





OBIETTIVO REALIZZATIVO 2

"STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI DI PESATURA DINAMICA NELLA GESTIONE DI SMART ROAD"

D 2.1 Report Finale Attività:

STATO DELL'ARTE SULLE SOLUZIONI TECNOLOGICHE E DI DESIGN MECCANICO PER LA PESATURA DINAMICA

CODICE PROGETTO: ARS01_00243

Coordinatore dell'OR Consorzio TRAIN

Visto del Responsabile Tecnico Scientifico

Ing. Piero De Fazio

















Contributi dei partecipanti					
Responsabile	Contributo	Descrizione contributo e note			
TRAIN (ETT - UNISA)	Stesura documento	Report Tecnico sull'A.R. 2.1			
Partecipanti					
ANAS	Commenti				
ENEA	Commenti				
TAKIUS	Commenti				















PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL "Sistema di p**E**satura di**N**amica in**T**ell**I**gente per la gestio**NE** de**L** traffico pesante"

Sommario

Ι.		Sintesi	
2.		Introduzione	6
3.		Stato dell'arte sulle soluzioni tecnologiche e di design meccanico per la pesatu	
	3.1		
	3.2		
	3.3		
		3.3.1 Sistemi W.I.M. per installazioni fisse	
		3.3.1.1 Sistemi di pesatura a piastra	
		3.3.1.2 Sistemi di pesatura con sensori a barra	
		3.3.1.3 Sistemi a ponte B-W.I.M	
		3.3.1.4 Altri approcci tecnologici: multi-sensor W.I.M	
		3.3.2 I sistemi di pesatura portatili	
		3.3.2.1 Sensori piezoelettrici	
		3.3.2.2 Sensori capacitivi	30
		3.3.2.3 Bridge W.I.M.	31
	3.4	4 Installazione e messa in opera	31
		3.4.1 Criteri di selezione delle sezioni di rilievo	
		3.4.2 Calibrazione	
		.5 Accuratezza dei sistemi W.I.M.	
	3.6	.6 Modalità di rilevamento e gestione dati	
		3.6.1 Il campionamento spaziale	
		3.6.2 Il campionamento temporale	
		.7 Mercato delle tecnologie per il monitoraggio del traffico	
4.		Caratteristiche dei sistemi W.I.M. commerciali e di ricerca esistenti per la pes	
de		veicoli	
		1 Caratteristiche dei sistemi W.I.M. commerciali	
		4.1.1 Il sistema W.I.M. Kapsch per il controllo del peso dei veicoli	
		4.1.2 Sistema iW.I.M. 50_10	
		4.1.2.1 Caratteristiche tecniche del sistema iW.I.M. 50_10	45
		4.1.3 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. di ECM	47
		4.1.3.1 Caratteristiche tecniche del sistema W.I.M. ECM	
		4.1.4 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. UnicamW.I.M. di CAMEA	53
		4.1.4.1 Componenti e caratteristiche tecniche del sistema W.I.M. CAMEA	
		4.1.4.2 Tipologie di installazione dei sensori	
		4.1.5 Sistema di pesatura dinamica W.I.M. International Road Dynamics	
		4.1.6 Sistema di pesatura dinamica W.I.M. KISTLER	
		4.1.6.1 Il sensore Lineas W.I.M.	
		4.1.6.2 Elettronica del sistema Wist Kistler	
		4.1.7 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. CROSS	
		4.1.7.1 OptiW.I.M	
	4.2		
_		4.2.1 Sistemi di pesatura in movimento per l'applicazione diretta	
5.			
	5.2	\mathbf{r}	
	5.3	bra ottica	
	J.3	5 Sensore di pressione dinamico in nora dulca dasato sun interferometro di N	11011018011 90















	5.4 Vai	ntaggi e svantaggi delle fibre ottiche	93
6.		ell'arte delle soluzioni di ricezione e trasmissione dati raccolti dal sistema W.I.M	
		chitettura a BUS	
(6.2 Wi	reless Sensor Network	97
	6.2.1	La storia delle WSNs	98
	6.2.2	Funzionamento di una rete WSN	99
	6.2.2.1	Nodo Sensore (mote)	99
	6.2.2.2	Gateway	
(6.3 IO	Γ (Internet Of Things)	101
	6.3.1	Storia delle reti IoT	101
	6.3.2	Architettura di un sistema IoT	102
(6.4 Sta	ndard e protocolli di comunicazione	103
	6.4.1	Architetture a BUS	104
	6.4.1.1	Modbus	
	6.4.2	Protocolli di comunicazione per reti WSN	106
	6.4.3	SensorThings API e IoT	
7.	Valutaz	1	
im	plementaz	zione del sistema W.I.M	112
,		patto dei sistemi W.I.M	
	7.1.1 V	alutazione dell'impatto architettonico delle differenti soluzioni di implementazion	ie del
		W.I.M.	
		'alutazione dell'impatto ambientale delle differenti soluzioni di implementazion	
	sistema	W.I.M.	
	7.1.3	Cambiamento del comportamento del trasportatore	
	7.1.4	Protezione della pavimentazione stradale e delle infrastrutture	
	7.1.5	Sicurezza del traffico	
	7.1.6	Gestione del traffico	
	7.1.7	Pianificazione del trasporto	
	7.1.8	Benefici economici	119
8	Riferim	enti	121















PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL "Sistema di p**E**satura di**N**amica in**T**ell**I**gente per la gestio**NE** de**L** traffico pesante"

1. Sintesi

Il presente documento rappresenta il deliverable 2.1 dell'OR 2 "Stato dell'arte dei sistemi di pesatura dinamica nella gestione di smart road", relativo l'attività AR2.1, denominata Capitolato tecnico "Stato dell'arte sulle soluzioni tecnologiche e di design meccanico per la pesatura dinamica".

L'obiettivo dell'attività AR2.1 è quello di raccogliere dati e informazioni tecniche sui sistemi W.I.M. (Weigh In Motion) per la pesatura dinamica dei veicoli attualmente utilizzati, valutati sia da un punto di vista delle loro capacità prestazionali sia da quello della loro integrazione con sistemi di gestione smart della struttura stradale, ossia:

- l'utilizzo della tecnologia dei sensori in fibra ottica per la pesatura di veicoli in movimento;
- sistemi ITS per la gestione intelligente dell'infrastruttura per l'erogazione in real time di servizi di infomobilità e di indirizzamento del traffico.

L'attenzione è stata focalizzata sulle funzionalità e prestazioni delle diverse tipologie del sistema W.I.M. ed è stata valutato l'impatto delle differenti soluzioni W.I.M. anche in termini architettonici e d'impatto ambientale. I dati raccolti in questa fase saranno utilizzati come benchmark per le successive attività di ricerca industriale.















PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL "Sistema di p**E**satura di**N**amica in**T**ell**I**gente per la gestio**NE** de**L** traffico pesante"

2. Introduzione

Attualmente nell'ambito della viabilità la situazione generale è caratterizzata, da una parte, dall'introduzione di standard di sicurezza delle infrastrutture sempre più severi e rigorosi e dall'aumento dei flussi di traffico con conseguente notevole crescita dei danni alle strade in tutti i percorsi di viabilità, dall'altra dalla riduzione, da parte dei Governi, delle risorse per far fronte a queste problematiche.

Dopo la trasformazione politica ed economica dell'Europa il trasporto su strada ha iniziato a svolgere il ruolo principale nel trasporto di merci pesanti. In Europa, negli ultimi tempi, è stata registrata una crescita piatta nel traffico stradale, e in particolare nel traffico dei veicoli commerciali, caratterizzata da un aumento del peso medio lordo del veicolo (GVW) determinando, in alcuni casi, il sovraccarico dei mezzi pesanti.

Dai numerosi studi effettuati sull'impatto del sovraccarico dei mezzi pesanti sul manto stradale è risultato che veicoli anche leggermente sovraccaricati, cioè quelli la cui massa totale o carico singolo assiale supera i limiti ammissibili solo in piccola misura, provocano un significativo deterioramento della pavimentazione stradale. Questo fenomeno è di natura non lineare e il suo effetto aumenta con la quarta potenza del carico sull'asse del manto stradale: ciò significa che il superamento dei limiti consentiti del 10% determina un aumento del 45% dell'effetto dannoso (Figura 1).

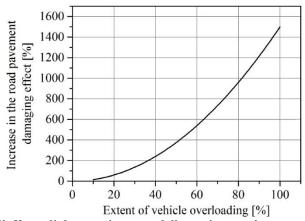


Figura 1 - Aumento dell'effetto di danneggiamento della pavimentazione stradale rispetto all'estensione del sovraccarico del veicolo

Per attuare una azione preventiva e proattiva ai fini della sicurezza della viabilità stradale, negli ultimi decenni, il mondo scientifico, così come quello imprenditoriale, si sta adoperando per trovare delle soluzioni tecnologiche intelligenti, anche di semplice utilizzo, che possano meglio gestire e controllare il traffico, soprattutto quello pesante.

In alternativa ai sistemi comunemente utilizzati per il controllo del peso di tipo statico o a bassissima velocità (circa 5 km/h), negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse tipologie di sistemi di pesatura, tra le quali il sistema W.I.M. risulta essere quello più promettente e affidabile. Grazie al suo sistema di controllo della validità (VCS) tutti i passaggi dei veicoli vengono registrati e non esistono misure non valide o mancanze. Tale sistema supporta applicazioni aggiuntive come telecamere ANPR (riconoscimento automatico del numero di targa), laser scanner per il rilevamento















e la classificazione dei veicoli, telecamere di videosorveglianza, controllo delle sezioni di barra (Section Control) e sistemi di controllo della velocità. Tramite l'utilizzo di sensori ad alta precisione, incorporati nel manto stradale, viene inviato un segnale che, trasformato ed elaborato, viene convertito in dati relativi al peso degli assi, al peso complessivo e al peso del rimorchio.

Come sopra detto, il presente documento traccia una panoramica sullo stato dell'arte delle soluzioni tecnologiche e di design meccanico per la pesatura dinamica.

Nello specifico sono descritte:

- le tipologie e capacità prestazionali di sistemi W.I.M. per la pesatura dinamica dei veicoli attualmente utilizzati;
- le modalità di ricezione dei dati dalla centralina, considerando anche i principali standard di comunicazione, bus-dati locali, "impacchettamento" dei dati (incluso elementi di sicurezza);
- i principali standard e metodi di gestione dei dati distribuiti;
- le modalità di raccolta dati per renderli disponibili al sistema informativo/supporto decisionale.

I dati e le informazioni raccolte in questa fase saranno utilizzati come benchmark per le successive attività di ricerca industriale.















3. Stato dell'arte sulle soluzioni tecnologiche e di design meccanico per la pesatura dinamica

La consistenza di un sistema di monitoraggio, finalizzato alla pesatura dinamica dei veicoli in transito su strada, dipende essenzialmente dall'ampiezza dell'ambito di interesse, dal numero delle variabili ricercate, dal livello di complessità dell'architettura del sistema. In generale, un sistema di monitoraggio si caratterizza attraverso la combinazione dei seguenti elementi:

- estensione spaziale dell'area di osservazione (area circoscritta, vasta, urbana, extraurbana, ecc.);
- *estensione della rete stradale* (semplice intersezione, singolo ramo, gruppo di rami e intersezioni, rete principale, ecc.);
- *estensione temporale* (periodo di riferimento, durata delle operazioni d'indagine, cadenza temporale delle misure);
- numero e tipo di variabili;
- *tecniche e tecnologie* (apparato strumentale ed organizzativo) per i rilievi.

Le tecniche e tecnologie di rilevamento costituiscono il *core* della catena informativa realizzata dal sistema di monitoraggio e si possono distinguere quelle che richiedono la presenza continuativa di un operatore umano (*tecniche di rilevamento manuale*) da quelle che non la richiedono (*tecniche di rilevamento automatico*).

Senza nulla togliere ai sistemi di rilevamento manuale, negli anni la emergente necessità di raccogliere con continuità e accuratezza dati di traffico, su lunghi periodi ed a tutte le ore (sia diurne sia notturne), ha indotto la ricerca tecnologica del settore a produrre strumenti e sistemi automatici di rilevamento sempre più raffinati e accurati.

In linea di principio, un sistema automatico di misura dei parametri del traffico è solitamente costituito da quattro componenti base:

- 1. un rilevatore (a volte chiamato captatore);
- 2. un interprete;
- 3. un registratore;
- 4. un elaboratore.

Il *rilevatore* è il componente sensibile alla grandezza che si vuole misurare (passaggio del veicolo, velocità del veicolo, ecc.): per ogni informazione rilevata esso genera un segnale che viene ricevuto e poi decifrato dall'*interprete*. Il segnale codificato viene quindi trasmesso al *registratore* che, appunto, registra i dati necessari per l'elaborazione, che può effettuarsi tramite l'*elaboratore* o in tempo reale o in una fase successiva, a seconda del tipo di sistema utilizzato.

Le più diffuse tecnologie di rilevamento di uso corrente possono essere distinte in rapporto al tipo di rilevatore adoperato, che può essere posto sulla pavimentazione (intrusivo), oppure entro o in prossimità della carreggiata (non intrusivo). La rapida evoluzione tecnologica registrata negli ultimi anni nel campo delle misure dei parametri della circolazione ha consentito la recente sperimentazione di metodi di rilevamento automatici innovativi, basati sul trattamento automatico delle immagini filmate con telecamere. Metodi più avanzati sono basati sul rilievo di segnali/immagini attraverso satelliti.















Allo stato attuale, nell'ambito del rilievo del traffico, del monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare tra le diverse soluzioni tecnologiche presenti sul mercato, quelli più promettenti in termini di rapidità di informazioni e affidabilità risultano essere la famiglia di dispositivi *Weigh In Motion* (W.I.M.). Con il termine *Weigh In Motion* si definisce il processo di misura delle forze dinamiche dello pneumatico di un veicolo stradale in movimento e la stima del peso del veicolo lordo e della porzione di quel peso trasportato da ciascuna ruota, asse o gruppo di assi di un veicolo statico corrispondente.

3.1 Cenno storico

Il sistema di pesatura dinamica *W.I.M.* è stato inventato negli Stati Uniti (Texas) negli anni '50 da Pr Clyde Lee. Originariamente tale sistema veniva utilizzato principalmente per la raccolta di un ampio campione di carichi per asse di veicolo per scopi di progettazione di pavimenti stradali in ottemperanza al codice di design della pavimentazione ASTHOO. All'epoca i bending plates sono stati tra i primi sensori utilizzati per la pesatura.

Dagli anni '70, sono state sviluppate nuove tecnologie di sensori *W.I.M.* in Europa, ossia i sensori a filo, a nastro e a barre, capacitivi, piezoelettrici (ceramica, poi polimero e poi quarzo) e infine a fibre ottiche.

Il sistema *Bridge W.I.M.* è stato introdotto anche negli Stati Uniti alla fine degli anni '70 e poi sviluppato in Europa negli anni '90. Negli anni '70 e '80, i dati *W.I.M.* sono stati utilizzati per la calibrazione del codice di progettazione del ponte (Ontario, Eurocode, ecc.), per la valutazione dei carichi a fatica del ponte e per stimare i carichi estremi e gli effetti del carico. I dati *W.I.M.* sono stati utilizzati anche per il monitoraggio del traffico e le statistiche sul trasporto di merci su strada.

Negli anni '90, il primo standard *W.I.M.* (ASTM-1318) è stato pubblicato in Nord America e l'azione COST323¹ ha fornito le specifiche europee di *W.I.M.* (pre-standard) nonché i test paneuropei dei sistemi *W.I.M.*

La COST è strutturata in nove vasti settori

- 1. biomedicina e scienze biologiche molecolari;
- 2. chimica e scienze e tecnologie molecolari;
- 3. scienza del sistema terrestre e gestione dell'ambiente;
- 4. prodotti alimentari e agricoltura;
- 5. foreste e relativi prodotti e servizi;
- 6. persone, società, culture e salute;
- 7. tecnologie dell'informazione e della comunicazione;
- 8. materiali, fisica e nanoscienze;
- trasporti e sviluppo urbano.

Tra i più importanti gruppi di lavoro COST c'è il COST 323 "Weigh in motion of road vehicles". Il COST 323 è una delle azioni sostenute dalla COST "trasporti e sviluppo urbano", è stata avviata nel 1992. Dal 1993 al 1998 è stata gestita da un gruppo di esperti scientifici e tecnici, per promuovere lo sviluppo e l'attuazione della pesatura in movimento dei veicoli stradali e le loro applicazioni, e per facilitare uno scambio di esperienze tra diversi paesi europei.







¹: Cooperazione europea nel settore della scienza e della tecnica (COST). Il programma COST costituisce un quadro di riferimento intergovernativo per la Cooperazione Scientifica e Tecnologica in Europa, che consente il coordinamento di programmi di ricerca nazionali a livello europeo.

La COST riunisce ricercatori ed esperti in vari paesi che lavorano su materie specifiche. La COST non finanzia la ricerca in quanto tale, ma sostiene attività di collegamento in rete quali riunioni, conferenze, scambi scientifici a breve termine e azioni a largo raggio. Attualmente ricevono sostegno più di 250 reti scientifiche (Azioni). Il programma COST invita a presentare proposte per azioni che contribuiscano allo sviluppo scientifico, tecnologico, economico, culturale e sociale dell'Europa. Il programma COST incentiva in Europa reti di ricerca nuove, innovative, interdisciplinari e di ampio respiro. Le attività COST sono svolte da gruppi di ricerca allo scopo di rafforzare le fondamenta per creare l'eccellenza scientifica in Europa.









Il progetto di ricerca europeo WAVE (assi e veicoli per la pesatura in movimento per l'Europa) e altre iniziative hanno fornito tecnologie migliorate e nuove metodologie di *W.I.M.*

Nei primi anni del 2000, l'accuratezza dei sistemi *W.I.M.* è stata notevolmente migliorata e sono stati utilizzati sempre di più per lo screening del sovraccarico e la preselezione (applicazione).

3.2 Le modalità di monitoraggio tramite dispositivi W.I.M.

La pesatura dinamica dei veicoli permette di misurare le forze di impatto o il carico applicato alla pavimentazione dai veicoli che transitano sulla strada in condizioni di flusso liberamente scorrevole ed alle velocità abituali.

I sistemi di pesatura dinamica *W.I.M.* sono dispositivi capaci di misurare direttamente alcune grandezze fisiche legate al carico indotto sulla pavimentazione dai veicoli in movimento, quali: peso totale e/o per singolo asse, distanza tra due assi successivi, velocità. L'informazione relativa al peso complessivo o di raggruppamenti di assi viene estrapolata dai dati misurati tramite delle procedure di calcolo.

Tali sistemi di pesatura dinamica, utilizzati in simbiosi con le spire induttive, sono in grado di descrivere in modo dettagliato numerosi parametri caratteristici del deflusso veicolare, quali (tabella 1):

- volume di traffico;
- classificazione veicolare;
- numero di assi;
- distanziamento tra gli assi;
- peso complessivo;
- peso per singolo asse;
- velocità;
- Headway²;
- Gap^3 ;
- tempo di occupazione, ossia tempo di permanenza del veicolo sul sensore.

I dati di peso, che si potranno misurare, e i parametri, che si potranno ricavare, sono particolarmente importanti per l'implementazione di alcune applicazioni, quali la progettazione di strade e ponti, la manutenzione delle pavimentazioni, il controllo di soglie di pericolo sovraccarico, la gestione del traffico veicolare.

³: Il tempo intercorrente tra il passaggio di due veicoli successivi, misurato prendendo come riferimento la coda per il primo veicolo la testa per il secondo, lunghezza dei veicoli







²: Il tempo intercorrente tra il passaggio di due veicoli successivi, misurato prendendo come riferimento la testa dei veicoli









PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SÉNTINEL

SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

Tabella 1 – Modalità di monitoraggio tramite dispositivi W.I.M.

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	Headw ay	Gap	Lunghezza dei veicoli	Tempo di occupazione
APPLICAZIONI IMPLEMENTATE	Progettazior	Progettazione di strade e ponti			Manutenzione delle pavimentazioni		Controllo soglie di pericolo sovraccarico		Gestione del traffico		
					Sensori capacitivi						
	INSTALLAZIONI FISSE	Sistemi di pesatura a piastra		Bending plates Sensori a celle di carico							
					Cavi piezoelettrici e sensori BL						
		Sistemi di pesatura con sensori a barra		Sensori al quarzo							
					Sensori a fibra ottica						
TIPOLOGIE DI		Sistemi di pesatura a ponte Sistemi di pesatura Multisensor									
SISTEMI W.I.M.	INSTALLAZIONI PORTATILI	Sensori capacitivi									
		Sensori piezoelettrici Bridge W.I.M.									















ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Per quanto concerne le attività di progettazione e manutenzione, l'informazione sul carico indotto dal traffico costituisce un fattore di primaria importanza, sia nel dimensionamento delle sezioni delle pavimentazioni stradali, che per stabilire il tipo di intervento di manutenzione da attuare. A tal proposito torna utile il dato sul peso del singolo asse, da cui dipende la procedura di calcolo per la valutazione del grado di affaticamento e della durabilità della pavimentazione stradale.

Nel settore della sicurezza, i sistemi *W.I.M.* possono essere utilizzati per effettuare una verifica preliminare del superamento dei limiti di peso imposti in corrispondenza di tratte critiche, ad esempio ponti, a garanzia del rispetto dei valori prescritti ed a supporto degli organismi di polizia preposti al controllo.

Bisogna comunque sottolineare che la pesatura dinamica, a causa delle oscillazioni a cui sono sottoposti i veicoli durante la marcia, non consente di determinare con sufficiente accuratezza il peso del veicolo e pertanto le sanzioni non possono essere applicate sulla base delle informazioni fornite direttamente dai *W.I.M.* Per poter avvalorare l'informazione fornita dal sistema di pesatura dinamica occorre installare anche una postazione di pesatura fissa per la verifica statica del peso del veicolo. Il sistema *W.I.M.* in questo caso funge da filtro funzionale per la selezione dei veicoli potenzialmente in sovraccarico.

In genere, il sistema di controllo si avvale anche di una telecamera per l'individuazione ed il riconoscimento del veicolo sospetto di carico eccedente il peso consentito. Nell'ambito delle attività di gestione e pianificazione degli interventi da attuare sulla rete stradale, l'informazione sulla portata complessiva rilevata sulle infrastrutture può essere efficacemente utilizzata per valutare il volume dei veicoli pesanti transitanti sulla rete e stimare i costi derivanti da situazioni di traffico congestionato, oppure i benefici che potrebbero essere tratti dalla realizzazione di nuove strade o dall'applicazione di strategie alternative di gestione del traffico pesante.

A seconda della velocità dei veicoli, i sistemi W.I.M. si distinguono (Figura 2):

- LS -W.I.M. a bassa velocità
- *HS-W.I.M.* ad alta velocità

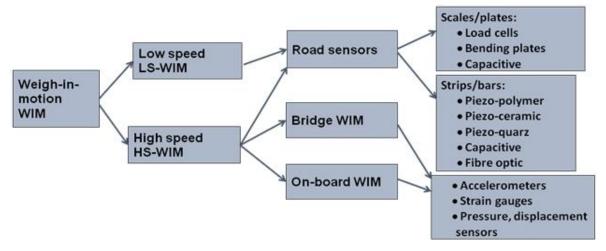


Figura 2 - Schematizzazione dei sistemi W.I.M. in base alla velocità del veicolo

La pesatura in movimento a bassa velocità viene effettuata su un'area dedicata (Figura 3), per lo più al di fuori della corsia di traffico, su una piattaforma piana e liscia (generalmente in calcestruzzo), lunga oltre 30 m e ad una velocità inferiore a 5-10 km/h, al fine di eliminare gli effetti















CERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

dinamici del veicolo e di assumere che le forze di impatto dello pneumatico siano pari ai carichi statici della ruota. Il sistema LS-W.I.M. utilizza principalmente bilance a *celle di carico* ed è legalmente approvato per l'applicazione diretta o il commercio.



Figura 3 – Area dedicata alla pesatura a bassa velocità

La pesatura in movimento ad alta velocità (Figura 4) viene effettuata nella corsia di marcia alla velocità corrente (cioè da 60 a 100 km/h), senza necessità di rallentare o arrestare i veicoli. Le misure sono influenzate dalla dinamica del veicolo (accelerazioni verticali) e possono differire in modo significativo dai pesi statici su superfici irregolari della pavimentazione.



Figura 4 – Configurazione della pesatura ad alta velocità (HS-W.I.M.)

3.3 Tipologie di sensori e principi di funzionamento

Un sistema W.I.M. è costituito principalmente da:

- un set di sensori di carico integrati nella pavimentazione (sensori stradali) o fissati in una parte del ponte (B-W.I.M.), costituiti sia da strisce/barre montate all'interno della pavimentazione, sia da tappeti attaccati alla superficie della pavimentazione e nel caso di B-W.I.M. sono utilizzati anche trasduttori e estensimetri.
- un'*unità di condizionamento* del segnale che coopera con sensori e contiene tutti i componenti elettronici, inclusi lo strumento di acquisizione dati, il convertitore A/D, il dispositivo di calcolo















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

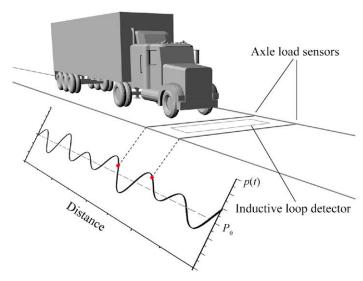
"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

del peso e lo strumento di auto-calibrazione nonché i dispositivi di archiviazione e comunicazione. Esso può anche includere alcuni dispositivi di visualizzazione e alimentazione di energia o unità di memorizzazione (ad esempio celle solari, batteria);

- un *sistema master* con un algoritmo implementato per la stima dei carichi statici sull'asse e altri parametri del veicolo.

Altri strumenti di misurazione e sensori possono essere inclusi a seconda della tecnologia W.I.M. e dell'applicazione, come sensori di temperatura per compensare le variazioni di risposta del sensore o telecamere

La struttura del sistema di pesatura in movimento *W.I.M.* è schematicamente rappresentata in Figura 5.



 $Figura \ 5 - Struttura \ del \ sito \ W.I.M.: \ p\ (t) - carico \ dinamico \ sull'asse, \ P_0 - componente \ statica \ del \ carico \ dinamico \ dell'asse$

I sensori *W.I.M.* rappresentano quella classe di detectors a pressione capaci di effettuare la pesatura dinamica dei veicoli in transito. Intraprese a partire dagli anni 70 per rispondere alle esigenze di classificazione dei veicoli e di repressione delle infrazioni sui carichi d'asse, le ricerche tecnologiche hanno portato negli ultimi anni allo sviluppo di una vasta serie di rilevatori *W.I.M.*

Il processo di pesatura dinamica consiste nel registrare ed elaborare i segnali generati dai sensori sotto l'influenza dei carichi sugli assi di un veicolo in movimento. Poiché i sensori sono incorporati nella pavimentazione perpendicolarmente alla direzione di movimento, viene pesato ogni veicolo che passa sul sito *W.I.M.*

Il vantaggio principale del sistema *W.I.M.*, rispetto alle scale statiche, è la mancanza di vincoli significativi sulla velocità del veicolo controllato che può essere considerata la caratteristica più interessante. Ciò, tuttavia, viene ottenuto a scapito di una *scarsa accuratezza* dei risultati di pesatura, che è stato considerato il principale svantaggio dei sistemi *W.I.M.* e fa sì che al momento questi sistemi non siano considerati equivalenti alle bilance statiche.

Gli attuali sistemi di pesatura dinamica commerciali W.I.M. si possono sostanzialmente dividere in due grandi categorie:

- sistemi W.I.M. per installazioni fisse;
- sistemi W.I.M. portatili per misure di breve durata.















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

3.3.1 Sistemi W.I.M. per installazioni fisse

I sistemi *W.I.M. per installazioni fisse* sono principalmente costituiti da sensori progettati per essere montati "a filo" o annegati nella pavimentazione stradale, consentendo così di minimizzare gli effetti dinamici prodotti dal passaggio dei veicoli sui sensori e conseguentemente di migliorare le prestazioni dei dispositivi di pesatura, sia in termini di accuratezza che di durata dei sensori.

Nella famiglia dei sistemi W.I.M. di pesatura dinamica per installazioni fisse commerciali si possono distinguere tre classi principali di sistemi:

- 1. Sistemi di pesatura a piastra;
- 2. Sistemi di pesatura con sensori a barra;
- 3. Sistemi a ponte.

I suddetti sistemi si avvalgono di varie tipologie di sensori di forza che misurano essenzialmente la deformazione di un supporto elastico soggetto alla forza. In tal caso la costante elastica del supporto (k che lega forza F e spostamento s, mediante la legge di Hooke F = k s) stabilisce la sensibilità e la portata del sensore.

Il sensore utilizzato può essere un cristallo piezoelettrico che sviluppa un campo elettrico proporzionale alla deformazione, o una piastrina di semiconduttore su cui è ricavato un ponte resistivo, o l'armatura flessibile di un condensatore, o più in generale un qualunque dispositivo elastico connesso ad un qualsiasi rivelatore di spostamento, anche di tipo ottico o magnetico.

3.3.1.1 Sistemi di pesatura a piastra

I sistemi di pesatura W.I.M. a piastre prevedono piastre strumentate, montate su un telaio rigido fissato nella struttura della pavimentazione, che misura le forze verticali della ruota/pneumatico dei veicoli in movimento. La lunghezza della bilancia nella direzione del traffico è più di una ruota/impronta dello pneumatico ($\approx 0,30$ m), ma inferiore alla spaziatura minima dell'asse (0,80 m) (Figura 6).

La larghezza della piastra di pesatura è inferiore a 1 m (scala della ruota) o superiore a 3 m (scala dell'asse). Pertanto tale sistema misura la forza d'urto della ruota o dell'asse contemporaneamente.





Figura 6 – Configurazioni delle piastre di pesatura dinamica montate sulla pavimentazione stradale















"SISTEMA DI P**E**SATUKA DII**v**amica in**i** ell**i** gente per la gestio**NE** de**L** traffico pesante"

Sensori capacitivi

I sensori di tipo capacitivo sono sostanzialmente dei condensatori costituiti da due lunghe e sottili lamine metalliche in acciaio inox tra cui è interposto un materiale isolante. Il sensore viene fissato alla pavimentazione stradale tramite apposito blocco di cemento armato prefabbricato, trasversalmente alla direzione di transito dei veicoli e a filo del manto stradale (Figura 7).

L'azione esercitata dalla pressione dei veicoli sul sensore induce delle variazioni di capacità elettrica nel condensatore, determinate dal fatto che le ruote dell'asse di un veicolo, che transitano sopra il sensore, determina un avvicinamento delle armature del condensatore, producendo un incremento della capacità. Le variazioni di capacità a sua volta si traducono in altrettante variazioni della frequenza di risonanza del circuito elettrico associato. Il peso viene determinato sulla base della frequenza di risonanza rilevata.



Figura 7 - Sensore capacitivo installato nella pavimentazione

In questo caso a velocità elevate gli effetti dinamici del veicolo, prodotti dall'interazione con la strada, possono ridurre in maniera significativa l'accuratezza della misura. Per migliorare l'accuratezza occorre ripetere la misura più volte, per esempio disponendo lungo la carreggiata, a breve distanza l'uno dall'altro, un certo numero di sensori, e determinare il peso finale del veicolo come media dei valori rilevati.

L'accuratezza dichiarata per questi dispositivi corrisponde attualmente ad una deviazione standard di $\pm 5 \div 12\%$. Il grado di affidabilità globale è del 90%, mentre non è ancora ben definita la loro vita media.

Bending plates

I sistemi di pesatura dinamica del tipo "bending plates" sono costituiti da piastre dotate di estensimetri (strain gauge). L'estensimetro è un sensore formato da una resistenza a film sottile inglobata in una striscia di materiale plastico isolante, che va incollata alla superficie del campione di cui si vuol misurare la deformazione (Figura 8).















GRUPPO FS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

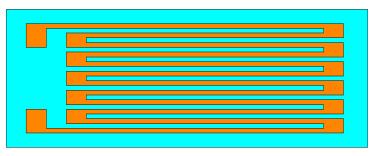


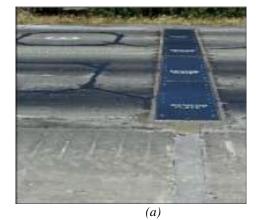
Figura 8 - Schema di un estensimetro lineare

La piastra è semplicemente supportata dal telaio ai suoi bordi e strumentata con spessimetri che misurano la piegatura del piatto mentre una ruota o un asse lo attraversa. Le deformazioni sono proporzionali alla forza verticale se applicate nella stessa posizione. Combinando diversi estensimetri, la posizione trasversale della ruota può essere stimata e la forza verticale misurata diventa quasi indipendente su di essa.

La geometria della pista del film resistivo conferisce all'estensimetro proprietà vettoriali: se la superficie resistiva dell'estensimetro viene allungata la resistenza aumenta proporzionalmente alla deformazione applicata, se invece viene compressa nel senso della lunghezza la resistenza si riduce. Tipicamente un sensore di forza è costituito da due estensimetri uguali incollati ad una lamina metallica.

La forza da misurare applicata all'estremo libero della lamina determina una flessione che provoca l'allungamento relativo e=DL/L di uno dei due film resistivi e l'accorciamento relativo (-e) dell'altro, con conseguente variazione della loro resistenza. Poiché le variazioni di resistenza sono molto piccole, la loro rilevazione richiede un circuito di rilevamento molto preciso in grado di apprezzare variazioni di pochi centesimi di ohm.

Quando un veicolo passa sopra la piastra (Figura 9), il sistema misura la forza impressa e calcola il peso dinamico del veicolo. Il peso statico viene determinato a partire dal peso dinamico attraverso dei fattori correttivi di calibrazione. I parametri di calibrazione tengono conto dei fattori che influenzano la misura, come la velocità del veicolo e le oscillazioni prodotte dalle sospensioni del mezzo per effetto dell'interazione ruota/pavimentazione.



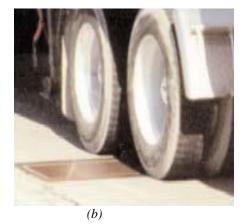


Figura 9 - (a) Sensori bending plates installati nella pavimentazione; (b) Veicolo transitante sopra una piastra del tipo "Bending plate"















GRUPPO FS ITALIANE ** LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Una stazione di pesatura dinamica del tipo "bending plate" consta di una o due piastre disposte perpendicolarmente alla direzione di marcia e da una coppia di spire induttive. Quando si utilizzano due piastre, ciascuna piastra viene posizionata lungo la traiettoria tracciata dai veicoli sulla corsia (Figura 9a), sull'impronta destra e sinistra. Le due piastre possono essere disposte allineate sulla medesima sezione o sfalsate di 5 metri l'una dall'altra. Si utilizzano configurazioni con una sola piastra su strade con bassi volumi di traffico.

Le spire induttive sono disposte a monte e a valle delle piastre: nella tipica configurazione di misura, la spira collocata a monte ha la funzione di rilevare il passaggio del veicolo e di allertare il sistema (Figura 10).

