



**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**

**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

**OBIETTIVO REALIZZATIVO 2**

**“STATO DELL’ARTE DEI SISTEMI DI PESATURA DINAMICA  
NELLA GESTIONE DI SMART ROAD”**

**D 2.2 Report Finale Attività:**

**STATO DELL’ARTE SULLE TECNOLOGIE BASATE SU  
SENSORI A FIBRA OTTICA PER PESATURA DINAMICA**

**CODICE PROGETTO: ARS01\_00243**

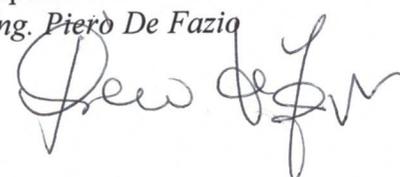
Coordinatore dell’OR  
Consorzio TRAIN

*Dott. Filippo Ragazzo*



Visto del Responsabile Tecnico Scientifico

*Ing. Piero De Fazio*



**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

<i>Contributi dei partecipanti</i>		
<i>Responsabile</i>	<i>Contributo</i>	<i>Descrizione contributo e note</i>
ENEA	Stesura documento	Report Tecnico sull’A.R. 2.2
<i>Partecipanti</i>		
ANAS	Commenti	
TAKIUS	Commenti	
TRAIN (ETT – UNISA)	Commenti	

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**

**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

## Sommario

1. Executive Summary .....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
2. Introduzione .....	5
3. Stato dell'arte sulle tecnologie dei sensori in fibra ottica .....	6
3.1. Principio di funzionamento dei sensori in fibra ottica .....	7
3.2. Componenti di un sistema di misura in fibra ottica.....	7
3.3. Applicazioni WIM con sensori in fibra ottica .....	10
3.3.1. Sistema WIM portatile di prima generazione .....	10
3.3.2. WIM con sensori dual core .....	12
4. Stato dell'arte sulle tecnologie FBG - Fiber Bragg Grating - .....	18
4.1. I reticoli di diffrazione.....	18
4.2. I Reticoli di Bragg .....	19
4.3. Vantaggi .....	24
4.4. Tipi di reticolo .....	24
4.5. Legame foto-termo-elastico .....	27
4.6. Tecniche di compensazione degli effetti termici.....	28
4.6.1. Sistemi di misura.....	28
4.6.2. Misura su sensori FBG in fibre di sezione differente .....	29
4.6.3. Tecniche basate sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo .	31
4.6.4. Isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante.....	32
4.6.5. Isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante.....	33
4.6.6. Sistemi basati su acquisizione di segnali già compensati in temperatura .....	33
4.6.7. Sistemi basati su FBG sovrascritti .....	34
4.6.8. Sistemi basati su sensori <i>phase-shifted</i> .....	35
4.6.9. Sistemi basati sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo .....	35
4.6.10. Confronto tra le diverse tecniche di misura.....	36
4.7. Tecniche di Multiplexing .....	37
4.8. Metodi di interrogazione .....	38
4.9. Applicazioni con sensori FBG .....	39
5. Stato dell'arte sull'uso di sensori FBG per applicazioni WIM .....	43
5.1. WIM con sensori FBG su strada .....	44
5.1.1. Bridge WIM – New Mexico (Stati Uniti) .....	44
5.1.2. Bridge WIM – Oregon (Stati Uniti).....	48
5.1.3. Tsing Ma Bridge WIM – Hong Kong (Cina).....	51
5.2. WIM su rotaia.....	55
5.3. Prodotto per pesatura dinamica proposto da IWIM S.r.l.....	58
6 Conclusioni .....	59
7 Bibliografia .....	61

## PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

### 1. Sintesi

Il presente documento rappresenta il deliverable 2.2 dell'OR 2 “Stato dell'arte dei sistemi di pesatura dinamica nella gestione di smart road”.

Nel Capitolato Tecnico l'attività AR2.2 è denominata “Stato dell'arte sulle tecnologie basate su sensori a fibra ottica per pesatura dinamica” ed il suo obiettivo è quello di approfondire lo stato dell'arte sulle tecnologie dei sensori in fibra ottica per applicazioni tipo WIM.

Le attività dell'AR2.2 sono rivolte pertanto all'indagine delle tecnologie per la pesatura dinamica con particolare riferimento all'utilizzo di sensori di deformazione a fibra ottica. Lo studio dello stato dell'arte, considerate le grandi potenzialità della tecnologia FBG non ancora completamente esplorate, non si è limitato esclusivamente al dominio proprio del progetto SENTINEL, ma ha approfondito anche domini differenti che sono risultati idonei a fornire spunti interessanti per la ricerca nell'ambito WIM.

Nel Capitolo 3 è stato analizzato lo stato dell'arte delle varie tecnologie dei sensori in fibra ottica. Dopo aver esaminato il principio di funzionamento con la descrizione delle relative componenti del sistema di misura sono state presentate alcune applicazioni con sistemi WIM in fibra ottica.

Il Capitolo 4 ha riguardato l'analisi dei sensori FBG in generale, esaminandone il principio di funzionamento, le tipologie, i vari metodi di compensazione degli effetti termici e relativo confronto e i diversi metodi interrogazione.

Il Capitolo 5 è stato focalizzato nella prima parte sullo stato dell'arte su applicazioni con sensori FBG non propriamente WIM ma afferenti a domini adiacenti come monitoraggio strutturale di ponti, strade, e controllo del traffico. Nella seconda parte invece sono state presentate due applicazioni WIM, una su strada e una su rotaia, che rappresentano lo stato dell'arte attuale dell'uso di FBG per applicazioni WIM.

## PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

## 2. Introduzione

Sebbene ormai da diversi anni si indaghi sulla possibilità di usare sensori in fibra ottica per applicazioni WIM e sebbene siano stati realizzati e sperimentati vari dimostratori, ancora oggi le applicazioni commerciali di WIM che utilizzino sensori in FO sono veramente poche e tutte caratterizzate da classe di precisione molto bassa. Il loro uso per applicazioni WIM si basa sulla misura della variazione delle caratteristiche del segnale luminoso che si propaga nella fibra ottica quando questa viene sottoposta a una deformazione causata dal passaggio di un veicolo sopra un elemento che a sua volta sollecita la fibra stessa.

I sensori in fibra ottica offrono, rispetto ad altre tipologie di sensori utilizzati in ambito WIM, diversi vantaggi: maggiore durabilità, affidabilità ed economicità.

L'analisi della tendenza attuale nell'uso di sensori in fibra ottica per applicazioni WIM sono basati essenzialmente su due differenti approcci:

- Cambiamento delle caratteristiche di Reticoli di Bragg scritti in fibra (cambiamento nella diffrazione della luce a causa di una deformazione)
- Cambiamento della proprietà della fibra ottica (trasparenza, frequenza, fase, polarizzazione).

I sensori in fibra ottica offrono numerosi altri vantaggi, oltre a quelli già elencati:

- Isolamento galvanico
- Immunità da interferenze elettromagnetiche
- Intrinsecamente sicuri
- Passivi: non necessitano di essere alimentati elettricamente
- Possibilità di controllo remoto
- Piccole dimensioni
- Facilmente integrabili in sistemi di telecomunicazioni: la fibra stessa è un mezzo per il trasporto dei dati a lunghissime distanze
- Risposta stabile e con alta risoluzione in regime sia statico sia dinamico
- Alta sensibilità
- Insensibilità alle condizioni meteo.

Per tutte le caratteristiche elencate quindi si prestano bene per realizzare sistemi WIM di buona precisione con garanzia che la misura non risulti influenzata da fattori che risultano invece penalizzanti per altre tipologie di sensori. La loro insensibilità alle interferenze elettromagnetiche in particolare li rende immuni da campi elettromagnetici generati dai componenti elettrici dei veicoli che vi transitino sopra e dalla eventuale presenza di apparecchiature fraudolente tese ad eludere il controllo di peso del veicolo.

In questo contesto si inseriscono le attività del progetto Sentinel. Esse aprono la strada all'utilizzo di vere e proprie strutture intelligenti (*smart materials*) che, inglobando al loro interno opportune tipologie di sensori e attuatori, sono in grado di monitorare l'ambiente fisico operativo, raccoglierne ed interpretarne le informazioni (attraverso un centro di elaborazione dati) per poi rispondere ai cambiamenti dello stesso in modo appropriato attraverso gli attuatori.

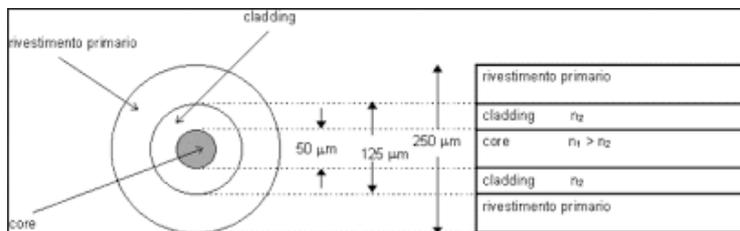
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

### 3. Stato dell’arte sulle tecnologie dei sensori in fibra ottica

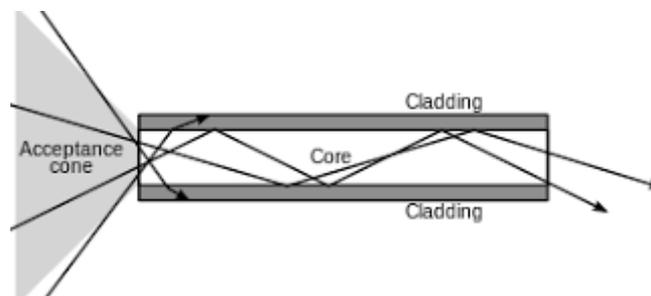
La fibra ottica (Figura 1) **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è composta da due strati concentrici di materiale vetroso opportunamente drogato ed estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o *core*, ed un mantello o *cladding* attorno ad esso. Tipicamente, il core presenta un diametro molto piccolo di circa 10 µm per le fibre monomodali e 50 µm per le multimodali, mentre il *cladding* ha un diametro di circa 125 µm. I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso, il *cladding* deve avere un indice di rifrazione minore (tipicamente circa 1,475) rispetto al core (tipicamente circa 1,5). Come ulteriore caratteristica il mantello (*cladding*) deve avere uno spessore maggiore della lunghezza di smorzamento dell'onda evanescente, caratteristica della luce trasmessa in modo da catturare la luce che non viene riflessa nel core.

La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare (Figura 2). La luce che entra nel core con angolo inferiore ad un particolare valore (angolo limite) si propaga mediante una serie di riflessioni totali alla superficie di separazione fra i due materiali del core e del *cladding*.

All'esterno della fibra vi è una guaina protettiva polimerica detta *coating* ed una eventuale ulteriore protezione detta *jacket* che serve a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione ed evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno.



**Figura 1 struttura fisica della fibra ottica**



**Figura 2 propagazione del segnale luminoso nella fibra ottica**

L'origine fisica della capacità della *fibra "tal quale"* di prestarsi come elemento sensore di deformazione risiede in quei processi che vengono identificati dal termine retrodiffusione. Quando la fibra è sollecitata con un segnale ottico, la natura intrinseca della matrice vetrosa di cui la fibra stessa è costituita genera una radiazione luminosa che si diffonde in tutte le direzioni. Una parte di

## PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

essa dunque risulta avere direzione parallela all'asse della fibra, e tale radiazione contro-propagante può essere utilizzata per leggere le proprietà locali della fibra stessa.

L'origine fisica della capacità della fibra “modificata” di prestarsi come sensore di deformazione risiede nel processo di diffrazione. Quando la luce si propaga nella fibra e raggiunge il segmento di fibra in cui è stato realizzato un reticolo di diffrazione, una componente spettrale della luce si contro-propaga nella fibra e può essere utilizzata per leggere le proprietà locali della segmento stesso.