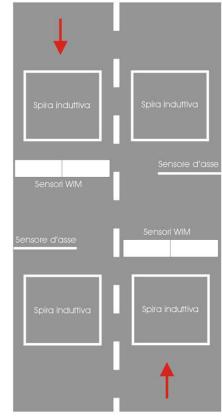


Figura 10 - Tipica configurazione di misura di un sistema W.I.M. del tipo "bending plate"

Con questa tipologia di sensori la velocità del veicolo, utilizzata per determinare l'interasse, può essere determinata in tre modi:

- sulla base dei segnali emessi dalle due spire induttive;
- sulla base dei segnali emessi da una delle spire e dalle piastre;
- sulla base dei segnali emessi dalle due piastre, quando non sono installate sulla medesima sezione.

I sistemi W.I.M. "bending plates" rappresentano una soluzione a basso costo, abbastanza facile da installare e con prestazioni intermedie.

I sensori a piastra, in virtù delle loro dimensioni, consentono di effettuare misure più accurate dei sensori a barra. L'estesa superficie di contatto dei sensori a piastra permette infatti di misurare l'intera forza esercitata dallo pneumatico sulla pavimentazione, a differenza dei sensori a barra sui quali insiste solo una parte della forza impressa dalla ruota.















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ saauuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Alcuni test eseguiti su questo tipo di sensori hanno dimostrato che la loro accuratezza è maggiore di quella dei sensori capacitivi, ma inferiore a quella delle celle di carico. Occorre tuttavia sottolineare che le prestazioni dei sistemi di pesatura dinamica dipendono non soltanto dalle caratteristiche intrinseche della tecnologia utilizzata, ma anche dallo stato della pavimentazione e dal modo in cui sono stati installati i sensori. Infatti, se i test non sono eseguiti su sistemi installati correttamente, la riposta dei dispositivi può produrre dei risultati non conformi ai valori attesi. Pertanto quando si confrontano le prestazioni dei dispositivi è molto importante appurare che i test siano stati eseguiti secondo modalità standard normalizzate e che i sensori siano stati installati a regola d'arte.

Questa tecnologia, meno costosa e meno precisa della cella di carico, viene utilizzata principalmente per sistemi HS-W.I.M..

Sensori a celle di carico

Un sensore a cella di carico è una bilancia di pesatura dinamica incassata nella pavimentazione della corsia stradale, oggetto di rilevamento, e collegata ad un'unità di elaborazione, posta all'interno di un armadio ai margini della strada, che provvede alla raccolta e memorizzazione dei dati rilevati.

La cella di carico è un trasduttore in grado di trasformare una forza meccanica in un segnale elettrico misurabile e registrabile. L'applicazione di una forza/peso lungo l'asse di misura (in trazione o compressione) produce infatti una deflessione proporzionale sulla meccanica del corpo cella.

La versione più comune di sensore W.I.M. a cella di carico si compone di uno o più cilindri idraulici contenenti olio. Le variazioni di pressione idraulica esercitate al passaggio del veicolo vengono correlate al peso dell'asse.

Il sistema W.I.M. a cella di carico utilizza un'unica cella di carico composta da due bilichi di pesatura, disposti sulla stessa sezione uno di seguito all'altro in direzione perpendicolare al flusso veicolare, trasversale alla via di corsa (Figura 11). I bilichi provvedono alla pesatura simultanea della parte destra e sinistra di ciascun asse.

Quando un veicolo passa sulla cella di carico, il sistema registra i pesi misurati da ciascun bilico e li somma per ottenere il peso complessivo dell'asse.

Ciascun bilico presenta solitamente una lunghezza di circa 75 cm ed una larghezza pari approssimativamente a 170 cm e si appoggiano su un telaio in acciaio incassato nel calcestruzzo (profondità complessiva dell'installazione circa 35 cm). Poiché la spaziatura intermedia tra i due bilichi è di 30 cm circa, la larghezza complessiva della bilancia di pesatura risulta essere di circa 370 cm.



Figura 11 - Sistema di pesatura dinamica a cella di carico









immediatamente dopo la cella di carico.







NE ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Ciascun bilico costituente la bilancia utilizza quattro celle elettroniche di carico di tipo a compressione, con corpo in acciaio inossidabile, ognuna delle quali deve avere una capacità minima pari a circa 23 tonnellate. Tali celle misurano le forze dinamiche trasmesse dagli pneumatici al passaggio dei veicoli sulla bilancia ed inviano i dati ricevuti all'unità di elaborazione automatica. La tipica configurazione di un sistema di pesatura dinamica a cella di carico si compone di una o più spire induttive ed un sensore d'asse (Figura 12). La cella di carico è disposta in posizione trasversale sulla corsia, a valle di una spira induttiva a cui è demandato il compito di rilevare i veicoli ed allertare il sistema. L'installazione di una seconda spira consente di migliorare la misura della velocità e del distanziamento tra gli assi, tipicamente demandata al sensore d'assi, disposto

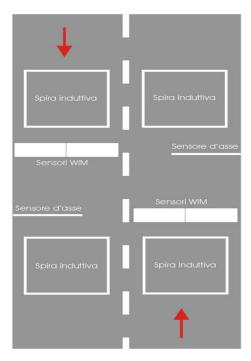


Figura 12 - Configurazione tipica di un sistema di pesatura dinamica a cella di carico

I sistemi di pesatura dinamica con *sensori a celle di carico* consentono di rilevare automaticamente e con precisione la presenza dei veicoli in movimento, il peso di ogni asse di un veicolo a più assi ed il peso lordo complessivo del veicolo stesso (sommando i pesi dei singoli assi). Tali sistemi di pesatura si prestano inoltre alla valutazione del numero e della distanza degli assi dei veicoli, nonché alla classificazione (secondo la disposizione degli assi) di ogni veicolo che viene pesato.

Tali sensori presentano il vantaggio di poter essere utilizzati anche per una serie di applicazioni che non riguardano specificatamente il rilevamento di parametri del traffico (controllo dei pesi nelle sezioni di accesso a strade con capacità di carico limitate, costrizione al rispetto della segnaletica vigente, scelta del manto stradale), ma, analogamente alle piastre capacitive, comportano dei costi superiori a quelli dei rilevatori piezoelettrici.

I dispositivi W.I.M. a *cella di carico* sono considerati tra i sistemi più accurati: la loro accuratezza, come per i dispositivi "*bending plates*", è dovuta all'estesa superficie di contatto ruota-sensore.

Le celle di carico sono fissate ad una cornice di acciaio che le rende strutturalmente indipendenti dalla pavimentazione. Questo accorgimento consente alle *celle di carico* di essere insensibili a















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

variazioni di temperatura o di umidità. Oltre ad essere stabili, le celle di carico presentano il vantaggio di poter misurare il peso dei veicoli sia a basse che alte velocità.

Per contro, la strumentazione impiegata è molto costosa ed onerosa da installare, sia in termini temporali che di lavorazioni da eseguire sulla pavimentazione (scavo piuttosto profondo).

3.3.1.2 Sistemi di pesatura con sensori a barra

I sistemi con *sensori a barra* sono costituiti da elementi sensibili di dimensioni ridotte che richiedono oneri di installazione meno impegnativi (tagli di dimensioni limitate sulla pavimentazione) e tempi di montaggio inferiori rispetto ai sensori a piastra.

La ridotta intrusività dei sensori è tuttavia accompagnata da una minore accuratezza nella determinazione del peso, dovuta al fatto che la superficie di contatto ruota-sensore è inferiore rispetto alle reali dimensioni dello pneumatico, per cui la ruota non scarica il peso che supporta completamente sul sensore, ma parte del carico viene distribuito sulla pavimentazione.

Le dimensioni tipiche di una barra sono 3÷4 cm (larghezza e altezza) e la lunghezza varia tra 0,75÷1 m per una mezza corsia (pesatura della ruota) o da 3÷4 m per l'intera corsia (pesatura dell'asse).

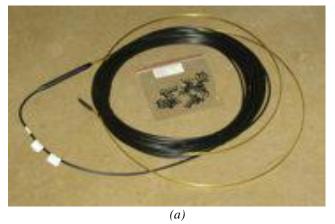
Tali sistemi di pesatura a barra sono utilizzati solo per sistemi HS-W.I.M.

I principali sistemi di pesatura con sensori a barra si avvalgono delle seguenti tipologie di sensore: cavi piezoelettrici, al quarzo e cavi in fibra ottica.

Cavi piezoelettrici e sensori BL

I *cavi piezoelettrici* sono cavi conduttori in rame coassiali ricoperti da una guaina esterna in rame e riempiti di una polvere piezoelettrica di tipo Perovskite (Figura 13a). La tecnica di rilevamento *W.I.M.* con *sensori assiali piezoelettrici* prevede l'utilizzo di un *cavo piezoelettrico* disposto sopra la pavimentazione stradale, in direzione perpendicolare a quella di marcia (Figura 13b) e di un registratore elettronico posizionato al margine della carreggiata.

I *sensori piezoelettrici* possono essere utilizzati per rilevamenti sia temporanei che permanenti. Nel caso di rilievi temporanei, il cavo viene fissato alla superficie stradale, mentre nel caso di installazione permanente, viene incapsulato in una barra di resina, che gli assicura una buona resistenza meccanica, ed inserito all'interno della pavimentazione bituminosa.



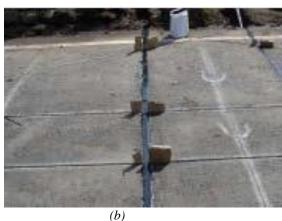


Figura 13 - (a) Cavo piezoelettrico; (b) Cavo piezoelettrico installato nella pavimentazione stradale















CERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

In alternativa ai *cavi piezoelettrici* possono essere utilizzati i *sensori BL*, costituiti da un polimero piezoelettrico avvolto in un involucro piatto protettivo di ottone. Il sensore viene tipicamente inserito all'interno di un tubo in alluminio riempito di resina epossidica.

Il principio di funzionamento su cui si basano questi sensori è quello tipico dei materiali piezoelettrici: quando il materiale subisce una deformazione elastica per una azione meccanica, si polarizza, dando luogo ad una differenza di potenziale dipendente dalla pressione esercitata. In pratica, quando le ruote dell'asse di un veicolo sollecitano il sensore, il materiale piezoelettrico risulta soggetto a una compressione, polarizzandosi. Tale polarizzazione genera una differenza di potenziale tra le due armature di rame costituenti il sensore, determinando l'invio di un impulso: gli impulsi variano in ampiezza e tempo a seconda del peso e della velocità del veicolo che transita.

Un sensore piezoelettrico installato in una corsia stradale permette l'immediata registrazione sia del passaggio degli assi di un veicolo sia del carico di ciascun asse. Pertanto, se propriamente installati e calibrati, questi sensori e le logiche elettroniche ad essi associate consentono di effettuare sia il conteggio dei veicoli in transito che la loro pesatura dinamica.

Disponendo una coppia di sensori piezoelettrici per corsia e collegando contemporaneamente i due sensori ad una stazione mobile risulta possibile ottenere l'acquisizione, dal primo sensore, del carico dell'asse, mentre dal secondo, distanziato dal primo, è possibile calcolare geometrie degli assi e velocità. In dettaglio, una coppia di sensori piezoelettrici installati su una corsia stradale è in grado di fornire, per ogni veicolo in transito, i seguenti dati:

- numero di assi;
- peso di ciascun asse e peso totale del veicolo;
- distanze reciproche tra gli assi e lunghezza complessiva;
- velocità.

I *vantaggi* del rilevamento con i sensori piezoelettrici risiedono nella facilità di installazione dei cavi e nella possibilità di acquisizione di un ventaglio di informazioni.

Gli *svantaggi* sono legati al costo più elevato rispetto agli altri sensori a pressione, alla non ottima affidabilità, al rischio di rottura meccanica dei cavi ed alla loro non determinabile durata di funzionamento.

L'effetto piezoelettrico generato da questo tipo di sensore è dinamico, ossia la carica viene originata quando la forza applicata al sensore non è costante. Ne consegue che i sistemi W.I.M. che utilizzano sensori piezoelettrici non possono essere impiegati in applicazioni dove i veicoli si muovono a basse velocità o in ambiti urbani (stop-and-go).

Per l'impiego nei sistemi di pesatura dinamica, i *sensori piezoelettrici* devono garantire una risposta uniforme lungo tutta la lunghezza dell'elemento sensibile (sensori di classe 1). Se tale condizione non è verificata il sensore appartiene alla classe 2. I sensori di classe 2 non sono idonei alla misurazione del peso, ma possono essere utilizzati per eseguire la classificazione veicolare.

La stima del peso effettuata dai sensori piezoelettrici è di media qualità. L'accuratezza di questi sistemi soffre infatti di due principali limitazioni: sensibilità alla temperatura e ridotte dimensioni della superficie di contatto del sensore. La sensibilità dei sensori piezoelettrici dipende dalla temperatura, ossia a parità di peso del veicolo, la risposta del dispositivo varia con la temperatura.

La temperatura in realtà produce un doppio effetto, poiché non interviene solo sulla sensibilità del sensore, ma agisce anche sulle proprietà dei materiali costituenti la pavimentazione, modificandone le caratteristiche strutturali. Infatti, la maggiore o minore elasticità della pavimentazione indotta















" LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

dalle variazioni di temperatura, incide sull'entità della forza che insiste sul sensore, contribuendo ad aumentare l'incertezza del risultato. I due effetti sopra citati, sebbene indipendenti, sono tra di loro strettamente correlati ed insieme determinano l'errore di misura. Per compensare le variazioni del segnale di uscita con la temperatura, e migliorare le prestazioni del sistema, si installa una sonda di temperatura nella pavimentazione, in funzione della quale il rilevatore provvede ad effettuare le necessarie correzioni.

Le ridotte dimensioni del sensore inducono ulteriori elementi di incertezza: la limitata estensione della superficie di contatto non consente di misurare correttamente la forza impressa dalla ruota sulla pavimentazione. Parte del carico viene infatti distribuito direttamente sulla pavimentazione, per cui il sensore non rileva mai l'intera forza esercitata dallo pneumatico.

La tipica configurazione di sistema comprende un sensore piezoelettrico ed una spira induttiva. Il sensore viene disposto perpendicolarmente alla direzione del flusso veicolare.

Nella configurazione spira induttiva-piezo-spira induttiva, il sensore piezoelettrico viene interposto tra la coppia di spire. Le spire misurano la velocità, mentre la spaziatura tra gli assi viene determinata moltiplicando la velocità per il tempo intercorso tra due impulsi successivi, generati a seguito del passaggio degli assi sul sensore piezoelettrico.

Per aumentare l'accuratezza della misura è possibile utilizzare una configurazione del tipo piezospira induttiva-piezo (Figura 14): la pesatura dinamica viene eseguita due volte e la media delle due pesate consente di ridurre l'incertezza di misura legata alle oscillazioni dei veicoli transitanti.

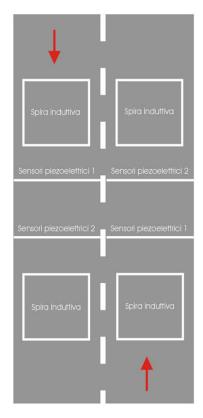


Figura 14 - Configurazione tipica di un sistema di pesatura dinamica con sensori piezoelettrici















ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ saauuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Sensori al quarzo

I sensori al quarzo sono costituiti da elementi sensibili (cristalli di quarzo) inseriti all'interno di un profilo estruso realizzato in metallo leggero e robusto (alluminio). I cristalli di quarzo sono uniformemente distribuiti all'interno del profilo in misura di 1 ogni 5 centimetri.

Allo scopo di adattare il sensore alle irregolarità della strada, alla parte superiore del profilo in alluminio è attaccata una copertura di sabbia epossidica, importante se il sensore viene installato in strade che mostrino segni di cedimento (per esempio le tracce di passaggi di camion).

Quando una forza viene applicata alla superficie del sensore, i dischi di quarzo producono una carica elettrica proporzionale alla forza impressa (effetto piezoelettrico). La carica elettrica viene convertita da un amplificatore di carica in una tensione. Il segnale generato è poi utilizzato per determinare il carico sull'asse o sulla ruota. I sensori hanno lunghezza approssimativamente uguale ad 1 m (Figura 15). Due o più sensori possono essere collegati insieme per realizzare una barra di dimensioni maggiori e connessi elettricamente in parallelo allo stesso amplificatore di carica. Il segnale di uscita in questo caso corrisponde alla somma delle forze che agiscono simultaneamente su tutti i sensori.

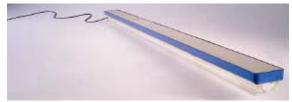


Figura 15 - Barra di sensori al quarzo

A differenza dei tradizionali materiali impiegati per la realizzazione dei sensori piezoelettrici, il quarzo è dotato di una sensibilità piezoelettrica maggiormente stabile nel tempo, risente meno delle variazioni di temperatura (resiste a temperature fino a 500°C e non richiede correzioni di temperatura), ha un'elevata linearità, isteresi trascurabile ed alta rigidità, grazie alla quale è possibile una costruzione a stato solido con una sensibilità unidirezionale ed una rigidezza adatta alla pavimentazione. I sensori al quarzo sono quindi più accurati dei piezoelettrici tradizionali. Bisogna tuttavia tenere conto che il sensore è supportato strutturalmente dalla pavimentazione, per cui se la pavimentazione subisce delle modificazioni per effetto della temperatura, anche il sensore mostrerà dei cambiamenti di risposta. La dipendenza delle prestazioni dalla temperatura viene meno se i sensori sono installati su pavimentazioni rigide che non risentono delle condizioni ambientali. Il sensore viene installato a filo della superficie. L'installazione prevede il taglio della pavimentazione stradale (Figura 16a) ed il fissaggio con un composto a base di sabbia epossidica e silice. Al termine dell'installazione la superficie viene levigata con uno smerigliatore (Figura 16b) per eliminare tutte le asperità ed assicurare una transizione morbida tra il sensore e la pavimentazione.















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ll $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

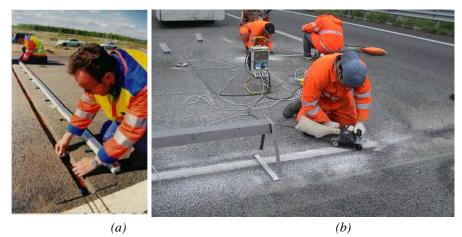


Figura 16 - Fasi di installazione di una barra di sensori al quarzo

La configurazione tipica dei sistemi di pesatura dinamica con sensori al quarzo prevede due sensori al quarzo ed una coppia di spire induttive. Di minore accuratezza è invece la configurazione costituita da una sola barra di sensori al quarzo interposta tra due spire induttive.

Sensori a fibra ottica

I sistemi W.I.M. a *fibra ottica* utilizzano sensori costituiti da due strisce di metallo saldate intorno ad una fibra ottica (Figura 17). Il principio di funzionamento del sensore si basa sull'effetto foto-elastico del vetro. Quando viene impressa una forza verticale alla fibra di vetro, il materiale di cui è costituita diventa birifrangente, dando luogo a due modi di propagazione che si muovono lungo la fibra a differente velocità: un modo verticale veloce ed un modo orizzontale più lento. La differente velocità induce un ritardo di propagazione, creando uno sfasamento tra i due modi. In queste condizioni, i valori minimi e massimi di intensità della luce si alternano in funzione del carico applicato al sensore, con periodicità dipendente dallo sfasamento (Figura 18). Il segnale generato è caratterizzato da un numero di frange polarimetriche, dipendente dal peso impresso dalla ruota ed influenzato dal tempo di attraversamento (velocità del veicolo) e dalla pressione degli pneumatici.

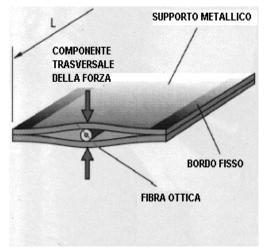


Figura 17 - Schema di un sensore a fibra ottica















NE ERCA E SVILUPPO SENTINEL

 $ilde{ ilde{S}}$ SISTEMA DI Р $oldsymbol{E}$ SA1Uka dil $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE $ilde{ ilde{U}}$

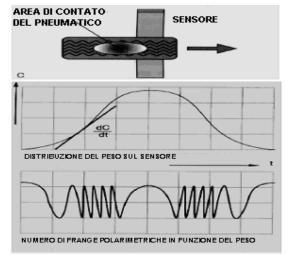


Figura 18 - Esempio di un tipico segnale prodotto da un sensore a fibra ottica

I sensori a fibra ottica vengono installati a filo della pavimentazione stradale e fissati con un legante a base di resina epossidica (Figura 19).

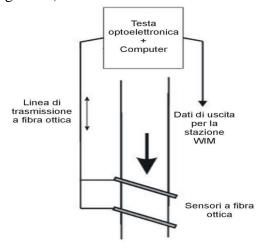


Figura 19 - Schema tipico di configurazione di installazione di un sistema W.I.M. a fibra ottica

I sensori interferometrici⁴ sono molto sensibili e particolarmente adatti per la misura di piccole variazioni di pressione.

I sistemi a fibra ottica presentano diversi vantaggi:

- operano correttamente sia in condizioni di traffico congestionato (veicoli fermi) che in condizioni di traffico liberamente scorrevole (veicoli ad alta velocità), garantendo sempre elevati livelli di accuratezza;
- non presentano una forte dipendenza delle prestazioni dalla temperatura;
- non richiedono un'alimentazione elettrica;
- sono pressoché immuni ad interferenze di tipo elettromagnetico.

I sistemi W.I.M. a fibra ottica sono in grado di restituire anche informazioni su alcuni effetti dinamici, quali pressione degli pneumatici, accelerazione e velocità.

⁴: I sensori interferometrici sono una tipologia di sensori a fibra ottica, nello specifico sono sensori di vibrazioni che sfruttano l'interferenza del segnale ottico che si propaga seguendo cammini ottici diversi.















. GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

3.3.1.3 Sistemi a ponte B-W.I.M.

I sistemi di pesatura a ponte si basano sul principio del Bridge Weigh-in-motion (B-W.I.M.), che è il processo attraverso il quale il peso dei veicoli in movimento viene determinato utilizzando la piattaforma di un ponte, opportunamente strumentata, come superficie basculante (Figura 20).

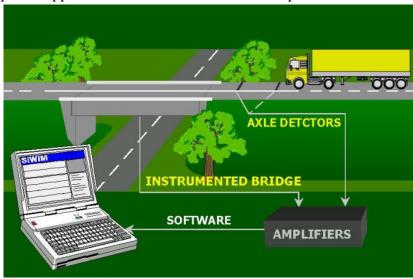
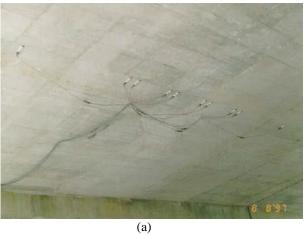


Figura 20 - Schema di un sistema Bridge W.I.M.

La strumentazione utilizzata nei sistemi B-W.I.M. comprende un certo numero di estensimetri installati al di sotto della superficie transitabile, in alcuni punti della struttura, ed una coppia di sensori di asse per corsia annegati nella pavimentazione stradale, per determinare la velocità dei veicoli, la spaziatura tra gli assi ed il tipo di veicolo (Figura 21). Queste informazioni, insieme al dato fornito dagli estensimetri, consentono di determinare il peso complessivo e per asse (Figura 22).



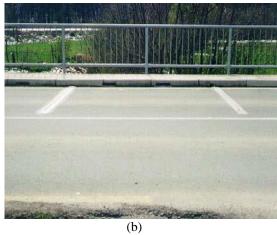


Figura 21 - Strumentazione utilizzata nei sistemi Bridge W.I.M.: (a) estensimetri installati al di sotto della piattaforma stradale; (b) Sensori di asse pneumatici installati nella pavimentazione stradale















ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

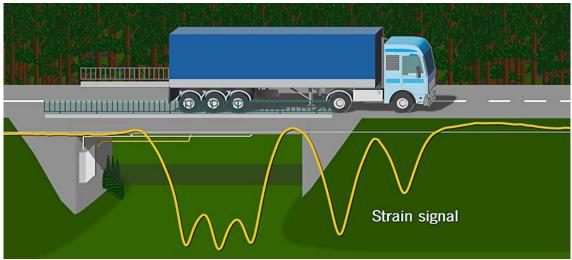


Figura 22 – Esempio di segnale da sistema B-W.I.M.

Inizialmente, negli Stati Uniti, tali sistemi sono stati utilizzati solo nei ponti sostenuti a trave. Nel corso degli anni il B-W.I.M. è stato esteso a quasi tutti i tipi di ponti, a condizione che la lunghezza della linea di influenza, ovvero la distanza tra i due punti più lontani che influiscono sulla misurazione, fosse inferiore a circa 30 m.

I risultati (peso lordo e carichi per asse) ottenuti con tale sistema sono molto accurati, a condizione che la superficie stradale sia liscia, senza buche o solchi che possono causare eccessivi rimbalzi o oscillazioni dinamiche del veicolo.

I sistemi B-W.I.M. possono essere realizzati su ponti le cui campate hanno una lunghezza compresa tra 8 e 25 m (Figura 23). Il soddisfacimento di questa condizione consente di isolare in maniera semplice il passaggio del singolo veicolo, limitando gli effetti di interferenza sulla misura (degradazione del grado di accuratezza) prodotti dal passaggio simultaneo di altri veicoli.

Ponti con campate di lunghezza maggiore possono essere utilizzati purché vengano impiegati particolari accorgimenti.





Figura 23 - Alcuni esempi di ponti strumentati















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

3.3.1.4 Altri approcci tecnologici: multi-sensor W.I.M.

I sistemi *multi-sensor* sono costituiti da un numero piuttosto elevato di sensori a basso costo installati in successione lungo la carreggiata per pesare più volte, a breve distanza di tempo, lo stesso veicolo. Attraverso la misura ripetuta del veicolo, è possibile tenere conto degli effetti dinamici della pesatura e stimare in maniera più accurata il peso statico del mezzo. Sebbene questa tecnica sia molto promettente, non è ancora ben chiaro se l'incremento di accuratezza giustifichi l'aumento di costo dovuto all'installazione di numerosi sensori (≥10). Per ridurre il numero di sensori da installare, e quindi il costo dell'applicazione, è stata sperimentata una configurazione di misura costituita da coppie sfalsate di sensori di dimensioni ridotte (pari a metà della corsia). In questo modo, senza rinunciare al principio di mediare le variazioni indotte dagli effetti dinamici del veicolo, è possibile diminuire del 50% il numero dei sensori necessari.

I sistemi *multi-sensor* hanno inoltre il vantaggio di incrementare l'affidabilità della stazione di misura, consentendo una "degradazione dolce" delle prestazioni. Infatti la perdita per malfunzionamento di uno dei sensori non rende inutilizzabile il sistema di misura, che al contrario continua a mantenere la propria funzionalità, anche se con un livello di accuratezza inferiore.

3.3.2 I sistemi di pesatura portatili

I sistemi di pesatura dinamica portatili consentono di effettuare rilievi di breve durata su sezioni geograficamente distribuite sul territorio senza incorrere in onerose installazioni fisse. Le prestazioni di tali sistemi sono inferiori rispetto a quelle ottenibili con i sistemi di rilievo continuo fisso. Tra i dispositivi portatili, le tecnologie maggiormente utilizzate includono i sensori piezoelettrici e le piastre capacitive. I sensori vengono fissati sulla superficie della sede stradale creando una discontinuità tra pavimentazione ed elementi sensibili. Questa discontinuità provoca all'atto della misura, ossia al passaggio del veicolo sul sensore, due effetti: il primo consiste in un incremento delle oscillazioni del veicolo, che induce una riduzione dell'accuratezza di misura sul peso assiale; il secondo è provocato dall'urto del veicolo con l'ostacolo (il sensore). Quando la ruota passa sopra il sensore, lo pneumatico si flette, assorbendo una parte della forza orizzontale, dovuta all'impatto con l'ostacolo, che viene trasmessa al sensore, causando rumore e distorsione nel processo di misura.

I sopracitati fenomeni rendono i sistemi portatili meno accurati di quelli fissi. Per ridurre l'errore di misura occorre provvedere ad una calibrazione del sistema, che va ripetuta ogni volta che il sistema viene installato su un sito diverso, implicando un onere economico non trascurabile che tende a ridurre la differenza di costo totale tra installazioni fisse e mobili. I costi possono essere ottimizzati limitando alla sola elettronica la portabilità del sistema ed installando in maniera permanente i sensori nella pavimentazione. In questo modo è possibile eliminare gli effetti prodotti dalla discontinuità tra pavimentazione e sensori. Tale accortezza non consente tuttavia di eliminare la procedura iniziale di calibrazione dei sistemi, che continua a costituire una voce di costo sostanziosa.

La maggiore economicità dei sistemi mobili rispetto ai permanenti risiede sostanzialmente nel fatto che il rilevatore può essere utilizzato su più sezioni e che la stazione di pesatura non necessita di linee di alimentazione elettrica e di comunicazione.















'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

3.3.2.1 Sensori piezoelettrici

Ci sono sostanzialmente due tipologie di sensori piezoelettrici utilizzati per applicazioni temporanee, che si basano sullo stesso principio di funzionamento: i *sensori BL* ed i *piezoceramici*. Quando una forza meccanica viene applicata al dispositivo, si genera una tensione che induce la formazione di cariche elettriche di polarità opposta sulle facce parallele di un materiale cristallino piezoelettrico. La tensione misurata è proporzionale alla forza peso della ruota o dell'asse. L'effetto piezoelettrico è dinamico, ossia la carica viene generata soltanto in corrispondenza di un gradiente di forze, per cui questi sistemi possono essere utilizzati esclusivamente in contesti dove la velocità non scende al di sotto di un valore minimo prefissato (15 km/h). I sensori piezoelettrici non sono quindi adatti per l'impiego in ambito urbano.

I sensori piezoelettrici vengono fissati alla superficie stradale in direzione perpendicolare al flusso di traffico. La configurazione di installazione tipica prevede due sensori posti ad una distanza prefissata per consentire la determinazione della velocità dei veicoli. L'informazione sulla velocità viene a sua volta impiegata per calcolare la spaziatura tra gli assi, da cui dedurre la classificazione veicolare.

Questi sensori sono relativamente semplici da installare, ma possono essere disposti, come le piastre capacitive, soltanto sulla corsia esterna. Come le piastre capacitive, anche i sensori piezoelettrici soffrono di significative limitazioni in termini di accuratezza, dovute alla sensibilità dei sensori alla temperatura, alle dimensioni ridotte delle superficie di contatto ed al basso rapporto segnale/rumore.

3.3.2.2 Sensori capacitivi

Un sensore capacitivo è costituito da due lunghe e sottili lamine piastre conduttrici metalliche, separate da uno strato di materiale isolante dielettrico, a cui è applicata una tensione costante. Il sensore, che realizza un largo condensatore, viene fissato alla pavimentazione di ogni corsia stradale (trasversalmente alla direzione di transito dei veicoli) e risulta associato ad un modulo elettronico posizionato a bordo strada. Quando le ruote dell'asse di un veicolo passano sopra il sensore, la pressione esercitata sulle armature metalliche riduce la distanza tra le due piastre, aumentando di conseguenza la capacità elettrica del sistema. Tale situazione comporta l'invio di un segnale al modulo elettronico, il quale lo converte in misure di peso: il peso dell'asse viene determinato misurando la frequenza di risonanza del circuito rilevatore.

Una tipica piastra capacitiva portatile copre circa metà della corsia e misura solo il lato dell'asse che la sollecita (Figura 24). La piastra viene usualmente fissata sulla superficie stradale utilizzando una combinazione di asfalto, chiodi e nastro adesivo. In aggiunta alla piastra capacitiva, vengono solitamente installate anche delle spire induttive portatili per rilevare la presenza dei veicoli e misurarne la velocità.















PPO FS ITALIANE *'ERCA E SVILUPPO SENTINEL*

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

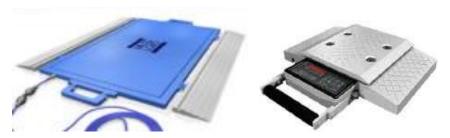


Figura 24 - Due esempi di piastre capacitive portatili

In sostanza, un rilevatore a piastra installato in una corsia stradale consente l'immediata registrazione sia del passaggio del veicolo, sia del carico di ogni suo asse, sia del peso veicolare complessivo, rendendo possibile anche una classificazione per tipologia di tutti i veicoli in transito. I sensori capacitivi sono insensibili alle variazioni di temperatura e la loro precisione dipende essenzialmente dalla corretta installazione dei rilevatori e dalle condizioni della strada. Tali sensori, molto impiegati in Gran Bretagna, comportano dei costi superiori rispetto ai rilevatori piezoelettrici. L'istallazione di questi sistemi richiede molto lavoro per disporre i sensori, calibrare il sistema e garantire la necessaria assistenza al controllo del traffico. Le piastre capacitive portatili possono essere utilizzate solo sulle corsie esterne per evitare che i cavi di connessione con l'elettronica possano essere sottoposti a sollecitazioni meccaniche da parte del traffico circolante sull'infrastruttura.

In termini di accuratezza, questi sistemi presentano significativi difetti, fra cui il fatto che la piastra misura soltanto un lato dell'asse ed in aggiunta le sue dimensioni creano una discontinuità non trascurabile con la pavimentazione stradale, dando luogo ad effetti dinamici e forze d'urto che riducono l'accuratezza della misura. L'incertezza di misura può essere contenuta operando delle procedure di calibrazione accurate. Le operazioni di calibrazione sono molto costose e questo rende in genere economicamente poco conveniente l'utilizzo dei sistemi portatili di misura.

3.3.2.3 Bridge W.I.M.

I ponti possono essere strumentati anche per periodi temporanei e la stessa strumentazione applicata in corrispondenza di sezioni diverse. In questi termini, anche i B-W.I.M. possono essere annoverati tra i sistemi portatili, con tutti i vantaggi e gli svantaggi tipici di questa tecnica di misura.

3.4 Installazione e messa in opera

Le attività di installazione del sistema di pesatura dinamica W.I.M. costituiscono una fase molto importante e delicata, da cui dipendono le caratteristiche prestazionali dei sistemi e la loro durata, indipendentemente dalla tecnologia prescelta. Le operazioni di installazione non contemplano solo la disposizione dei sensori nella pavimentazione, ma anche una serie di attività accessorie, che includono la creazione di cavidotti, la predisposizione 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. Installazioni poco curate possono condurre ad una prematura avaria















ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

del sistema ed a significativi incrementi dei tempi di fermo e dei costi di manutenzione e riparazione.

Per garantire il buon funzionamento di un sistema di pesatura dinamica è importante non soltanto scegliere opportunamente la strumentazione più idonea al soddisfacimento delle specifiche progettuali, ma anche individuare le sezioni di rilievo che meglio si adattano ai requisiti della tecnologia acquisita. In generale questo presuppone l'installazione dei sensori in corrispondenza di tronchi stradali dove la pavimentazione è in buone condizioni e la vita stimata è maggiore di quella dei dispositivi stessi.

L'installazione deve procedere secondo le indicazioni fornite dal produttore ed in periodi dell'anno che consentano di avere condizioni meteorologiche favorevoli all'indurimento delle resine utilizzate per fissare i sensori (assenza di umidità, gelo o temperature elevate).

Al termine delle operazioni di installazione, segue la messa in opera del sistema che comprende la calibrazione e l'esecuzione dei test di accettazione per la verifica del corretto funzionamento dell'impianto.

La calibrazione è un'operazione importante che consente di ottimizzare il funzionamento del sistema e di eliminare gli errori sistematici dovuti alle caratteristiche peculiari del sito di installazione.

3.4.1 Criteri di selezione delle sezioni di rilievo

La chiave di successo di un sistema di pesatura dinamica è legata alla corretta localizzazione delle sezioni di rilievo. Poiché le oscillazioni a cui è soggetto il veicolo in movimento giocano un ruolo significativo nella composizione delle forze che insistono sugli assi, la selezione del sito di misura è spesso più importante della scelta tecnologica per assicurare un'accurata rilevazione dei dati di peso.

La disposizione dei sensori su pavimentazioni accidentate ed irregolari comporta l'acquisizione di dati poco accurati, indipendentemente dalla tecnologia utilizzata. Allo stesso modo, se le condizioni della pavimentazione si deteriorano dopo l'installazione dei sensori, anche le prestazioni del sistema W.I.M. tendono ad alterarsi, qualunque sia la strumentazione installata. Le prestazioni dei sistemi W.I.M. sono principalmente influenzate da 3 fattori:

- geometria della strada,
- condizioni della pavimentazione,
- caratteristiche del deflusso veicolare.

La geometria della strada rappresenta un fattore di primaria importanza per garantire il buon funzionamento dei sistemi di pesatura dinamica. Alcuni parametri, quali la pendenza trasversale e longitudinale, incidono sulla dinamica del veicolo e quindi sul valore del carico rilevato istantaneamente dai sensori. I requisiti geometrici di base raccomandati per poter assicurare il corretto funzionamento dei sistemi di misura comprendono i seguenti parametri:

- Raggio di curvatura
- Pendenza longitudinale
- Pendenza trasversale.

Nella tabella 2 sono riassunti i requisiti individuati nell'ambito di uno studio europeo del 1999 (azione COST 323 "Weigh-in-motion of road vehicles"), nel quale le aree destinate alle















CERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

installazioni dei sistemi W.I.M. sono suddivise in 3 classi, a ciascuna delle quali sono assegnati diversi valori dei parametri menzionati.

Tabella 2 - Requisiti geometrici raccomandati

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

I valori dei suddetti parametri devono essere verificati a partire da 50 m a monte della sezione di rilevo ed essere mantenuti per 25 m, a valle della medesima sezione. Con le tecnologie attualmente disponibili, i sistemi W.I.M. sono in grado di misurare il peso accuratamente solo se i sensori sono installati su pavimentazioni rispondenti ad alcuni specifici requisiti.

Per ridurre gli effetti dinamici del veicolo in moto (maggiore causa di errore nella determinazione del peso statico) occorre che la pavimentazione sia levigata, priva di irregolarità e solida. Queste condizioni consentono di limitare le oscillazioni a cui il veicolo è soggetto durante la marcia e quindi di diminuire l'errore dovuto agli effetti dinamici, migliorando l'accuratezza della misura. Nella tabella 3 sono riportati i valori di riferimento dei parametri di ormaiamento, deflessione e regolarità associati alle 3 classi sopra menzionate.

Tabella 3 - Classificazione dei siti idonei all'installazione dei sistemi W.I.M. in funzione delle caratteristiche della pavimentazione

		_	Classi di installazione W.I.M		
			I	II	III
			Eccellente	Buono	Accettabile
Ormaiamento (3m-beam)		Massima profondità dell'ormaia (mm)	≤ 4	≤ 7	≤ 10
	Pavimentazioni semi-rigide	Deflessione media (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 15 ≠ 3	≤ 20 ≠ 5	≤ 30 ≠ 10
Deflessione	Tutte le pavimentazioni bituminose	Deflessione media (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 20 ≠ 4	≤ 35 ≠ 8	≤ 50 ≠ 12
(quasi statica) 13 t- asse	Pavimentazioni flessibili	Deflessione media (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 30 ≠ 7	≤ 50 ≠ 10	≤ 75 ≠ 15
Deflessions	Pavimentazioni semi-rigide	Deflessione (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 10 ≠ 2	≤ 15 ≠ 4	≤ 20 ≠ 7
Deflessione (dinamica) 5 t - carico	Tutte le pavimentazioni bituminose	Deflessione media (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 15 ≠ 3	≤ 25 ≠ 6	≤ 35 ≠ 9
3 t - carico	Pavimentazioni flessibili	Deflessione (10 ⁻² mm) Differenza Sinistra/Destra (10 ⁻² mm)	≤ 20 ≠ 5	≤ 35 ≠ 7	≤ 55 ≠ 10
Regolarità	Indice IRI	Indice (m/km)	0-1.3	1.3-2.6	2.6-4
<u> </u>	APL	Rating (SW, MW, LW)	9-10	7-8	5-6
Nota: I valori di	ormaiamento e deflessione sono da	ati per temperature ≤ 20 °C			

Anche la solidità della pavimentazione può influire sull'accuratezza. Infatti, la stima del peso eseguita da sensori annegati o a filo della superficie stradale dipende dal sostegno fornito dalla pavimentazione. Quando le condizioni ambientali cambiano, anche le caratteristiche fisico strutturali della pavimentazione si modificano (caso di pavimentazioni bituminose). Un cedimento della pavimentazione, dovuto per esempio ad un cattivo drenaggio dell'acqua piovana, può















ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

provocare una diminuzione dell'accuratezza. I sistemi *W.I.M.* dovrebbero essere pertanto installati soltanto in corrispondenza di pavimentazioni non soggette a significative variazioni stagionali di risposta.

I sensori W.I.M. subiscono abbattimenti dei livelli di accuratezza anche quando la pavimentazione subisce dei danneggiamenti superficiali. Nella maggior parte dei casi non è conveniente effettuare installazioni di sistemi W.I.M. in corrispondenza di sezioni dove la pavimentazione presenti irregolarità o ammaloramenti, o più in generale dove la vita residua della pavimentazione è inferiore al tempo di vita della strumentazione. Il rifacimento del manto stradale danneggia i sensori in maniera irreparabile e soltanto alcune tipologie di dispositivi possono essere parzialmente rimosse prima delle attività di manutenzione. Nel selezionare il sito di installazione occorre tenere presente anche le caratteristiche del deflusso veicolare. Le prestazioni dei sistemi W.I.M. dipendono dalle condizioni di traffico: se il traffico è fluido ed i veicoli si muovono a velocità costante, l'accuratezza del sistema non subisce alterazioni; viceversa, rallentamenti, congestioni, cambiamenti di corsia, stop and go, passaggi a cavallo di due corsie possono dar luogo all'acquisizione di dati scarsamente accurati. La condizione che i veicoli si muovano a velocità costante deriva dal fatto che durante le fasi di frenata ed accelerazione cambiano le componenti del carico sugli assi, dando luogo a misure meno rispondenti al peso statico sia degli assi che del veicolo nel suo complesso (minore accuratezza). Il soddisfacimento delle condizioni sopra esposte limita l'utilizzo dei sistemi W.I.M. nelle aree urbane e suburbane dove sono frequenti condizioni di traffico congestionato.

Per concludere, nell'individuazione del sito di installazione si dovrebbe tenere conto di alcuni aspetti accessori, ma non di minore rilevanza, come la disponibilità di accesso a linee di potenza e comunicazione. Questi requisiti non sono cruciali nell'ambito dei sistemi W.I.M. portatili, ma sono importanti per le installazioni permanenti, dove è richiesto un funzionamento continuo della strumentazione. In alcuni casi è possibile soprassedere alla mancanza della rete di alimentazione elettrica con l'installazione di pannelli fotovoltaici ed all'assenza di linee di comunicazione via cavo mediante l'utilizzo di sistemi di trasmissione via etere, nelle aree coperte dai gestori di telefonia mobile.

3.4.2 Calibrazione

La calibrazione consiste in una procedura di verifica ed ottimizzazione che consente di compensare gli effetti prodotti sulla misura dalle condizioni ambientali del sito come la temperatura, lo stato della pavimentazione e la velocità dei veicoli, al fine di assicurare la maggiore rispondenza possibile tra peso statico e valore rilevato dinamicamente. L'accuratezza dei sistemi W.I.M. dipende quindi in maniera sensibile dalla corretta calibrazione del sistema. Il metodo maggiormente utilizzato per calibrare i sistemi W.I.M. prevede la pesatura ripetuta di uno o più veicoli pesanti, di peso noto, transitanti a diverse velocità. La calibrazione viene condotta nell'arco di uno o due giorni consecutivi per garantire condizioni climatiche e di temperatura omogenee (condizioni di ripetibilità ambientale). Durante la calibrazione, i pesi rilevati dal sistema W.I.M. sono confrontati con i valori statici preventivamente misurati e sulla base degli scostamenti osservati corretti tramite dei fattori di calibrazione che intervengono sugli algoritmi di set-up del sistema in modo da minimizzare la differenza tra i dati acquisiti in maniera statica e dinamica.















NE 'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

La metodologia sommariamente descritta prevede numerose varianti che possono incrementare l'accuratezza del sistema. Queste varianti comprendono tipicamente l'uso di veicoli addizionali, passaggi a diverse velocità ed in differenti condizioni ambientali (di solito diverse temperature). I benefici che si possono ottenere dall'applicazione di queste varianti dipendono dalla tecnologia impiegata, dalle condizioni ambientali che si possono verificare in sito e dal tipo di pavimentazione in cui i sensori sono installati. La calibrazione effettuata utilizzando mezzi pesanti di peso noto ha il vantaggio di essere relativamente semplice da implementare e di costo modesto. In molti casi è possibile incrementare la qualità della calibrazione semplicemente aumentando il numero dei passaggi sui sensori.

L'utilizzo di un solo mezzo pesante per effettuare la calibrazione è sconsigliato. In questo caso si genera tipicamente un errore sistematico (*bias*) legato al tipo di sospensioni montate sul veicolo ed allo stato superficiale della strada. Durante il moto il veicolo oscilla per effetto dell'interazione con la pavimentazione ed il peso varia da punto a punto in funzione della velocità. A parità di velocità, l'andamento delle forze dinamiche che insistono sugli assi può essere descritto graficamente (Figura 25), riportando sull'asse delle ascisse la posizione del veicolo lungo la traiettoria percorsa e sull'asse delle ordinate l'entità del peso che grava sulla pavimentazione (curva caratteristica della dinamica del veicolo). La differenza tra il peso statico e dinamico nel punto di misura quantifica l'errore di bias.

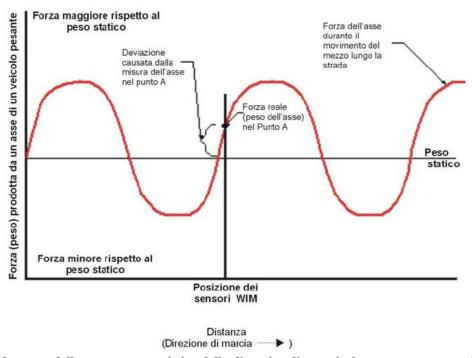


Figura 25 - Andamento della curva caratteristica della dinamica di un veicolo pesante generata dall'interazione tra pavimentazione e sospensioni 5

L'errore di bias dipende dalla velocità. Se la velocità cambia, la curva caratteristica si espande o si contrae (diversa frequenza spaziale, ma stessa frequenza temporale) rispetto all'andamento rilevato ad una velocità prefissata, per cui l'ampiezza dell'oscillazione nella sezione di misura varia, a parità

⁵: Il punto A individua il valore della forza impressa dal veicolo in corrispondenza dei sensori di peso.















. GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

di frequenza temporale, in funzione del tempo impiegato a raggiungere la postazione di rilievo. Facendo passare il veicolo più volte sui sensori e confrontando il valore medio, ottenuto dalle misure eseguite, con il peso statico è possibile determinare un fattore di calibrazione in grado di compensare lo scostamento prodotto dalle oscillazioni del veicolo. Occorre tuttavia tenere conto che ogni veicolo è caratterizzato da una propria curva dinamica e che la sezione di misura può essere raggiunta in un punto diverso della curva caratteristica. Pertanto la calibrazione eseguita con un solo mezzo pesante può dar luogo ad una sovrastima o sottostima del peso dei veicoli con caratteristiche diverse da quello campione (Figura 26).

La calibrazione effettuata con un solo mezzo pesante è accettabile solo quando il veicolo è rappresentativo del flusso veicolare. Purtroppo, un solo veicolo non è generalmente in grado di rappresentare l'intero parco veicolare e quindi l'accuratezza della misura è garantita solo su un ristretto sottoinsieme di veicoli.

Il metodo maggiormente utilizzato per ovviare a questo problema ed incrementare l'accuratezza del sistema consiste nell'effettuare la calibrazione utilizzando diverse tipologie di mezzi pesanti in modo da ricavare una curva media che sia rappresentativa della maggior parte dei veicoli transitanti sull'infrastruttura monitorata.

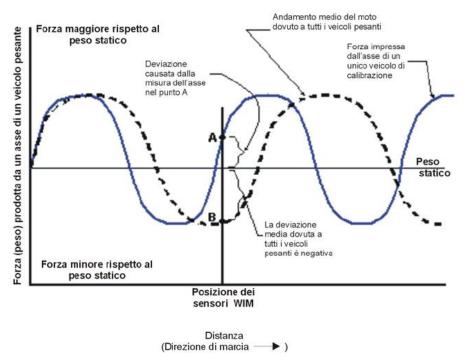


Figura 26 - Confronto tra le curve dinamiche caratteristiche del veicolo campione e della media dei veicoli pesanti transitanti su una particolare porzione dell'infrastruttura 6

Una volta effettuata la calibrazione iniziale è opportuno verificare periodicamente i valori misurati ripetendo in maniera semplificata la procedura di test. Valori diversi rispetto ai pesi statici possono essere rilevati a causa di modificazioni della pavimentazione stradale, dovute ad usura, ammaloramenti e/o cedimenti strutturali, o ancora a variazioni di risposta dei sensori prodotte da cambiamenti delle condizioni ambientali (la temperatura). Alcuni sistemi di pesatura dinamica sono

⁶: I punti A e B individuano lo scostamento della forza impressa sui sensori dal valore statico.















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{u}$ ELL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

dotati di funzioni di autocalibrazione in grado di regolare i fattori di calibrazione al variare delle condizioni ambientali. L'applicazione di queste funzioni è indicata soltanto in corrispondenza di strade ad elevato flusso veicolare e dove i cambiamenti ambientali non sono repentini, in modo da consentire al sistema di modificare i fattori di calibrazione dopo aver valutato i dati prodotti da un numero sufficiente di veicoli in condizioni ambientali stazionarie.

3.5 Accuratezza dei sistemi W.I.M.

L'accuratezza di un sistema W.I.M. viene definita in maniera statistica, attraverso la determinazione dell'intervallo di confidenza dell'errore relativo della grandezza misurata (peso di un asse, gruppo di assi o complessivo), dato da (Wd-Ws)/Ws, dove Wd è la forza d'impatto o il carico misurato dal sistema W.I.M. e Ws il carico o peso statico relativo alla stessa grandezza. L'intervallo di confidenza è centrato sul valore statico del peso o del carico ed è compreso tra $[-\delta, +\delta]$, dove δ è la tolleranza relativa al livello di confidenza π . Il livello di confidenza definisce la probabilità π che il dato misurato sia contenuto all'interno dell'intervallo di confidenza. Il livello di confidenza π di un qualsiasi campione di dati dipende dalla procedura di verifica impiegata, dalle condizioni ambientali e dalla dimensione del campione di dati (numero di veicoli utilizzati e passaggi effettuati per eseguire il test).

L'accuratezza del dato si riferisce non soltanto alle prestazioni del sistema *W.I.M.* impiegato (sensoristica, hardware e software), ma anche alla procedura e frequenza di calibrazione, allo stato della pavimentazione ed al comportamento dinamico dei veicoli.

I sistemi *W.I.M.* sono classificati in sei classi di accuratezza corrispondenti a determinate specifiche e campi di applicazione (Tabella 4).

Tabella 4 - Le classi di accuratezza in funzione del tipo di applicazione

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: 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 D(25). I sistemi appartenenti a queste classi possono essere utilizza dare delle indicazioni sulla composizione del traffico e la distribuzione frequenza di carico.					

I principali campi di applicazione, con i relativi intervalli di tolleranza, sono mostrati in tabella 5:















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Tabella 5 - Campi di applicazione dei sistemi W.I.M. e relativi intervalli di tolleranza

Compo di applicazione		nza (%)
Campo di applicazione	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

I numeri riportati nelle classi di accuratezza si riferiscono all'ampiezza dell'intervallo di confidenza definita per il peso complessivo. Alle grandezze misurate (peso complessivo, per asse, gruppo di assi, velocità, interasse, classificazione veicolare) sono associati diversi valori di tolleranza per ciascuna delle classi di accuratezza individuate (Tabella 6).

Tabella 6 - Tolleranze delle classi di accuratezza

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)	Е
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

Per individuare la classe di accuratezza si devono testare le grandezze riportate in Tabella 6. La classe di accuratezza del sistema W.I.M. corrisponde a quella per cui sono verificati tutti i requisiti minimi relativi alle diverse grandezze.

3.6 Modalità di rilevamento e gestione dati

Le modalità di rilevamento dei dati dipendono dalle finalità delle attività di monitoraggio in modo che sia possibile stabilire quali sono le grandezze da acquisire, quando e dove rilevare le informazioni necessarie al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

L'ambito territoriale di indagine può essere più o meno vasto. Se il monitoraggio comprende un numero ridotto di strade o percorsi, i dati possono essere raccolti su ciascuna infrastruttura. Se invece la raccolta dei dati deve essere eseguita su una rete stradale estesa, per limitare i costi dell'indagine si rende necessario il ricorso a procedure di campionamento spaziale e temporale. I dati misurati in corrispondenza di determinate sezioni, opportunamente selezionate, consente di effettuare delle stime sulle tratte non monitorate tanto più accurate, quanto maggiore è il grado di















"SISTEMA DI PESATURA DIINAMICA IN ILLLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

rappresentatività delle sezioni di rilievo individuate. Tipicamente si ricorre al campionamento nelle attività di pianificazione dove non è richiesta un'accuratezza elevata.

3.6.1 Il campionamento spaziale

Il campionamento spaziale consiste nel selezionare un numero limitato di sezioni di misura rappresentative delle tipologie di infrastrutture da monitorare. La localizzazione delle sezioni di rilievo viene eseguita attraverso una procedura statistica che si applica a determinate classi funzionali di strade definite in relazione agli obiettivi dell'indagine, sulla base di caratteristiche operative e di traffico simili. L'individuazione delle classi funzionali richiede un'analisi preliminare del traffico lungo la rete che consenta di determinare le componenti caratteristiche del deflusso veicolare: tipologie di veicoli transitanti, entità del carico lungo l'itinerario di viaggio, distanza di percorrenza, frequenza di viaggio, aree geografiche e centri urbani serviti, ecc. Il numero delle sezioni di monitoraggio dipende proporzionalmente dal numero di classi funzionali individuate e dal livello di precisione che si intende perseguire. Quanto maggiore è il numero di sezioni di rilievo all'interno di ciascuna classe funzionale, tanto maggiore è la precisione delle stime effettuate. Il numero delle sezioni di rilievo deve essere stabilito sulla base del grado di accuratezza che si vuole ottenere e dei costi che si è in grado di sostenere. Il grado di precisione viene definito in termini di percentuale di errore all'interno di un prefissato intervallo di confidenza. Una diminuzione dell'errore accettabile o un incremento del livello di confidenza, aumenta il numero dei campioni necessari e quindi i costi. La definizione dell'estensione del campione all'interno di ciascun gruppo funzionale si basa sulla valutazione di tre variabili statistiche:

- *Coefficiente di variazione* (c.v.). Il c.v. fornisce una misura relativa di variabilità ed è definito come il rapporto fra la deviazione standard e la media. Il c.v. può essere calcolato a partire da dati esistenti, oppure ricondotto a valori di default presenti in letteratura.
- Statistica-Z (o t-statistica per campioni inferiori a 30 elementi). E' una funzione del livello di confidenza desiderato (es. livello di confidenza del 95%) per la media campionaria. I livelli di confidenza comunemente usati oscillano tra 1'80% ed il 95%, a seconda del budget disponibile.
- *Errore relativo ammesso* (e). Espresso in percentuale è pari ad ½ dell'intervallo di confidenza desiderato per la media campionaria (es. ± 5%).

La dimensione del campione per ciascuna classe funzionale è data dalla seguente espressione:

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

dove N è la dimensione della popolazione ed n' è la dimensione del campione non corretta, pari a:

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

Il coefficiente di variazione può essere calcolato attraverso la seguente espressione

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

dove σ è la deviazione standard della popolazione, μ la media della popolazione, μ la deviazione standard del campione e μ la media del campione.

Il numero dei campioni da acquisire e quindi delle sezioni di misura da attrezzare dipende dall'errore che si intende accettare, ossia dalla precisione della stima che si vuole perseguire. In generale, maggiore è il numero di sezioni all'interno di uno stesso gruppo di strade (stessa classe















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

funzionale), migliore è la stima prodotta, sebbene i benefici che si possono ottenere incrementando la dimensione del campione diminuisca oltre un certo valore limite. Ipotizzando un livello di confidenza del 95% la riduzione dell'intervallo di confidenza che si ottiene passando da 5 a 6 sezioni è del 10%. Aumentando il numero delle sezioni oltre questo valore non si ottengono benefici apprezzabili o comunque tali da giustificare l'incremento di costo che ne consegue.

3.6.2 Il campionamento temporale

I rilievi devono essere condotti per periodi che consentano di verificare la variabilità del dato. Se la distribuzione dei pesi rilevati durante i diversi giorni della settimana non è stabile, i dati andranno acquisiti per almeno una settimana, compresi i giorni di sabato e domenica. Se si verificano anche delle differenze stagionali, occorre acquisire i dati più volte nell'arco di un anno oppure installare delle stazioni permanenti di rilievo. In quest'ultimo caso, se la classe funzionale è stata formata effettivamente da infrastrutture aventi caratteristiche simili, le variazioni stagionali dedotte dalla stazione W.I.M. fissa sono tipiche dell'intero insieme di strade appartenenti alla medesima classe. Quanto maggiore è il numero di stazioni W.I.M. permanenti installate, tanto maggiore è il grado di accuratezza del dato stimato.

In linea generale deve essere presente per ciascuna classe funzionale almeno una stazione W.I.M. permanente. Nelle altre sezioni di misura possono essere effettuati rilievi di breve durata. Per tenere conto delle variazioni orarie e giornaliere, è consigliabile eseguire l'acquisizione dei dati con continuità per almeno una settimana. I rilievi di breve durata possono essere effettuati installando delle stazioni semi-mobili, costituite da sensori fissi e rilevatori portatili. Le stazioni mobili, a causa della loro scarsa accuratezza, non sono raccomandabili.

3.7 Mercato delle tecnologie per il monitoraggio del traffico

Secondo ricerche condotte negli Stati Uniti nel mondo sono stati installati circa 1,59 milioni di strumenti per il rilievo del traffico, che effettuano monitoraggio su circa 1,36 milioni di corsie stradali, con un investimento complessivo stimato essere circa 2,04 miliardi di dollari.

La maggior parte di tali strumenti è costituita da spire magnetiche (63%), seguono a distanza i rilevatori ultrasonici (21,3%), che cominciano ad avere larga diffusione. I rilevatori radar, a microonde, piezoelettrici, a raggi infrarossi e i sensori video sono invece scarsamente presenti sul mercato rispetto ai primi due (Tabella 7).

Tabella 7 - Mercato delle tecnologie di rilevo del traffico per unità installate, corsie coperte e valore delle installazioni

Rilevatore	Unità installate	Quota di Mercato (%)	Corsie monitorate	Quota di mercato	Valore (US\$)	Quota di mercato
Spire induttive	670.182	63,30	460.203	33,85	833.933.204	40,82
Ultrasuono	225.456	21,30	563.640	41,46	447.123.300	21,89
Microonda	51.036	4,82	142.563	10,49	65.551.208	3,21
Piezo-elettrico	42.473	4,01	79.074	5,82	179.649.975	8,79















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Ibridi AVI	2.423 1.272	0,23	4.511 1.610	0,33	61.308.000 15.309.096	3,00 0,75
W.I.M.	4.721	0,45	1.788	0,13	56.062.713	2,74
CCTV	5.026	0,47	10.717	0,79	63.722.870	3,12
Magnetico	12.046	1,14	12.038	0,89	2.383.235	0,12
Video	19.502	1,84	48.197	3,55	237.595.482	11,63
Infrarosso	23.999	2,27	34.029	2,50	75.935.459	3,72

La prospettiva di ripartizione si modifica se si considera la diffusione delle tecnologie sulla base del numero di corsie coperte. Infatti, alcune tecnologie (radar, video) coprono più di una corsia per unità, mentre altre (spire induttive) richiedono una o più unità per monitorare una singola corsia, a seconda dei parametri da rilevare. In tal caso più del 41% delle corsie sono coperte da rilevatori ad ultrasuoni, mentre le spire induttive coprono il 34% del totale di corsie monitorate. I rilevatori a microonde coprono invece il 10,5%, cui seguono i sensori piezoelettrici (5,82%) e i video (3,55%). Considerando invece l'importo globale degli investimenti, le spire induttive e i rilevatori ad ultrasuono si trovano ai primi posti. Anche se relativamente economiche, le spire sono così diffuse che coprono il 41% del mercato globale (espresso in dollari USA). I sensori ad ultrasuoni coprono invece il 22% del mercato. *Le spire induttive* costituiscono quindi la tecnologia più diffusa per il monitoraggio del traffico, in quanto spesso garantiscono i risultati affidabili rispetto al costo. Nella Tabella 8 sono riportati i costi medi unitari per tecnologia.

Tabella 8 - Costi medi per tecnologia di rilievo del traffico

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

Gli enti preposti al monitoraggio e gestione del traffico richiedono strumenti sempre più flessibili, a supporto dei sistemi avanzati di gestione del traffico (ATMS, Advanced Traffic Monitoring Systems). Oltre ciò, si stanno diffondendo quindi strumenti di tipo non intrusivo, in grado di essere installati, rimossi, riparati e riconfigurati molto più rapidamente dei sensori calati all'interno del manto stradale, senza alcuna interruzione nel deflusso di traffico.















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

4. Caratteristiche dei sistemi W.I.M. commerciali e di ricerca esistenti per la pesatura dinamica dei veicoli

4.1 Caratteristiche dei sistemi W.I.M. commerciali

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e prestazionali di alcuni sistemi W.I.M. commerciali presenti sul mercato.

4.1.1 Il sistema W.I.M. Kapsch per il controllo del peso dei veicoli

Il sistema W.I.M., *Kapsch*, presente sul mercato, consente agli operatori stradali di effettuare il controllo sistematico del peso del veicolo e di applicare i limiti di peso, senza richiedere interruzioni del flusso di traffico, sia su strade rurali che su autostrade, sia per strade a corsia singola o a più corsie (Figure 27-28).





Figura 27 - Configurazione operativa del sistema di pesatura dinamica Kapsch

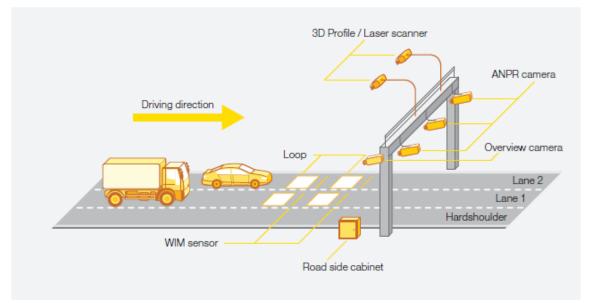


Figura 28 - Configurazione di funzionamento complessivo del sistema Kapsch W.I.M. su strada multicorsia















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Il sistema *Kapsch* funziona come un'unità autonoma e può essere facilmente integrata nei sistemi di pedaggiamento e di sorveglianza del traffico, operando da anni in diversi Paesi in maniera altamente accurata: per questo motivo, alcune funzionalità uniche come il sistema di controllo della validità (VCS) e il sistema di manutenzione permettono l'applicazione di un enforcement diretto.

Tutti i passaggi dei veicoli vengono registrati e non esistono misure non valide o mancanze, grazie al sistema di controllo della validità. Tale sistema supporta applicazioni aggiuntive come telecamere ANPR (riconoscimento automatico del numero di targa), laser scanner per il rilevamento e la classificazione dei veicoli, telecamere di videosorveglianza, controllo delle sezioni di barra (Section Control) e sistemi di controllo della velocità.

Kapsch W.I.M. si compone di un'unità di controllo, sensori e un software appositamente sviluppato. Il prodotto utilizza sensori W.I.M. Kistler Lineas® ad alta precisione, incorporati nel manto stradale.

Il segnale del sensore viene trasformato, elaborato e convertito in dati relativi al peso basati sulla ruota. *Kapsch W.I.M.* determina e controlla in modo affidabile il peso degli assi, il peso complessivo e il peso del rimorchio. Inoltre i veicoli sono classificati secondo lo schema di classificazione del veicolo del cliente (Figura 29).

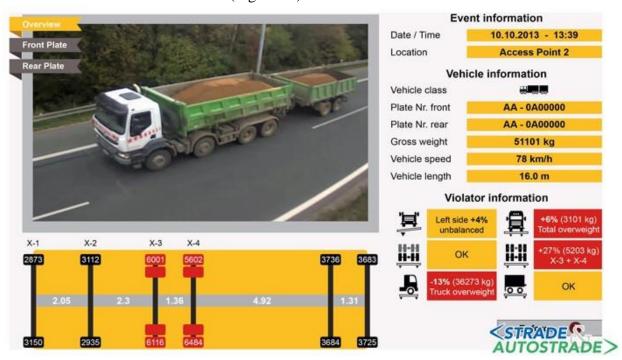


Figura 29 - Configurazione dei dati monitorati in uscita dal sistema di elaborazione

Per facilitare la connessione e l'integrazione in una soluzione esistente, Kapsch W.I.M. è disponibile con interfacce standardizzate, tra cui interfacce seriali RS232, RS422, RS485 (fino a 115200 baud), connettività Ethernet con server IP/TCP e configurazione del cliente.

Il sistema Kapsch W.I.M. può avere diverse applicazioni:

o **applicazione diretta**: il sistema di monitoraggio dei mezzi pesanti può essere integrato negli ambienti multi-lane free-flow di Kapsch oppure in combinazione con i sistemi per la riscossione elettronica del pedaggio. Le immagini del veicolo e della targa sono memorizzate insieme a tutti i parametri di peso;















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

- o **pre-selezione per ispezione del veicolo**: i veicoli sono preselezionati alle stazioni W.I.M. presso appositi punti di controllo. I veicoli sospetti sono deviati nel sito di ispezione per effettuare controlli più approfonditi;
- o **protezione del ponte e dell'area di cantiere**: ai veicoli sovraccarichi è vietato attraversare ponti con capacità limitata. Il sistema può creare delle regole di applicazione e fermare i veicoli in corrispondenza dei semafori;
- o **ricerche statistiche e sul traffico**: Kapsch W.I.M. consente di includere i dati relativi al peso del veicolo nelle statistiche sul traffico, rappresentando così una preziosa fonte di informazioni per la gestione del manto stradale;
- o **controllo degli accessi:** il peso del veicolo viene controllato all'entrata (o all'uscita) da stabilimenti, porti, basi militari o altre zone di speciale interesse.

I parametri che possono essere rilevati e elaborati sono i seguenti:

- Caratteristiche di peso

- peso complessivo
- peso del rimorchio
- peso per asse
- peso di gruppi di assi
- peso sbilanciato.

- Caratteristiche del veicolo

- Classe del veicolo
- velocità del veicolo
- riconoscimento rimorchio
- interasse totale
- numero di assi
- attuatore pneumatico a doppio effetto con rilevamento di posizione
- rilevamento 3D della sagoma del veicolo.

- Transito e informazioni sul sistema

- Numero unico del veicolo
- ora e data (sincronizzazione via GPS o NTP)
- identificativo della corsia
- messaggio di attivazione del veicolo
- messaggio di stato del sensore
- stato del sistema.

Le specifiche tecniche dei sistemi Kapsch W.I.M. in termini di precisione della misurazione, in conformità con la COST 323 classe A (5) ⁷, sono riportate nella Tabella 9.

 ⁷: per il sito dove viene installato il sistema W.I.M. sono richieste eccellenti condizioni di manto stradale conformi alla specifica COST 323 per garantire la massima classe di precisione A (5)















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

Tabella 9 – Specifiche tecniche dei sistemi Kapsch

Grandezze	Range
Peso complessivo	(> 3,5 t) +/— 5%
Asse singolo	+/— 8%
Gruppo di assi	+/— 7%
Velocità del veicolo	(> 30 km/ora) +/— 2%
Distanza d'interasse	+/2%
Gamma di temperature operative	− 40 °C ÷70 °C
Velocità di esercizio	3 ÷ 255 km/h

4.1.2 Sistema iW.I.M. 50_10

Il sistema "iW.I.M. 50_10" è un sistema di pesatura dinamica di veicoli in movimento certificato OIMLR134 *Classe 10* fino a 50 km/h e omologato MiSE. Tale sistema permette di misurare il peso dei veicoli in transito con la massima accuratezza.

Il sistema è veloce da installare, poco invasivo per la pavimentazione, non subisce danneggiamenti da agenti atmosferici e salini, non è influenzato da campi magnetici né da sbalzi di temperatura e si può usare tramite APP, utilizzabili su smartphone, tablet e pc.

4.1.2.1 Caratteristiche tecniche del sistema iW.I.M. 50_10

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e prestazionali del sistema *i W.I.M. 50_10* (Figure 30-31 e Tabelle 10-11).



Figura 30 – Configurazione operativa del sistema i W.I.M. 50_10















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

SCHEMA DI SCAVO

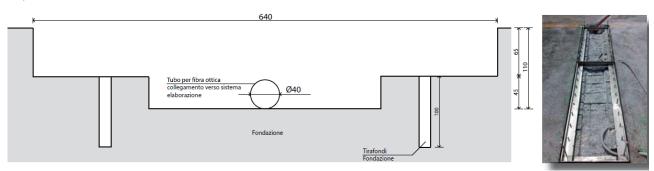


Figura 31 – Schema di scavo per l'installazione dei sensori sulla pavimentazione stradale

Tabella 10 – Specifiche tecniche del sistema iW.I.M. 50_10

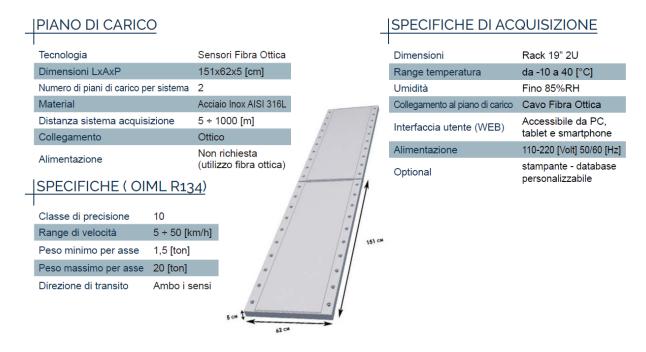
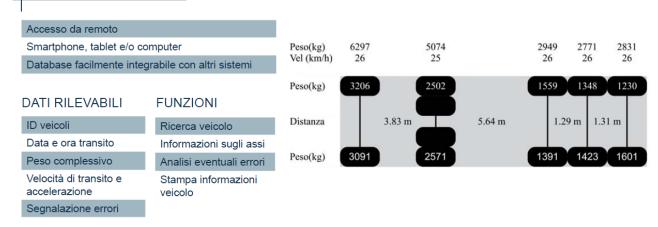


Tabella 11 – Interfaccia utente

INTERFACCIA UTENTE

















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

4.1.3 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. di ECM

La stazione HERA, con il sistema di pesatura dinamica W.I.M. della casa costruttrice *Electrinique Controle Misure* utilizza sensori piezoelettrici per rilevare il peso (accuratezza COST 323 classe B (10)), la velocità, la lunghezza, il numero di assi, il rilevamento di ruote (a seconda della posizione dei sensori sulla superficie stradale), distanza tra gli assi, tipologia di categoria, ecc. Tale sistema è collegato alla stazione di analisi del traffico stradale, che misura una serie di dati provenienti da veicoli che viaggiano ad alta velocità su strada.