### 3.1. Principio di funzionamento dei sensori in fibra ottica

La variazione della perturbazione causata da una variazione di sollecitazione che agisce su un tratto di fibra ottica è codificata nella variazione di alcune caratteristiche del fascio di luce che sono causate dalla variazione della perturbazione stessa. A questo scopo vengono usate differenti tecnologie basate su noti principi fisici:

- La *phase technology* con una sorgente di luce coerente, misura lo shift di fase tra l'onda in ingresso e quella in uscita.
- La *tunnel technology* usa gli effetti fisici che si verificano quando la luce attraversa una piccola apertura
- La *polarization technology* misura i cambiamenti nella polarizzazione della luce quando sia ha una modifica della geometria della fibra ottica a causa dell'applicazione di un carico
- La *spectral technology* misura le variazioni spettrali della luce
- La *amplitude technology* misura la variazione dell'intensità luminosa dovuta all'applicazione di forze in alcuni punti della fibra ottica.

Nel caso della amplitude technology, nei punti in cui viene applicato il carico si ha una curvatura del core della fibra ottica e del cladding e ciò porta a una variazione delle caratteristiche di riflessione della fibra ottica con conseguente perdita di una parte della radiazione luminosa. In genere maggiore è il carico e minore sarà l'intensità della radiazione luminosa che esce dal secondo estremo della fibra. Dunque, al contrario di altre tipologie di sensori, il segnale di uscita è tanto più piccolo quanto più grande è il carico, inoltre hanno un comportamento non lineare.

Tutte le tecnologie su menzionate, eccetto l'ultima, richiedono circuiti elettronici e algoritmi molto complessi per convertire gli effetti del cambiamento fisico in segnali elettrici della forma richiesta. Queste tecnologie sono molto accurate ma anche molto costose dal punto di vista economico e della configurazione e della calibrazione pertanto non vengono usate molto frequentemente. L'ultima tecnologia è semplice in termini di implementazione ed economica in termini di costi ma ha una accuratezza più bassa.

### 3.2. Componenti di un sistema di misura in fibra ottica

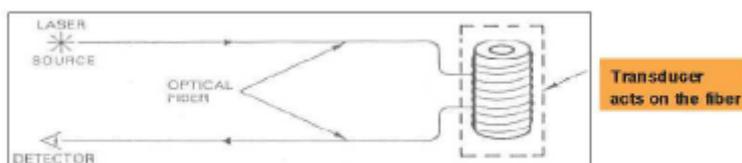
Gli elementi chiave dei sensori in fibra ottica sono: la fibra ottica, la sorgente luminosa, il rilevatore ottico e il modulatore ottico.

Fibra ottica

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

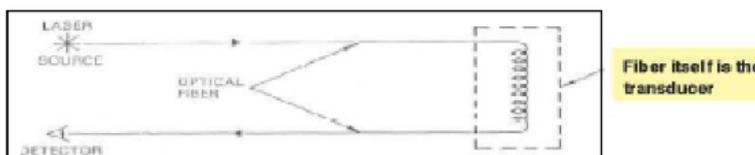
Le fibre ottiche risentono delle sollecitazioni in due modi distinti: estrinseco e intrinseco, in alcuni casi si ricorre a una combinazione di entrambi i metodi e in questo caso si parla di sistema di misura ibrido.

Nel caso di sensore estrinseco (o indiretto) (Figura 3 sensore in fibra ottica estrinseca) la luce viene condotta su un tratto di fibra collegato a un trasduttore che risente delle sollecitazioni ambientali e le trasferisce alla fibra ottica causando una variazione di fase, di frequenza, di polarizzazione o di contenuto spettrale al fascio luminoso che attraversa la fibra ottica.



**Figura 3 sensore in fibra ottica estrinseca**

Nei sensori intrinseci (o diretti) (Figura 4) invece la sollecitazione agisce direttamente sulla fibra.



**Figura 4 sensore in fibra ottica intrinseco**

I sensori intrinseci sono più sensibili dato che la sollecitazione agisce direttamente sulla fibra però in applicazioni WIM sono maggiormente suscettibili di danno a causa delle forze di impatto dei veicoli che vi passano sopra. Bisogna, quindi porre particolare cura nella fase di installazione per proteggere il sensore senza ridurre significativamente la sensibilità ed assicurare così misure accurate.

Sorgente luminosa

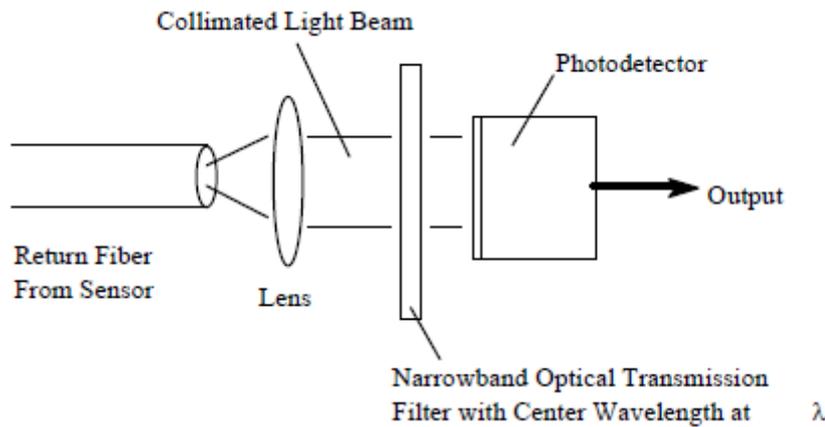
Le sorgenti luminose usate per inviare luce nelle fibre ottiche possono essere di due tipi: ad emissione spontanea (LED) o stimolata (LASER). Nel caso di emissione stimolata la luce prodotta è una luce coerente, monocromatica, direzionale e concentrata e quindi risulta particolarmente adatta ad essere inviata in una fibra ottica anche con core molto piccolo a differenza della luce prodotta dai LED che di solito si può accoppiare a fibre ottiche con core più grande.

Rilevatore ottico

Il processo di rilevamento della luce consiste nella conversione dell'energia ottica sotto forma di fotoni in un segnale elettrico che può essere trattato dagli elaboratori di segnale convenzionali. I rilevatori di segnale ottico più comunemente usati, per i sensori in fibra ottica, sono i fotodiodi. Essi sono generalmente usati per misurare la potenza restituita dal sensore. Se associati a reticoli di diffrazione o filtri, possono essere usati anche per misurare l'intensità delle componenti spettrali discrete che compongono il fascio luminoso.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

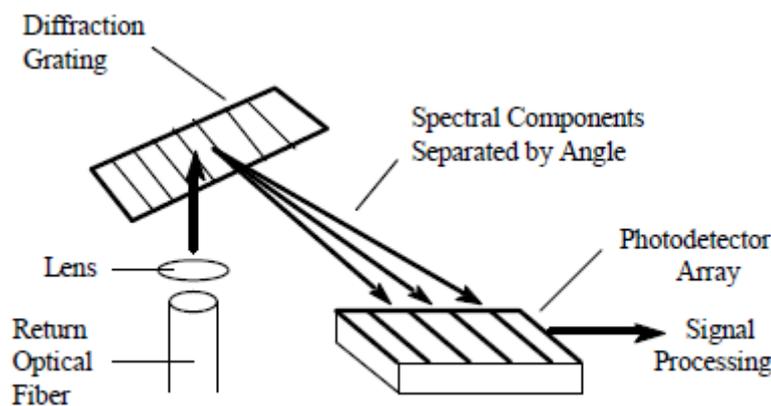
Ci sono diversi modi in cui si può misurare l'intensità delle singole righe spettrali. Il metodo più semplice è realizzato mediante un filtro ottico a banda stretta che filtra il segnale prima che arrivi al fotorilevatore. Se il fotorilevatore è caratterizzato da una funzione di risposta  $S(\lambda)$  amper/watt, la misura della potenza rilevata, nota la lunghezza d'onda del filtro ottico ( $\lambda$ ), permette di determinare l'intensità della singola componente spettrale  $\lambda$ .



**Figura 5 rilevamento di una singola componente spettrale**

Per misurare l'intensità delle singole componenti spettrali del segnale luminoso non monocromatico si può sostituire il filtro ottico a banda stretta con un filtro la cui lunghezza d'onda passante sia modulabile mediante un segnale elettrico. I limiti principali di un siffatto sistema risiedono nei costi elevati e nella larghezza di banda stretta che non permetterebbe di rilevare tutte le componenti spettrali di un segnale luminoso a larga banda. In aggiunta, questi filtri hanno un tempo di vita limitato se usati in sensori in fibra ottica in maniera continua.

Il metodo più comunemente usato per rilevare la distribuzione spettrale del segnale luminoso è rappresentato in Figura 6 dove il segnale ottico è spettralmente disperso per singola componente da un reticolo di diffrazione. Le varie componenti spettrali poi sono rilevate individualmente da un array di fotorilevatori come una telecamera a CCD. Sono disponibili CCD ad alta sensibilità di milioni di singoli elementi sensibili rendendo così possibile l'analisi ad alta risoluzione del segnale in uscita dai sensori.



**Figura 6 misura dello spettro del segnale di uscita per mezzo di un reticolo di diffrazione e di un array di fotorilevatori**

## PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

### Modulatore ottico

I modulatori ottici sono un altro componente fondamentale di un sistema in fibra ottica implementando una varietà di funzioni come la modulazione in ampiezza, fase o polarizzazione del segnale ottico. Essi sono di solito implementati come dispositivi allo stato solido nei quali la luce viene modulata variando le proprietà ottiche di un materiale mediante un segnale di controllo elettrico che è legato alle proprietà del materiale da meccanismi di tipo elettro-ottico, acusto-ottiche o magneto-ottiche. Ci sono tre tipi di modulatori ottici allo stato solido: bulk, integrati ottici e solo fibra.

Nei modulatori bulk il segnale si propaga attraverso un blocco uniforme di materiale. Nei modulatori bulk di fase la modulazione avviene variando l'indice di rifrazione del cristallo mediante l'applicazione di un campo elettrico. Cambiando la tensione applicata in un modulatore di fase si ottiene una variazione della polarizzazione del fascio di luce utilizzandolo così come modulatore di polarizzazione. I modulatori bulk acusto-ottici vengono usati prevalentemente per modulare la frequenza del fascio luminoso facendolo interagire con un'onda di perturbazione dell'indice di rifrazione viaggiante nel materiale mediante un'onda acustica. La perturbazione è dovuta all'effetto fotoelastico per cui una deformazione meccanica del materiale, dovuta all'onda acustica, produce una variazione lineare dell'indice di rifrazione.

I modulatori integrati sono realizzati mediante guide d'onda fabbricate sulla superficie di un substrato. Questi modulatori sono caratterizzati da elevata larghezza di banda, piccole dimensioni e compatibilità elevata con le fibre ottiche per cui non sono richieste complicate ottiche di accoppiamento. Possono essere usati per modulare la fase, l'intensità o la frequenza.

I modulatori in fibra sono molto interessanti nelle applicazioni su sensori in fibra ottica in quanto non richiedono accoppiamento con la fibra riducendo le perdite nella connessione e semplificando il packaging. I modulatori in fibra ottica non sono facili da realizzare poiché le fibre, essendo comunemente di materiale vetroso, non variano il proprio indice di rifrazione mediante l'applicazione di un campo elettrico e dunque è necessaria la variazione dell'indice di rifrazione che si può ottenere mediante un'azione meccanica come la compressione.