I componenti del sistema W.I.M. ECM sono:

- **Sensori piezoelettrici "Piezolor":** tali sensori, posizionati sul manto stradale (Figura 32), sfruttano le proprietà della ceramica per fornire segnali ad ogni passaggio dei veicoli, che poi vengono inviati alla stazione HERA, che effettua le necessarie elaborazioni.



Figura 32 - Configurazione del posizionamento dei sensori sul manto stradale

- Stazione di analisi del traffico stradale HERA: si tratta di un sistema di analisi del traffico stradale dotato delle più recenti tecnologie di comunicazione e archiviazione, ossia una scheda SD da 32 GB utilizzata per memorizzare milioni di singoli veicoli, la porta Ethernet sul pannello frontale consente inoltre di comunicare rapidamente e facilmente con la stazione (tramite il protocollo TCP/IP). Inoltre, la stazione presenta un basso consumo energetico, per cui è in grado di funzionare per diversi giorni con una batteria o con un pannello solare.
- Sistema di videoregistrazione VESTA: il kit consiste di una telecamera e un IPC (PC industriale) e viene utilizzato per fotografare la targa e/o la dimensione del veicolo su una o più corsie (Figura 33). Sono quindi possibili due applicazioni di VESTA combinato con i sistemi ECM:
 - Il sistema HERA di pesa in movimento (peso, altezza, ecc.);
 - Il sistema di classificazione dei pedaggi, utilizzato per verificare le targhe dei veicoli utilizzando le corsie a pedaggio "Free-Flow".















ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



Figura 33 - Configurazione operativa del kit VESTA

- Software
 - *ElCoM*: configurazione e impostazione della stazione HERA
 - *TALOS*: raccolta regolare automatica di dati dalla stazione HERA.
- **Loop induttivo:** utilizzato per rilevare la massa metallica dei veicoli sulla strada, consentendo una buona rilevazione dei veicoli per il conteggio, la classificazione o la pesatura (Figura 34).



Figura 34 - Configurazione del posizionamento del loop induttivo

- **Resine P5G e P6G:** sviluppate da ECM e utilizzate per installare sensori piezoelettrici, supporti in acciaio inossidabile sul manto stradale.

4.1.3.1 Caratteristiche tecniche del sistema W.I.M. ECM

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e prestazionali delle componenti del sistema *W.I.M.* (Tabelle 12, 13, 14, 15 e 16).















"SISTEMA DI PESATUKA DIINAMICA IN ILLLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

Tabella 12 – Caratteristiche tecniche e prestazionali dei sensori piezoelettrici ECM

	SENSORI PIEZOELETTRICI PIEZOLOR					
Sensore PE1O	Sensore piezoelettrico in ceramica che emette segnali di classe I (7%) quando viene attraversato dai veicoli. La sua lunghezza dipende dalla larghezza della corsia. Il numero di sensori piezoelettrici per corsia è pari a 4.					
Sensore PF-2N	Sensore piezoelettrico in ceramica che emette segnali di classe II (20%) quando viene attraversato dai veicoli. Possono essere impiegati anche per altre applicazioni: "On-Scale" (0,7 metri) per rilevare veicoli non centrati sulla corsia. "45°" (2,2 metri) per rilevare veicoli con assi a due ruote.					
Funzionalità	Quando il sensore viene attraversato dai veicoli in transito emette un segnale, che varia in base alla pressione esercitata. Tale segnale viene trasmesso alla stazione di traffico stradale di HERA, per essere analizzato e misurato.					
	Tipo di nucleo	a singolo filamento e guaina di rame				
	Materiali piezoelettrici	ceramica polarizzata				
	Velocità per la classificazione dinamica	> 20 km/h				
	Lunghezza del sensore	adattabile alla larghezza della corsia, da 1 a 4 metri				
	Lunghezza del cavo	da 25 a 100 metri massimo				
Specifiche	Cavo	RG58				
tecniche	MTBF (Tempo medio prima dell'usura)					
	Capacità per unità di lunghezza					
	Resistenza di isolamento	$\geq 1010~\Omega m$				
	Costante piezoelettrica	$\approx 1 \text{V/bar}$				
	Temperatura di esercizio	da -30°C a +70°C				
	Resina di installazione	P5G				

Tabella 13 – Caratteristiche tecniche e prestazionali della stazione del traffico stradale HERA

	STAZIONE DI ANALISI DEL TRAFFICO STRADALE HERA			
Caratteristiche tecniche	B10 class 110 / 220 Vac Solar power Ethernet SD card 32GB Up to 12 lanes			















"SISTEMA DI PESATUKA DILVAMICA IN I ELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

		HERA C Sensors layout examples
Tipologie	HERA C Conteggio del traffico	Parametri: Conteggio Velocità Lunghezza Tasso di occupazione Classificazione (lunghezza) Tempo tra veicoli Distanza tra i veicoli
	Hera A Conteggio e classificazione automatica dei veicoli	Parametri: Conteggio Velocità Lunghezza Tasso di occupazione Classificazione (lunghezza) Tempo tra veicoli Distanza tra i veicoli Classificazione (asse, lunghezza) Spaziatura dell'asse
	HERA W conteggio, classificazione automatica dei veicoli e peso in movimento	Parametro: Conteggio Velocità Lunghezza Tasso di occupazione Classificazione (lunghezza) Tempo tra veicoli Distanza tra i veicoli Classificazione (asse, lunghezza, Spaziatura dell'asse Pesi degli assi Separare il lato sinistro/destro Pesi delle ruote laterali Peso del veicolo lordo Rilevazione doppia ruota
	Peso totale lordo	+/- 10%
	Peso dell'asse	+/- 15%
Specifiche	Velocità	+/- 2%
specificne funzionali	Lunghezza	+/- 10%
	Distanza tra asse	+/- 2%
	Classificazione	1% (14 categorie di veicoli)
	Conteggio Precisione di pesata	<+/- 1% classe B (10) secondo COST 323
Considerate	Numero di corsie	massimo 12 corsie (2 direzioni)
Specifiche tecniche	Numero di sensori per corsia	fino a 4 sensori piezoelettrici per corsia
	Comunicazione	Ethernet, PPP e RS232















"SISTEMA DI PESATUKA DILVAMICA IN L'ELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

Protocollo di comunicazione	TCP, UDP, FTP, protocollo TED (solo per gli allarmi)	
Memoria	scheda SD da 32 GB che può contenere fino a 30 milioni di veicoli singoli	
Formato dati	XML	
Calibrazione	automatica per statistica, per veicolo standard o manuale	
Comunicazione backplane	tramite CAN bus	
Alimentazione	110/220Vac o 12Vdc con un pannello solare	
Formato	stazione di pesatura fissa o portatile	
Intervallo di temperatura	$+ da = 30^{\circ} C a + 70^{\circ} C (da = 22^{\circ} E a + 158^{\circ} E)$	
Durata della batteria	Una settimana con una batteria da 12V, 90 Ah (valutazione senza modem)	

Tabella 14 – Caratteristiche tecniche e prestazionali del SISTEMA DI VIDEOREGISTRAZIONE VESTA

	SISTEMA DI VIDEOREGISTRAZIONE VESTA				
Caratteristiche tecniche	2 MP	IR Infrared flash IPC fanless WiMapplication			
	Unità istantanea di video ripresa	 Alta risoluzione (1600 x 1200 quindi 2 Megapixel), Bianco e nero, Zoom ottico 25 mm, Flash a infrarossi, Tecnologia IP PoE (Power on Ethernet), Ampia temperatura operativa, Colore (in opzione). 			
Componenti del kit	Unità di registrazione immagini digitali	 Computer industriale (IPC). Scheda di acquisizione per 2 telecamere. Software di gestione ECM VESTA PICTURES. Memorizzazione dell'immagine del veicolo (JPEG o BMP) e dati in database dedicato (formato SQL). Trasferimento del database tramite connessione IP Ethernet (fibra ottica, ADSL, 3G, ecc) Software di riconoscimento della targa automatico opzionale (ANPR). 			















GRUPPO FS ITALIANE LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Tabella 15 – Visualizzazione dei dati del software di gestione

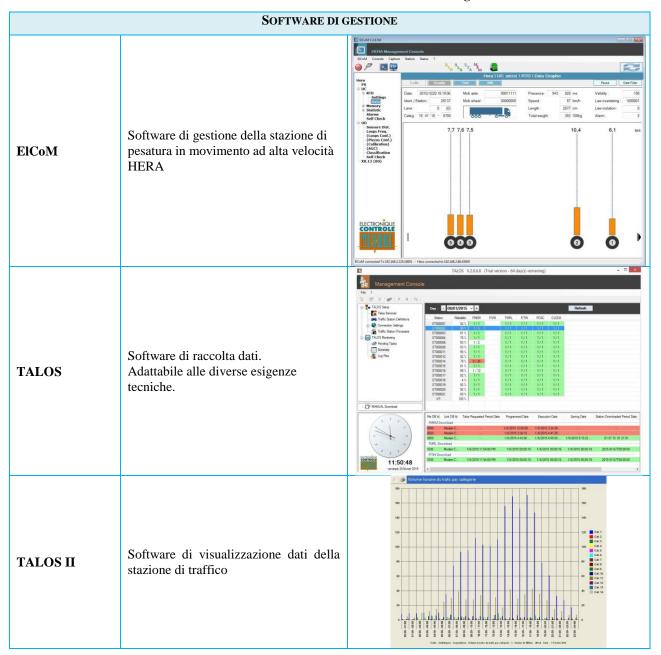


Tabella 16 - Caratteristiche tecniche e prestazionali del Loop induttivo

LOOP INDUTTIVO									
Componenti	 Cavo ad anello Sezione trasversale del cavo in rame: 1,5 o 2,5 mm² Dimensioni del cavo (diametro esterno): da 6 a 8 mm Temperatura di esercizio: da -35 ° C a + 85 ° C Isolamento:> 400 V Materiali isolanti: elastomero reticolato. 								















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Cavo di ritorno ad anello Sezione del conduttore: 1,34 mm² Schermatura: rame stagnato Numero di torsioni al metro: da 10 a 20 Diametro esterno: 8mm Scatola di giunzione impermeabile tra il cavo di ritorno e il cavo ad anello Tipo 3M Resina per riempire la traccia del cavo. Tipo: E.C.M. P6G Utilizzabile a + 20 ° C dopo: 20 minuti Tempo di asciugatura a + 20 ° C: 20 minuti.

4.1.4 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. UnicamW.I.M. di CAMEA

Il sistema *UnicamW.I.M.* proposto da CAMEA, effettua la pesatura dinamica sia ad alte che a basse velocità (HS/LS) secondo gli standard internazionali (COST 323, ASTM E1318). Tale sistema misura e registra i pesi (lordi) di ruote, assi e veicoli che passano sopra i sensori di pesatura incorporati nella pavimentazione stradale.

Nel sito scelto per l'installazione del sistema UnicamW.I.M. vengono installati diversi tipi di sensori sul manto stradale (Figura 35). I sensori induttivi ad anello (o loop induttivi), utilizzati per rilevare la presenza del veicolo, si basano sul principio del cambiamento di induttanza che avviene in una bobina quando il suo campo elettromagnetico viene modificato al passare di un oggetto metallico. I sensori di pesatura vengono installati nella direzione in cui viaggiano i veicoli. Opzionalmente, i sensori di posizione possono determinare la posizione dei veicoli nella corsia stradale, misurare la larghezza dei veicoli e rilevare la presenza di pneumatici gemellati (doppi).















. GRUPPO FS ITALIANE "LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

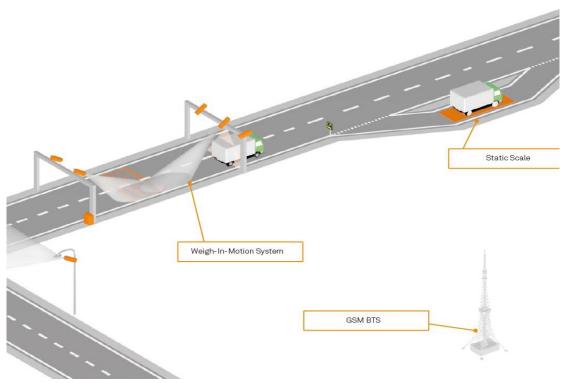


Figura 35 - Configurazione operativa del sistema CAMEA

La scelta di un sito appropriato influisce in modo significativo sulla precisione e sulla durata dei sensori. Il numero di misure valide dipende direttamente dalle condizioni della strada e dal numero di sensori installati (più sono e meglio è). Il sistema UnicamW.I.M. fornisce dati completi del veicolo, che possono essere archiviati in un database locale o centrale.

I dati di uscita del sistema UnicamW.I.M. sono:

- peso lordo
- n° assi
- velocità
- classe
- lunghezza
- direzione
- ecc.

Facoltativamente, il sistema può fornire:

- posizione del veicolo sulla corsia
- larghezza dell'asse
- rilevamento degli pneumatici gemellati
- temperatura della superficie stradale
- altezza del veicolo
- ecc.

Inoltre tale sistema può essere combinato con altri sistemi ITS, come il sistema *UnicamVELOCITY* e *UnicamSPEED*. Il sistema *UnicamVELOCITY* misura la velocità media del veicolo. Rispetto ai sistemi di controllo della velocità che misurano solo la velocità effettiva in un determinato punto.















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Il sistema UnicamSPEED misura la velocità in un determinato punto utilizzando loop induttivi. CAMEA dispone anche di sistemi precisi per la classificazione del traffico e raccolta dati. La classificazione del traffico e la raccolta dei dati possono essere effettuate utilizzando diversi sensori *Unicam*, comprese le telecamere con rilevamento video e software ANPR / ADR, radar, circuiti induttivi, sensori di peso/posizione ecc. CAMEA ha sviluppato due tipologie di contatori del traffico avanzato estremamente precisi e affidabili, semplici da installare, e relativamente economici: *UnicamTC-L* e *UnicamATC*.

4.1.4.1 Componenti e caratteristiche tecniche del sistema W.I.M. CAMEA

Di seguito si riportano le componenti e le caratteristiche tecniche e prestazionali delle componenti del sistema *W.I.M. CAMEA* (Tabelle 17, 18, 19, 20, 21 e 22).

Tabella 17 – Componenti del sistema UNICAM

COMPONENTI DEL SISTEMA UNICAMW.I.M. Armadietto UC-CAB Dotato di diversi accessori (unità di riscaldamento, ventilatori, circuiti di protezione ecc). Installato su pali, o pareti o appoggiato a terra su gambe metalliche o supporti in cemento. Unità di elaborazione centrale UC-CPU Computer industriale con interfacce di comunicazione standard, supporto SSD rimovibile per super storage, ecc. Unità di misura UC-WLU Un'unità responsabile dell'amplificazione, della conversione analogico-digitale ad alta risoluzione e elaborazione avanzata del segnale digitale ottenuto da massimo 18 sensori di pesatura/posizione, 8 loop induttivi e 2 termometri stradali. Unità di commutazione Ethernet UC-ESU Composto da 8/16-porte, 1 router da 1Gb/s e switch con funzionalità Wi-Fi e 3G. Alimentatore UC-PSU Alimentatore con filtri di rete incorporati e interruttori automatici CA/CC. È gestibile da remoto con controllo on / off / reset e ingresso della sorgente di alimentazione. Unità di sincronizzazione UC-SU Unità in grado di uniformare il tempo preciso. Alimenta fino a 4 altri componenti del sistema, tra cui telecamere e unità di illuminazione a infrarossi. È gestibile da remoto. Unità di tempo satellite UC-STU Unità di tempo gestibile a distanza per una sincronizzazione temporale precisa e affidabile dell'intero sistema. Il tempo preciso viene preso dai satelliti GNSS (GPS / GLONASS).















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

Telecamera ANPR / ADR UC-D2

Fotocamera dedicata alla cattura di immagini dettagliate in bianco e nero dei veicoli (con un campo visivo ristretto) in una corsia (circa 3,5 m + 60 cm di sovrapposizione su ciascun lato).



Unità di illuminazione a infrarossi UC-IRU

Unità di illuminazione a LED ad alte prestazioni utilizzata con le telecamere ANPR / ADR per migliorare l'illuminazione dei veicoli.



Sensori di pesatura / posizione

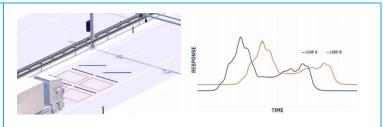
Sensori di pesatura basati sul principio quarzo/piezo.



Tabella 18 – Applicazione dei componenti del sistema UNICAM

CICLO INDUTTIVO

- Profilo magnetico del veicolo
- Rilevamento veicolo
- Classificazione
- Misura della velocità



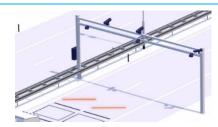
SENSORI DI PRESSIONE

- Misura del carico della ruota
- Misura della velocità
- Spaziatura tra gli assi
- Distribuzione del carico
- Conteggio degli assi

TIME

POSIZIONE DEI SENSORI

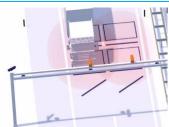
- Posizione laterale della ruota
- Rilevamento singolo/doppio dello pneumatico
- Impronta pneumatico
- Larghezza del veicolo



TELECAMERA ANPR (Automatic Number

Plate Re-cognition, Riconoscimento Automatico della targa)

- Lettura della targa
- Riconoscimento dei codici di ogni paese
- Classificazione















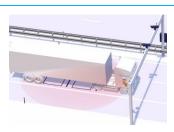


PPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

TELECAMERA PANORAMICA

- Immagine completa del veicolo
- Colore veicolo (di giorno)
- Identificazione veicolo



SCANNER 3D

- Forma del veicolo in 3D
- Misura della dimensione
- Classificazione
- Posizione laterale

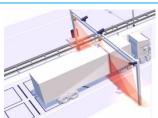


Tabella 19 – Specifiche di applicazione del sistema UNICAM

Applicazioni UnicamW.I.M.	Applicazione	Tolleranza δ [%]	Classe di precisione							
	Rinforzo	5-7	A(5) o B+(7)							
(peso lordo, livello di confidenza $\pi = 95\%$)	Preselezione	10-15	B(10) o C(15)							
	Statistiche	15-25	D+(20) o D(25)							

Tabella 20 – Specifiche di base del sistema UNICAM

Livello di	Range di	Peso lordo	Gruppo di assi, singolo asse,
confidenza	velocità		asse di un gruppo
$\pi = 95\%$	20 – 100 km/h	$\delta = 5 \% \ (>3.5 \ t)$	$\delta = 11 \% (1 - 20 t)$

Tabella 21 - Specifiche di base del sistema UnicamVELOCITY

Range delle velocità	1 - 250 km / h
Precisione	$\pm 3 \text{ km / h } (v < 100 \text{ km / h})$ $\pm 3\% (v \ge 100 \text{ km / h})$
Range della lunghezza della sezione	100 m - 10 km

Tabella 22 - Specifiche di base del sistema UnicamSPEED

Range delle velocità	1 - 250 km / h
Precisione	$\pm 3 \text{ km / h (v < 100 km / h)}$ $\pm 3\% \text{ (v } \ge 100 \text{ km / h)}$

4.1.4.2 Tipologie di installazione dei sensori

I sensori del sistema UNICAM possono avere tre configurazioni di installazione (Tabella 23):

- Installazione del sensore a due file con sensori al quarzo altamente precisi garantisce la massima precisione del sistema quando le condizioni stradali sono conformi alla Classe I Eccellente (come definito nella specifica COST323).
- Installazione del sensore a tre file consigliata per l'applicazione diretta, poiché un numero maggiore di sensori indica una pesatura della ruota più individuale che si traduce in una minore incertezza di misura.











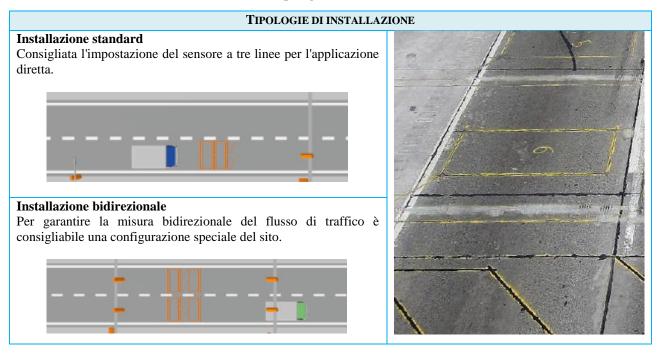




"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

■ Installazione di due sensori sfalsati permette una precisione inferiore e si attua per effettuare la preselezione e per scopi di acquisizione statistica.

Tabella 23 - Tipologie di installazione dei sensori



4.1.5 Sistema di pesatura dinamica W.I.M. International Road Dynamics

La società International Road Dynamics (IRD) produce sistemi di pesatura dinamica W.I.M. con sensori per diversi tipi di applicazioni: controllo del peso, pedaggio basato sul peso, raccolta di dati sul traffico, sicurezza e pesatura nei terminali merci.

Le tipologie di dispositivi W.I.M. IRD sono:

- Sensore piezoelettrico IRD-Roadtrax BL;
- Sensore a striscia W.I.M. Intercomp;
- *Bilancia SLC-IRD*;
- *Bending Plate IRD-PAT*.

Il rilevamento e l'analisi dei dati viene affidato ad un software multi-tasking iSINC.

Il *sensore piezoelettrico Roadtrax BL* può essere installato sia per applicazioni permanenti, posizionandolo direttamente all'interno di un piccolo solco/fessura (dimensioni pari a circa 19 x 25 mm) della strada, sia per applicazioni temporanee, fissato direttamente sul manto stradale (Figura 36 - 37). Grazie alla particolare flessibilità, tali sensori si conformano perfettamente al profilo stradale fornendo un segnale pulito, che si traduce in dati accurati relativi al numero di veicoli, alla velocità e ai dati W.I.M.

Il sensore BL è disponibile sia come sensore di Classe I, usato per le applicazioni W.I.M., sia come sensore di Classe II più economico utile ad effettuare il conteggio, la classificazione e il rilevamento della velocità. Entrambi i sensori di Classe I e Classe II sono disponibili in una varietà di lunghezze che va da 2 a 5,5 metri, con lunghezze dei cavi da 35 a 100 metri.















 $ilde{ ilde{S}}$ SISTEMA DI Р $oldsymbol{E}$ SA1Uka dil $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE $ilde{ ilde{U}}$



Figura 36 - Sensore piezoelettrico Roadtrax BL

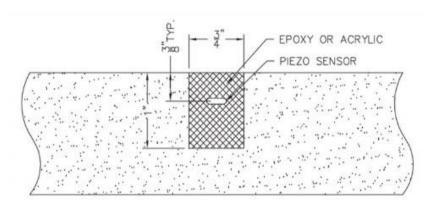


Figura 37 - Solco sul manto stradale per installazione permanente del sensore piezoelettrico Roadtrax BL

Tali sensori sono compatibili con tutti i contatori e i sistemi W.I.M. con ingresso piezoelettrico e hanno un design che permette di effettuare un conteggio più accurato dei veicoli che transitano (Tabella 24).

Tabella 24 - Specifiche tecniche del sensore piezoelettrico Roadtrax BL per installazione permanente su strada

Uniformità dell'uscita	\pm 20% per la Classe II (Classificazione), \pm 7% per la Classe I (peso in movimento)							
Intervallo operativo di temperatura	-40 a 70°C							
Tipico Livello di uscita	Il carico di una ruota di circa 180Kg produrrà un segnale di uscita minimo di 250 mV, a 21°C e 89 km/h							
Cavo del segnale passivo	RG58C/U con rivestimento esterno in polietilene ad alta densità, classificato per l'installazione diretta; 4,75 mm OD							
Capacità (classe II con cavo da 100)	$8.50 \text{ nF} \le C \le 14.50 \text{ nF}$							
Peso (classe II con cavo da 100)	1.36 kg							
Resistenza dell'isolante	>500 MΩ							
Installazione staffe	Ogni 150mm							

I sensori a striscia W.I.M. Intercomp utilizzano la stessa tecnologia degli estensimetri, che sfrutta i rapidi tempi di risposta e le ampie frequenze di campionamento per ottenere precisione e stabilità a lungo termine. I sensori a striscia Intercomp vengono installati nella carreggiata in fessure di 75 mm, riducendo i tempi necessari per l'installazione e la manutenzione. I sensori W.I.M. a striscia possono essere configurati in gruppi di 1, 2 o 3 paia di strisce, a seconda dell'applicazione e della precisione richiesta. Se combinati con telecamere, rilevatori e dispositivi per la trasmissione dei















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DIL $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

dati. Tali sensori possono essere utilizzati come stazioni di pesatura remote virtuali stand-alone. Il produttore IRD specifica che i sensori a *striscia Intercomp* sono in grado di soddisfare i requisiti di prestazione ASTM E1318 Tipo I, Tipo II, Tipo III e COST 323 A (5), B + (7) o B (10) (Figure 38-39 e Tabelle 25 -26).





Figura 38 - Sensore a striscia W.I.M. Intercomp e relativa installazione

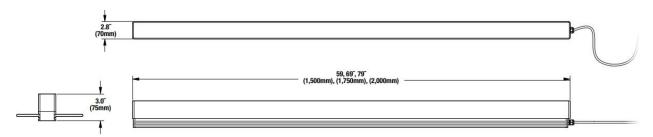


Figura 39 – Dimensioni del sensore a striscie Intercomp

Tabella 25 – Specifiche tecniche del sensore a striscie Intercomp

Lunghezza sensore	1,50 m	1,75 m	2,0 m					
Peso sensore (cavo non incluso)	22 kg	28 kg	35 kg					
Ampiezza sensore	70 mm							
Altezza sensore	75 mm							
Range di velocità del veicolo		129 km/h						
Range temperature di esercizio		-40°C a + 80°C						
Tipo di cavo	Cavo	a 6 conduttori con schermat	ura					
Lunghezza cavo	40m o 100m - lunghezza personalizzabile in base alle richieste del cliente							















 $ilde{ ilde{S}}$ SISTEMA DI Р $oldsymbol{E}$ SA1Uka dil $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE $ilde{ ilde{U}}$

Tabella 26 - Requisiti di prestazione ASTM e COST rispettati dal sensore a strisce Intercomp

Descrizione	ASTM 1318 ASTM 1318 Tipo III Tipo II		ASTM 1318 TIPO I	COST 323 A (5)	COST 323 B+(7)	COST 323 B(10)
Velocità (se applicabile)	16-130 km/h	24-130 km/h	16-130 km/h	non richiesto	non richiesto	non richiesto
Peso lordo del veicolo	±6%	±15%	±10%	5%	7%	10%
Carico gruppo di assi	±10%	±20%	±15%	7%	10%	13%
Singolo asse	±15%	±30%	±20%	8%	11%	15%

La *bilancia SLC* (*Single Load Cell*) *di IRD* effettua la pesatura dinamica a tutte le velocità, richiede pochissima manutenzione ed ha una lunga durata. Il componente di pesatura di tale bilancia è la *singola cella di carico* montata centralmente sulla corsia.

Ciascuna corsia di solito contiene due bilance (da 1,8 m) che consentono di pesare individualmente ciascun gruppo di ruote, asse per asse. Ogni bilancia viene montata su un telaio installato allo stesso livello della superficie stradale (Figura 40). La bilancia SLC è completamente impermeabile e funziona in tutte le condizioni atmosferiche e operative.



Figura 40 - Configurazione stradale della bilancia SLC

La bilancia SLC soddisfa o supera la specifica ASTM E1318-09 Tipo III fino alle tipiche velocità che si possono raggiungere su di una strada principale (Tabella 27).

Tabella 27 – Dati tecnici della bilancia SLC

Velocità (km/h)	Funzione	Accura	tezza (%)	Prestazioni (%) Tolleranza di tipo III ASTM				
		1σ	2σ	E1318-09 per conformità al 95%				
3-16	Carico della ruota	±4	±8	N/A				
	carico dell'asse	±2	±4	N/A				
	carico del gruppo di assi	±1.5	±3	N/A				
	GVW	±1	±2	N/A				
17-40	Carico della ruota	±6	±12	±20				
	carico dell'asse	±4	±8	±15				
	carico del gruppo di assi	±3	±6	±10				
	GVW	±2	<u>±</u> 4	±6				















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DIL $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

41-73	Carico della ruota	±8	±16	±20
	carico dell'asse	±5	±10	±15
	carico del gruppo di assi	±4	±8	±10
	GVW	±3	±6	±6
74-130	74-130 Carico della ruota		±16	±20
	carico dell'asse	±6	±12	±15
	carico del gruppo di assi	±5	±10	±10
	GVW	±3	±6	±6

NOTA: le condizioni del sito devono soddisfare le specifiche stradali identificate nell'ASTM E1318-09.

La manutenzione della bilancia a singolo carico è semplice in quanto la cella di carico può essere rimossa o riparata direttamente sulla superficie stradale.

I sistemi di pesatura dinamica *Bending Plate IRD-PAT* sono costituiti da piastre dotate di estensimetri (strain gauge), tecnologia collaudata e duratura (>10 anni) (Figure 41 - 42). Tale sistema è conforme ASTM tipo I e tipo III per velocità 0-200 km/h (Tabella 28).





Figura 41 – Configurazione stradale del sistema di pesatura $Bending\ Plate\ IRD\text{-}PAT$

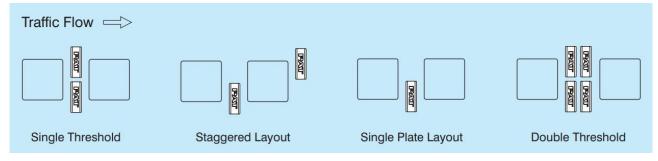


Figura 42 - Layout di possibili posizionamenti del Bending plate IRD-PAT















PPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Tabella 28 - Specifiche tecniche Bending Plate IRD-PAT

	WP 1250	WP 1550	WP 1750	WP 1750 15T	WP 1950	WP 1950 15T			
Peso	81kg	100kg	114kg	131 kg	127kg	146kg			
Dimensione del sensore	507x1250mm	507x1550mm	507x1750mm	507x1750mm	507x1950mm	507x1950mm			
Capacità nominale	10.000kg	10.000kg	10.000kg	15.000kg	10.000kg	15.000kg			
Capacità di sovraccarico	15.000kg	15.000kg	15.000kg	22.500 kg	15.000kg	22.500 kg			

L'elettronica del *software multitasking iSINC* dell'IRD costituisce il nucleo del sistema di gestione del traffico e dei sistemi di pesatura dinamica (W.I.M.). L'iSINC svolge moltissime funzioni ITS, dalla raccolta dei dati e dal monitoraggio del traffico all'automazione della stazione di pesatura (Figura 43). L'iSINC si collega con i sensori su strada, la segnaletica, lettori AVI (Automated Vehicle Identification - Identificazione automatica del veicolo), telecamere, sistemi di comunicazione e attrezzature personalizzate.

Le sue tecnologie modulari hardware e software sono configurabili, scalabili e affidabili, e possono essere applicati per:

- Stazioni di pesatura virtuale
- Raccolta dati sul traffico
- Monitoraggio del ponte
- Applicazioni ITS in tempo reale



Figura 43 - Versione compatta dello strumento ITS iSINC Lite

Tabella 29 - Caratteristiche delle diverse tipologie iSINC

Modello	Dimensioni HxWxD (mm)	a	b	с	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	0	р	q	r	s
iSINC Lite CE	150x265x280		X	х	х	10	9			х	х		х		х	х				x
iSINC SSR9U	445x334x318		х	х	х	10	6	2	4	х	х		х		х	х	х	х		
iSINC SSR9U CE	445x334x318		X	X	х	10	6		4	Х	х		х		х	х				х
iSINC SR12U	607x534x305		X	Х	х	20	12	8	48	X		х	op	op	X	х	х	x	X	
iSINC SR20U	966x534x458		X	Х	х	20	12	8	48	X		х	op	op	X	х	х	x	X	
iSINC TCSM	591x473x423	х	X	х	х	10	6	2	4	х	х		х		х	х	х	х		
iSINC TCSM CE	591x473x423	х	X	Х	х	10	6		4	Х	х		х		х	х				х
iSINC 336	1194x610x578	х	X	х	х	20	12	8	48	X		х	op	op	х	х	х	x	X	
iSINC 334	1702x610x826	х	X	х	х	20	12	8	48	х		х	op	op	х	х	х	x	x	
iSINC ERK	2058x559x635	х	x	х	х	20	12	8	48	х		х	op	op	х	х	х	x	х	

dove:

- **a.** Armadietto esterno;
- **b.** Temperatura di esercizio -40°C a +65°C;
- c. Umidità da 0% a 90% (senza condensa);















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{i}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

- d. Compatibile con i moduli iSINC;
- e. Numero massimo moduli iSINC;
- f. Numero massimo Pannelli I/O;
- g. Numero massimo segnale di uscita;
- h. Numero massimo input Dynax;
- i. Estensibile (più di 648 I/O per sistema);
- **j.** 36W AC/DC (120/240VAC, 50/60Hz);
- **k.** 90W AC/DC (120/240VAC, 50/60Hz);
- **l.** Batteria di riserva (non inclusa);
- m. Ricarica solare (pannelli/batterie non incluse);
- n. Terminazione I/O senza viti;
- **o.** Protezione I/O da sovratensione;
- p. Doppia uscita GFI service;
- **q.** Doppia uscita della sovratensione protetta AC;
- r. Doppia uscita seconda AC;
- s. Conforme a CE (IEC/EN61326-1) / RoHS
- op. opzionale

4.1.6 Sistema di pesatura dinamica W.I.M. KISTLER

I sistemi W.I.M. di Kistler "KiTraffic" raccolgono e processano i dati relativi al traffico al fine di misurare il volume del traffico, il carico degli assi e il peso totale, di facilitare l'identificazione dei veicoli sovraccarichi che viaggiano a diverse velocità, di contribuire a proteggere in modo affidabile le infrastrutture stradali e di aumentare la sicurezza stradale (Tabella 30).