### 3.3. Applicazioni WIM con sensori in fibra ottica

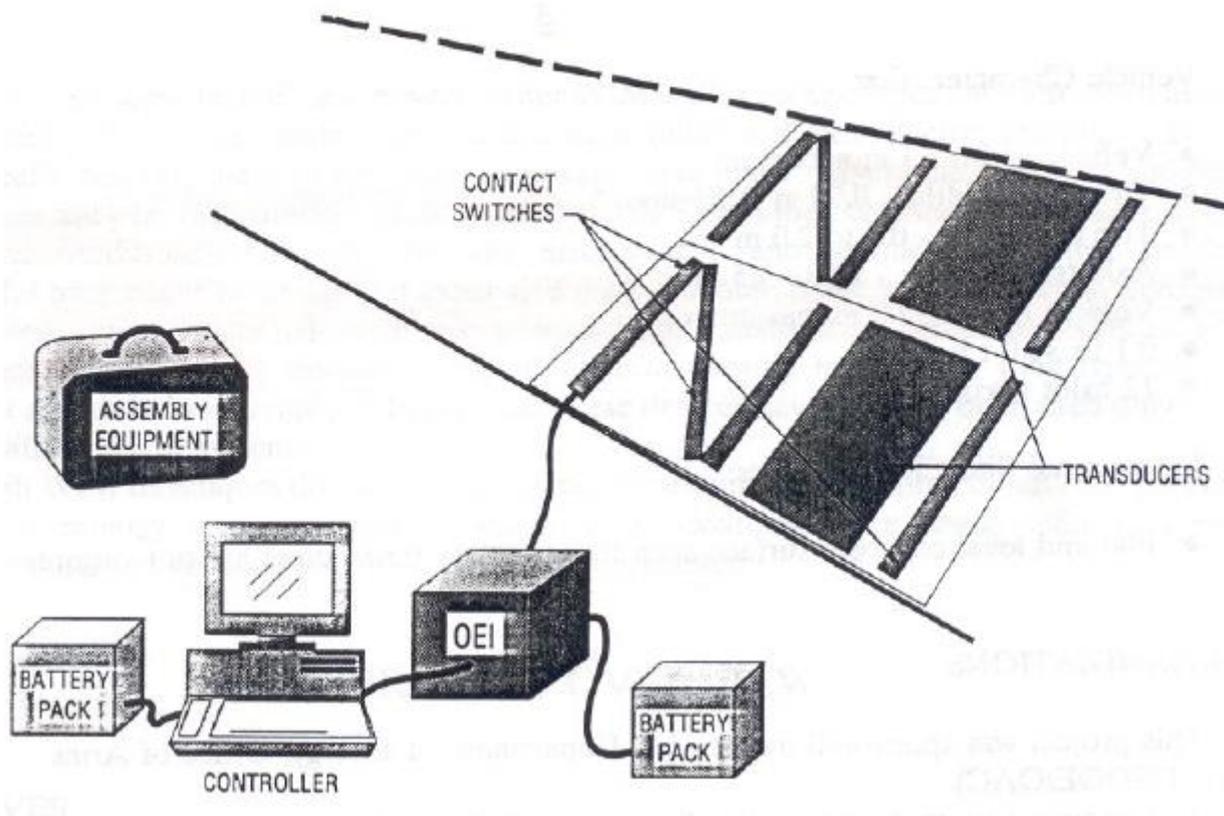
#### 3.3.1. Sistema WIM portatile di prima generazione

Il sistema studiato dai ricercatori del Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Stati Uniti, è un prototipo di prima generazione di un dispositivo WIM portatile in fibra ottica. Il sistema è composto da 4 componenti: trasduttore, contact switch, optoelettronica e un computer di interfaccia. Il trasduttore e i contact switch sono stati opportunamente progettati per essere posizionati sulla strada in occasione delle campagne di misura. Il sistema di misura (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) è costituito da due trasduttori opportunamente progettati e da 8 contact switch che hanno il compito di misurare alcune grandezze (carichi dinamici applicati, velocità, posizione degli

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

pneumatici e accelerazione) a ogni passaggio di un veicolo sopra di essi. Inoltre il sistema è stato progettato per avere la capacità di distinguere dati validi da dati non validi.

La base del trasduttore e le piastre sensibili alla pressione dello pneumatico sono state fabbricate utilizzando acciaio temprato semirigido.



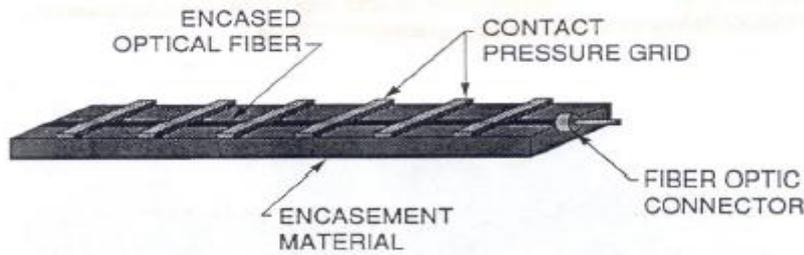
**Figura 7 schema della WIM portatile**

Nella piastra sono state realizzate due scanalature che alloggianno e proteggono i sensori. Ciascun trasduttore contiene due sensori in fibra ottica per aumentare la sensibilità e il range dinamico. In ciascun trasduttore un sensore è appositamente calibrato per i veicoli leggeri mentre l'altro per i veicoli pesanti. La forza dinamica impressa dai veicoli determina una compressione del sensore in fibra ottica provocando una riduzione di intensità del segnale luminoso che è tanto maggiore quanto maggiore è la forza impressa dal veicolo.

La fibra ottica è racchiusa in una struttura di poliuretano prima di essere installata sul trasduttore per migliorarne le prestazioni dal punto di vista della risposta a variazioni di temperatura e umidità.

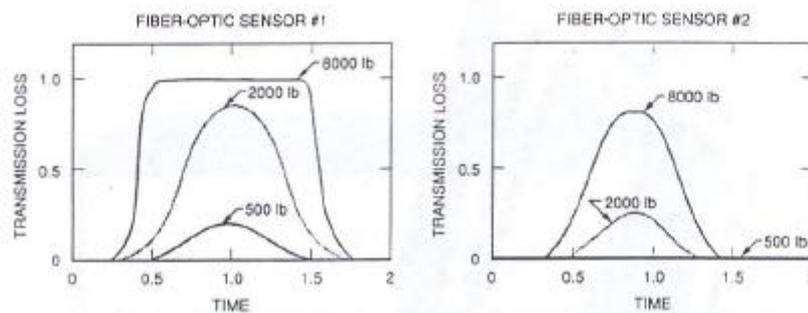
La sensibilità di ciascun sensore è determinata dalla configurazione della griglia di contatto (Figura 8): variandone la configurazione la relazione perdite-carico può essere adattata per ciascun sensore al range dinamico desiderato.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 8** esempio di configurazione della griglia di contatto

In Figura 9 si vede come i due sensori, a causa del diverso design della griglia, abbiano risposte differenti a parità di carico, così mentre il primo sensore è idoneo alla misura di veicoli leggeri il secondo è adatto alla misura di veicoli pesanti.



**Figura 9** comparazioni delle risposte dei due sensori con diversa griglia di contatto sottoposti allo stesso carico.

I contact switches sono usati per acquisire la velocità, la posizione e l'impronta degli pneumatici. Dal momento che questi parametri sono usati dall'algoritmo di stima della del peso, gli switches sono posizionati in prossimità del trasduttore per avere una misura più attendibile possibile della velocità con cui il veicolo attraversa i trasduttori. Inoltre viene misurata l'accelerazione su ciascun asse per determinare se il veicolo ha subito improvvise accelerazioni in modo da rendere la misura ripetibile.

Il sistema di misura è stato poi completato dall'elettronica e optoelettronica di interfaccia con il computer che acquisisce ed elabora i segnali provenienti dal trasduttore e dagli switches.

Il sistema è stato testato e calibrato mediante presse idrauliche che simulano l'applicazione di un carico dinamico.

I test eseguiti su campo hanno dimostrato la capacità della WIM di raggiungere accuratèzze vicino al 3% in ambiente controllato (velocità 5 km/h) nella misura del peso assiale nel range da 0,1 a 10 tonnellate.

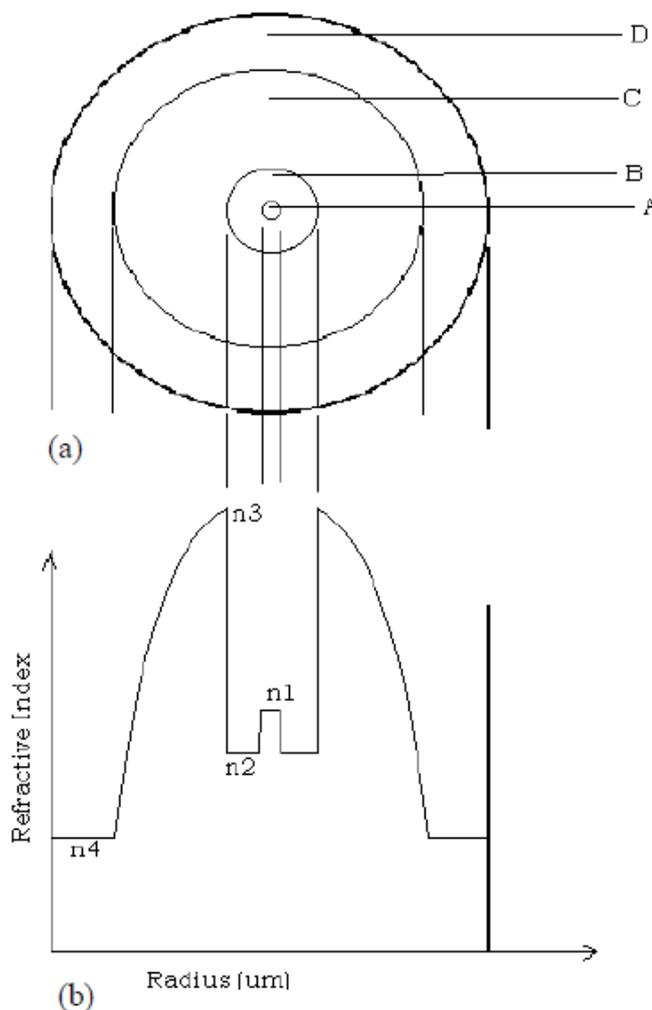
### 3.3.2 WIM con sensori dual core

La WIM sviluppata utilizza una speciale fibra ottica come sensore per misurare il peso di veicoli che viaggiano a velocità normale sulle superstrade. La fibra usata è realizzata mediante due core concentrici di differente lunghezza efficace dei percorsi ottici e in questo modo dà la possibilità di misurare direttamente l'ampiezza e la localizzazione di forze che agiscono in punti diversi della stessa fibra.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

La fibra utilizzata permette di catturare e misurare, mediante *Forward Time Division Multiplexing* (FTDM), la luce che, a causa della curvatura della fibra in seguito all'applicazione di forze su vari punti lungo la sua lunghezza, fuoriesce dal core generando così un segnale che è più forte, e quindi meno affetto da rumore, del segnale dovuto al backscattering. Questa speciale fibra FTDM ha mostrato un notevole potenziale per misurare direttamente sia l'ampiezza che la posizione delle forze applicate simultaneamente sulla stessa fibra. Questa caratteristica di questo tipo di sensore può facilitare la misura del carico esercitato dalle ruote di veicoli che viaggino su corsie multiple e anche la misura di altri importanti parametri come la velocità, la distanza inter-asse, la larghezza del veicolo ecc...

In Figura 10 è riportata la sezione trasversale della fibra ottica e l'andamento del profilo dell'indice di rifrazione all'interno della fibra ottica.



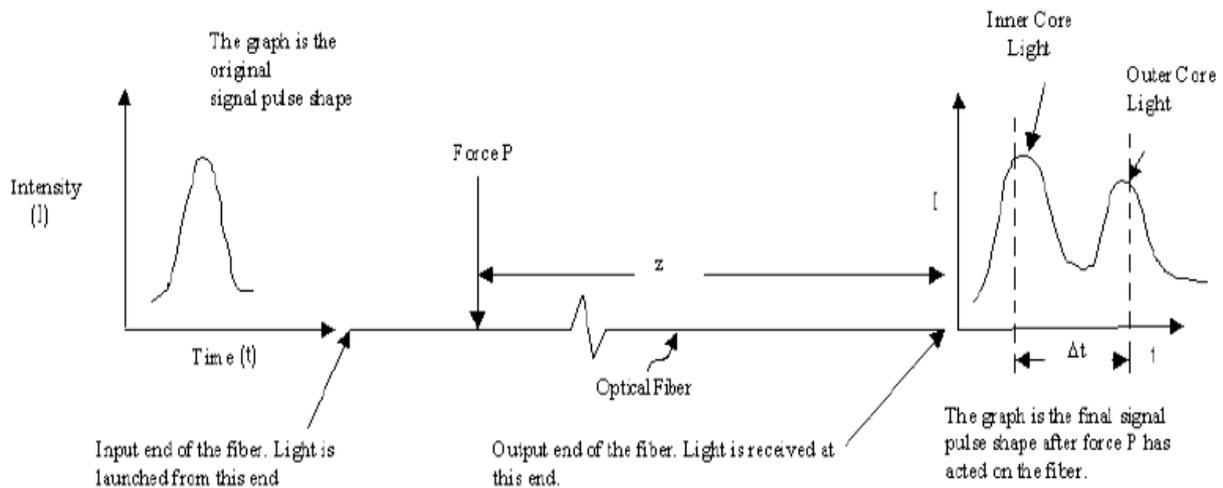
**Figura 10** fibra FTDM dual core (a) sezione trasversale, (b) profilo dell'indice di rifrazione

La fibra è basata sul principio FTDM ed è composta da quattro regioni concentriche :un primo core single mode centrale intorno al quale c'è un primo cladding, poi un secondo core con indice di rifrazione variabile e infine il cladding esterno.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

Quando un treno di impulsi luminosi di breve durata viene lanciato nel core interno, una forza meccanica laterale applicata in un punto qualsiasi lungo la fibra causerà la curvatura della stessa e produrrà una deviazione di una certa frazione dell'intensità di ciascuno di questi impulsi dal core interno al core esterno *graded index*. A causa del profilo dell'indice di rifrazione questa luce deviata viene catturata dal core esterno e trasmessa all'altra estremità.