Tabella 30 - Specifiche tecniche del Sistema KiTraffic (Modello 9841A)

Parametri	Perfomance
Numero di ingressi:	
Sensori W.I.M.	4 oppure 8
Ingressi digitali (loop)	4
Numero della linea di traffico	> 4
Numero di uscite: Ethernet	2 TCP/IP
Uscite digitali (trigger)	4 TCP/IP
Errore di misurazione con layout distribuito	±15 % di GVW
(2 sensori compatti Lineas W.I.M. per Corsia)	±15 % df G V W
Livello di confidenza della precisione di misura del peso	95%
Range di misura dei carichi per asse	$0 \div 25$ tons
	[55100] [lb]
Gamma di velocità	3 ÷ 250 km/h
Gainna di velocita	[2 ÷ 155] [mph]
Intervallo di temperatura di esercizio dell'elettronica	−20 ÷ 65 °C
	[–4 ÷ 149] [°F]
Montaggio (EN50045)	Modello TS-35 (guida DIN)
Ingresso dell'alimentazione	85 ÷ 264 VAC
Consumo di energia	<8 W















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ ELL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

Il *sistema W.I.M.* prodotto dalla casa costruttrice KISTLER, denominato *KiTraffic* (Modello 9841A), è composto dai *sensori Lineas W.I.M.* a quarzo (Modello 9195GC), posizionati sotto il manto stradale, dal *Data Logger W.I.M. di Kistler* (Modello 5204AC) (registratore di dati) e dall'*elettronica di supporto* Wist Kistler, grazie alla quale si effettua qualsiasi misura a differenti velocità, da 1 km/h fino ad oltre 250 km/h (Figura 44 - 45). Il sistema *KiTraffic* viene precablato su una guida DIN insieme al *Data Logger W.I.M.*, alla scheda a circuito di induzione, all'alimentazione e ai connettori. Il layout del sensore e la direzione del traffico possono essere configurati individualmente per ciascuna corsia.



Figura 44 - Sistema W.I.M. KiTraffic (Modello 9841A)

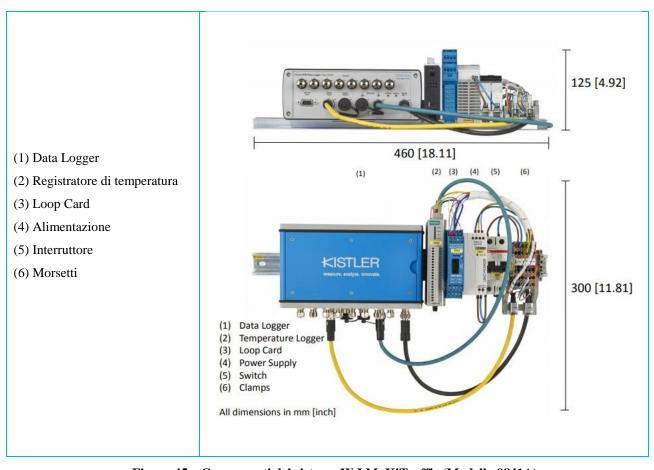


Figura 45 – Componenti del sistema W.I.M. KiTraffic (Modello 9841A)















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

Il sistema W.I.M. KiTraffic:

- effettua una pesatura accurata di veicoli a qualsiasi velocità con una precisione fino al 2,5% di GVW;
- è scalabile per il monitoraggio di qualsiasi numero di corsie;
- ha una tecnologia al quarzo per un'eccellente stabilità del sensore e durata;
- identifica completamente e automaticamente i veicoli sovraccaricati;
- è facile da integrare con i sistemi di controllo esistenti;
- è conforme ai requisiti COST 323.

4.1.6.1 Il sensore Lineas W.I.M.

Il sensore *Lineas W.I.M.* è basato su tecnologia a cristalli di quarzo e progettato specificamente per le applicazioni di pesatura in movimento (Figura 46). Una volta installato sotto il pavimento stradale e collegato al *Data Logger Modello 5204AC* (registratore dati) il sistema *W.I.M. Kistler*, misura i carichi di ruote e assi dei veicoli in qualsiasi condizione di velocità.

Il sensore *Lineas W.I.M.* è progettato per misurare i carichi su ruote e assi dei veicoli in transito sulla strada. Il sensore viene installato permanentemente sotto la superficie stradale. Una ruota che rotola sul sensore *Lineas W.I.M.*, applica forze verticali che vengono distribuite attraverso i cristalli di quarzo lungo il sensore. Gli elementi di quarzo producono un segnale di carica elettrica proporzionale alla forza applicata. La sensibilità del sensore è praticamente indipendente alle variazioni di temperatura, velocità e tempo (non presenterebbe effetti di invecchiamento). L'accuratezza misurata del carico delle ruote non viene influenzata dal tipo di pneumatico o dalla pressione degli pneumatici.

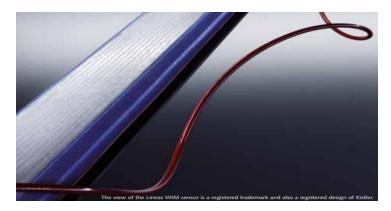


Figura 46 - Sensore Lineas W.I.M. con tecnologia a cristalli di quarzo

I sensori *Lineas W.I.M.* possono essere facilmente installati in qualsiasi tipo di pavimentazione. Grazie al design modulare (lunghezza 1,5 m, 1,75 m e 2 m), i sensori possono essere combinati in modo flessibile per coprire qualsiasi larghezza stradale. I sensori vengono inseriti in una piccola fessura della strada (profondità tipicamente di 20 mm) e incorporati completamente nella malta epossidica (Modello della malta 1000A1) (Figure 47-48-49).















GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

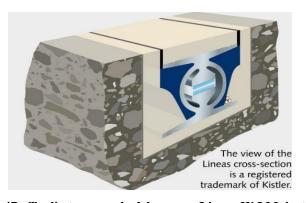


Figura 47 - Taglio trasversale del sensore Lineas W.I.M. installato

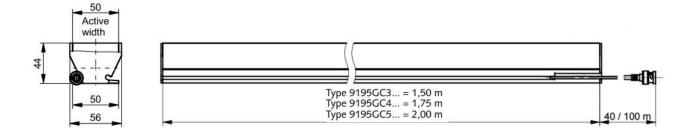


Figura 48 - Dimensioni del sensore Lineas W.I.M. (Modello 9195GC)

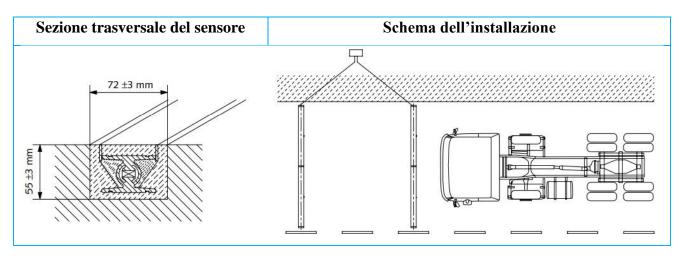


Figura 49 - Schema di installazione del sensore Lineas W.I.M. (Modello 9195GC)

Il sensore richiede la connessione al *Data Logger W.I.M. di Kistler*, che può coprire fino a 4 corsie. Il Data Logger W.I.M. converte i segnali elettrici di tutti i sensori *Lineas W.I.M.* e ricava informazioni sulla classificazione del veicolo (Tabella 31). Le misure di temperatura vengono effettuate per compensare le mutevoli caratteristiche della pavimentazione.

Le caratteristiche dei sensori Lineas W.I.M. (Tabella 32) sono:

- Ampia gamma di misure del peso e della velocità;
- Elevata precisione di misura;
- Design robusto;















"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

- Insensibili alle variazioni di temperatura;
- Installazione rapida e semplice su qualsiasi tipo di pavimentazione stradale;
- Eccellente rapporto qualità-prezzo;
- Tempo di vita esteso a causa dell'installazione nel sottosuolo;
- Tecnologia al quarzo;
- Conforme agli standard OILM (classe di precisione 2).

Tabella 31 - Caratteristiche elettriche del sensore Lineas W.I.M. (Modello 9195GC)

Parametri	Performance
Sensibilità	1,7 (±12%) pC/N
Sensibilità massima che cambia lungo il sensore	$< \pm 2\%$
Linearità	< ±1,0 % FSO
Resistenza di isolamento	$>1\cdot10^9 \Omega$
Capacità	
con 40 m di cavo	4 ÷ 16 nF
con 100 m di cavo	7 ÷ 25 nF

Tabella 32 - Caratteristiche operative del sensore Lineas W.I.M. (Modello 9195GC)

Parametri	Performance
Classe di precisione (OIML R134)	2%
massimo errore	±1%
Gamma di carico della ruota	$0 \div 150 \text{ kN}$
Area di contatto dello pneumatico di riferimento	200x320 mm
(lunghezza del filo x larghezza del filo)	
Capacità di carico sulla superficie del sensore	6 N/mm ²
Intervallo operativo di temperatura	–40 ÷ 80°C
Coefficiente di temperatura (sensibilità)	−0,02 %/°C
Lunghezza sensore	1,50/1,75/2,00 m
Lunghezza cavo	40/100 m
Peso (con cavo 40 m / 100 m)	
lunghezza del sensore: 1,50 m	7,4/8,3 kg
lunghezza del sensore: 1,75 m	8,3/9,2 kg
lunghezza del sensore: 2,00 m	9,2/10,1 kg
Grado di protezione (EN60529)	IP68

4.1.6.2 Elettronica del sistema Wist Kistler

Il *Data Logger W.I.M.* e l'elettronica del sistema *Wist Kistler* vengono precablati su una guida DIN, tipicamente all'interno di un armadietto vicino al sito W.I.M.. L'interfaccia web viene impiegata per la configurazione e la calibrazione del sistema, la visualizzazione dei dati di misura e il monitoraggio del corretto funzionamento del sistema. Inoltre, è disponibile un'interfaccia REST API (REST-REpresentational State transfer, API-Application Programming Interface) leggibile a livello macchina (Figura 50).















GRUPPO FS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL"

"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{u}$ LLL $oldsymbol{L}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

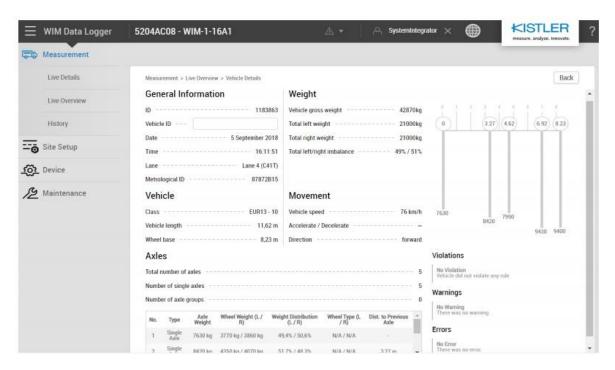


Figura 50 - Interfaccia web di Kistler

Il Data Logger W.I.M. Modello 5204AC in combinazione con i sensori Lineas W.I.M., oltre a consentire di monitorare il traffico e raccogliere dati precisi sui veicoli (Figura 51), presenta le seguenti caratteristiche:

- Elevata precisione di pesatura (certificazione OIML R134)
- Monitoraggio fino a 4 corsie di traffico
- Gestione del traffico stop & go
- Ampia gamma di velocità (0 ÷ 250 km / h)
- Campo di misura fino a 50 tonnellate di carico per asse
- Design compatto con amplificatore integrato
- Individuazione di pneumatici singoli o doppi
- Impostazione rapida grazie alla moderna interfaccia web
- Disponibilità di più lingue
- · Classificazione del veicolo



Figura 51 - Data Logger W.I.M.-Modello 5204AC

Il *Data Logger W.I.M.* è un'unità di elaborazione dati progettata per interfacciarsi con i sensori Lineas W.I.M.. Il Data Logger W.I.M. può fornire anche una soluzione personalizzata in base alle esigenze dell'utente finale (Tabelle 33 e 34). I sensori Lineas W.I.M. possono essere direttamente















IANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

collegati al Data Logger W.I.M.. Il Data Logger W.I.M. è disponibile nelle versioni con 4 o 8 canali per il monitoraggio di 1, 2, 3 o 4 corsie di traffico. Nei sistemi KiTraffic di Kistler, è possibile combinare più Data Logger W.I.M. per monitorare un numero virtualmente illimitato di corsie con un'unica interfaccia per l'utente finale. Ogni corsia può essere equipaggiata con 2 - 8 sensori Lineas W.I.M..

Tabella 33 - Caratteristiche tecniche del Data Logger W.I.M.-Modello 5204AC

Parametri	Perfomance
Campo di misura (carico per asse)	0 ÷ 50 tons
Gamma di velocità (senza stop & go)	3 ÷ 250 km/h
Gamma di velocità (stop & go)	0 ÷ 250 km/h
Intervallo operativo di temperatura	−20 ÷ 65 °C
Grado di protezione EN60529	IP61
Montaggio EN50045	Modello TS-35 (guida DIN)
Dimensioni AmpiezzaxAltezzaxSpessore	213x77x136 mm
Peso (4/8 canali)	1,5/1,65 kg
	FHWA-13
Classificazione del veicolo	EUR-13 RUS-12

Tabella 34 - Caratteristiche elettriche del Data Logger W.I.M.-Modello 5204AC

Parametri	Perfomance
Tensione di alimentazione	18 ÷ 30 VDC
Consumo di corrente (tipicamente)	
@18 V	210 mA
@24 V	150 mA
@30 V	120 mA

Grazie alle caratteristiche di precisione di misura in un ampio intervallo di velocità e alla capacità di interfacciare diversi dispositivi esterni tra loro, il Data Logger W.I.M. può essere utilizzato per diverse applicazioni:

- Raccolta dati sul traffico (ad esempio statistiche, conteggio e classificazione);
- Rilevamento del peso;
- Riscossione pedaggi (pedaggio automatico o manuale);
- Pesatura di camion industriali (monitoraggio del peso nei porti, impianti di calcestruzzo o altri impianti industriali);
- Rilevamento del sovraccarico per la protezione del ponte.

Con KiTraffic, è possibile installare ogni layout su un numero virtualmente illimitato di corsie (Figura 52).















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

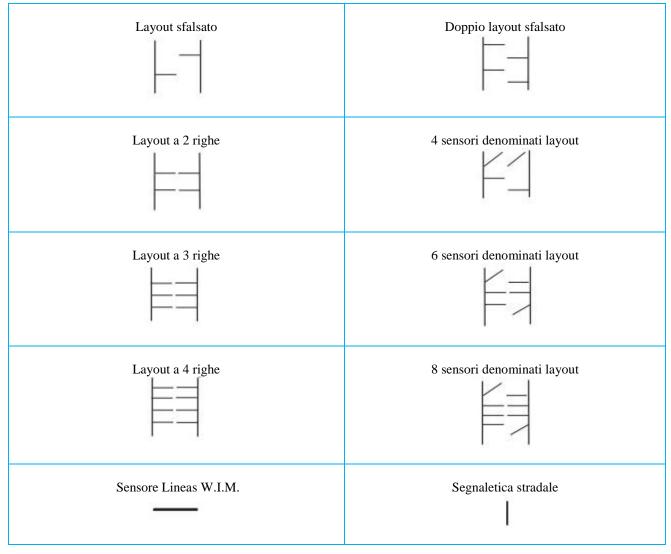


Figura 52 - Layout per una corsia

L'unità di controllo (interfaccia utente) è solitamente un computer situato in ufficio e collegato al Data Logger W.I.M. tramite cavo Ethernet o router wireless.

Esistono due opzioni per comunicare con il Data Logger W.I.M..

- 1. Tramite *l'interfaccia web di Kistler* (utilizzando un browser Web comune);
- 2. Tramite un'interfaccia leggibile dalla macchina.

L'interfaccia web di Kistler consente l'esecuzione delle seguenti attività (Figura 53):

- Configurazione del sistema (configurazione e calibrazione);
- Visualizzazione dei dati del veicolo (live e cronologia);
- Supervisione (rilevamento delle violazioni);
- Accesso alle informazioni e allo stato del sistema;
- Supporto remoto;
- etc.















GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



Figura 53 - Interfaccia Web Kistler

L'interfaccia leggibile dalla macchina si basa sull'interfaccia API RESTful che consente una comunicazione dei dati rapida e semplice e il controllo dei dispositivi di qualsiasi server della rete con il Data Logger W.I.M..

Il Data Logger W.I.M. genera una grande varietà di dati relativi ai veicoli in transito, come:

- Peso lordo del veicolo;
- Informazioni sull'asse (carico su ruota e asse, distanza dall'asse, numero di assi, ruota con pneumatici singoli o doppi);
- Velocità del veicolo;
- Lunghezza del veicolo;
- Direzione di marcia;
- Disequilibrio (differenza in % sinistra/destra);
- Tempo tra i veicoli (densità del traffico);
- Violazioni;
- Classificazione del veicolo.

Il Data Logger W.I.M. viene generalmente montato all'interno di un armadietto vicino al sito W.I.M. (Figura 54).















. GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

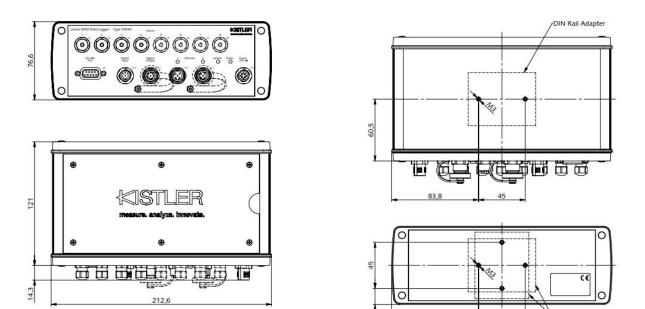


Figura 54 - Montaggio e dimensioni del Modello 5204AC

4.1.7 Il sistema di pesatura dinamica W.I.M. CROSS

L'azienda CROSS produce due sistemi *CrossW.I.M.* e *OptiW.I.M.* per il rilevamento del peso del veicolo in movimento ad alta velocità.

Il sistema *CrossW.I.M.*, impiegato per il rilevamento del traffico e la pesatura dinamica, è adatto per installazioni di base a singola corsia e multi-corsia con traffico intenso (Figura 55) e si adatta ai componenti SW e HW di terze parti.

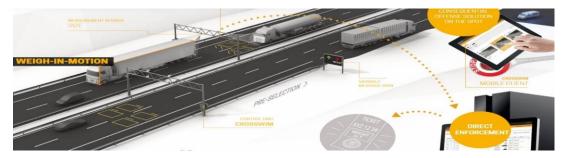


Figura 55 - Configurazione operativa del sistema W.I.M. CROSS

Il sistema CrossW.I.M. fornisce:

- Dati del veicolo (peso lordo del veicolo, carico per asse, carico della ruota, tipo / classe di veicolo, velocità del veicolo, gap, dimensioni del veicolo);
- Alta precisione sia per basse che per alte velocità;
- Rilevamento del veicolo sovraccaricato;
- Preselezione e applicazione diretta;
- Misura della dimensione del veicolo;
- Rilevamento di pneumatici gemellati;
- Limiti di peso configurabili dall'utente in base alla legislazione locale;
- Monitoraggio del traffico su strade a più corsie;















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

- Elevata precisione nella classificazione del veicolo;
- API Web per l'integrazione di dati di terze parti;
- SQL database.

I requisiti tecnici del suddetto sistema sono:

- Standard EN 8+1;
- EUR 13 e COST 323;
- Completo adattamento a possibili norme nazionali specifiche;
- Categorie personalizzate che riflettono esigenze e requisiti specifici del cliente/utente finale.

CrossW.I.M. è progettato come sistema modulare, per cui si possono configurare layout di posizionamento dei sistemi/sensori di rilevamento (Figura 56).

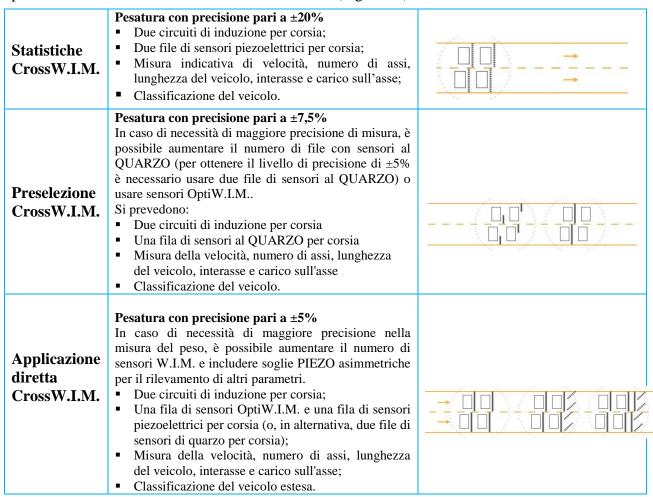


Figura 56 - Layout tipici di alcune configurazioni operative del sistema CrossW.I.M.

Una parte integrante del sistema *CrossW.I.M.* è la parte SW basata su Linux, database SQL e un'interfaccia Web che offre tutte le funzioni chiave per il monitoraggio, il controllo e l'impostazione del sistema. Le informazioni di sistema, i dati misurati in tempo reale e anche le statistiche vengono valutate on-line e sono facilmente accessibili tramite qualsiasi dispositivo abilitato a Internet (mobile).

Il modulo principale dell'applicazione web è il cosiddetto *Watchdesk*, una console, dove i veicoli pesati (misurati) vengono visualizzati in tempo reale (Figura 57). Inoltre, è possibile visualizzare tutte le informazioni come il numero di assi, peso dell'asse, peso della ruota, velocità della ruota (per vedere se ci sono state svolte o interruzioni).















GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



Figura 57 – Interfaccia Web CrossW.I.M.

L'interfaccia Web CrossW.I.M. permette di:

- Visualizzare in tempo reale i veicoli in transito inclusi LPR e panoramica delle istantanee della fotocamera;
- Accedere al database del veicolo, incluse funzioni di ricerca e filtraggio;
- Fornire informazioni dettagliate su ogni veicolo registrato (ad esempio peso totale del veicolo e persino peso della ruota e dell'asse, indicazione di sovraccarico, velocità, validità della misurazione);
- Fornire statistiche sul traffico (ad esempio veicoli sovraccaricati, classificazione, paese di origine
 Tabella 35);
- Visualizzare il protocollo di misura in caso di violazione;
- Esportare i dati in Microsoft Excel e PDF;
- Calibrare il dispositivo e configurare i parametri operativi;
- Gestire gli account utente, del database e le impostazioni regionali;
- Fornire API Web per l'integrazione dei dati;
- Fornire strumenti di calibrazione e manutenzione.

Tabella 35 - Statistica sul Traffico

















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

4.1.7.1 OptiW.I.M.

Il sistema OptiW.I.M. è un sistema notevolmente superiore rispetto al sistema CrossW.I.M. già esistente e permette di pesare accuratamente veicoli di tutte le dimensioni e pesi, indipendentemente dalla posizione istantanea delle ruote durante l'attraversamento. L'uso della tecnologia ottica consente di ottenere una quantità superiore dei dati in uscita forniti dal sensore durante ogni misurazione rispetto alla tecnologia convenzionale. Tale sistema è adatto anche per l'istallazione di base a singola corsia e a multicorsia (Figura 58). Per la sua soluzione unica, OptiW.I.M. è stato nominato per l'*Intertraffic Innovation Award 2018* nella categoria Infrastruttura.



- Pesatura con precisione pari a ±3%;
- Due circuiti di induzione per corsia;
- Una o due file di sensori OptiW.I.M. per corsia;
- Rilevamento multi-pneumatico;
- Misura della velocità, numero di assi, lunghezza del veicolo, interasse e carico sull'asse;
- Alta precisione nella classificazione del veicolo.

Figura 58 - Layout operativo e vantaggi Sistema OptiW.I.M.

Nello specifico OptiW.I.M., che si basa su tecnologia *a fibre ottiche*, fornisce la misura diretta della larghezza del veicolo, rileva le ruote gemellate, rileva gli pneumatici non gonfiati, è di facile installazione e manutenzione ed ha una durata di vita pari a 10 anni.

Il sistema richiede una forma a U per l'assemblaggio da collocare nella superficie stradale (Figura 59). Una volta installata la forma a U, la manutenzione e l'eventuale sostituzione dopo 10 anni di vita dei sensori consiste solo nel cambiare l'interno senza la necessità di altri interventi sulla superficie stradale.



Figura 59 – Configurazione ad U per l'assemblaggio da collocare nella superficie stradale

OptiW.I.M. utilizza un sensore che si basa sui cambiamenti della fibra ottica ed è anche un sistema di pesatura che in assenza di carico consente misurazioni accurate del peso dei veicoli su tutta la larghezza della strada indipendentemente dalla posizione istantanea della ruota durante l'attraversamento. Fornisce la valutazione del peso su tutta la lunghezza del sensore, il che significa che il valore registrato è lo stesso in qualsiasi parte della strada, indipendentemente da dove passi esattamente il veicolo.















. GRUPPO FS ITALIANE "LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"SISTEMA DI Р $oldsymbol{E}$ SATUKA DIL $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

Il sensore, con una compensazione delle variazioni di temperatura senza distorsioni, consente un'accurata valutazione del peso indipendentemente dalle condizioni meteorologiche attuali.

Il sensore OptiW.I.M. funziona esclusivamente secondo il principio ottico, senza componenti elettronici. Questa soluzione innovativa consente di ottenere una quantità sproporzionata di dati dal sensore durante ogni misurazione rispetto alla tecnologia convenzionale. OptiW.I.M. è totalmente passivo, con massima immunità alle radiofrequenze, ovvero la resistenza a un campo magnetico.

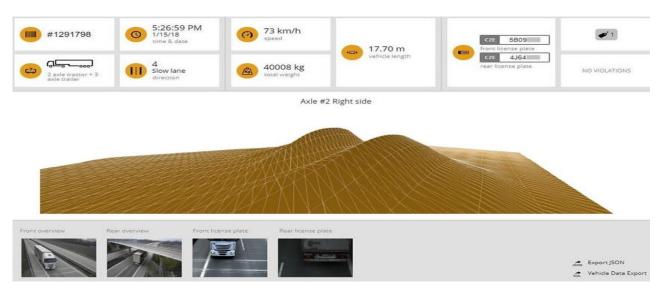


Figura 60 - Grafico del rilevamento di pneumatici gemellati sgonfi

Il sensore OptiW.I.M. può misurare direttamente la larghezza dell'asse del veicolo. È anche in grado di rilevare l'uso di gruppi a doppia ruota o la presenza di pneumatici sgonfi, anche in caso di doppio montaggio, separatamente (Figura 61).



Figura 61 – Configurazione degli pneumatici dei veicoli in transito

Dato che il sensore OptiW.I.M. non solo pesa i veicoli ma misura anche la loro larghezza, è anche in grado di determinare con precisione se i veicoli utilizzano correttamente la distribuzione del peso sui singoli assi. Il sistema è in grado di rilevare tali sovraccarichi e pneumatici non gonfiati, anche in caso di montaggio con pneumatici doppi separatamente.















. GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

4.2 Studi e ricerche sulle caratteristiche dei sistemi W.I.M.

4.2.1 Sistemi di pesatura in movimento per l'applicazione diretta

Nel 2013 è stato costituito un cluster ITS di Enti governativi polacchi, Università, Istituti di ricerca e aziende commerciali, con l'obiettivo di individuare le modalità efficaci di utilizzo dei sistemi di pesatura in movimento nell'applicazione diretta.

Il leader di questo gruppo è l'Università di Scienza e Tecnologia AGH, il gruppo comprende anche: l'Ispettorato generale dei trasporti stradali (IRT), l'Ufficio centrale delle misure (COM) e le società commerciali: Kistler, Kapsch Telematic Services Sp. z o.o., CAT Traffic Sp. z o.o. e TRAX Elektronik.

La necessità di utilizzare i sistemi W.I.M. per l'esecuzione diretta di massa è derivata da due evidenti motivi:

- bassa efficacia del sistema di controllo del peso statico del veicolo attualmente utilizzato,
- costi elevati sostenuti per lo sviluppo delle infrastrutture stradali e la conseguente necessità di proteggerli dagli effetti devastanti dei veicoli sovraccaricati.

La possibilità di implementare nella pratica sistemi W.I.M. per l'esecuzione diretta è subordinata alle seguenti condizioni:

- 1. Definire procedure dettagliate per la legalizzazione e il controllo metrologico dei sistemi W.I.M. (condizioni di prova);
- 2. Definizione dei requisiti tecnici per tali sistemi W.I.M.

Soddisfare entrambe le condizioni non risulta essere facile: il problema delle procedure di legalizzazione deriva dalle proprietà specifiche delle stazioni W.I.M., in cui una sezione della pavimentazione diventa parte di un sistema W.I.M. Un altro problema importante deriva dalle proprietà dei sensori di carico, che non possono essere calibrati in modo statico, e dal fatto che non esistono metodi comunemente approvati per determinare gli errori di sistema W.I.M.

Nei sistemi W.I.M. utilizzati per l'applicazione diretta, il problema della valutazione della precisione e della calibrazione del sistema, aumenta ulteriormente poiché l'efficacia dell'eliminazione dei veicoli sovraccaricati dal traffico è strettamente correlata all'accuratezza della pesatura. Ciò deriva dal fatto che i valori ammissibili di GVW e carichi per asse devono essere aumentati della quantità di errore di pesatura. Quindi, maggiore è l'errore di pesatura, più i veicoli meno sovraccarichi saranno eliminati dal traffico.

L'importanza di garantire una bassa incertezza dei risultati di pesata nei sistemi di controllo W.I.M. è stata studiata utilizzando i dati di misurazione ottenuti da un sistema W.I.M. installato in Polonia meridionale. A tale scopo è stato sviluppato un istogramma che illustra il numero di veicoli negli intervalli di peso lordo del veicolo, sviluppato sulla base dei risultati di misurazione raccolti (Figura 62). In Polonia il GVW ammissibile è di 40 tonnellate.















. GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

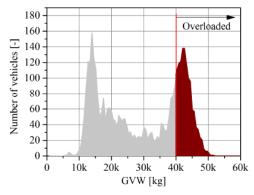


Figura 62 - Distribuzione del numero di veicoli in funzione del loro peso lordo

In tal caso i valori ammessi di GVW e carichi per asse devono essere aumentati della quantità di errore di pesatura. Tale procedura è necessaria in vista della necessaria precauzione di evitare che un veicolo caricato nei suoi valori nominali sia ritenuto erroneamente sovraccaricato. Di conseguenza, una parte dei veicoli che sono effettivamente sovraccarichi non sarà eliminata dalla strada. Pertanto, l'efficacia di un sistema W.I.M. risulta essere limitata (Figura 63). Infatti, dalla Figura 62 emerge la diversa precisione (2% e 10%) di due sistemi W.I.M. rispetto al numero di veicoli sovraccarichi (GVW> 40t). L'area ombreggiata rossa rappresenta i veicoli sovraccaricati che, a causa della suddetta correzione dei risultati di pesatura, non saranno eliminati dalla strada.

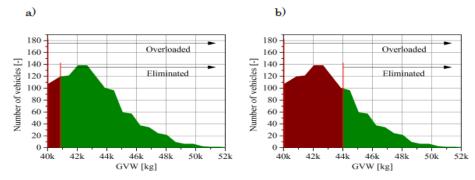


Figura 63 - L'influenza dell'accuratezza del sistema W.I.M. sull'efficacia dell'eliminazione dei veicoli sovraccaricati: a) l'errore di misurazione GVW 2%, b) l'errore di misura GVW 10%

Dai due grafici di Figura 63 risulta che, per garantire l'efficacia di un sistema di controllo del peso del veicolo, l'errore di pesatura non deve superare l'1÷2%. Inoltre, il sistema richiede frequenti verifiche successive a causa della sua non stazionarietà. Le pese a ponte, invece, consentono di determinare il GVW del veicolo con un errore non superiore allo 0,1%.

Per definire i requisiti tecnici per i sistemi W.I.M. da implementare è necessario:

- determinare il numero di sensori di carico e le loro reciproche distanze,
- determinare l'insieme dei disturbi che influiscono sulla precisione del risultato di pesata,
- determinare il sottospazio della variabilità ammesso di tutte le grandezze influenzanti. Se tutte le quantità di influenza sono contenute entro i limiti determinati, l'incertezza del risultato di pesatura è accettabile.
- sviluppare procedure che garantiscano l'accuratezza richiesta della pesatura, indipendentemente dalle manovre del veicolo durante il passaggio attraverso la stazione W.I.M..















 $ilde{ ilde{S}}$ SISTEMA DI Р $oldsymbol{E}$ SA1Uka dil $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{NE}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE $ilde{ ilde{U}}$

Per determinare il numero ottimale di sensori di carico, sono state realizzate serie di simulazioni per mezzo di Software multibody dinamico MSC Adams / Car.

In Figura 64 si rappresenta la relazione tra errore relativo del risultato di pesatura $\delta_{95\%}$ e il numero di sensori di carico. La *curva 1* rappresenta la situazione in cui l'incertezza di tutti i sensori è la stessa, la *curva 2* quando l'incertezza di ciascun sensore successivo è maggiore del 10% rispetto a quella del precedente e *la curva 3* quando l'incertezza aumenta del 20% da sensore ad un'altro sensore.

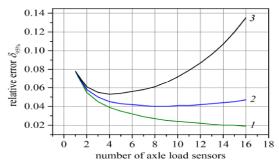


Figura 64 - Dipendenza dall'errore di pesatura del veicolo (GVW) dal numero di sensori di carico installati sul sito W.I.M.

Si rileva che nel $caso\ 2$ e $caso\ 3$ l'errore relativo $\delta_{95\%}$ ha un minimo per un numero specifico di sensori. Dopo aver superato il valore minimo, un ulteriore aumento del numero di sensori installati determina un aumento del valore di errore nel sistema W.I.M. Pertanto, non vale la regola secondo cui la quale la presenza di più sensori di carico possono dare una maggiore accuratezza nelle misurazioni. Di conseguenza è giustificato eliminare dai sistemi di applicazione i sensori di carico W.I.M. che presentano un'elevata variabilità dei risultati di pesatura.

Un altro importante problema tecnico da risolvere, deriva dall'elevata sensibilità dei sistemi W.I.M. ai parametri climatici, alle influenze ambientali e ai fattori direttamente associati al veicolo pesato e al suo comportamento nel sito W.I.M.

I fattori principali che hanno l'effetto più significativo sulla precisione del sistema W.I.M. comprendono le variazioni di temperatura della pavimentazione in cui sono installati i sensori di carico, la classe di pavimentazione, il bilanciamento verticale della massa sospesa del veicolo e il salto della ruota, la velocità del veicolo pesato, la variabilità di velocità durante il passaggio del veicolo sulla stazione W.I.M., la velocità e la direzione del vento, la formazione di ghiaccio superficiale ed le interferenze elettromagnetiche.

L'errore o l'incertezza nei sistemi W.I.M. variano a seconda dell'intensità dei suddetti fattori influenti. Non controllare la loro intensità al momento in cui il veicolo viene pesato, significa che non può essere determinata la precisione del risultato, quindi il risultato è inutile dal punto di vista amministrativo.