Poiché l'indice di rifrazione del core esterno è maggiore di quello interno l'impulso di luce arriverà in ritardo rispetto a quello non deviato che si propaga nel core interno (Figura 11).



**Figura 11 segnali di input e output**

La relazione del ritardo  $\Delta t$  tra i due impulsi di luce che viaggiano nei due core della fibra e la distanza tra il punto in cui viene applicata la forza che produce la curvatura della fibra può essere scritta come:

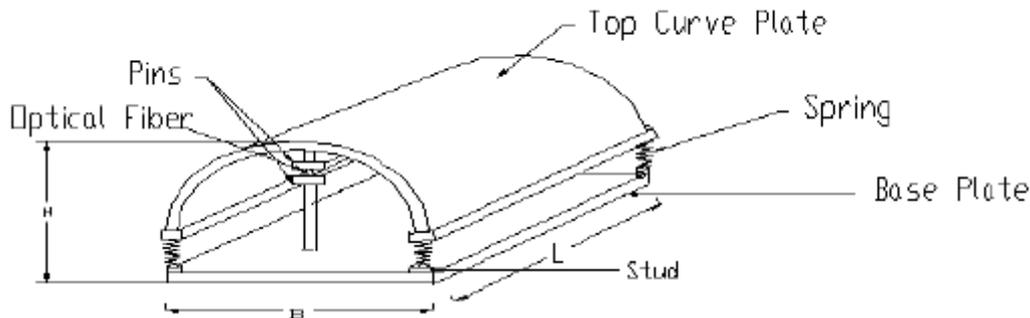
$$\Delta t = \left(\frac{z}{c}\right) [(n_3)_{eff} - (n_1)_{eff}] = \left(\frac{z}{c}\right) (\Delta n_{31})_{eff} \quad (3.1)$$

dove  $z$  è la distanza tra l'estremità di uscita del segnale e il punto in cui è stata applicata la forza,  $c$  è la velocità della luce nel vuoto,  $(n_3)_{eff}$  e  $(n_1)_{eff}$  sono rispettivamente i valori efficaci degli indici di rifrazione nel core esterno e quello interno.

Dal momento che parte della luce passa dal core interno a quello esterno, c'è una diminuzione di intensità luminosa nel core interno. L'entità della forza applicata che fa curvare la fibra può essere determinata proprio dalla variazione dell'intensità del segnale luminoso che viaggia nel core interno o quello esterno.

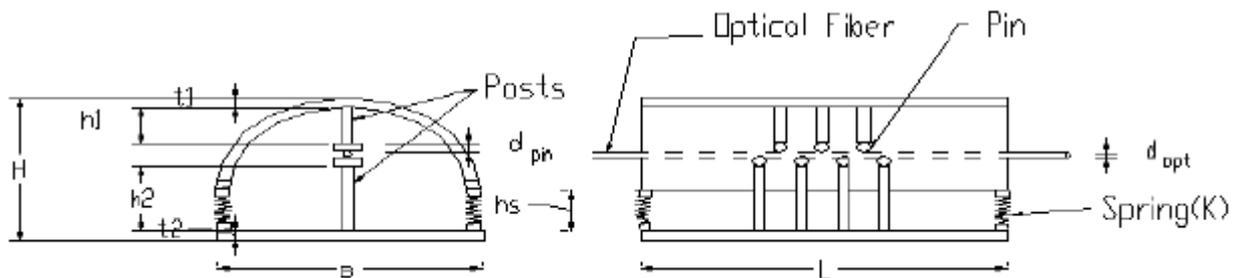
Il dispositivo che, sentito il carico delle ruote di un veicolo, trasforma il carico in curvatura della fibra ottica è realizzato come in Figura 12 mentre in Figura 13 sono riportate la sezione trasversale e longitudinale.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 12** schema grafico del trasduttore carico-curvatura della fibra ottica

1



**Figura 13** sezione trasversale longitudinale del trasduttore.

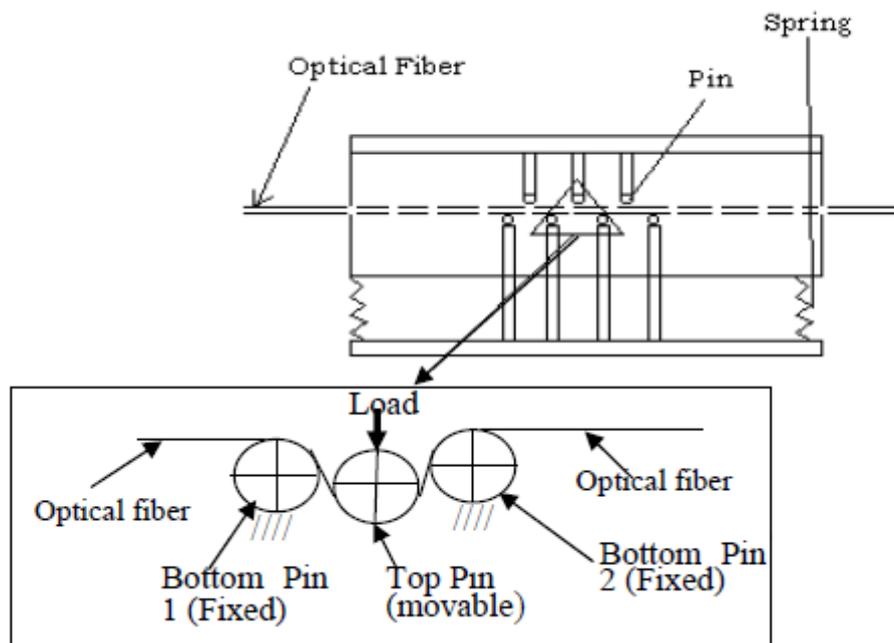
Il trasduttore è basato su un sistema di molle e piedini: esso consiste di una parte superiore di sezione semicircolare di acciaio supportata da quattro molle poste ai quattro angoli di una piastra di acciaio. Al top semicircolare è attaccata una fila di piedini di diametro di circa 1 cm mentre una seconda fila di piedini dello stesso diametro ma sfalsati rispetto alla prima sono collegati alla piastra di base. La distanza tra i piedini, la costante elastica della molla e il diametro dei piedini sono opportunamente dimensionati per far sì che la fibra ottica venga curvata di un raggio opportuno in modo che si abbia il passaggio di una quantità appropriata di luce dal core interno a quello esterno. La fibra ottica viene sistemata tra la parte bassa e quella alta di piedini delle due file collegate rispettivamente al top curvo e alla piastra base. Quando viene applicato un carico le molle si comprimono e la fila superiore di piedini va verso il basso per cui, poiché la fila inferiore di piedini rimane ferma, si ha una curvatura della fibra ottica. Una volta che il carico viene rimosso, la ruota ha superato il top d'acciaio, i piedini superiori ritornano nella loro posizione originaria e la fibra ritorna perfettamente orizzontale. Il top di forma curvilinea presenta alcuni vantaggi: permette il passaggio del veicolo sul trasduttore in maniera uniforme e consente di porre il dispositivo sottoterra esponendo solo una piccola porzione alle ruote del veicolo.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 14** foto del dispositivo trasduttore

Il sistema è stato testato sottoponendolo a compressione mediante una macchina universale e poi con un veicolo nella configurazione a tre piedini nella fila superiore (Figura 15).

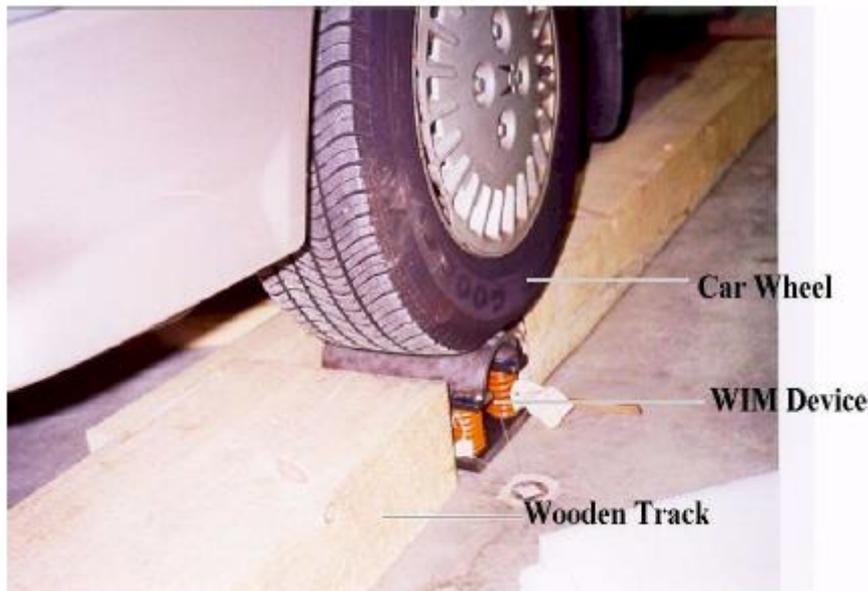


**Figura 15** curvatura della fibra ottica

In una WIM siffatta si può notare una riduzione del picco luminoso nel core interno all’aumentare del carico, dal momento che all’aumentare della curvatura una quantità sempre maggiore di luce passa nel core esterno. Nel core esterno invece si osserva un aumento del picco per la stessa ragione fino a un certo carico applicato (la cui entità dipende da fattori progettuali come ad esempio la costante elastica della molla), al di sopra di questo valore anche il picco nel core esterno comincia a decrescere a causa delle perdite di luce dal core esterno verso l’esterno della fibra ottica a causa

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

della curvatura. Pertanto la misura più affidabile del carico applicato viene data dalla misura del picco nel core interno.



**Figura 16 carico applicato per mezzo di un'autovettura**

Dai dati raccolti sperimentalmente si è trovato che la relazione tra il carico applicato e l'intensità del picco luminoso nel core interno è, con buona approssimazione, di tipo lineare.

Dai test inoltre si è visto che per veicoli che si trovano su corsie adiacenti il ritardo tra i picchi è sufficiente per poter distinguere i carichi esercitati da ciascun veicolo.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

## 4. Stato dell'arte sulle tecnologie FBG - Fiber Bragg Grating -

Al fine di introdurre i reticoli di Bragg richiamiamo brevemente i concetti di base relativi ai reticoli di diffrazione. I reticoli di Bragg infatti si ottengono imponendo semplicemente la condizione per la quale si individua direzione di massima intensità del valore dell'onda elettromagnetica uscente da due sorgenti puntiformi come descritto nel seguito.

### 4.1. I reticoli di diffrazione

I reticoli di diffrazione sono costituiti da un insieme di elementi, aperture o ostacoli, separati tra loro da una distanza dello stesso ordine di grandezza delle lunghezze d'onda della luce incidente che consentono la diffrazione di un'onda incidente. Tali reticoli in base all'applicazione possono essere progettati e costruiti in diversi modi. Tipicamente si tratta di una serie di fessure in uno schermo opaco oppure di scanalature ricavate su una superficie riflettente. In alcuni casi vengono prodotti sovrapponendo strati sottili di materiale ad indice di rifrazione differente. La caratteristica fondamentale dei reticoli di diffrazione è la capacità di modificare la fase o l'ampiezza di un'onda elettromagnetica incidente in base alle caratteristiche di modulazione spaziale del reticolo.