La soluzione a tale problema per i sistemi W.I.M. deve poter contemplare la determinazione sperimentale di mappe multidimensionali che descrivono l'errore del risultato di pesatura e la dipendenza dall'incertezza sui fattori influenti.

Tali mappe consentiranno di controllare l'incertezza dei risultati della pesatura monitorando l'intensità dei fattori influenti. Se i valori di questi fattori superano i limiti consentiti per la pesata richiesta, i risultati vengono considerati imprecisi e non possono essere utilizzati nelle procedure amministrative.















"SISTEMA DI P**E**SATUKA DIL**v**amica in**1** ell**I**GENTE PER LA GESTIO**NE** DE**L** TRAFFICO PESANTE"

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

Negli ultimi decenni per far fronte ai problemi e ai costi associati all'eccessivo peso dei veicoli, come, ad esempio, la necessità di pianificare la manutenzione stradale, di gestire il traffico delle merci, di proteggere il manto stradale dall'usura e di garantire la sicurezza stradale, sono state introdotte le nuove tecnologie di pesatura in movimento (W.I.M.). Tali sistemi W.I.M. sono in grado di misurare veicoli che viaggiano a velocità ridotta o normale e non richiedono che il veicolo si fermi. Ciò rende il processo di pesatura più efficiente e consente ai veicoli che rispettano il limite di peso di bypassare l'applicazione. Questi sistemi possono funzionare utilizzando diversi tipi di sensori, tra cui quelli a fibre ottiche, che risultano essere più affidabili e durevoli rispetto agli estensimetri e ai sensori piezoelettrici e notevolmente più economici.

Attualmente sono presenti sul mercato diversi tipi di sensori a fibra ottica, i quali si basano su due principi:

- Reticolo di Bragg (cambio di diffrazione in un canale sotto deformazioni);
- *Cambiamento delle proprietà delle fibre ottiche* (trasparenza, frequenza, fase e polarizzazione) a seguito delle deformazioni.

5.1 Principi di funzionamento dei sensori a fibra ottica per la pesatura dei veicoli in movimento

La funzionalità dei sensori a fibra ottica si basa sui cambiamenti dei parametri del segnale ottico dovuti alla deformazione della fibra ottica sotto il peso del veicolo in transito. Le misurazioni del sistema W.I.M. derivano in particolare dall'elaborazione della risposta della fibra ottica soggetta alla deformazione causata dal veicolo in transito: i segnali registrati quando un veicolo pesante transita sopra un gruppo di sensori a fibra ottica costituiscono gli input, che elaborati permettono di stimare il peso e gli altri parametri.

Il sensore a fibra ottica utilizzato per la stima del peso di veicoli consiste in un cavo costituito da fibre polimeriche fotoconduttrici rivestite con uno strato sottile riflettente la luce e posizionato nella fessura (larghezza di circa 30 cm) della strada, riempiti con gomma elastica (Figura 65 (b)).

Al passaggio del veicolo pesante, la deformazione indotta sul cavo determina un cambiamento alle condizioni del fascio di luce all'interno del cavo. Maggiore è il carico, meno luce arriva da un capo all'altro del cavo. Poiché la larghezza del sensore è inferiore all'impronta dello pneumatico sulla superficie, il sensore prende solo una parte del peso dell'asse.

Nei sistemi esistenti vengono utilizzati due metodi per calcolare il peso totale dell'asse:

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















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

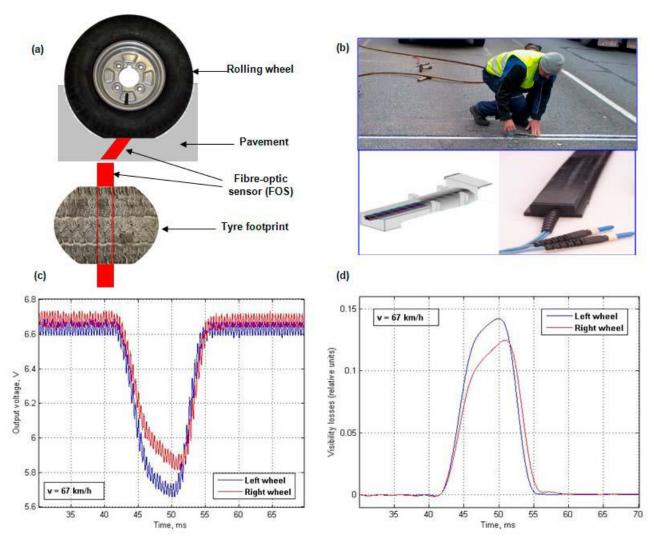


Figura 65 - (a) Posizione del sensore a fibra ottica rispetto alla ruota e all'impronta dello pneumatico, (b) SENSORLINE PUR installazione e costruzione del sensore;

(c) Tensione di uscita del sensore a fibra ottica;

(d) Perdite di visibilità come funzione della pressione dopo il pre-trattamento (filtraggio) [5]

In letteratura scientifica sono presenti dei lavori riportanti i risultati di sperimentazioni e studi di sistemi di pesatura W.I.M. con fibre ottiche, che saranno di seguito analizzati.

Sono stati realizzati diversi esperimenti di misura su strada con i sensori a fibre ottiche SENSOR LINE PUR (SENSORLINE GmbH., 2010) prendendo a riferimento un camion pesante (Figura 66), preliminarmente pesato sulla bilancia con precisione <1% (Tabella 36).



Figura 66 - Veicolo sperimentale "Volvo FH12" a pieno carico (36.900 kg)















"SISTEMA DI P**E**SATUKA DII**v**amica in**i** ell**i** gente per la gestio**NE** de**L** traffico pesante"

Tabella 36 - I pesi statici di riferimento

Data: 20.04.2012 (Temperatura dell'aria +12°C)						
Peso dell'asse di riferimento (tonnellate):	7,296	12,619	5,509	5,641	5,844	

I segnali di uscita dei suddetti sensori, nel caso di due diverse velocità del camion, rispettivamente a 70 km/h e 90 km/h, risultano modificati in ampiezza (Figura 67).

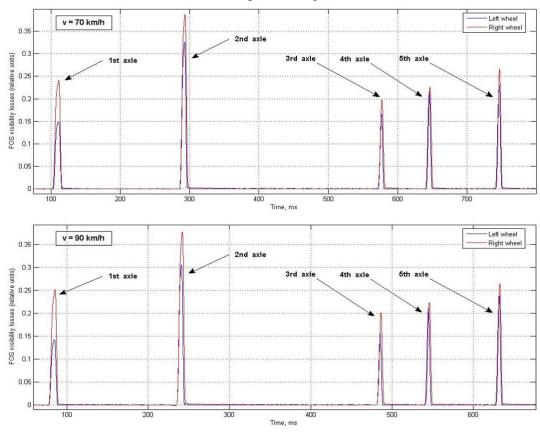


Figura 67 - Esempi di segnali FOS di veicoli sperimentali per velocità del veicolo rispettivamente di 70 e 90 km/h

Tale comportamento è riconducibile principalmente alle proprietà del sensore, dipendenti dalla forza-peso (pressione) lungo la lunghezza del sensore e dalla temperatura.

Esperimenti di laboratorio con parametri variabili (temperatura, larghezza della piastra di acciaio e velocità di carico) sono stati realizzati presso l'Institute of Polymer Mechanics (Università della Lettonia) con una macchina a compressione a controllo elettronico. Le variazioni dell'intensità luminosa in uscita del sensore a fibra ottica dovute alla forza verticale esterna applicata (peso) sono state misurate utilizzando l'interfaccia ottica SL MA-110 sviluppata da SensorLine GmbH.

Il primo esperimento ha permesso di analizzare la caratteristica del carico al variare della temperatura: il sensore è stato inserito nel tubo del materiale isolante termico morbido in cui circolava anidride carbonica refrigerata.

Una forza di compressione è stata applicata al sensore attraverso il tubo e una piastra di acciaio quadrata di 200 x 200 mm (Figura 68 (a)). Durante questo esperimento è stato rilevato che la risposta ottica del sensore stava cambiando a causa del riscaldamento, senza avere applicata alcuna pressione (Figura 68 (b)).















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

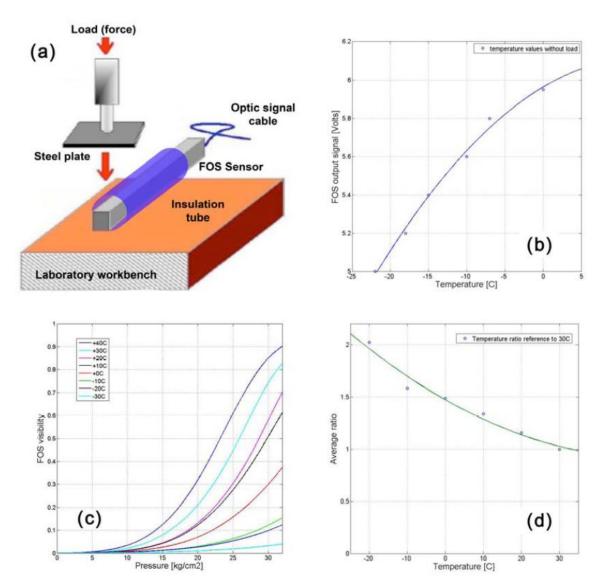


Figura 68 – a) regime sperimentale di attrezzature di laboratorio, (b) dipendenza dalla temperatura del FOS senza applicare il carico, (c) Caratteristiche del carico sensore a fibra ottica a diverse temperature e (d) Modello adattato di vari valori di rapporto caratteristico del carico di temperatura del sensore relativi a 30°C gradi

Il sensore a fibre ottiche è installato permanentemente sulla superficie stradale, pertanto le variazioni della temperatura dell'ambiente influenzano le caratteristiche della gomma di protezione (rigidità) e il mezzo in cui la luce propaga. Queste modifiche inducono distorsioni non lineari, che insieme alla pressione applicata esternamente sul sensore sono visualizzate nella Figura 68 (c). Nella Figura 68 (d) sono riportate le caratteristiche di carico alle diverse temperature.

Nell'ambiente reale si deve inoltre considerare il fatto che la larghezza dell'impronta dello pneumatico può variare a seconda delle dimensioni dello pneumatico e della pressione di gonfiaggio e quindi una diversa ridistribuzione della forza.

Il secondo esperimento, effettuato alla temperatura costante di 14 °C e velocità di carico costante di 20 mm/s, mostra questa relazione (Figura 69 (a)). Le relazioni tra le caratteristiche di carico ottenute utilizzando le diverse piastre in acciaio sono visualizzate in Figura 69 (b).









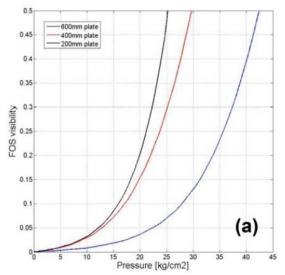






. GRUPPO FS ITALIANE "LERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



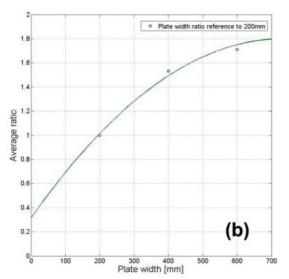
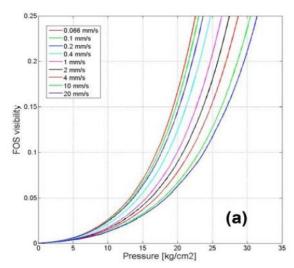


Figura 69 - (a) Caratteristiche del carico FOS con le diverse larghezze della piastra d'acciaio e (b) Modello montato di vari valori di rapporto di carico caratteristico della larghezza della piastra d'acciaio del sensore rispetto alla piastra d'acciaio 200x200 mm



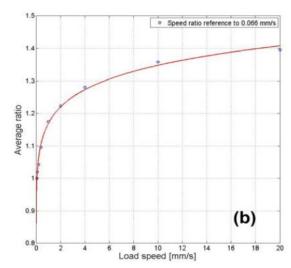


Figura 70 - (a) Caratteristiche del carico del sensore a fibra ottica a diverse velocità di carico e (b) Modello montato di diversi valori del rapporto caratteristico di carico della velocità di carico del sensore relativi a una velocità di carico di 0,066 mm/s

In considerazione del fatto che la reazione del sensore a fibre ottiche, per le sue proprietà di inerzia, varia in funzione della velocità dei veicoli che vi passano sopra, il terzo esperimento è stato dedicato allo studio della dipendenza del segnale di uscita dalla forza applicata alle diverse velocità (Figura 70 (a)), a temperatura costante 17°C e con piastra in acciaio di dimensioni 200 mm.

I sensori a fibre ottiche vengono utilizzati principalmente come rivelatori di veicoli a causa della complicata dipendenza di una serie di fattori (temperatura della superficie del sensore, area di impatto, larghezza dello pneumatico del veicolo, velocità di carico e velocità del veicolo).

L'insieme dei suddetti parametri di input rende relativamente problematico il compito di pesare in movimento usando detti sensori. I risultati di ricerca presenti in letteratura scientifica dimostrano che i fattori che maggiormente influenzano l'accuratezza della misurazione con sensori a fibre ottiche possono essere studiati e inclusi nei calcoli del peso degli assi.















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{u}$ ELL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

L'idea di normalizzare la tensione di uscita del sensore tramite il parametro di perdita di visibilità del sensore (da 1 a 0) aiuta ad evitare l'influenza dell'instabilità della sorgente di tensione statica e le condizioni di installazione del sensore sul pavimento.

I risultati sperimentali mostrano che l'intervallo di velocità dei veicoli da 50 a 90 km/h sembra essere più appropriato per i sistemi W.I.M. basati su sensori a fibra ottica.

5.2 Pesatura dinamica di veicoli che attraversano ponti usando sistemi W.I.M. con sensori a fibra ottica

I sistemi di pesatura dinamica (B-W.I.M.) dei veicoli che attraversano i ponti sono considerati un mezzo per raccogliere informazioni sul carico del traffico utilizzando un ponte esistente come bilancia per determinare il peso dei veicoli che lo attraversano. Grazie a questo sistema è possibile determinare la causa delle variazioni delle deformazioni e raccogliere informazioni per facilitare il controllo dei veicoli sovraccarichi. Assume un ruolo importante l'ottimale posizionamento dei sensori.

Attualmente non sono molto utilizzati i sensori a fibra ottica nei sistemi di pesatura dinamica, ma diversi sono gli studi e le ricerche su tali sistemi. L'applicabilità dei sistemi B-W.I.M. è attualmente limitata dal tipo di struttura del ponte e dalle difficoltà incontrate nel rilevamento degli assi per ponti rigidi o inclinati. In particolare, una ricerca si è concentrata sullo sviluppo e test in campo di un sistema B-W.I.M. su un ponte obliquo integrale con trave precompressa e costruzione di lastre in situ. Preliminarmente, è stata valutata l'idoneità della struttura prima dell'installazione del sistema nel sito.

Sono state condotte ricerche approfondite per dimostrare l'idoneità dei sensori a fibra ottica per la pesatura dinamica di veicoli pesanti in transito . Queste ricerche sono state effettuate su di un ponte che si trova nella località di Loughbrickland, Co. nell'Irlanda del Nord e forma un sottopasso per l'autostrada principale A1 che collega Dublino e Belfast, con una stazione di pesatura situata a meno di un miglio a nord del sito.

Il ponte ha una larghezza di 19 m e un angolo di inclinazione di 22,7°. La sovrastruttura consiste di 27 travi in calcestruzzo prefabbricato Y4 precompresso che supportano una lastra di cemento armato gettato in opera di 200 mm (Figura 71).









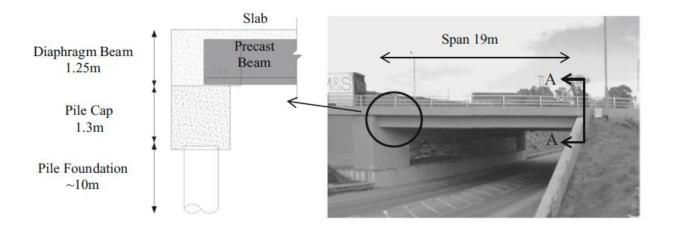






. GRUPPO FS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DIL $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"



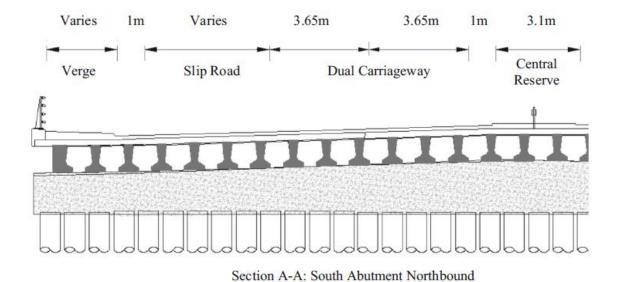


Figura 71 - Sezione ed elevazione della struttura del ponte in esame

Le linee guida per la selezione di un sito adatto per l'utilizzo del B-W.I.M. vengono delineate nel COST 323 e la relativa Tabella 3 delle specifiche raccomanda un disallineamento ottimale inferiore a 10°.

La posizione ottimale di installazione dei sensori di pesatura è stata individuata nel centro mezz'arco delle travi longitudinali (Figura 72).

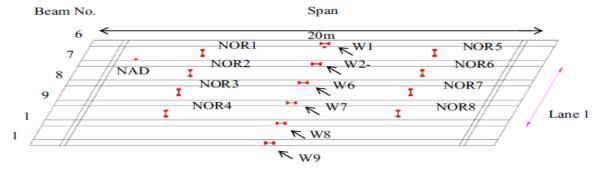


Figura 72 – Localizzazione dei sensori sul ponte [6]















. GRUPPO FS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

In questa ricerca è stata studiata e valutata l'idoneità dei sensori ottici per il rilevamento degli assi rispetto ai sensori elettrici che vengono tradizionalmente utilizzati nei sistemi B-W.I.M. commerciali (Figura 73).

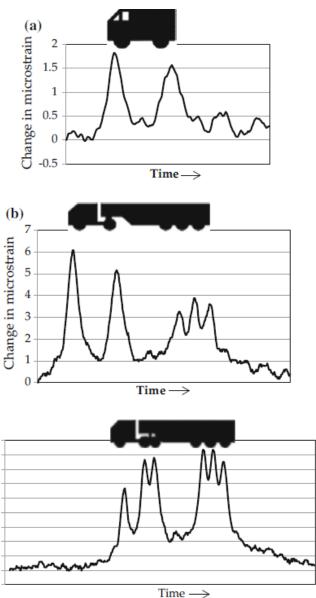


Figura 73 - a) Eliminazione del picco di rilevamento dal veicolo di classe 2: 1,78 e 2,07 t rispettivi pesi degli assi b) Rilevamento del picco da un veicolo scaricato di Classe 55 (21 t GVW)

c) Rilevamento del picco da un veicolo caricato di classe 56 (49 t GVW)

I risultati hanno dimostrato che il sistema B-W.I.M. con sensori a fibre ottiche permette di fornire dati accurati sul rilevamento degli assi. Tuttavia, questo metodo di rilevamento dell'asse dipende in larga misura dalla posizione trasversale del carico della ruota (Figura 74). Ad esempio nella Figura 74 (a) si visualizza un rilevamento chiaro dell'asse per un veicolo di classe 52 parzialmente caricato (22 t); mentre nella Figura 74 (b) si visualizza un rilevamento per un veicolo di classe 52 sovraccaricato (41 t) in cui né gli assi del tandem né i singoli assi di trazione sono distinguibili.



(c)

2 1 0

Change in microstrain













"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

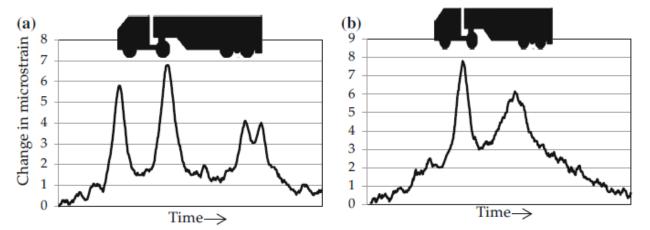


Figura 74 - a) Il rilevamento del picco dal carico della ruota del veicolo scarico di classe 52 si verifica sopra la lastra. b) Il rilevamento del picco spalmato dal carico della ruota del veicolo caricato di classe 52 si verifica al di sopra della trave

Per superare questo problema è stata valutata come strategia alternativa di rilevamento, ossia la misura della deformazione verticale sulle travi di sostegno (Figura 75 a).

I risultati del sensore NAD installato sul supporto hanno fornito picchi ben definiti (Figura 75 b), dai quali è possibile identificare chiaramente il camion a 5 assi, dimostrando che la deformazione a compressione misurata nella trave può essere utilizzata come metodo accurato per il rilevamento dell'asse.

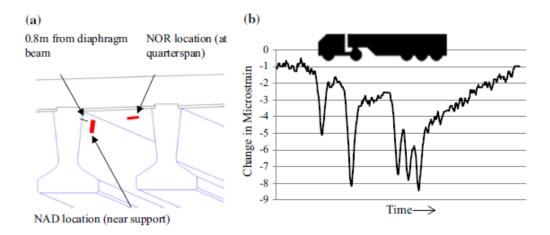


Figura 75 - a) Posizionamento del sensore NAD. b) Variazione della deformazione dovuta al camion a 5 assi misurato in questa posizione

Tale tecnica di rilevamento è stata opportunamente testata rilevando l'asse per un veicolo classe 55 scarico, in cui il secondo asse è significativamente più pesante del tridem posteriore e ben si evince dal segnale (Figura 76).

A rafforzare la validità di tale metodologia è stato effettuato un rilevamento su un veicolo classe 56 carico con 6 assi. Il segnale in uscita mette in evidenza tutti e sei gli assi, anche nel caso del gruppo ravvicinato alla parte anteriore del veicolo (Figura 76). Ciò dimostra che la deformazione a compressione misurata nella trave può essere utilizzata come metodo accurato per il rilevamento dell'asse.















LIANE 'ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

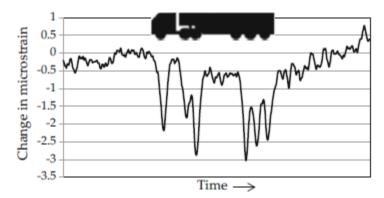


Figura 76 - Rilevamento di picco del veicolo con classe 56 carico utilizzando una nuova strategia per il rilevamento degli assi

Dai test effettuati è stato possibile individuare la classe di precisione (Tabella 37).

Tabella 37 - Classificazione di precisione Sistema B-W.I.M. con sensori a fibre ottiche⁸ [6]

Criterio	Numer o	Identificato (%)	Principale errore (%)	Deviazione standard (%)	δ (%)	π_0 (%)	π (%)	Classe
Peso lordo	6	100.0	-4.50	2.45	10	60.8	85.5	B (10)
Gruppo di assi	8	100.0	-6.14	5.79	18	71.5	86.1	C (15)
Singolo asse	28	97.0	-2.25	9.33	20	87.1	90.1	C (15)
Asse del gruppo	20	95.0	-2.11	9.81	20	84.9	85.9	B (10)

La precisione complessiva del sistema risulta essere C (15).

5.3 Sensore di pressione dinamico in fibra ottica basato sull'interferometro di Michelson

Sono stati effettuati studi sui sensori di pressione dinamici basati su fibra ottica per misurare il peso in movimento dei veicoli. In particolare, è stato sviluppato un interferometro di Michelson, con hardware e software appositamente progettati, sperimentalmente sottoposto a compressione di carichi dinamici di diverse grandezze e regimi di carico.

Gli esperimenti hanno dimostrato che è possibile ottenere sia il peso dinamico che il peso statico del veicolo in transito.

Attualmente vengono utilizzate diverse tecniche per la pesatura dei veicoli in movimento, utilizzando cavi piezoelettrici, i "tappetini" capacitivi, le celle di carico idrauliche e le bendingplate (o piastre di flessione). Le celle di carico idrauliche e bending-plate offrono un'elevata precisione (1÷5%) e una gamma dinamica, pur soffrendo di elevati costi di installazione e vincoli dimensionali. Le tecniche a "tappetino" piezoelettrico e capacitivo hanno sostanzialmente costi più bassi, ma sono meno precisi (5÷15%) e non funzionano correttamente a velocità inferiori a 20 km/h.

 $^{^{8}}$: Ampiezza dell'intervallo δ richiesto per soddisfare questa classe; $\pi 0$ livello minimo di confidenza richiesto; π livello effettivo di confidenza.















IS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Attualmente l'attenzione si è focalizzata sui sensori a fibre ottiche al fine di migliorare, integrare o addirittura sostituire quelli attualmente in uso.

Secondo le ultime ricerche sono stati sperimentate fibre ottiche a elevata polarizzazionemantenimento (HiBi) per la misura dinamica della pressione con conseguenze pratiche per la determinazione del peso in movimento dei camion, basate sull'effetto di accoppiamento di polarizzazione tra due autostati (<u>eigenmodes</u>) ortogonalmente polarizzati di fibra a mantenimento di polarizzazione.

Interessanti sono i risultati di ricerca relativi allo sviluppo di un sensore di pressione dinamico basato sull'interferometro di Michelson, che ha una struttura semplice, è economico e può potenzialmente offrire l'elevata precisione richiesta per molte applicazioni (Figura 77).

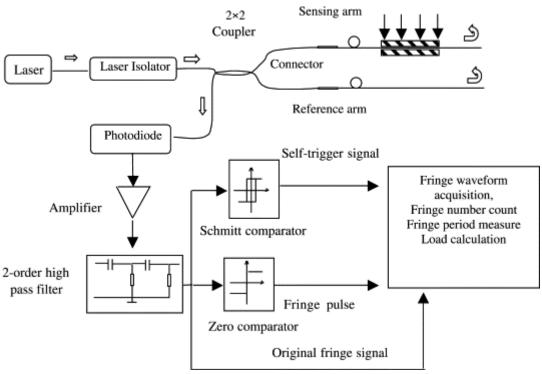


Figura 77 - Configurazione dinamica del sensore di pressione in fibra ottica

In tale sistema di pesatura la fibra ottica single-mode viene utilizzata come elemento sensibile per formare un interferometro di Michelson. I componenti optoelettronici dell'interferometro consistono in un laser operante alla lunghezza d'onda di 1550 nm, un isolatore laser e un fotodiodo. Il sensore è realizzato con fibra ottica per le comunicazioni (Corning SMF 28). Il segnale di uscita dal rivelatore-amplificatore viene dapprima inviato ad un circuito hardware speciale, che include un filtro passa alto di due ordini, un circuito di rilevamento del punto zero e un circuito di Trigger di Schmitt.

Sono previsti circuiti hardware progettati per implementare le seguenti funzioni:

- autodiagnosi del tempo di arrivo del veicolo per auto-innescare il processo di misurazione;
- fornire una funzione per eliminare i disturbi a bassa frequenza, come influenze della temperatura e variazioni lente delle prestazioni dell'elemento;















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

• fornire una funzione per ridurre il rumore a una banda di frequenza simile all'uscita utile della frangia dell'interferometro di Michelson. Una possibile fonte di questo rumore è causata dal passaggio di veicoli in una corsia vicina.

Poiché l'uscita dell'interferometro di Michelson sotto pressione è una frangia che può essere considerata un segnale ad alta frequenza rispetto al rumore causato da variazioni di temperatura, variazione delle prestazioni del laser e del diodo e altre influenze ambientali a bassa frequenza, è stato adottato un filtro passa alto di due ordini per eliminare quelle componenti a bassa frequenza. Un circuito di rilevamento del punto zero è stato progettato per cambiare la frangia sinusoidale in segnale a impulsi per il contatore nel sistema di acquisizione dati del computer al fine di contare il numero di frangia e misurare il periodo di frangia. La funzione di auto-trigger viene realizzata dal circuito di Schmitt. La tensione di soglia del circuito di Schmitt viene impostata in base agli esperimenti per distinguere il segnale di frangia reale causato dai veicoli e il segnale di pseudo-frangia causato da piccole vibrazioni nell'ambiente di prova.

In condizione di funzionamento operativo un braccio dell'interferometro di Michelson è soggetto a un carico dinamico di distribuzione e ad una deformazione. Misurando la deformazione della fibra, è possibile misurare la deformazione nel materiale epossidico.

Dalle prove sperimentali sono state estrapolati dei grafici che mettono in evidenza le relazioni tra le uscite del sensore e le ampiezze massime del carico con diverse velocità di carico (Figura 78).

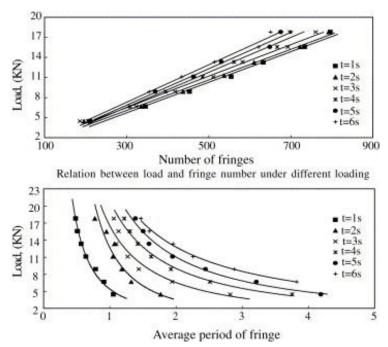


Figura 78 - I risultati sperimentali: i numeri di frangia e i periodi di frangia rispetto ai carichi

Il numero di frangia ha una relazione lineare con il carico statico, mentre il periodo di frangia ha una relazione non lineare.

La relazione differisce in base alle diverse velocità di caricamento, poiché con l'aumentare della velocità di caricamento, lo stesso carico di ampiezza massima si traduce in un carico dinamico più

⁹: In ottica ed in particolare nei fenomeni di interferenza e di diffrazione, ciascuna delle strisce o zone, rettilinee ed equidistanti oppure ad andamento più complesso, in cui appare suddiviso il campo di osservazione.















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

grande, che provoca l'aumento del numero di frangia e la diminuzione del periodo di frangia. Sebbene sia il numero di frangia che il periodo di frangia siano sensibili al carico dinamico, i loro range sensibili sono diversi. Quando il carico è basso, il piccolo cambiamento del carico dinamico potrebbe non essere riconosciuto dal numero di frangia.

Tre risultati sperimentali sotto le stesse condizioni di carico sono confrontati in Figura 79 e dimostra che il sensore dinamico di pressione in fibra ottica ha una buona ripetibilità.

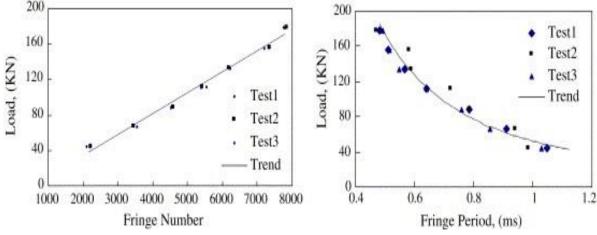


Figura 79 - Ripetibilità del sensore a fibra ottica

In base al numero di frangia e al periodo di uscita del sensore a fibra ottica, il carico dinamico e il carico statico del veicolo transitato possono essere ottenuti dal processo di calibrazione.

Gli esperimenti mostrano che sia il numero di frangia di uscita che il periodo di frangia possono essere utilizzati per indicare il carico, e poter ottenere sia il peso dinamico che il peso statico del veicolo in transito. I risultati ottenuti da questi studi hanno sviluppato una comprensione per il comportamento del sensore interferometro in stati di compressione dinamica e sono fondamentali per l'applicazione di questo tipo di sensore per monitorare i pesi del veicolo in movimento.

5.4 Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche

I sistemi W.I.M. basati su fibra ottica offrono la possibilità di misurare carichi dinamici reali attraverso l'utilizzo di sensori oggi largamente utilizzati grazie alla leggerezza, alle dimensioni ridotte, a nessuna richiesta di alimentazione elettrica nel punto di acquisizione, dalla capacità di multiplexing per formare reti di rilevamento (più sensori possono trovare posto lungo la stessa fibra), alla velocità ed immunità alle interferenze elettromagnetiche, alla possibilità di integrazione in ambienti ostili, alta capacità di larghezza di banda, basso costo, elevata sensibilità, capacità di sensing remoto.

Tuttavia tali sensori però non sono immuni alle perdite. Queste perdite si possono classificare in quelle che deformano il segnale d'ingresso generando quindi dispersione e in quelle che ne riducono la potenza generando quindi attenuazione. Le perdite per attenuazione possono essere raggruppate in due categorie:

- perdite dovute alla realizzazione tecnologica (diffusione, assorbimento, perdite per curvature (microbending))















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satura dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{L}$ Gente per la Gestio $oldsymbol{NE}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

- perdite dovute all'interconnessione tra fibre ottiche (differenza fra gli indici di rifrazione, differenza tra apertura numerica, differenza tra i diametri del core, perdite per errori di disassamento o disallineamento assiale, perdite per errori di separazione o accostamento, perdite per errori di disallineamento angolare).

I fenomeni che determinano le dispersioni delle fibre ottiche sono invece la dispersione modale, del materiale e di guida d'onda.

Altri svantaggi sono la bassa precisione della misurazione del peso (in particolare del peso in movimento) e dell'elevata dipendenza dalle condizioni meteorologiche. Tutte queste problematiche sono state oggetto di studio ed in parte risolte grazie allo sviluppo di particolari metodi di calcolo ed algoritmi.















TALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

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

I sistemi di monitoraggio si compongono di più parti, ognuno scelto in base alle esigenze di installazione e di funzionalità. Un esempio di esigenza fondamentale da valutare in base al contesto operativo è la scelta del canale di comunicazione tra i dispositivi di misura e il sistema di raccolta dati: si deve scegliere un mezzo ed un protocollo di comunicazione in base al tipo di ambiente da monitorare (indoor, outdoor, presenza di ostacoli, logistica), alle caratteristiche del monitoraggio (real time, con o senza attuazione), ecc.

Il contesto operativo è normalmente quello di una serie di sensori eterogenei situati sul campo che monitorano variabili ambientali/operative e che comunicano questi dati (in maniera sincrona o asincrona in base al tipo di applicazione) ad un sistema centrale che li espone verso gli utenti questi dati in maniera omogenea e interoperabile. La comunicazione tra i sensori e quella tra i sensori e il sistema centrale è il punto fondamentale da dirimere nella costruzione dell'architettura del sistema ICT.

Le soluzioni possono essere wireless o wired ed esistono architetture e soluzioni specifiche in entrambi i casi. Non esiste una soluzione ottimale generale ma come accennato devono essere valutate tutta una serie di caratteristiche tecniche, prestazionali ed anche economiche. In tal modo è possibile soddisfare al meglio le esigenze del monitoraggio al minor costo possibile per garantire la sostenibilità a lungo termine del sistema che si andrà a realizzare.

Nel caso specifico del sistema SENTINEL si dovranno valutare quindi sia la logistica delle installazioni che le caratteristiche degli strumenti e dei sistemi (sia quelli che verranno sviluppati nel progetto sia quelli proprietari di terze parti) che andranno a comporre il servizio. In generale comunque esistono alcune tipologie standard di architetture per le reti di monitoraggio che verranno descritte nei prossimi capitoli e che saranno la base della progettazione dell'infrastruttura SENTINEL.

6.1 Architettura a BUS

Generalmente nel campo delle comunicazioni quando si costruisce una architettura che connette molti sensori anche eterogenei si parte dal concetto di BUS (Basic Utility System) ovvero del canale di comunicazione che permette a periferiche e componenti di un sistema elettronico di dialogare tra di loro e di scambiarsi dati attraverso dei segnali. A differenza delle connessioni point-to-point, un singolo BUS può collegare tra di loro più dispositivi.

L'approccio tradizionale al cablaggio di un tipico sistema di controllo e monitoraggio è mostrato in Figura , in cui i vari sensori (e/o attuatori) del sistema sono collegati direttamente al controllore posizionato in un locale tecnico. Questo approccio di collegamento a stella però presenta numerosi svantaggi, perché è necessaria la posa di numerosi cavi e, nel caso di soluzioni outdoor, questa soluzione è spesso difficilmente realizzabile.















GRUPPO FS ITALIANE "ERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

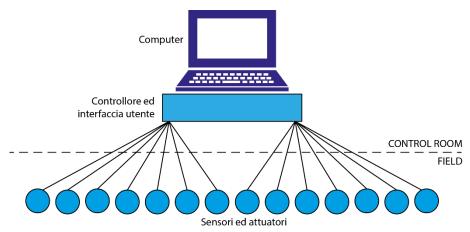


Figura 80 - Approccio standard nei sistemi di automazione

Un altro approccio che si può adottare è il DCS o Sistema di Controllo Distribuito (Figura 81), nel quale il controllo è parzialmente distribuito su diverse schede, dove ciascuna realizza più anelli di controllo. Le schede possono essere posizionate più o meno vicine ai sensori o al sistema centrale, ma devono comunque essere collegate a stella ad un computer che le gestisce.

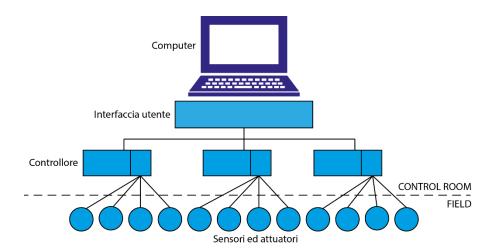


Figura 81 - Sistema di controllo distribuito

Un ulteriore topologia applicabile è quella del sistema BUS, dove il controllo è completamente distribuito e gli anelli di controllo sono realizzati nei singoli dispositivi (Figura 82). Questo tipo di sistema è decentralizzato e, con un singolo cavo, si possono connettere molteplici dispositivi di misura e controllo.















GRUPPO FS ITALIANE ZERCA E SVILUPPO SENTINEL

"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

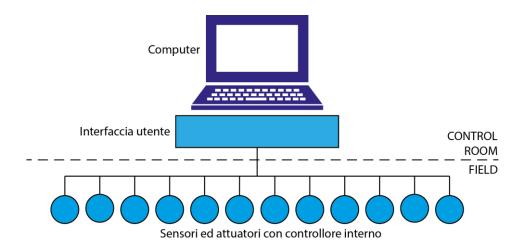


Figura 82 - Sistema BUS

Il concetto di BUS deriva dal settore industriale, nel quale la richiesta della tecnologia BUS è nata dal desiderio di passare dalle vecchie strategie di controllo centralizzate ad un controllo distribuito. Il sistema BUS permette una interoperabilità a livello di campo tra i dispositivi, così da abbattere i costi di installazione ed aumentare la flessibilità del sistema a nuovi upgrade. Il BUS è stato sviluppato principalmente per:

- Sostituire il vecchio sistema analogico di scambio informazioni '4-20 mA' con uno digitale;
- Controllare allarmi ed altre funzionalità distribuite a livello di campo;
- La interoperabilità, cioè la flessibilità di aggiungere o sostituire dispositivi nella rete BUS con altri di altri costruttori, senza perdere in funzionalità;

Il BUS è quindi un mezzo di trasporto dei dati che può essere realizzato con diversi supporti fisici (doppino, onde convogliate, fibra ottica, etc...). Su di esso vengono trasmesse informazioni (messaggi) in maniera sequenziale, da un dispositivo del sistema a tutti gli altri. Un dispositivo per volta è abilitato a trasmettere, mentre gli altri (o almeno quelli che hanno la funzione di ricevere) sono in stato di ricezione. Nel caso di sistemi BUS orientati al nodo, quando un dispositivo trasmette un messaggio, tale messaggio deve contenere sia l'indirizzo del dispositivo (o del gruppo di dispositivi) di destinazione, sia quello del mittente (oltre ai dati e ai vari controlli). Il dispositivo di destinazione è l'unico che, riconoscendo il proprio indirizzo, interpreta il messaggio ed esegue eventuali azioni richieste.

6.2 Wireless Sensor Network

Un approccio diverso da quello descritto nei capitoli precedenti e che si è sviluppato in parallelo alla tecnologia wireless e dei sistemi embedded, è quello che si basa su sensori distribuiti collegati in reti wireless. Le cosiddette Wireless Sensor Network (WSNs) hanno iniziato ad essere utilizzate in moltissimi campi, dal monitoraggio ambientale fino all'automazione.

Con il termine Wireless Sensor Network (o WSN) si indica una determinata tipologia di rete che, caratterizzata da una architettura distribuita, è realizzata da un insieme di dispositivi elettronici autonomi in grado di prelevare dati dall'ambiente circostante e di comunicare tra loro.















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Una WSN può quindi essere definita come un insieme di nodi wireless interconnessi (anche detti nodi sensori o mote), aventi poca RAM e una CPU con prestazioni relativamente basse. La struttura di una WSN prevede solitamente diversi nodi sparsi in un ambiente, che inviano periodicamente dati rilevati tramite sensori (e a volte anche processati) ad uno o più nodi speciali della rete, detti nodi *sink*, i quali hanno lo scopo di raccogliere i dati e trasmetterli ad un punto di raccolta, chiamato gateway, il quale gestisce la rete, raccoglie i dati dei nodi e li inoltra ad un altro sistema remoto per ulteriori elaborazioni. Una comunicazione può avvenire autonomamente da parte del nodo quando si verifica un dato evento, o può venire indotta dal nodo sink tramite l'invio di una query verso i nodi interessati.

6.2.1 La storia delle WSNs

La prima rete wireless che è possibile definire come WSN è conosciuta come *SOSUS* (Sound Surveillance System). La rete SOSUS è stata sviluppata per rilevare i sottomarini sovietici dalla Marina Militare statunitense negli anni '50 ed è composta da una serie di idrofoni sparpagliati nell'Oceano Atlantico e nel Pacifico.

Nei primi anni '80, il DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) sponsorizzò la creazione di Distributed Sensor Network (DSN) per determinare se protocolli TCP/IP, insieme alla rete ARPA, potessero essere usati come reti di sensori. Le DSN prevedevano diversi nodi autonomi equamente spaziati, in grado di collaborare tra loro, il cui obiettivo era quello di raccogliere i dati in nodi che potessero utilizzare al meglio quelle informazioni. Le applicazioni delle DSN erano il calcolo distribuito, il signal processing e il tracking. I componenti di queste reti erano sensori acustici, protocolli di comunicazione di alto livello, algoritmi di calcolo e software distribuito.

Negli anni '80 e '90 furono sviluppati i primi prodotti commerciali derivanti dalla tecnologia delle DSN che, proprio in funzione della commercializzazione, erano caratterizzati da un costo minore ed inoltre portarono all'implementazione dei primi standard di comunicazione per garantire un'ampia compatibilità con i sensori già esistenti. Tali reti di sensori erano adoperati in situazioni di *network-centric warfare*, ovvero in ambienti in cui i sistemi d'arma dovevano cooperare tra di loro scambiandosi informazioni sull'obiettivo. I sensori infatti erano in grado di tracciare obiettivi multipli, anche molto distanti e con ottimi tempi di risposta. Esempi di questa tecnologia erano le reti di radar per rilevare obiettivi aerei, reti di sensori acustici negli oceani per rilevare sottomarini e reti di sensori schierate sul campo di battaglia.

Dopo l'evoluzione tecnologica degli anni '90 e dei primi anni del 2000, si è giunti ad una nuova generazione di sensori, che può essere definita come seconda generazione di prodotti commerciali. Il progresso ha consentito lo sviluppo di tecnologie ad alta densità come i MEMS e i NEMS (Nanoscale Electromechanical Systems). La standardizzazione è diventata un fattore determinante per la diffusione delle WSN e la nascita di sistemi Bluetooth, WiFi, W.I.M.ax e ZigBee abilitano la connettività totale. Tutto ciò, insieme a nuovi processori a basso costo e basso consumo energetico, consente oggi di adoperare le reti di sensori per molteplici applicazioni. La ricerca nelle soluzioni commerciali si sta muovendo verso la definizione di topologie di rete mesh, peer-to-peer e cluster-tree, di standard di sicurezza e di profili di applicazioni comuni.















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

6.2.2 Funzionamento di una rete WSN

Le reti WSN sono un insieme di nodi paragonabili a piccoli computer. Questi piccoli device lavorano in maniera cooperativa per formare un unico network. La topologia di questo network può essere diversa (lineare, a stella, mesh) a seconda delle esigenze specifiche del contesto applicativo. Nella WSN acquisizione e trasmissione sono normalmente compiute in 4 passi:

- 1. acquisizione del dato da parte dei sensori;
- 2. data processing;
- 3. impacchettamento dei risultati;
- 4. trasmissione del dato.

Le componenti basilari di una rete per un sistema di questo tipo sono:

- un insieme di sensori distribuiti in una area
- una rete di interconnessione (wireless nel caso in questione)
- un punto di raccolta dei dati
- un insieme di risorse computazionali con prestazioni medio elevate nel punto di arrivo dei dati della rete al fine di effettuare data logging, correlazioni dei dati, elaborazione, monitoraggio dello stato etc..

La Figura 83 mostra in maniera schematica questo concetto, in cui sono tre gli elementi fondamentali di questa architettura: nodi sensori, gateway, e sistema di gestione.

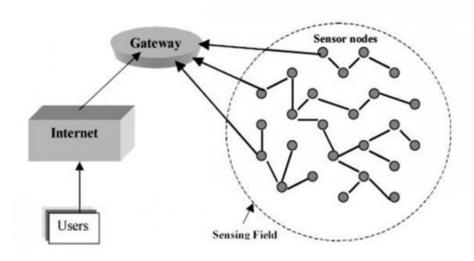


Figura 83 - Wireless Sensor Network (WSN)

6.2.2.1 Nodo Sensore (mote)

Il nodo sensore è l'unità base di ogni WSN. Un nodo sensore (detto anche mote) è un piccolo dispositivo autonomo a basso consumo che pur avendo risorse energetiche limitate, ha capacità di elaborazione multithread ad un costo decisamente ridotto.

Il nodo sensore è costituito da:

- una o più unità di rilevamento necessarie per il monitoraggio dell'ambiente circostante e delle sue condizioni come l'umidità, la pressione e la vibrazione;
- una unità di elaborazione (embedded CPU);















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

- una unità di trasmissione.

Dopo aver completato il monitoraggio e processi di rilevamento attraverso le sensing unit, tutte il processing necessario è eseguito dalla CPU embedded. Inoltre, i dati ambientali calcolati vengono trasferiti dall'unità radio attraverso i canali di comunicazione wireless tra i nodi. Da ultimo, questi dati vengono inviati verso il Gateway.

Le componenti principali di un nodo sensore di una WSN sono (Figura 8):

- Unità di alimentazione: fornisce energia alle varie parti del componente (sensore, unità di elaborazione e trasmissione). Se l'unità non può essere collegata direttamente ad una rete elettrica è necessario utilizzare batterie (insieme a sistemi di energy harvesting) o celle solari che permettano il funzionamento continuo del sistema. Poiché le risorse energetiche sono limitate e l'energia è fondamentale per eseguire tutti i compiti. Pertanto, ogni nodo spende fino al 99% del proprio tempo in modalità sleep per risparmiare energia e si accende solo il tempo necessario per registrare, inviare e/o ricevere dati.
- *Microcontrollore*: l'unità di processing è composta tipicamente da una CPU, una memoria e una serie di connettori per connettere i sensori ed eventuali unità esterne. Le sue funzioni sono quelle di gestire l'attività del nodo secondo le specifiche del progettista (i programmi di gestione sono sviluppati ed elaborati in laboratorio e quindi ne viene fatto il deploy sulla memoria del microcontrollore) dalla fase di wake up del sistema, alla acquisizione e all'impachettamento dei dati per l'invio all'unità di trasmissione fino al ritorno alla modalità sleep per esigenze di energy saving.
- Sensori: sono la parte cruciale di una WSN. Convertono le variabili ambientali osservate in segnali elettrici compatibili con il sistema elettronico. Negli ultimi decenni c'è stato un velocissimo avanzamento nello sviluppo di sensori e trasduttori (tecnologie MEMS, LED CMOS, etc) con miglioramenti incredibili in termini di efficienza, miniaturizzazione, capacità e costo. Questi progressi hanno reso i sensori ampiamente utilizzati sia in ambito industriale che anche in ambito privato basti pensare al settore della home automation dove ormai sensori di temperatura, umidità, luminosità o presenza sono considerati parte integrante di un sistema di gestione di una abitazione.
- *Trasmettitore*: è il componente responsabile per la comunicazione wireless tra i nodi. Ha quattro stati operazionali di base: *Receive, Transmit, Idle* e *Sleep* e può operare a Radio Frequenza, Infrarosso o Laser. Nei sistemi WSN tipicamente viene usata la Radio Frequenza con range operativi che vanno dai 10m per applicazioni indoor fino a 100m per applicazioni outdoor

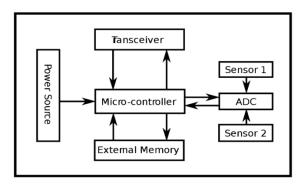


Figura 84 - Schema logico di un nodo di una WSN















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

6.2.2.2 Gateway

Attraverso il gateway è possibile interfacciare la rete dei nodi con un server dati. I gateway sono essenzialmente sistemi che garantiscono (e proteggono) l'accesso alla rete da sistemi esterni. I gateway possono agire in 3 modalità:

- Attiva: i nodi in maniera autonoma inviano i dati al server remoto
- Passiva: i nodi non sono autonomi nell'invio dei dati ma eseguono l'invio dietro specifica richiesta
- Mista: il sistema può funzionare in maniera alternata sia attiva che passiva

In definitiva le WSN hanno numerosissimi vantaggi per l'utilizzo nei sistemi di monitoraggio. Innanzitutto possono essere usate in ambienti complessi e di difficile gestione dove reti cablate non possono essere installate o il cui costo di installazione è troppo alto. Inoltre le reti WSN sono scalabili e robuste e possono essere adattate *in corsa* alle esigenze del contesto operativo. Le controindicazioni sono legate alle limitate capacità computazionali dei singoli nodi e ai limiti legati alle risorse energetiche e alla banda di comunicazione. Tuttavia nonostante queste limitazioni le WSN sono una risorsa preziosa per la costruzione di reti intelligenti per il monitoraggio.

6.3 IOT (Internet Of Things)

Un sistema di gestione di reti di monitoraggio che estende il concetto di WSN è quello dei sistemi IOT (*Internet Of Things*) nei quali la rete di nodi è composta da sistemi complessi identificabili univocamente da un ID e che attraverso una propria interfaccia di rete possono autonomamente inviare dati alla rete senza nessun tipo di interazione con utenti o altri nodi della rete.

In questo senso la differenza fondamentale con le WSN è che nelle reti IoT non esiste il concetto di routing in quanto ogni nodo invia i propri dati direttamente su internet essendo provvisto di interfaccia di rete. Nelle WSN, come specificato nel capitolo precedentemente, i nodi sensori inviano i propri dati ai nodi sink che possono essere accessibili dal livello centrale per il recupero delle informazioni. Le reti IoT in un certo qual modo estendono il concetto di WSN perché nelle WSN ogni sink può essere connesso a Internet per formare una rete IoT.

Nel paradigma Internet delle Cose una "cosa" (o nodo) può essere una persona con un cellulare, un animale con un transponder, un'auto con sensori per il controllo dello stato del veicolo, un sistema di monitoraggio della qualità dell'aria o più in generale qualunque oggetto cui può essere assegnato un indirizzo IP e che può trasferire dati su una rete.

6.3.1 Storia delle reti IoT

La prima menzione dell'Internet delle cose è stata fatta da Kevin Ashton del MIT in una presentazione per Procter & Gamble (P&G) nel 1999. Volendo portare il concetto di RFID (Radio Frequency ID) all'attenzione dei vertici di P&G, Ashton ha chiamato la sua presentazione "Internet of Things" per sottolineare la presenza di Intenet che rappresentava la nuova tendenza tecnologica nel 1999. Sempre nel 1999 il libro del prof. Neil Gershenfeld del MIT "When Things Start To Think" non usava il termine esatto ma forniva una chiara visione di dove fosse diretto l'IoT.















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{u}$ ELL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

IoT nasce dalla convergenza di tecnologie quali comunicazione wireless, sistemi microelettromeccanici (MEMS) e internet che ha permesso di integrare i mondi dell'Information Technology e dell'Operational Technology (OT) per la generazione di dati al fine di migliorare le prestazioni dei sistemi.

Sebbene Ashton sia stato il primo a menzione l'internet delle cose, l'idea di dispositivi intelligenti connessi è in circolazione fino dagli anni '70 sotto il nome di *Embedded Internet* o *Pervasive Computing*. La prima applicazione di questo concetto infatti fu una macchina distributrice di lattine di Coca Cola alla Carnegie Mellon University all'inizio degli anni '80. Attraverso il web i programmatori potevano verificare lo stato della macchina e controllare che ci fosse bevanda disponibile da remoto.

IoT si è evoluta dal concetto di comunicazione macchina-macchina (M2M), ovvero l'interazione automatica tra dispositivi senza bisogno dell'interazione umana, in particolare attraverso la connessione con il cloud per la gestione dei dati. Facendo un passo avanti, l'Internet delle Cose consiste in una rete di svariati dispositivi che connettono persone, sistemi e applicazioni informatiche per acquisire e condividere dati. Alla base di questa rete c'è la connettività M2M ed i protocolli che sono nel tempo stati definiti e standardizzati.

L'internet delle cose è anche una naturale evoluzione dell'architettura SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), una categoria di applicazioni software per il controllo di processo, l'acquisizione dei dati da remoto. I sistemi SCADA di ultima generazione sono considerati i primi sistemi IoT.

Il concetto di ecosistema IoT si è quindi realizzato del tutto ed è salito alla ribalta intono al 2010 quando il governo cinese ha inserito l'IoT tra le priorità strategiche nel proprio programma quinquennale. Negli ultimi anni l'ingresso nel mercato di nuove tecnologie miniaturizzate a basso costo, la diffusione di reti di comunicazioni sempre più performanti e alla portata di tutti hanno permesso lo sviluppo di questo tipo di rete in applicazioni di qualunque tipo dalla home automation al controllo di processo in ambiente industriale, fino alle reti di crowd-sourcing per il monitoraggio di eventi.

6.3.2 Architettura di un sistema IoT

La rete IoT è composta da diversi elementi e sottosistemi che insieme forniscono dei servizi chiamati comunemente servizi IoT. Dal punto di vista architetturale una rete IoT è composta da 4 componenti fondamentali: sensori, devices, gateways e internet (cloud) (Figura 85).

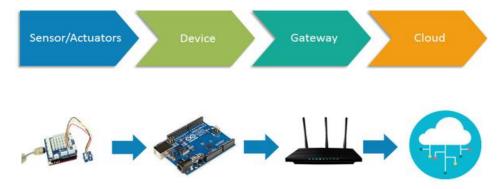


Figura 85 – Componenti di una rete IoT















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Il seguente diagramma mostra schematicamente come è definita l'architettura di un sistema IoT attraverso quella che si definisce *4-stage architecture* (Figura 86):

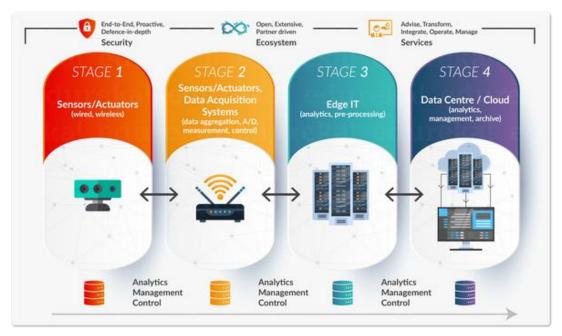


Figura 86 - Architettura IoT

In questo paradigma il primo stage consiste fondamentalmente nella parte di interazione con l'ambiente ovvero:

- Sensori: sensori che acquisiscono dati dall'ambiente e li trasformano in dati utili
- Attuatori: sistemi che agiscono sul sistema e ne cambiano le caratteristiche (dal sistema di apertura/chiusura di una valvola ad un braccio robotico in una catena di montaggio)

Il secondo stage rappresenta la parte di comunicazione ed è ubicata fisicamente vicino (o integrata) ai sensori e attuatori del sistema. Lo stage 3 definito, come EdgeIT, è lo stadio in cui il dato acquisito viene riprocessato prima di essere inviato al sistema centrale. Un compito classico di questo stage è la riduzione della dimensionalità del dato in maniera da poter inviare attraverso la rete solo le informazioni strettamente necessarie e non tutto il raw data per minimizzare il consumo di risorse legate alla banda o alla capacità di storage del datacenter finale.

Lo stage 4 (data center fisici o sistemi cloud), dove sono installati sistemi IT per l'analisi, la gestione, la sicurezza e la condivisione del dato verso gli utenti esterni, riceve i dati dallo stage 3.

6.4 Standard e protocolli di comunicazione

Nel corso degli ultimi anni, c'è stato un continuo proliferare di sistemi per il monitoraggio in parte dovuto all'abbattimento dei prezzi delle componenti elettroniche, in parte dovuto alla sempre maggiore necessità di controllare in modo efficiente impianti e servizi sia in ambito industriale che in ambito privato, si pensi all'interesse sempre maggiore verso il settore della home automation. Tuttavia, nel corso degli ultimi anni, non si è mai arrivati ad un'unificazione degli standard e dei















"SISTEMA DI PESATUKA DIINAMICA IN I ELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE"

protocolli. I progettisti e gli installatori sono quindi costretti a districarsi tra le proposte di parecchi produttori, dovendo scartare spesso la soluzione multi-vendor per problemi di compatibilità tra sensori, gateways e sistemi di controllo.

I sistemi di monitoraggio possono essere divisi in due categorie: quelli "proprietari" e quelli "aperti".

I sistemi proprietari sono quelli che vengono realizzati da un costruttore a cui non interessa la divulgazione delle specifiche dei suoi prodotti, evitando l'integrazione con i sistemi di altri produttori. Questo permette di abbattere i costi e di facilitare l'installazione, ma per contro si hanno minori flessibilità di progettazione e di upgrade futuri. Si è inoltre costretti in questo caso a scegliere dal catalogo di un solo produttore, che limita parecchio la possibilità di costruire un sistema di monitoraggio secondo le specifiche del cliente finale. Solitamente questo tipo di sistemi ricoprono la fascia medio-bassa del mercato.

I sistemi aperti invece, che a volte vengono anche definiti "standard", sono quelli dove le specifiche di funzionamento dei componenti vengono rese pubbliche così da permettere ad altre aziende di creare dei dispositivi conformi e capaci di comunicare con tutti gli altri. Solitamente i produttori di questo tipo di sistemi si riuniscono in grandi consorzi creando spesso dei veri e propri riferimenti per il mercato. Questa tipologia di prodotti è quella che permette la costruzione di impianti anche medio-grandi. I vantaggi che presentano sono l'affidabilità, l'interoperabilità dei dispositivi, la scalabilità delle soluzioni e la quasi totale indipendenza dei costruttori.

6.4.1 Architetture a BUS

Per quanto riguarda le architetture a BUS il mercato degli standard presenta una frammentazione molto marcata anche se, soprattutto in Europa, si sta procedendo verso una unificazione. Al momento alcuni degli standard più conosciuti ed utilizzati sono i seguenti:

- CEBUS (Consumer Electronics Bus) anche conosciuto come EIA-600, sviluppato dall'associazione americana EIA (Electronic Industries Association) è uno standard integrato multimediale per sistemi di Automation che ha caratteristiche di flessibilità e modularità. È adatto sia per l'uso domestico che per quello industriale. È supportato da partner industriali quali Microsoft, IBM, Compaq Computer Corp, AT&T Bell Labs, Honeywell, Panasonic, Sony, Thomson Consumer Electronics, Leviton e Pacific Gas & Electric.
- LonWorks è una tecnologia di comunicazione digitale su BUS creata per garantire in modo particolare prestazioni, affidabilità, flessibilità e una facile installazione o manutenzione di sistemi di automazione. I mezzi di comunicazione che questo protocollo sfrutta sono molteplici: si passa dal classico doppino in rame, alla fibra ottica, alle onde radio. Dopo una rapida diffusione in sistemi di automazione di edifici, in particolare nei sistemi di illuminazione, di condizionamento e riscaldamento, di controllo accessi, allarme ed antincendio, la tecnologia LonWorks si è in seguito affermata anche in diversi settori industriali.
- BatiBUS, sviluppato da MERLIN GERIN, AIRELEC, EDF e LANDIS & GYR, è stato uno dei primi fieldbus nel mercato. Le aziende che utilizzano questo standard hanno fondato nel 1989 il BatiBUS Club International (BCI), con più di 80 partners in molti paesi. BatiBUS è















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

inoltre gestito anche dai comitati CENELEC e ISO/IEC JTC 1 SC25, aderendo all'iniziativa KONNEX.

- KNX è il primo standard aperto orientato soprattutto alla building automation, coperto da royalty ed indipendente dalla piattaforma, approvato come standard europeo (EN 50090 -EN 13321-1) e mondiale (ISO/IEC 14543). Lo standard è stato sviluppato da KNX Association sulla base dell'esperienza dei suoi predecessori BatiBUS, EIB ed EHS. Esistono tre modalità di KNX:
 - o Automatic-Mode: riprende le specifiche di EHS
 - o Easy-Mode: riprende le specifiche di BatiBUS
 - o System-Mode: riprende le specifiche di EIB.
- MODBUS, nato a metà del 1970 come un protocollo utilizzato per collegare i terminali con rapporto master/slave, è diventato uno standard de facto nella comunicazione di tipo industriale, ed attualmente è uno dei protocolli di connessione più diffusi al mondo fra i dispositivi elettronici industriali. Le versioni più utilizzate sono il MODBUS RTU che permette di stabilire comunicazioni seriali asincrone su interfacce RS-232 e RS-485 e il MODBUS TCP che si appoggia a reti Ethernet.

6.4.1.1 Modbus

Il protocollo Modbus RTU (Remote Terminal Unit) ha un vastissimo campo di applicazione nell'automazione della produzione industriale quindi sia nelle fasi di monitoraggio che di controllo. Inoltre, Modbus è spesso adottato per la sua semplicità, perché è uno standard aperto e perché è supportato da una vasta gamma di prodotti di diverse marche. Modbus RTU è un protocollo di comunicazione dati estremamente robusto progettato per l'uso in ambienti industriali basato su una architettura di tipo master-slave che consente ad un master di controllare fino a 247 slave in una singola rete.

Dal 2004 il protocollo Modbus è gestito e controllato dal Modbus-IDA, una comunità di utenti e fornitori di strumentazioni per l'automazione, che cerca di mantenere e controllare in maniera open il processo di aggiornamento del protocollo e la sua standardizzazione, in modo tale che possa essere utilizzato da diversi prodotti mantenendo la compatibilità indipendentemente dai fornitori dei device.

Il protocollo Modbus opera a livello applicativo basandosi su una architettura di tipo client/server, in cui il server funziona solo a seguito di una richiesta del client. Questo protocollo fornisce un'interfaccia per la comunicazione tra dispositivi collegati su diversi tipi di reti.

Il protocollo Modbus è attualmente implementato usando:

- *TCP/IP su Ethernet*: in questa modalità i dati sono incapsulati in formato binario, in pacchetti TCP (Transmission Control Protocol), utilizzando il protocollo Ethernet (IEEE 802.3). La trasmissione avviene utilizzando Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA-CD);
- *Trasmissione seriale*: questa modalità può operare su diversi supporti fisici (cavo, fibra ottica e radio). I principali protocolli che operano su mezzi fisici sono: EIA/TIA-232-E (noto come RS232), EIA-422 (noto come RS422) e EIA/TIA-485-A (noto come RS485). La trasmissione seriale ha due varianti: (i) Modbus RTU i dati vengono trasmessi in formato















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

binario a 8 bit, dove gli interi da -32768 a 32767 sono rappresentati da due byte; (ii) Modbus ASCII: i dati sono trasmesso in formato ASCII a 7 bit, cioè i messaggi sono "leggibili" ma molto più grandi, con quindi maggiore traffico sulla rete.

 Modbus Plus: questa modalità utilizza una rete di trasferimento ad alta velocità con diverse funzionalità aggiuntive per il routing, verifica dell'integrità e coerenza dei dati e l'indirizzamento. Anche se più robusta ed efficiente, questa modalità non è aperta ma proprietaria di Schneider Electric.

6.4.2 Protocolli di comunicazione per reti WSN

Per descrivere l'architettura di rete di una Wireless Sensor Network, si può ricorrere al modello OSI (*Open Systems Interconnection*), descritto dalla Figura 87. La peculiarità in una WSN è che la separazione dei layer non è così netta; al contrario, i layer si sovrappongono tra loro, in particolare il livello 2 (livello Collegamento) e il livello 3 (livello Rete).

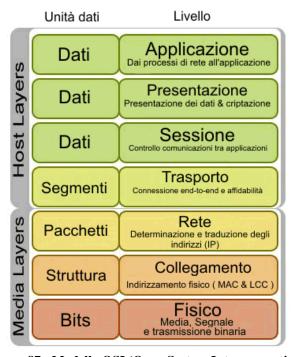


Figura 87 - Modello OSI (Open System Interconnection)

Questa scelta progettuale nasce per motivi che vanno ricondotti alle caratteristiche e ai limiti di una Sensor Network: per creare dei protocolli di comunicazione efficienti, leggeri, capaci di supportare avanzate funzionalità di risparmio energetico e flessibili ai cambiamenti della rete stessa, il livello Collegamento e il livello Rete si trovano spesso a lavorare in stretta collaborazione tra loro, violando così il principio di separazione dei livelli caratteristico dell'OSI. I livelli che costituiscono il cuore di una WSN sono il secondo e il terzo, proprio perchè vanno a definire il carattere della rete, ovvero sono questi due livelli che si occupano di risolvere le sfide più difficili di una rete di sensori wireless. I layer rimanenti assumono invece un'importanza minore, specialmente dal quinto in su.















"Sistema di p $m{E}$ sa \imath uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

È vero che anche il livello fisico svolge un ruolo fondamentale, senza il quale la rete non esisterebbe nemmeno. Tuttavia tutte le reti di sensori senza fili a bassa potenza sfruttano apparati radio con caratteristiche simili, ovvero bassa potenza di trasmissione, basso consumo, basso bit-rate. Quindi, al di là di fattori come la frequenza o il tipo di modulazione adoperato, il profilo di una WSN a bassa potenza non è definito dal livello Fisico. Il livello del Trasporto, se viene implementato, non è definito da particolari regole e, in ogni caso, non è complicato come nelle reti classiche TCP/IP. I livelli 5, 6 e 7 sono solitamente validi solo per i gateway o per gli host. Nel dettaglio ecco analizzati i primi layer del modello:

• Livello fisico: Esistono varie tecnologie utilizzabili per le Wireless Sensor Network: Wi-Fi,3, W.I.M.ax, Bluetooth e 802.15.4/ZigBee. Dato che solitamente esse ricorrono all'802.15.4/Zigbee, le altre tipologie di connessione non verranno trattate. Infatti connessioni WiFi,3G o W.I.M.ax vengono per lo più sfruttate per il collegamento del nodo gateway ad Internet o ad un altro host, ma non per creare collegamenti tra i vari nodi. La Tabella 3838 analizza diversi aspetti delle tecnologie nel dettaglio:

Tabella 38 - Tecnologie a confronto

Tabena 58 - Technologie a comronto					
	802.11	802.15.1/Bluetooth	802.15.4/ZigBee		
Copertura (metri)	100	10-100	10-75		
Throughput (Mbps)	2-30	1-2	0.25		
Consumo Energetico	Medio	Basso	Molto Basso		
Autonomia	Minuti	Ore	Giorni		
Dimensioni	Medie	Piccole	Molto Piccole		
Rapporto costo/complessità	Alto	Medio	Basso		

- Livello Data Link: Il livello Data Link è composta da due sottolivelli: LLC e MAC. Il primo, detto Logical Link Control layer, fa da tramite tra i livelli superiori e il livello fisico, consentendo l'interoperabilità tra diversi tipi di rete. Il livello MAC (Medium Access Control) riveste un ruolo molto importante e si occupa di tre funzioni fondamentali:
 - o assemblaggio dei dati in frame tramite l'aggiunta di un header, contenente informazioni sull'indirizzo, e un trailer, contenente informazioni per la correzione degli errori;
 - o disassemblamento dei frame ricevuti per estrarre informazioni sull'indirizzo e la correzione degli errori;
 - o gestione dell'accesso al mezzo di trasmissione condiviso.

Il requisito fondamentale di un MAC per reti WSN è la necessità di risparmiare più energia possibile. Ci sono diversi fattori che contribuiscono allo spreco energetico, come l'eccessivo overhead, l'idle listening, le collisioni di pacchetti e l'overhearing. Inoltre l'accesso regolato al mezzo trasmissivo comporta lo scambio di informazioni di controllo e di sincronizzazione tra i nodi. Il continuo scambio di tali dati può provocare perdite significative di energia. Lo stesso effetto e un throughput di rete diminuito possono essere causati anche da un















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

prolungato ascolto del canale in attesa di pacchetti. L'obiettivo di un MAC `e quello di impedire queste situazioni appena descritte attraverso l'utilizzo di specifici protocolli di scheduling quali Schedule-based, Contention-based e ibridi.

- Livello Network: Il livello Network si occupa principalmente del routing. Il routing ha un ruolo importantissimo, dato che lo scopo di una rete di sensori è quello di raccogliere dati da vari punti di un dominio, processarli e farli convogliare tutti in un unico punto (detto sink) dove risiede un'applicazione specifica. Perché questi dati raggiungano la destinazione in maniera efficiente, cioè in maniera affidabile e con un basso costo energetico, è necessario che i protocolli di routing individuino dei cammini ottimali tra i nodi e il sink (o i sink). Le caratteristiche di una WSN come la dinamicità (nodi che perdono il link o esauriscono la batteria, nodi aggiunti, ...), la densità (che può variare molto di zona in zona), le risorse hardware limitate e la bassa disponibilità energetica, rendono complicato lo sviluppo di protocolli di Routing.
- Livello Trasporto: la natura data-centric delle WSN combinata con le risorse hardware limitate, rende il protocollo TCP inutilizzabile in questo ambito. Inoltre, le reti di sensori sono caratterizzate da un concetto di affidabilità differente dalle reti classiche. Per di più, i livelli stessi di affidabilità o di controllo di congestione possono dipendere dal tipo dei dati trasportati. Quindi, le funzionalità di questo livello devono essere progettate trovando il giusto compromesso tra consumo energetico e politiche implementate. Queste ultime sono però dipendenti anche dal percorso seguito dai pacchetti: forward path (dai nodi verso il sink) o reverse path (dal sink verso i nodi). Nel forward path si applica un principio di event-reliability, ovvero non ha importanza che tutti i pacchetti arrivino a destinazione, ma serve che arrivino almeno quelli necessari per un corretto monitoraggio dell'evento. Al contrario, nel percorso inverso (reverse path), è richiesto che tutti i messaggi spediti dal sink giungano ai nodi destinatari. Questo perché i messaggi mandati dal sink contengono informazioni critiche per il controllo dell'attività del nodo, come query dei dati o istruzioni di programmazione. Quindi, in questo caso, sono necessarie delle regole di consegna dei pacchetti più severe.
- Livello Applicativo: Protocolli di questo tipo per una generica WSN non sono ancora diffusi, sebbene in passato ne siano stati proposti alcuni, tra cui Sensor Management Protocol (SMP), Task Assignment e Data Advertisment Protocol (TADAP) e Sensor Query Data Dissemination (SQDDP). SMP fornisce operazioni software per compiti di amministrazione della rete, come data aggregation, clustering, sincronizzazione, localizzazione, accensione sensori, monitoraggio e riconfigurazione dei nodi, autenticazione e distribuzione di chiavi nelle comunicazioni sicure. TADAP gestisce l'assegnazione di 'interessi' riguardo un attributo o un evento e la pubblicizzazione dei dati disponibili. SQDDP fornisce all'utente le interfacce per avviare e rispondere a query e si occupa di assegnare identificativi ai nodi in base ad attributi o alla loro locazione. Il discorso è diverso per le reti ZigBee. Infatti questo standard definisce anche il livello applicativo.