Da un lato del reticolo è posta una sorgente luminosa equidistante da entrambe le fessure, dall'altra parte è invece posto uno schermo ad una distanza  $D \gg d$ . Le due fessure possono essere trattate come due sorgenti luminose puntiformi di eguale intensità, in base al *principio di Huygens-Fresnel*. Si vogliono considerare le direzioni (angoli  $\theta$ ) in cui si ha interferenza costruttiva delle onde elettromagnetiche uscenti da queste due fessure.

Si considera  $E_0$  pari al valore del campo elettrico all'altezza del reticolo, che è anche il campo delle sorgenti puntuali, le onde elettromagnetiche uscenti da A e B, e propagantisi in direzione x possono essere scritte come segue:

$$E_A = E_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad E_B = E_0 e^{i(k(x+l) - \omega t)} \quad (4.1)$$

dove  $k = 2\pi/\lambda$  ed  $\omega$  sono rispettivamente il vettore d'onda la frequenza della luce incidente. La lunghezza  $l = d \sin\theta$  rappresenta invece la differenza di cammino ottico tra le due onde in direzione x. La somma di queste due onde risulta:

$$E_t = E_A + E_B = E_0 e^{i(kx - \omega t)} [1 + e^{ikl}] \quad (4.2)$$

La figura di interferenza dipende dall'intensità del campo elettromagnetico risultante. Come già anticipato nell'introduzione se si vuole determinare semplicemente la direzione  $\theta$  dei massimi di  $E_t$ , e non il loro valore, si può ricavare la condizione di massima intensità:

$$\frac{kl}{2} = m\pi \quad (4.3)$$

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

dove  $m$  è un numero intero, e prende il nome di ordine del massimo, definito anche *frangia di interferenza*. Tenendo conto che  $l=d \sin\theta$  si ricavano le direzioni  $\theta$  in cui la figura di interferenza presenta un massimo

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} \tag{4.4}$$

che rappresenta la *condizione di Bragg*.

## 4.2. I Reticoli di Bragg

Se si considera una struttura per cui il reticolo di diffrazione viene ottenuto per mezzo di una variazione periodica dell'indice di rifrazione del core della fibra, e la modulazione periodica è ottenuta per mezzo di un laser a luce UV che altera localmente le proprietà fisiche del materiale, aumentandone leggermente l'indice di rifrazione, andando a costruire una serie di frange all'interno del core, si parla di reticoli di Bragg (*Fiber Bragg Grating – FBG*). Anche per un reticolo inscritto in fibra ottica è possibile individuare le condizioni sotto le quali si verifica interferenza costruttiva per la luce trasmessa e riflessa all'interno della fibra (Figura 17).

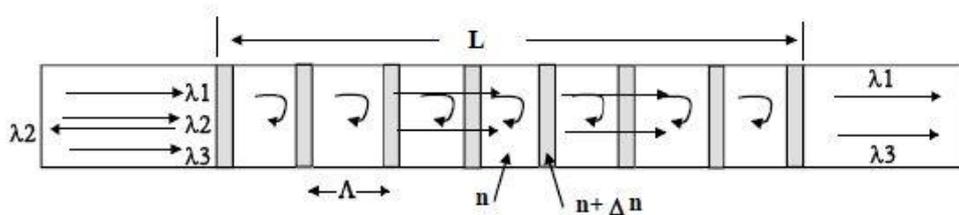


Figura 17 struttura a reticolo di Bragg.

A tale scopo basta procedere come precedentemente, analogamente al caso più semplice trattato. Nel caso di un'onda che si propaga all'interno di un mezzo con indice di rifrazione  $n$  non unitario, si può scrivere:

$$L n (\sin\theta_2 - \sin\theta_1) = m\lambda \tag{4.5}$$

Dove  $\Lambda$  è il periodo del reticolo,  $\theta_1$  è l'angolo formato tra il raggio incidente e la normale alla superficie dell'interfaccia e  $\theta_2$  è l'angolo formato tra il raggio rifratto e la normale. Definito l'indice di rifrazione efficace  $n_{eff}$  per entrambi gli angoli

$$n_{eff,1} = n \sin\theta_1 \quad n_{eff,2} = n \sin\theta_2 \tag{4.6}$$

e le costanti di propagazione del modo

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

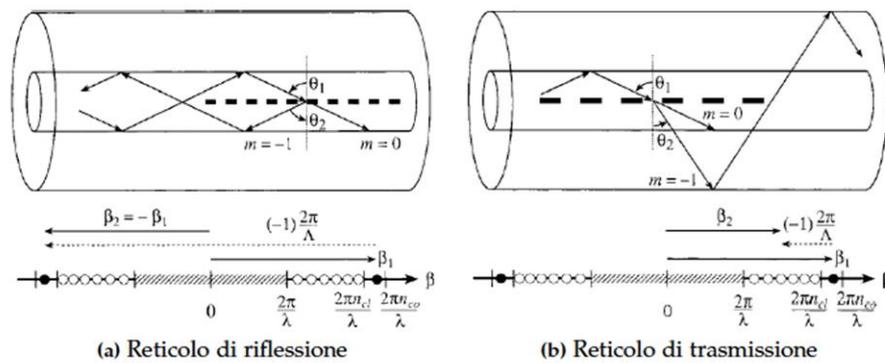
$$b_1 = n_{eff,1} \frac{2\rho}{l} \quad b_2 = n_{eff,2} \frac{2\rho}{l} \quad (4.7)$$

si ottiene

$$b_2 - b_1 = \frac{2m\lambda}{d} \quad (4.8)$$

Tipicamente nelle fibre ottiche risulta dominante il primo ordine di diffrazione, corrispondente a  $m=-1$ . A valori positivi di  $\beta$ , corrispondono modi viaggianti in direzione  $+z$  (trasmissione), mentre per  $\beta$  negativo si hanno modi viaggianti in direzione opposta (riflessione). In base alla direzione in cui vengono accoppiati i modi si possono quindi classificare i reticoli come reticoli di *Bragg*, o di *riflessione* e reticoli di *trasmissione*, detti anche *Long Period Gratings*.

In Figura 18 viene illustrato il funzionamento di entrambi i tipi di reticoli.



**Figura 18** Tipologie di reticoli inscritti in fibra ottica. Sono riportati i valori delle costanti di propagazione dei singoli modi

Se ci si limita al caso dei reticoli di riflessione, l'equazione 4.5 si riscrive nel modo seguente:

$$l = L(n_{eff,1} + n_{eff,2}) \quad (4.9)$$

da cui, imponendo che l'angolo di trasmissione sia uguale all'angolo di riflessione, si ottiene la *relazione caratteristica di un reticolo di Bragg*, che fornisce la lunghezza d'onda  $\lambda_B$  per la quale si ha un massimo del segnale riflesso

$$l_B = 2n_{eff} L \quad (4.10)$$

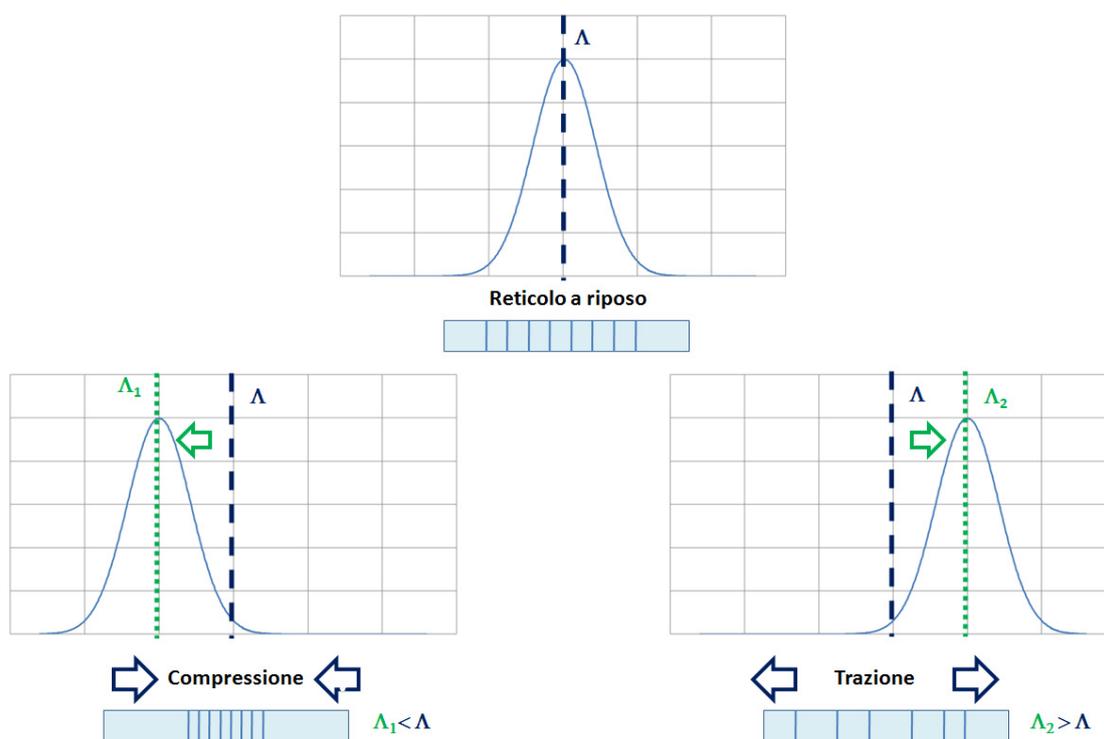
Valori tipici sono per  $n_{eff} \sim 1.5$  e per  $L$  valori da 505 nm a 535 nm.

Il fatto che la lunghezza d'onda riflessa dipenda dal passo del reticolo fa sì che una qualsiasi variazione subisca il passo può essere facilmente rilevata come variazione di lunghezza d'onda. Per questa ragione i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come *sensori di deformazione* e di

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

*temperatura*. Il fatto poi che sono poco invasivi consente di inserirlo in strutture di vario tipo. Un ulteriore vantaggio non trascurabile è la linearità della dipendenza  $\lambda_B - \Lambda$  che viene mantenuta fino alla rottura del sensore.

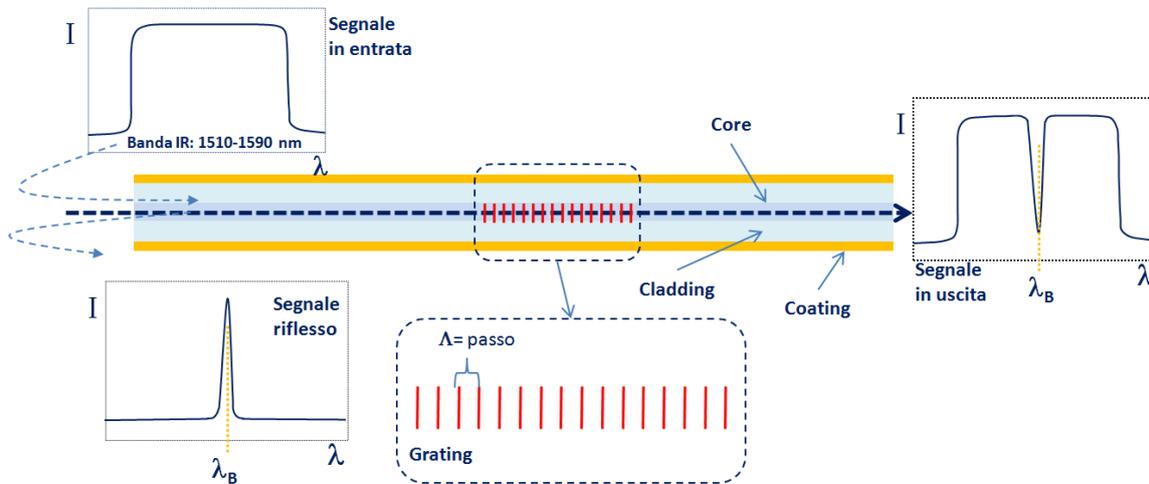
Se il sensore è sottoposto ad una sollecitazione, termica o meccanica, costante, che determina una variazione uniforme del passo del reticolo si ha una traslazione rigida dell'intero spettro (Figura 19). Se ad esempio sul sensore agisce una deformazione variabile sulla lunghezza del reticolo, cambia anche la forma dello spettro, rendendo molto complessa, se non impossibile, l'identificazione della deformazione. In presenza di una deformazione lineare, tuttavia, la variazione di lunghezza d'onda di Bragg consente di rilevare la deformazione media sul sensore.



**Figura 19** Variazione del reticolo in funzione di una sollecitazione meccanica

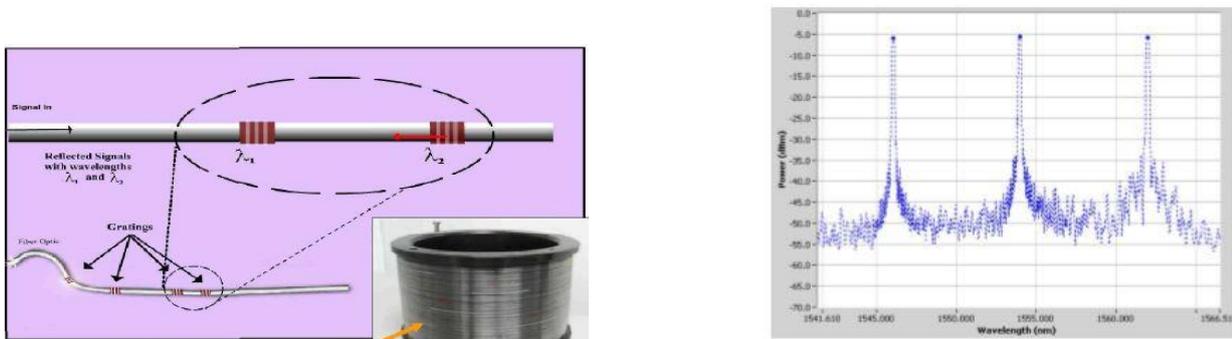
In Figura 20 sono mostrati gli spettri riflessi e trasmessi da un sensore FBG.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 20** Principio di funzionamento reticolo di Bragg.

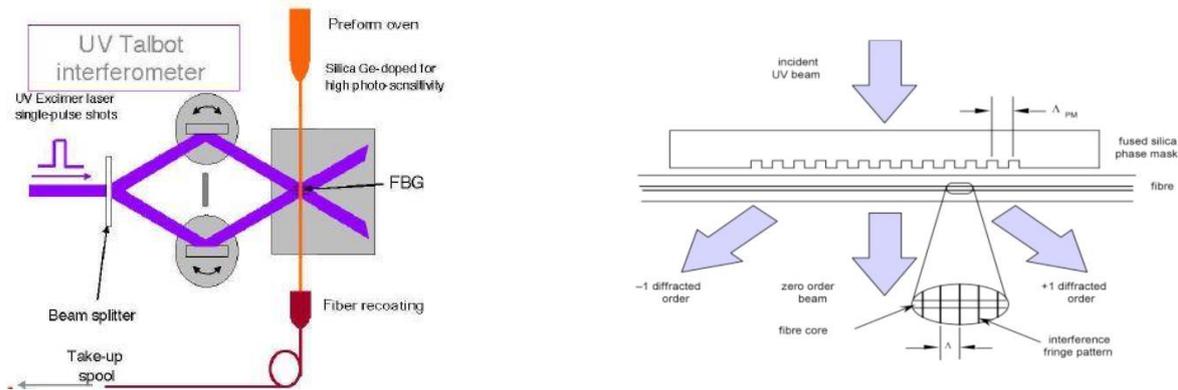
Con opportuni accorgimenti di installazione e packaging, i sensori FBG possono misurare anche: pressione, accelerazione, grandezze elettriche (corrente, tensione, campo magnetico, ecc.). Un FBG può lavorare come sensore singolo o inserito in un array di FBG incisi sulla stessa fibra, ognuno con un distinto reticolo di Bragg. ( Figura 21a).



**Figura 21 a)** Array di FBG multipunto **b)** Spettro di un array di FBG

Moderni metodi di incisione (*drawing tower*) possono fabbricare fino a 50 FBG per singolo array, con lunghezze d’onda distanti ~ 2nm tra ogni lunghezza d’onda di Bragg. Lo spettro risultante sarà la combinazione di tutti gli spettri dei singoli FBG (Figura 21b). Tale metodo di incisione dei reticoli durante lo stesso processo di estrusione della fibra prima della deposizione del coating, si fa preferire alla procedura standard di incisione del sensore FBG mediante una maschera di fase in quanto lo svestimento della fibra, l’esposizione al modello di interferenza ad UV ed il successivo rivestimento riducono la resistenza meccanica a trazione della fibra. (Figura 22). Dallo spostamento delle lunghezze d’onda  $\Delta\lambda$  pertanto è possibile risalire alla causa dello spostamento, una deformazione meccanica  $\Delta\varepsilon$  o una variazione di temperatura  $\Delta T$  o entrambi.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 22 a) Drawing tower b) Maschera di fase**

Sono riportati di seguito i parametri caratteristici dei sensori FBG.

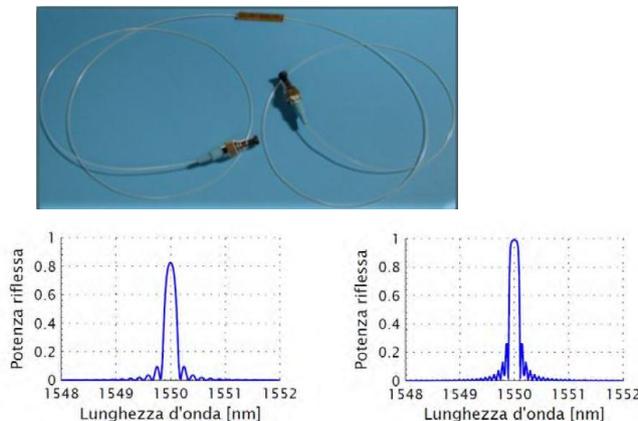
Caratteristiche geometriche e meccaniche:

- ✓ Lunghezza FBG: 6 – 15 mm
- ✓ Resistenza alla temperatura: riduzione della riflettività T=200°C 4% dopo 100 gg, 6% dopo 1000gg
- ✓ Resistenza alla trazione: carico di rottura tipico 4 Kg, corrispondente ad una elongazione del 4.5%
- ✓ Durata sotto carico: 20 anni sotto sforzo equivalente ad una elongazione dello 0.2%
- ✓ Rivestimento: recoat acrilato o poliammide

Caratteristiche ottiche:

- Riflettività: 10 – 95 % (Potenza riflessa)
- Lunghezza d'onda: 1500-1600 nm
- FWHM (Full Width at Half Maximum) indica la larghezza del lobo principale nello spettro di riflessione.

L'intensità della risposta del sensore dipende dalla lunghezza del reticolo di Bragg e quindi dal numero di variazioni dell'indice di rifrazione all'interno del reticolo (Figura 23).



**Figura 23 a) Sensore FBG inserito nella fibra b) Riflettività per L=5mm e L=10mm**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

### 4.3. Vantaggi

I sensori in fibra ottica presentano una serie di vantaggi rispetto ai tradizionali sensori basati su sistemi elettrici o meccanici, tra questi:

- **Dimensioni:** il diametro esterno di un sensore FBG misura 150 micron (nel caso di coating in poliammide); ciò significa che tali sensori hanno una bassa intrusività e quindi si possono utilizzare, ad esempio, per posizionarli in spazi molto ristretti oppure possono essere inglobati (embedded) in materiali compositi per ottenere “smart structures”;
- **Immunità alle interferenze elettromagnetiche:** un reticolo di Bragg è un componente passivo, non necessita cioè di alimentazione per il suo funzionamento e inoltre il materiale con cui sono realizzate le fibre ottiche, il vetro, è un materiale dielettrico quindi i campi elettromagnetici non possono ovviamente indurre correnti elettriche in esso.
- **Alta risoluzione e accuratezza:** un sensore FBG presenta una capacità di rilevare una variazione molto piccola della grandezza da misurare (risoluzione) pari a 0,1 parti per milione ( $1 \times 10^{-7}$ ) e inoltre presenta un’elevata accuratezza nel determinare massimo scostamento tra il valore misurato e il valore reale della grandezza fisica misurata.
- **Stabilità:** i sensori a fibra ottica FBG sono caratterizzati da una propria stabilità intrinseca legata al materiale che costituisce la fibra ottica, il vetro. Trattandosi come detto di componenti passivi non presentano derive nel tempo dovute all’invecchiamento dei materiali, alla corrosione, all’azione degli agenti atmosferici quindi una volta installati possono essere impiegati per anni senza la necessità di ri-calibrazioni.
- **Elevatissima moltiplicazione su singola fibra:** è possibile integrare su una singola fibra ottica un numero di sensori molto elevato, in questo modo una singola catena di sensori, ovvero un singolo tratto di fibra ottica è in grado di sopperire alla necessità di un sistema di sensori articolato ed in grado di misurare diverse grandezze contemporaneamente (i.e. un set di FBG può comprendere sensori per misurare deformazioni, temperatura, umidità, variazioni di concentrazioni, ecc).
- **Installazione a grande distanza:** la fibra ottica è una delle portanti fisiche con la più bassa attenuazione di segnale quindi è possibile porre il sistema di interrogazione ad una distanza molto elevata (decine di km) dalla rete dei sensori.

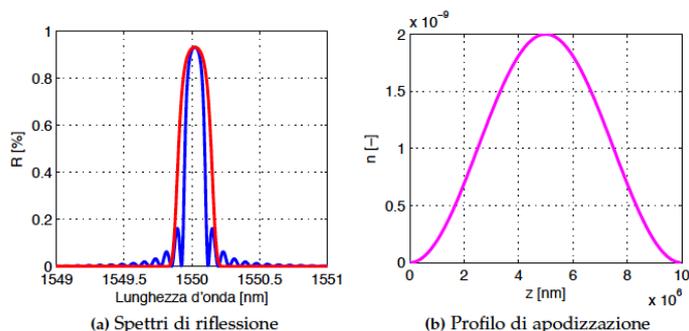
Tra gli ulteriori vantaggi possiamo annoverare la praticità ed economia nell’installazione, la non necessaria calibrazione iniziale o durante la vita del sensore, la possibilità di compensare gli effetti dovuti alla temperatura ecc..

### 4.4. Tipi di reticolo

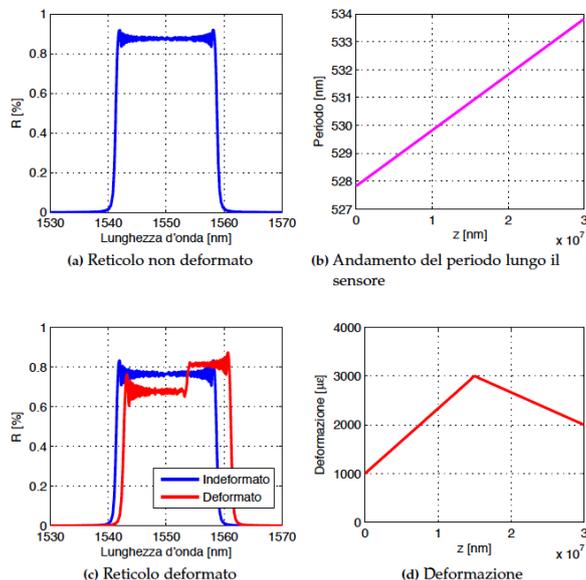
Il processo di iscrizione del reticolo definisce le caratteristiche ottiche e geometriche. Se si modificano le caratteristiche ottiche si ottengono reticoli *apodizzati* cioè reticoli che non presentano lobi ai lati del picco principale. Esistono vari tipi di apodizzazione, che vengono descritti come modulazione dell’indice di rifrazione efficace. In Figura 24 è illustrato l’effetto di un’apodizzazione sullo spettro di riflessione di un reticolo, a parità di caratteristiche.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

Se si modifica la geometria, ad esempio modificando il passo del reticolo, si ottengono invece reticoli *chirped*. Il risultato dell'analisi spettrale è quello di ottenere uno spettro allargato, dal momento che ogni frangia, avendo un periodo diverso dalle altre, riflette una lunghezza d'onda  $\lambda_B$  differente. Questa caratteristica è molto interessante e in fase di progettazione può essere sfruttata per ricostruire deformazioni con andamento arbitrario, in quanto esiste una relazione tra lunghezza d'onda e posizione sul sensore. In Figura 25 è possibile vedere l'effetto di una deformazione complessa su un reticolo con *chirp* lineare. La ricostruzione della deformazione richiede tuttavia procedure più complesse rispetto alla semplice lettura di una variazione di lunghezza d'onda del picco poiché l'informazione sull'andamento della deformazione è contenuto nella forma dello spettro.