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

6.4.3 SensorThings API e IoT

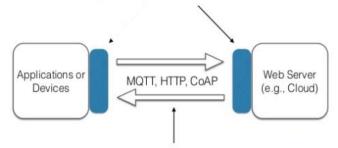
Dal punto di vista della connettività le reti IoT si basano sui protocolli di comunicazione standard definiti per internet basati su TCP/IP su rete sia wired che wireless. Dal punto di vista applicativo invece vista la natura delle reti IoT si sta cercando di lavorare a livello internazionale alla definizione di standard di comunicazione tra i vari dispositivi che permettano di far parlare la stessa lingua i vari dispositivi prodotti da diverse aziende in una ottica plug&pray multipiattaforma.

Nel campo del monitoraggio ambientale notevoli passi avanti sono stati compiuti dell'Open Geospatial Consortium (www.opengeospatial.org) un'organizzazione internazionale no profit che si occupa di definire specifiche tecniche per servizi geospaziali e di monitoraggio che siano aperti ed estensibili. Tutte le specifiche definiti da OGC sono pubbliche e disponibili gratuitamente.

Il consorzio OGC ha sviluppato SensorThings API ovvero una serie di specifiche open per connettere device, dati e applicazioni IoT sul web. Questo standard si basa su una serie di standard open consolidati quali i protocolli Web e la famiglia dell'OGC-SWE (Sensor web Enablement) che includono ad esempio i data model ISO/OGC Observation and Measurement (O&M) [OGC 10-004r3 e ISO 19156:2011].

Le SensorThings API permettono l'accesso e la condivisione di dati provenienti virtualmente da ogni oggetto del mondo fisico (sensori) e informatico (applicazioni) che possono essere identificate univocamente e integrate in una rete. Il dato è reso accessibile attraverso una interfaccia basata su standard REST mentre il dato in uscita dalle API è serializzato in un oggetto JSON (JavaScript Object Notation) (Figura 88). L'utilizzo di queste tecnologie è dovuto al fatto che offrono una maggiore efficienza in termini di consumi e dimensioni delle informazioni trattate, fattore fondamentale quando i componenti della rete sono device come microcomputer, piccoli controllers, smartphones, etc... L'uso della tecnologia REST inoltre rende più facile agli realizzatori web sviluppare applicazioni che implementano servizi di data access basati su patterns URL.

2. SensorThings API RESTful Interfaces for accessing sensor data, tasking actuators and detect events



1. Standard Data Model based on ISO/OGC Observation and Measurement

Figura 88 - SensorThings API















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

La seguente tabella mostra le entità messe a disposizione delle SensorThings API.

Tabella 39 - SensorThings API

Oggetto	Descrizione								
Thing	Nel mondo IoT una 'cosa' è un oggetto del mondo fisico o del mondo dell'informazione che è possibile identificare univocamente e che può essere integrato in una rete di comunicazione (vedi definizioni ITU-T)								
Location	La 'location' definisce la posizione della 'cosa' e in particolare come la sua ultima posizione conosciuta.								
Historical Location	L'entità 'historical Location' fornisce il frame temporale delle posizioni della 'cosa'.								
Datastream	Un 'datastream' è una entità che raggruppa osservazioni riguardanti la stessa proprietà prodotta da uno stesso sensore.								
Sensor	Un sensore è uno strumento che osserva una proprietà od un fenomeno con l'obiettivo di produrre una stima del valore di quel fenomeno.								
Observed Property	La proprietà osservata specifica il fenomeno oggetto di una osservazione.								
Observation	Una osservazione rappresenta l'atto del misurare o determinare il valore di una proprietà.								

Di seguito sono invece mostrate un esempio di chiamata e risposta secondo lo standard SensorThings. Ogni oggetto facente parte della rete IoT deve poter accettare chiamate di questo tipo e rispondere secondo il template garantendo così completa interoperabilità con altri device. Qui di seguito un esempio di chiamate e risposte in standard SensorThings:

https://toronto-bike-

 $snapshot.sensorup.com/v1.0/Locations? \$expand=Things/Datastreams (\$filter=ObservedProperty/nameeq'available_bikes'), Things/Datastreams/Observations (\$orderby=phenomenonTime desc; \$top=1)$

```
{ "@iot.count": 199,
 "@iot.nextLink":"https://toronto-bike-
snapshot.sensorup.com/v1.0/Locations?\expand=Things/Datastreams(\filter=ObservedProperty/name\gamma20eq\gamma20\text{927}\gammaxailable_bikes\gamma27), Things/D
atastreams/Observations($orderby=phenomenonTime%20desc;$top=1)&$top=100&$skip=100",
 "value": [
   "@iot.id": 206048,
   "@iot.selfLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Locations(206048)",
          "description": "The geographic location with coordinates for the Toronto bike share station Bloor St / Brunswick Ave",
   "name": "7061:Bloor St / Brunswick Ave",
   "encodingType": "application/vnd.geo+json",
   "location": {
    "coordinates": [
     -79.407224,
    43.665876
   1.
   "type": "Point"
   "Things": [
      "@iot.id": 206047,
     "@iot.selfLink": https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Things(206047)
          "description": "Bloor St / Brunswick Ave Toronto bike share station with dataof available bikes and available docks",
      "name": "7061:Bloor St / Brunswick Ave",
      "properties": {},
     "Datastreams": [
```















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

```
"@iot.id": 206050,
        "@iot.selfLink":"https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Datastreams(206050)",\\
                    "description": "The datastream of available bikes count for the Toronto bike share station Bloor St / Brunswick Ave",
        "name": "7061:Bloor St / Brunswick Ave:available_bikes",
                     "observationType": "http://www.opengis.net/def/observationType/OGC-M/2.0/OM_CountObservation",
        "unitOfMeasurement": {
         "symbol": "{TOT}",
         "name": "bike count",
         "definition": "http://unitsofmeasure.org/ucum.html#para-50"
                    "Observations@iot.nextLink":"https://toronto-bike-
                    snapshot.sensorup.com/v1.0/Datastreams(206050)/Observations?$top=1&$skip=1",
        "Observations": [
           "@iot.id": 1595434,
                               "@iot.selfLink":"https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Observations(1595434)",
          "phenomenonTime": "2017-02-16T21:55:11.908Z",
          "result": "2",
          "resultTime": null,
                               "Datastream@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-
                               snapshot.sensorup.com/v1.0/Observations(1595434)/Datastream",
                         "FeatureOfInterest@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-
                         snapshot.sensorup.com/v1.0/Observations(1595434)/FeatureOfInterest"
                     "ObservedProperty@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-
                    snapshot.sensorup.com/v1.0/Datastreams(206050)/ObservedProperty",
                     "Sensor@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Datastreams(206050)/Sensor",
                    "Thing@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Datastreams(206050)/Thing"
}
],
          "HistoricalLocations@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Things(206047)/HistoricalLocations",
              "Locations@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Things(206047)/Locations"
}
],
          "HistoricalLocations@iot.navigationLink": "https://toronto-bike-snapshot.sensorup.com/v1.0/Locations(206048)/HistoricalLocations"
},
}
]
```

Le specifiche complete dello standard SensorThings API sono scaricabili dal sito dell'OGC all'indirizzo http://www.opengeospatial.org/standards/sensorthings















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

7. Valutazione dell'impatto architettonico e ambientale delle differenti soluzioni di implementazione del sistema W.I.M.

7.1 Impatto dei sistemi W.I.M.

L'utilizzo dei sistemi *W.I.M.* porta a vantaggi interessanti, quali la riduzione del numero di veicoli in sovrappeso sulle strade e incoraggiare cambiamenti nel comportamento del trasportatore.

I sistemi di pesatura W.I.M. sono stati sviluppati con lo scopo di preservare la pavimentazione stradale e le infrastrutture.

Gli altri effetti del sistema *W.I.M.* sono riconducibili al comportamento del trasportatore (ad es. la riduzione della quantità media di sovrappeso e numero di veicoli sovraccaricati), all'ambiente (ad es. la riduzione delle emissioni nocive, vibrazioni, rumore e consumo di carburante), alla gestione del traffico (ad es. la riduzione della congestione e chiusura delle strade), alla sicurezza del traffico (ad es. la riduzione dei rischi di traffico e incidenti) e ai costi (ad es.la riduzione delle tasse e violazione delle tasse, aumento dei tassi di acquisizione della violazione in sovrappeso).

7.1.1 Valutazione dell'impatto architettonico delle differenti soluzioni di implementazione del sistema W.I.M.

Nel seguito si descriverà lo stato dell'arte relativamente alle tipologie di installazioni dei sistemi di pesatura dinamica presenti sulle strade che fondamentalmente si riconducono a due classi principali:

- sistemi robusti incassati in pannelli di acciaio;
- sistemi ad array multipli con sensori ad anello.

Per la prima classse si può far riferimento alle esperienze già condotte proprio in Italia e messe a punto da iW.I.M., azienda italiana che ha sviluppato, certificato ed omologato il primo sistema di pesatura dinamica in Italia. iW.I.M. nasce nel 2011 come start-up e nel 2014 ha installato il primo prototipo sperimentale presso una pista del casello autostradale dell'Autostrada A22 del Brennero. Nel 2015, migliorando la precedente tecnologia ha brevettato a livello internazionale il sistema iW.I.M.50_10 che è in grado di pesare i veicoli in movimento. In particolare, il sistema tramite lastre in acciaio sensorizzate in fibra ottica, consente di pesare i veicoli a velocità compresa tra 0 e 50 km/h.

Dal punto di vista dell'impatto architettonico il sistema scompare quasi nel manto stradale (Figura 89). Il sistema, veloce da installare, poco invasivo per la pavimentazione, non subisce danneggiamenti da agenti atmosferici e salini e non è influenzato né da campi elettromagnetici, né da sbalzi di temperatura. Pertanto, esso risulta adeguato ad essere installato su strade di qualsiasi tipologia, ed anche in presenza di neve, ghiaccio e fango garantisce un adeguato funzionamento.















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



Figura 89 - Lastra per la pesatura dinamica del sistema iW.I.M.

Le dimensioni della struttura, tipicamente in acciaio ed estremamente ridotte, sono dell'ordine dei 151 x 51 x 5 cm. Il peso per asse dei sistemi attualmente in uso sono dell'ordine 1,5 ton, quello massimo è pari a 5 ton.

Dal punto di vista dell'invasività degli interventi di installazione in Figure 90-91 si può osservare un tipico scavo dell'impianto.

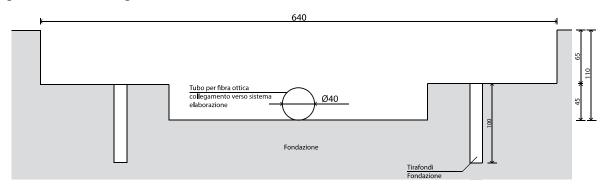


Figura 90 - Esempio di scavo per sistema iW.I.M. (dimensioni in cm)



Figura 91 - Esempio di installazione di una sistema di pesatura dinamica di veicoli















 $ilde{ ilde{S}}$ SISTEMA DI Р $ilde{ ilde{E}}$ SA $ilde{ ilde{I}}$ Uka dil $ilde{ ilde{u}}$ amica in $ilde{ ilde{u}}$ ell $ilde{ ilde{I}}$ GENTE PER LA GESTIO $ilde{ ilde{NE}}$ DE $ilde{ ilde{L}}$ TRAFFICO PESANTE $ilde{ ilde{u}}$

Altre esperienze nella maggior parte dei casi si riconducono a proposte analoghe. Tutti i sistemi di pesatura dinamica infatti coprono una o più corsie della carreggiata stradale ed utilizzano spire induttive e sensori ad alta precisione operanti tramite tecnologia piezoelettrica.

Tali sensori possono essere installati in qualsiasi tipo di pavimentazione stradale (asfalto, cemento) e risultano essere minimamente invasivi.

Un altro esempio di sistema W.I.M. è quello proposto dalla Essae la cui architettura è riportata in figura 92. Le dimensioni sono 845 x 3,275 mm. La maggiore larghezza del sistema è dovuta al fatto che tipicamente è applicato su almeno due carreggiate. Anche in questo caso lo scavo per l'installazione del sistema non è più invasivo di quello precedentemente illustrato.



Figura 92 - Sistema W.I.M. Essae

Alla seconda classe appartengono i sistemi W.I.M. che installano nel manto stradale loop modulari. In figura 93 si mostra un esempio di installazione che presenta 8 strisce collegate ad un loop in ingresso all'area di rilevazione.

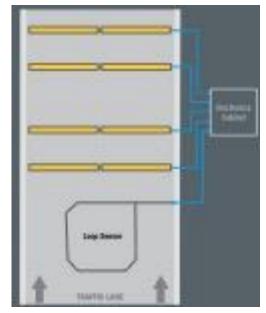


Figura 93 - Sistema multistrip

Altre possibili configurazioni sono riportate nelle seguenti figure dalle quali si può apprezzare il grado di invasività delle soluzioni proposte (Figura 94).







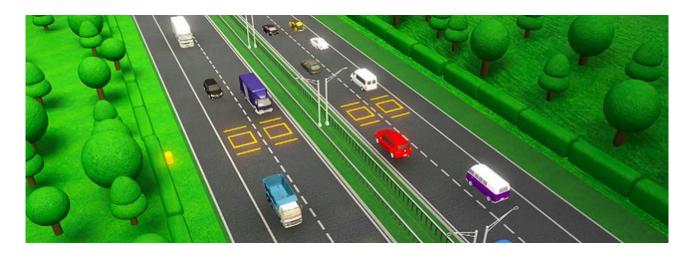








"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"



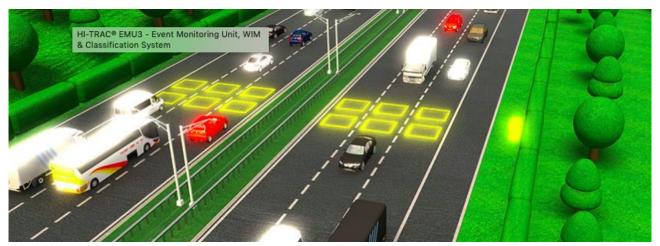


Figura 94 - Sistemi W.I.M. q-free

I sistemi in genere possono essere potenziati con un impianto di ripresa veicoli, che tramite una telecamera intelligente, montata strutture laterali o sovrastanti e a valle dei sensori di pesa, acquisisce l'immagine del veicolo che risulta essere in transito. La telecamera deve essere a colori, in quanto il colore del mezzo rappresenta una informazione essenziale alla sua identificazione, insieme alla forma, alla targa e ad eventuali scritte presenti sul veicolo. Di notte, l'area viene illuminata da un faro montato sulla stessa struttura in asse con il sistema dei sensori. Le immagini rilevate possono essere inviate ad una centrale operativa e trattate per gli scopi del caso.

In letteratura, le esperienze più significative descrivono sistemi composti dai seguenti elementi:

- sensori piezoelettrici W.I.M. installati nella sede stradale;
- la lunghezza dei sensori è in accordo all'ampiezza della corsia da coprire;
- una unità di pesatura dinamica, Datalogger con interfaccia Web e protocolli di comunicazione. La configurazione del Datalogger viene fatta in base al numero di corsie da monitorare;
- spire induttive installate nella sede stradale, in corrispondenza dei sensori piezoelettrici;
- alimentatore, switch e cavi;
- una unità di ripresa veicoli: camera per lettura targhe;
- una unità centrale di monitoraggio e archiviazione dati;















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per La Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

- eventuali sensori di temperatura per correggere la misura in funzione della temperatura dell'asfalto;
- resina bi-componente per sigillatura dei sensori piezoelettrici.

7.1.2 Valutazione dell'impatto ambientale delle differenti soluzioni di implementazione del sistema W.I.M.

La valutazione dei vari effetti ambientali associati all'eccesso di sovraccarico: vibrazioni, rumore e inquinamento sono piuttosto complessi. Per misurare gli impatti in termini di vibrazioni e rumore è necessaria un'attrezzatura speciale (ad esempio vibrazioni a terra). Le emissioni di gas di scarico dipendono da una combinazione di parametri (ad esempio stile di guida, gradienti stradali e carico) e sono generalmente stimati mediante fattori legati alla classe del veicolo, classificazione delle emissioni del motore, peso lordo misurato e velocità.

Dal punto di vista dell'inquinamento acustico si osservi che le soluzioni prevedono sensori piezoelettrici caratterizzati da un profilo schiacciato tale da ridurre il rumore tramesso dalla strada quando un asse si avvicina al sensore o un veicolo transita su una corsia adiacente. Essi possono essere principalmente di due tipi:

- sensori piezo-ceramici, con correzione del peso basata sulla differenza fra la temperatura rilevata e quella alla quale è stata effettuata la taratura del sistema;
- sensori al quarzo naturale, che assicurano l'accuratezza di risposta massima oltre che nel tempo anche alla variazione della temperatura.

La struttura che completa il sistema di pesatura e che sovrasta la zona di pesatura deve prevedere un rack da equipaggiare con morsettiere, unità di alimentazione completa di filtri di rete, unità di pesatura dinamica, switch e teleruttori per comandare l'accensione di un eventuale faro.

L'impatto ambientale e architettonico delle soluzioni già presenti in letteratura è minimale ed inoltre tali sistemi possono essere installati in ambienti che presentano anche temperatura estreme.

Nel progetto pertanto si seguiranno strade analoghe e laddove ce ne sarà la possibilità si indagheranno soluzioni che migliorino le condizioni di impatto già esistenti.

Per tale motivo in questo prima relazione si riportano anche i dati di traffico che caratterizzano la strada sulla quale si immagina di poter installare il sistema di pesatura. I dati, di seguito riportati, si riferiscono alla autostrada A2 per i primi 100 km per il 2018 (fonte ANAS) (Figure 95 - 96 - 97).















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{I}$ Gente per la Gestio $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Tratta n. 900012: A3, Km 5.200, Salerno(SA)

D:	Consistenza Dati		Veicoli Leggeri i medi negli in		Veicoli Pesanti Volumi medi negli intervalli			Velocità medie nei periodi tutte le classi		
Direzione del Flusso	Pervenuti/Attesi	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00
flusso ascendente	80,00%	20962	1976	2496	2217	132	444	94	96	92
flusso discendente	80,00%	22137	2465	2595	2597	131	400			

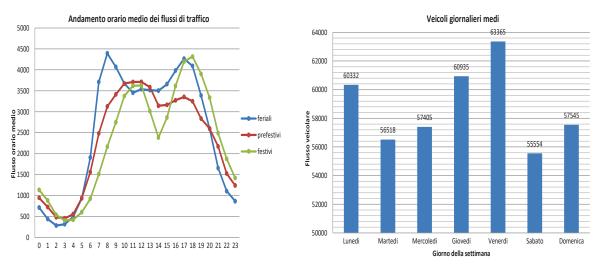


Figura 95 – Dati di traffico rilevati dall'ANAS nella tratta di Salerno

Tratta n. 1890: A3, Km 61.320, Sicignano degli Alburni(SA)

Direzione del Flusso	Consistenza Dati		Veicoli Legger		Veicoli Pesanti Volumi medi negli intervalli			Velocità medie nei periodi tutte le classi		
		Volum	i medi negli in	tervalli						
	Pervenuti/Attesi	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00	06:00-20:00	20:00-22:00	22:00-06:00
flusso ascendente	60,00%	8266	737	1234	1043	92	291	99	100	97
flusso discendente	60,00%	7754	634	804	1068	88	291	111	114	110

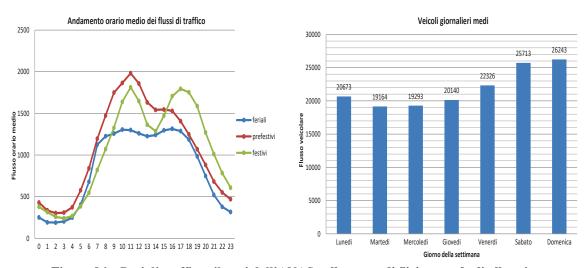


Figura 96 – Dati di traffico rilevati dall'ANAS nella tratta di Sicignano degli albumi









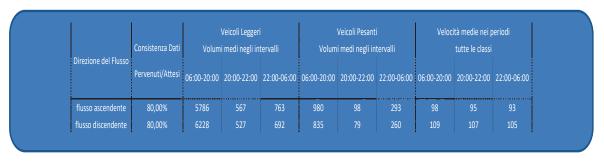






"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{\iota}$ ell $oldsymbol{I}$ gente per la Gestio $Noldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

Tratta n. 1891: A3, Km 82.620, Atena Lucana(SA)



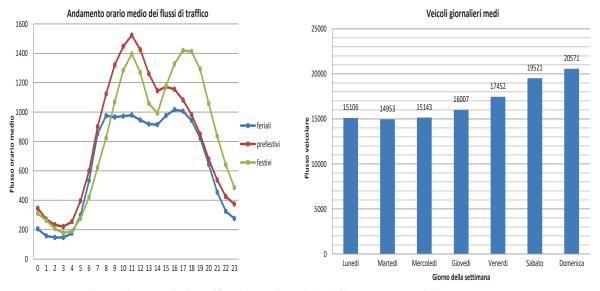


Figura 97 – Dati di traffico rilevati dall'ANAS nella tratta di Atena Lucana

7.1.3 Cambiamento del comportamento del trasportatore

Le tecnologie di pesatura in movimento consentono il controllo dei pesi dei veicoli senza interrompere il traffico e le operazioni di trasporto. La procedura di invio di avvisi alle società di trasporto risulta essere molto efficace nell'incoraggiare il cambiamento del comportamento del trasportatore nel tempo. Esempi in tal senso sono stati riscontrati in esperienze fatte in *Francia* e nei *Paesi Bassi*.

7.1.4 Protezione della pavimentazione stradale e delle infrastrutture

I veicoli illegalmente sovrappeso causano danni alla pavimentazione e all'infrastruttura stradale.

I sistemi W.I.M. hanno il potenziale per ridurre il numero di sovrappeso grave e i costi associati per il rifacimento della pavimentazione e le riparazioni dell'infrastruttura.

Diversi studi negli Stati Uniti hanno mostrato esperienze nel seguire i danni causati da veicoli in sovrappeso con sistemi di segnalazione di grandi dimensioni forniti settimanalmente, mensilmente e annualmente (STARS). Questo metodo consiste nel valutare il danno l'anno prima dell'installazione del sistema W.I.M. e gli anni dopo l'installazione dell'attuazione del peso. Il danno viene stimato in















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

fattori ESAL (Single Axle Loads) equivalenti (American Association of State Highway Officials (AASHO).

7.1.5 Sicurezza del traffico

Un peso in eccesso è sempre pericoloso per la stabilità di un camion, anche se viene caricato in modo sicuro. Ciò può causare errori del sistema frenante e il camion potrebbe diventare difficile da manovrare e controllare. Il rischio che un conducente di un autocarro sovraccarico possa essere coinvolto in un incidente è quindi più elevato rispetto a un camion caricato legalmente. Inoltre, il coinvolgimento di veicoli in sovrappeso negli incidenti stradali aumenta la gravità delle conseguenze degli incidenti.

Mancano statistiche sui veicoli in sovrappeso relativi agli infortuni e agli incidenti stradali a causa della mancata raccolta dei dati relativi al peso da parte della polizia. In diversi studi, i camionisti sono sospettati di utilizzare percorsi alternativi per evitare una serie di bilance di pesatura. Ciò potrebbe aumentare il rischio di incidenti su queste strade secondarie. Questa situazione è fonte di preoccupazione in Norvegia, dove le strade alternative non sono adattate ai veicoli pesanti. L'impatto dei sistemi W.I.M. sulla sicurezza stradale e in galleria è considerata di grande importanza in Norvegia al fine di ridurre il numero degli infortuni ed incidenti.

7.1.6 Gestione del traffico

I sistemi W.I.M. possono fornire ai centri di gestione del traffico una panoramica della posizione geografica nazionale e regionale dei veicoli sovraccarichi. I futuri sistemi di gestione dei dati W.I.M. potrebbero includere nuove applicazioni appositamente sviluppate per i centri di gestione del traffico: la raccolta di dati sul traffico in tempo reale, le informazioni sul flusso intenso di traffico, il monitoraggio delle merci pericolose, la sicurezza del traffico nei tunnel, il monitoraggio del traffico/della congestione, ecc.

7.1.7 Pianificazione del trasporto

I dati W.I.M. possono anche essere utili alle società per meglio pianificare le operazioni di trasporto. Questo potrebbe essere valido per le grandi aziende nell'individuare soluzioni per organizzare al meglio la ripartizione delle merci sui loro veicoli. Di conseguenza, i ritardi provocati dai controlli del peso verranno ridotti nel tempo e l'efficienza delle operazioni di trasporto aumenterà.

La riduzione del sovraccarico genererà operazioni di trasporto più sicure per i conducenti e gli operatori dei terminali. Ciò può essere valutato mediante raccolta di dati e questionari tra i vettori e i loro dipendenti.

7.1.8 Benefici economici

I veicoli sovraccaricati generano benefici economici per le aziende che violano le regole e le tasse imposte, creando così una concorrenza sleale tra le aziende. I benefici economici attesi per le















"Sistema di p $oldsymbol{E}$ satuka dii $oldsymbol{v}$ amica in $oldsymbol{u}$ ell $oldsymbol{L}$ Gente per la Gestio $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ de $oldsymbol{L}$ traffico pesante"

autorità con il sistema W.I.M. sono il pagamento di poche multe e tasse (ad esempio tasse di immatricolazione dei veicoli, tasse sugli assi e tasse di riscossione pedaggi). L'aumento dell'efficienza del controllo del peso riduce anche i costi per le risorse e le operazioni di applicazione del peso. Vengono inoltre ridotti i costi relativi al danno alle infrastrutture (ad es. tunnel, ponti), chiusure di strade e gallerie, lavori di rifacimento e riparazioni di infrastrutture.















"Sistema di p $m{E}$ satuka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ gente per la gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

8. Riferimenti

- Associazione Mondiale della Strada AIPCR Comitato Nazionale Italiano Comitato tecnico C4.2, "Interazione strada/veicolo", "MONITORAGGIO DELLE CARATTERISTICHE E DELLE AZIONI DEL TRAFFICO VEICOLARE PER IL PROGETTO E LA MANUTENZIONE DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI", XXV CONVEGNO NAZIONALE STRADALE Napoli 4 7 Ottobre 2006
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "SISTEMI DI MONITORAGGIO DEL TRAFFICO - LINEE GUIIDA PER LA PROGETTAZIONE", Ministero dei Lavori Pubblici, Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale
- Piotr Burnos, Janusz Gajda "Vehicle's Weigh-in-Motion system for enforcement in Poland" AGH University of Science and Technology, Department of Measurement and Electronics, Poland, 11th ITS European Congress, Glasgow, Scotland, 6-9 June 2016
- Torbjørn Haugen a, Jorunn R. Levy a, Erlend Aakre a, Maria Elena Palma Tello "Weigh-in-Motion equipment experiences and challenges", Traffic Engineering Research Centre, NTNU
 The Norwegian University of Science and Technology, 7491 Trondheim, Norway 6th Transport Research Arena April 18-21, 2016
- Alexander Grakovski, Alexey Pilipovec, Igor Kabashkin, Elmars Petersons, "WEIGHT-IN-MOTION ESTIMATION BASED ON RECONSTRUCTION OF TYRE FOOTPRINT'S GEOMETRY BY GROUP OF FIBRE OPTIC SENSORS" Transport and Telecommunication, 2014, volume 15, no. 2, 97–110
 - DOI 10.2478/ttj-2014-0009
- Myra Lydon, D. Robinson, S. E. Taylor, G. Amato, E. J. O. Brien, N. Uddin, "Improved axle detection for bridge weigh-in-motion systems using fiber optic sensors" J Civil Struct Health Monit (2017) 7:325–332
 - DOI 10.1007/s13349-017-0229-4
- Zhiming Zhang, Ying Huang, Raj BridgelallRaj, Muath A Al-Tarawneh, Pan Lu, "Optimal System Design for Weigh-In-Motion Measurements Using In-Pavement Strain Sensors", Article in IEEE Sensors Journal PP(99):1-1
 - DOI: 10.1109/JSEN.2017.2702597
- Aaron Barrett, Emma Benbow, Alex Wright, "CEDR Contractor Report 2018-06" Transnational CEDR Transnational Road Research Programme Call 2013: Ageing Infrastructure HiSPEQ, RE-GEN and X-ARA projects Giugno 2016
- CEDR Transnational Road Research Programme Call 2013: Ageing Infrastructure Management-Understanding Risk Factors, "Re-Gen Risk Assessment of Ageing Infrastructure. Guidelines on collecting W.I.M. data and forecasting of traffic load effects on bridges. Deliverable D3.1", June 2015















"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

- Shenfang Yuan, Fahard Ansari, Xiaohui Liu, Yang Zhao "Optic fiber-based dynamic pressure sensor for W.I.M. system"- The Aeronautical Key Laboratory for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 29 YuDao Street, Nanjing 210016, China. Department of Civil and Materials Engineering, University of Illinois at Chicago, Illinois, IL 60607, USA. 15 December 2004
- SMART ROAD "La strada all'avanguardia che corre con il progresso". A cura della Direzione Operation e Coordinamento Territoriale Infrastruttura Tecnologica e Impianti. ANAS (Gruppo FS Italiane)
- COST ASSOCIATION AISBL. EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE & TECHNOLOGY. COST Open Call-Submission, Evaluation, Selection and Approval (SESA) Guidelines, Version January 2018
- COST 323 "Wheight-in-Motion of Road Vehicles", Final Report, Appendix 1, European W.I.M. Specification. Version 3.0, August 1999
- Dr. Richard Livingston, Mr. Rais Rizvi, Luz-Elena Y. Mimbela, Jim Pate, Scott Copeland and Perry M. Kent, "Applications of fiber optic sensors in Weigh-In-Motion (W.I.M.) systems for monitoring truck weights on pavements and structures" – Final report on research project, 158 p. New Mexico State University, Dept. of Transportation's, Las Cruces, April 17 2003.
- B.Jacob, E.J. Obrien, A. O'Connor, & M.Bouteldja, "Bridge Weight-in-Motion-Latest developments and Applications World Wide". March 2015. In International Conference of Heavy Vehicles-ICW.I.M.5, eds., Paris, France, Wiley, pp.39-56.
- Anatoly Batenko, Alexander Grakovski, Igor Kabashkin, Elmars Peterson, Yuri Sikerzhicki "Problems of fibre optic sensor application in weight-in-motion (W.I.M.) systems". Proceedings of the 11th International Conference "Reliability and Statistics in Trasportation and Communication" 19-22 October 2011, Transport and Telecommunication Institute Lomonosoxa str.1, Riga, LV 1019, Latvia















"Sistema di p $m{E}$ sa1uka dii $m{v}$ amica in $m{\imath}$ ell $m{I}$ Gente per la Gestio $m{N}m{E}$ de $m{L}$ traffico pesante"

Siti web

https://www.cost.eu/cost-actions/what-are-cost-actions/

https://www.cost.eu/actions/323/#tabs|Name:parties

http://W.I.M..zag.si/cost323/cost_en.htm

http://programmicomunitari.formez.it/content/programma-cost-bando-cooperazione-europea-nei-settori-scienza-e-tecnica-scadenza

http://www.is-W.I.M..org

 $\underline{https://www.stradee autostrade.it/traffico-smart-mobility/autonomia-movimento-controllo-dei-mezzi-pesanti/$

 $\underline{https://www.kapsch.net/ktc/Portfolio/Intelligent-Mobility-Solutions/Safety-Security/Road-Safety-Enforcement/Weigh-In-Motion}$

https://www.kapsch.net/ktc/Portfolio/Products/Video-Sensor-Products/Classification-Products

iW.I.M., "iW.I.M. 50_10 IL SISTEMA DI PESATURA DINAMICA CONCEPITO PER RILEVARE IL PESO COMPLESSIVO DEI VEICOLI IN MOVIMENTO" (brochure)

http://www.suardi.it/uploads/news/attachments/1d5ffa9c42c0561b0f2c0b5eb7b3ce54effa8e6e.pdf

Betamont-Slovacchia

https://www.betamont.sk/measure-in-motion-motorway

Camea-Repubblica Ceca

https://www.camea.cz/en/

https://www.cameatechnology.com/products/W.I.M./?utm_source=redirect&utm_medium=website &utm_campaign=from_camea-cz

Cestel-Slovenia

https://www.cestel.eu/

Cross-Repubblica Ceca

http://www.cross.cz/

http://www.cross.cz/en/solutions-weigh-in-motion

Ecm-Francia

https://www.ecm-france.com/en/areas-of-activity/weigh-in-motion/

Intercomp-USA

https://www.intercompcompany.com/its-enforcement-scales.html

Irdinc-Canada

https://www.irdinc.com/pages/its-solutions/bridge-protection-systems.html

Kistler-Milano

https://www.kistler.com/en/about-us/competencies/newsletter-february-

2019/#?utm_source=web&utm_medium=homepage-slider&utm_campaign=competencies

Wheel Right-Regno Unito















"SISTEMA DI P $oldsymbol{E}$ SATUKA DII $oldsymbol{v}$ AMICA IN $oldsymbol{\iota}$ LLL $oldsymbol{I}$ GENTE PER LA GESTIO $oldsymbol{N}oldsymbol{E}$ DE $oldsymbol{L}$ TRAFFICO PESANTE"

http://www.wheelright.co.uk/vehicle-weight/

The Modbus Organization: http://www.modbus.org/

Yang , Sh - Wireless Sensor Networks: principles, design and applications, 2014 Chapter 2 – http://www.ipcsit.com/vol35/003-CNCS2012-N010.pdf

Zigbee Alliance:

https://www.zigbee.org/

IOT Architecture:

https://techbeacon.com/enterprise-it/4-stages-iot-architecture

OGC Observation & Measurements:

http://www.opengeospatial.org/standards.com

OGC SensorThings API:

http://www.opengeospatial.org/standards/sensorthings