**Figura 24** Confronto tra gli spettri di riflessione del reticolo apodizzato e non apodizzato.



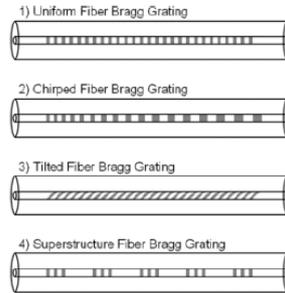
**Figura 25:** Spettro di un reticolo chirped e comportamento del reticolo sottoposto ad una deformazione complessa.

Una classificazione più completa comprende anche altri tipi di reticoli che di seguito vengono elencati e mostrati in Figura 26:

1. *uniforme*, se il periodo non varia lungo la fibra;
2. *chirped*, se il periodo non è uniforme;
3. *tilted*, se la variazione è inclinata rispetto la normale alla fibra;

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

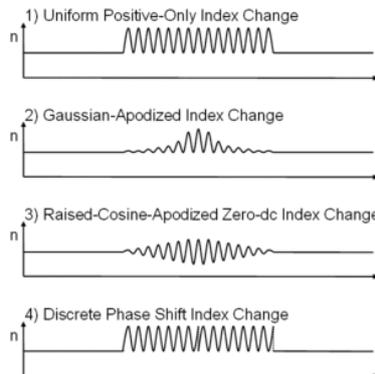
4. *superstructured*, se la variazione d'indice è distribuita in superstrutture lungo la fibra.



**Figura 26 Classificazione degli FBG in base al tipo di reticolo**

La variazione dell'indice di rifrazione può essere (Figura 27):

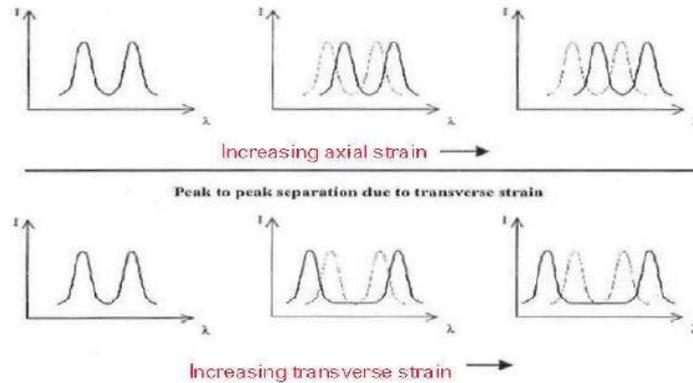
1. *uniforme positiva*, se è costante per ogni periodo, con offset positivo;
2. *gaussiana apodized*, se ha una forma longitudinale gaussiana, con offset positivo;
3. *raised-cosine-apodized*, se ha una forma longitudinale a coseno rialzato, con offset nullo;
4. *discrete phase shift*, se le due metà della struttura sono in opposizione di fase, con offset positivo.



**Figura 27 Classificazione degli FBG in base al tipo di reticolo in base alla variazione dell'indice di rifrazione**

Nella maggior parte delle applicazioni i sensori FBG misurano la deformazione lungo l'asse longitudinale. In alcune applicazioni la deformazione indotta dal carico avviene sia lungo la direzione X che la direzione Y. Una deformazione trasversale lungo Y, agendo sul sensore FBG, svilupperà nello spettro un secondo picco di riflessione, dovuto ad uno splitting del picco originario. All'aumentare del carico applicato aumenta lo splitting tra i due picchi e questo è noto come effetto fotoelastico. Come risultato, lo shift della lunghezza d'onda osservato è dovuto ad una combinazione di entrambe le deformazioni assiale e trasversale. Aumentando la deformazione assiale i due picchi si spostano di un  $\Delta\lambda$  nella stessa direzione, mentre con l'aumentare della deformazione trasversale si allarga la separazione dei due picchi (Figura 28).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 28 FBG con deformazioni su due assi**

In questi casi si possono utilizzare 3 sensori FBG in configurazione a rosetta tipicamente disposti a 45° o a 120°. Questa configurazione è utile in analisi sperimentali per misurare le deformazioni lungo direzioni non note a priori.

#### 4.5. Legame foto-termo-elastico

Una perturbazione esterna, che dunque indirettamente coinvolge il reticolo, può determinare una variazione del reticolo di Bragg stesso e dell'indice di rifrazione, andando conseguentemente a modificare la lunghezza d'onda di Bragg.

Dal punto di vista analitico facilmente l'effetto si può formalizzare, infatti se si considera la variazione della lunghezza d'onda in funzione della variazione del periodo del reticolo, si ha:

$$\frac{D\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{DL}{L} + \frac{Dn_{eff}}{n_{eff}} = e_z + \frac{Dn_{eff}}{n_{eff}} \quad (4.11)$$

in cui si evidenzia la deformazione lungo l'asse del sensore  $e_z$ . Il termine  $\Delta n_{eff}$  rappresenta la variazione di indice di rifrazione del reticolo dovuta alla sollecitazione meccanica o termica. Al fine di evidenziare la componente meccanica e termica la deformazione assiale può essere scomposta in due parti:

$$e_z = e_z^t + e_z^m = \alpha DT + e_z^m \quad (4.12)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica della fibra ottica. La variazione dell'indice di rifrazione è invece la si ottiene come segue:

$$Dn_{eff} = -\frac{n_{eff}^3}{2} \left[ \rho_{12} e_z + (\rho_{12} + \rho_{11}) e_r - \left( \frac{2}{n_{eff}^3} \frac{dn}{dT} \right) DT \right] \quad (4.13)$$

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

dove sono evidenziati con  $p_{ij}$  le componenti del tensore opto-elastico,  $\varepsilon_r$  la deformazione radiale del core della fibra e  $\Delta T$  la variazione di temperatura. Si può pertanto facilmente ricavare il legame foto-termo-elastico completo

$$D/l_B = l_B \left[ e_z - \frac{n_{eff}^3}{2} (p_{12} e_z + (p_{12} + p_{11}) e_r) \right] + l_B \left[ a + \frac{1}{n_{eff}} \left( \frac{dn}{dT} \right) \right] \Delta T \quad (4.14)$$

La (4.14) si può semplificare introducendo una costante foto-elastica (4.15) e un coefficiente termo-ottico (4.16)

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - (p_{12} + p_{11}) \nu) \quad (4.15)$$

$$z = \frac{1}{n_{eff}} \left( \frac{dn}{dT} \right) \quad (4.16)$$

Pertanto l'equazione finale risulta:

$$D/l_B = l_B (1 - p_e) e_z + l_B (a + z) \Delta T \quad (4.17)$$

Per i sensori FBG valori tipici rispettivamente sono per il coefficiente deformazione-ottico  $k_e = 1 - p_e \sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  e per il coefficiente termo-ottico  $k_T = \alpha + \zeta \sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ .

## 4.6. Tecniche di compensazione degli effetti termici

Dagli anni '90 l'utilizzo di sensori ottici basati sul reticolo di Bragg è cresciuto notevolmente in grazie alle peculiari caratteristiche già introdotte e alla capacità di trasdurre sia variazioni di temperatura sia di deformazione. Tuttavia, si è riscontrata la necessità di riuscire a distinguere l'una o l'altra variazione e ciò ha portato allo sviluppo di diverse tecniche di disaccoppiamento del segnale ottico. Nel progetto Sentinel si è interessati alle misure di deformazione e pertanto è di fondamentale importanza comprendere quali siano oggi le possibilità che la tecnologia offre per attuare misurazioni corrette. Dopo un breve richiamo teorico sui principi di funzionamento nel seguito sono esposte e confrontate le principali tecniche presenti in letteratura al fine di individuare quelle potenzialmente adatte ad essere applicate a sensori inglobati in elementi carrabili quali laminati o cemento e che rendono i materiali ormai intelligenti.

### 4.6.1. Sistemi di misura

Nella generalità dei casi i sistemi di misura che disaccoppiano il segnale ottico si basano sull'impiego di due sensori FBG aventi differente risposta alle medesime perturbazioni. A partire dall'equazione fondamentale del legame foto-termo-elastico precedentemente introdotto, è possibile relazionare la variazione di lunghezza d'onda di Bragg con le deformazioni e le variazioni di temperatura applicate al reticolo. Utilizzando due sensori aventi differenti coefficienti di

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**

**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

proporzionalità è possibile disaccoppiare i contributi delle due grandezze risolvendo un sistema di due equazioni in due incognite come mostrato in (4.18):

$$\begin{Bmatrix} D/B_1 \\ D/B_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{e1} & K_{T1} \\ K_{e2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e \\ DT \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

La capacità di risolvere tale sistema è di fondamentale importanza poiché la soluzione consente il ottenere il disaccoppiamento voluto. È evidente che la risoluzione del sistema è possibile solamente se ai sensori è applicato lo stesso livello di sollecitazione. Un'altra possibilità di impiego dei sensori FBG è rappresentata dall'impiego di soluzioni meccaniche tali da permettere di variare la deformazione percepita dal sensore lungo la sua lunghezza, comportando una modificazione della spaziatura del reticolo (ottenendo di fatto un sensore *chirped*). In questo caso la discriminazione tra deformazione e temperatura non viene più effettuata andando ad analizzare unicamente lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg, ma è necessario analizzare la risposta spettrale del sistema.

#### 4.6.2. Misura su sensori FBG in fibre di sezione differente

In questo primo metodo i sistemi di misura consentono di disaccoppiare le risposte alle sollecitazioni termiche e meccaniche utilizzando due sensori FBG posti su fibre ottiche aventi sezioni differenti.

A tale scopo si consideri uno spezzone di fibra di lunghezza  $L$  costituito da due tratti  $l_1$  e  $l_2$  aventi rispettivamente sezione di area  $A_1$  e  $A_2$ ; siano FBG1 e FBG2 i due reticoli iscritti nei due tratti. La deformazione meccanica complessiva della fibra può essere espressa come:

$$e = \frac{Dl_1 + Dl_2}{l_1 + l_2} \quad (4.19)$$

Le deformazioni agenti sui due sensori possono essere rapportate alla deformazione totale nel seguente modo:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{l_1 + l_2}{l_1 \left(1 + \frac{A_1 l_2}{A_2 l_1}\right)} e \\ e_2 &= \frac{l_1 + l_2}{l_2 \left(1 + \frac{A_2 l_1}{A_1 l_2}\right)} e \end{aligned} \quad (4.20)$$

dove  $A_i$  rappresenta le aree delle due sezioni,  $l_i$  le lunghezze dei tratti sensorizzati e  $\varepsilon_i$  le deformazioni agenti.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

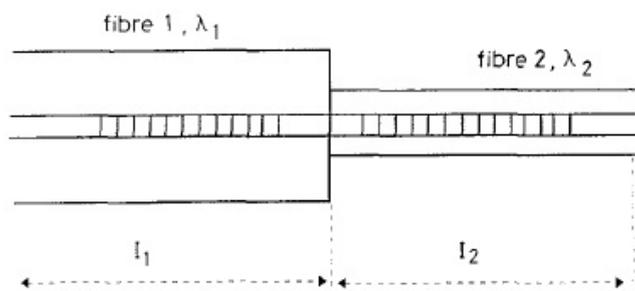
Manipolando le due precedenti equazioni si ottiene la variazione di lunghezza d’onda per entrambi i sensori:

$$\begin{aligned}
 D/B_1 &= k_e \frac{I_1 + I_2}{I_1 \left(1 + \frac{A_{12}}{A_{21}}\right)} e + K_{T1} DT = k_{e1} e + K_{T1} DT \\
 D/B_2 &= \frac{I_1 + I_2}{I_2 \left(1 + \frac{A_{21}}{A_{12}}\right)} e + K_{T2} DT = k_{e2} e + K_{T2} DT
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Ciò consente di risolvere il sistema di due equazioni in due incognite (4.18) introdotto all’inizio della sezione e ottenere così i valori di deformazione e temperatura. Ovviamente devono essere noti i coefficienti di proporzionalità dei due sensori alla deformazione e alla temperatura.

**a) Variazione della sezione mediante giunzione splice di fibre differenti**

Una prima configurazione basata sulla tecnica di misura presentata può essere ottenuta mediante giunzione *splice* di fibre ottiche aventi diametro differente con i reticoli inscritti in prossimità della giunzione stessa. Lo schema è mostrato in Figura 29.



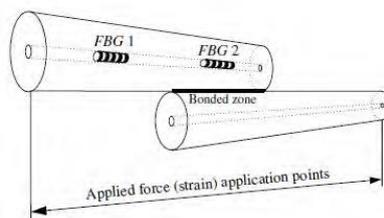
**Figura 29** Variazione della sezione mediante giunzione *splice* di fibre differenti

Le sollecitazioni agenti sono differenti in base al rapporto tra le aree delle fibre ottiche. Questa tecnica tuttavia è di scarso interesse per lo scopo del progetto Sentinel in quanto non è adatta per realizzare un sistema di misura inglobato in strutture in composito in quanto la deformazione percepita dai sensori non sarebbe proporzionale al rapporto tra le aree delle fibre ottiche su cui sono scritti. Essendo inglobati e quindi vincolati alla struttura ospite la deformazione percepita sarebbe costante e uguale a quella della struttura stessa. Inoltre, un sistema di misura di questo tipo presenta non poche difficoltà realizzative principalmente legate alla fase di giunzione delle fibre. L’operazione di fusione delle fibre, già di per sé complessa essendo le stesse di diametro differente, è difatti resa ancor più critica per la presenza ravvicinata dei due sensori.

**b) Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

Una diversa tecnica per ottenere sezioni differenti in corrispondenza dei sensori consiste nell'unire per sovrapposizione due fibre posizionando uno solo dei due reticoli nella zona di sovrapposizione. La Figura 30 mostra il caso in cui entrambi i reticoli sono iscritti nella medesima fibra. Vale la pena notare che la tecnica funziona anche se il sensore FBG2 è posizionato sulla fibra inferiore. Una possibile difficoltà che questa tecnica introduce potrebbe essere legato all'incertezza sulla dimensione della sezione maggiore la quale dipende dalla quantità di resina deposta in fase di incollaggio. È evidente infatti in fase di realizzazione l'impossibilità di avere un controllo rigoroso essendo tale operazione eseguita manualmente. Ciò comporta che la determinazione dei coefficienti di proporzionalità è più complessa.

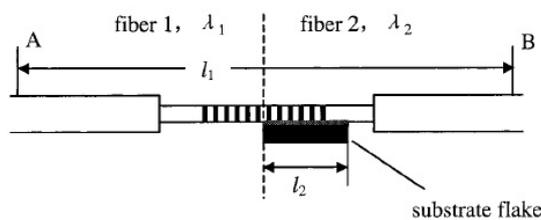


**Figura 30** Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre.

**4.6.3. Tecniche basate sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo**

Se si vincola uno dei due reticoli ad un substrato di materiale con diverso coefficiente di dilatazione termica (CTE), si possono ottenere risposte differenti da sensori sottoposti alla medesima sollecitazione termica.

Una variante di questa tecnica è quella riportata in Figura 31 dove è utilizzato un solo reticolo, parte del quale adeso al substrato.



**Figura 31** Sensore FBG parzialmente vincolato ad un substrato di materiale differente

Per questa tecnica la letteratura evidenzia come sia fondamentale utilizzare per il substrato un materiale avente CTE di almeno un ordine di grandezza differente rispetto a quello della fibra ottica al fine di evitare un malcondizionamento del sistema.

La risposta alla variazione di temperatura e di deformazione del sensore è quindi differente per i due tratti di reticolo in quanto il coefficiente di espansione termica maggiore comporta una variazione del passo del reticolo, sollecitato termicamente, più ragguardevole. La perturbazione pertanto determina la formazione di due differenti lunghezze d'onda di Bragg che dipendono dal differente passo delle frange.

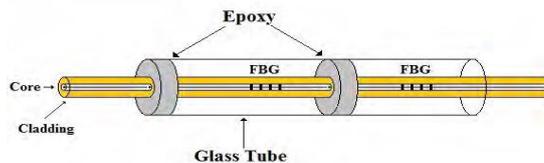
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Anche la dimensione del substrato a cui parte del reticolo è vincolato ovviamente ha un ruolo e in particolare determina la variazione del coefficiente di proporzionalità alla deformazione. Nota la matrice dei coefficienti di proporzionalità è così possibile determinare le sollecitazioni agenti risolvendo il sistema delle due equazioni in due incognite (4.18).

Anche questa tecnica tuttavia non è adatta se si vuol inglobare il sensore all'interno di strutture in composito in quanto le deformazioni meccaniche agenti sulle due porzioni del sensore sono le medesime essendo esso vincolato alla struttura. Inoltre, la marcata differenza tra il coefficiente di espansione termica dei materiali utilizzati potrebbe provocare l'instaurarsi di indesiderati sforzi di natura termo-elastica all'interno della struttura. Infine, per completezza di trattazione, è doveroso segnalare il problema legato alla sensibilità del sistema: in seguito a sollecitazioni di bassa intensità lo spettro delle due porzioni del reticolo potrebbe risultare parzialmente sovrapposto rendendo difficoltosa l'individuazione delle lunghezze d'onda.

**4.6.4. Isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante**

La tecnologia mostrata in Figura 32 è alla base di un'ulteriore tecnica basata su due FBG inseriti in un tubo capillare.



**Figura 32 Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante**

Uno dei due sensori è vincolato al capillare ad entrambi gli estremi mediante resina epossidica. In questo modo il capillare permette allo stato di sforzo agente sulla fibra di superare la zona del reticolo consentendone l'isolamento dalla deformazione. Ciò comporta che si rileva inizialmente la sola variazione di temperatura. Nota quest'ultima è possibile utilizzare il secondo sensore, assoggettato ad entrambe le sollecitazioni, per determinare la deformazione per differenza. Questa zona del sistema può essere rappresentata da un modello in parallelo fra fibra e capillare secondo la teoria della micromeccanica. È possibile esprimere il rapporto fra le rigidzze assiali come di seguito

$$\frac{A_{\text{capillare}} E_{\text{capillare}}}{A_{\text{FO}} E_{\text{FO}}} \tag{4.22}$$

Il funzionamento del sensore e la precisione della misura sono direttamente proporzionali a tale rapporto.

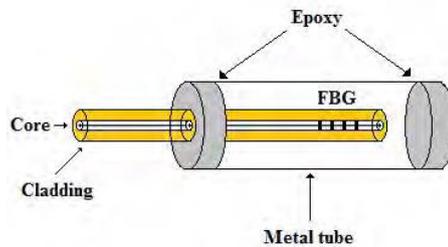
Le difficoltà intrinseche a tale tecnica sono legate in primo luogo al fatto che essa non risulta adatta per inglobare il sensore all'interno di strutture in composito. Come nei casi precedenti, il vincolo alla struttura rappresenta un ostacolo. In questo caso il tubo capillare vincolato alla struttura ospite si deforma congruentemente ad esso. I due FBG risultano pertanto deformati della stessa quantità invalidando il funzionamento del sistema. In secondo luogo si evidenzia un problema di tipo produttivo e riguarda la realizzazione del vincolo interno al capillare, che, se non correttamente

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

eseguito, potrebbe provocare l’adesione del sensore al capillare stesso inficiando anche in questo caso il funzionamento del sistema.

**4.6.5. Isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante**

Una variante della tecnica precedente è basata sul posizionamento del capillare ad un estremo della fibra ottica includendo in esso un tratto di fibra dotata di FBG. Tale accorgimento supera il primo ostacolo relativo all’inglobamento in strutture composite. Occludendo le estremità del capillare con resina epossidica è possibile ottenere un perfetto isolamento del sensore alle deformazioni meccaniche. A differenza della tecnica precedente le deformazioni subite dal capillare non possono essere trasferite al reticolo posizionato al suo interno.



**Figura 33 Sensore FBG di estremità posto in un capillare**

Il coefficiente di proporzionalità rispetto alla deformazione del sensore realizzato è pertanto nullo ed è possibile quindi utilizzare il sensore per misurare la sola variazione di temperatura. La determinazione della deformazione strutturale agente è invece effettuata mediante un secondo sensore FBG vincolato alla struttura e quindi soggetto sia ai carichi termici che meccanici.

Depurando la risposta del sensore dal contributo delle sollecitazioni termiche è possibile ricavare la deformazione agente. La tecnica qui presentata risulta adatta per la realizzazione di un sistema di misura inglobato in strutture in composito nel caso in cui il sensore posto nel capillare sia adeguatamente isolato, ma la presenza del capillare aumenta il grado di invasività nella struttura.

Inoltre, a causa dell’interruzione della fibra ottica all’interno del capillare, il sistema non permette l’interrogazione ridondante del sensore, ovvero il sensore può essere raggiunto da un solo lato.

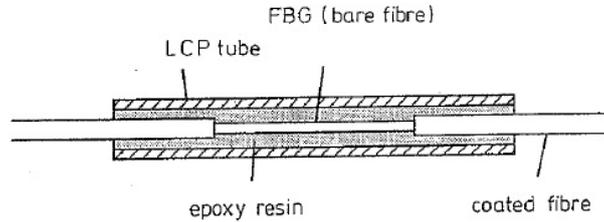
**4.6.6. Sistemi basati su acquisizione di segnali già compensati in temperatura**

Questa tecnica di misura permette la determinazione della deformazione agente sul sensore effettuando una compensazione diretta della temperatura ovvero rendendo la risposta del reticolo invariante alla temperatura. Ciò che può essere ottenuto annullando il coefficiente di proporzionalità fra le due grandezze nella (4.22)

$$D/I_B = I_B(a + z)DT \tag{4.22}$$

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Il sistema di misura rappresentato in Figura 34 è realizzato mediante un sensore FBG inglobato in un tubetto di materiale polimerico a liquido cristallino (LPC) e resina epossidica.



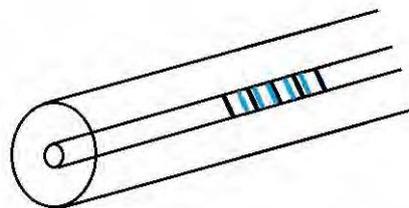
**Figura 34 Sensore FBG posto in una struttura con tubetto LPC**

Il CTE negativo del polimero cristallino consente, dimensionando opportunamente il tubetto, di ottenere un CTE complessivo del sistema (tubetto LPC, resina e fibra) uguale ed opposto al coefficiente termo-ottico. Il sistema di misura è adatto ad essere inglobato in strutture di diverso tipo in quanto la compensazione diretta della temperatura è garantita dimensionando opportunamente i diversi componenti impiegati. Chiaramente la presenza del tubo polimerico aumenta notevolmente l'invasività del sistema.

**4.6.7. Sistemi basati su FBG sovrascritti**

Il sistema è basato sull'impiego di due reticoli di Bragg a diverse  $\lambda_B$  iscritti nella medesima posizione. Per realizzare un sistema di misura robusto è opportuno che i due reticoli siano in grado di riflettere lunghezze d'onda posizionate in finestre differenti, ad esempio a 1300 e 1550nm. In questo modo i coefficienti di proporzionalità alle sollecitazioni ( $K_\epsilon$  e  $K_T$ ), e conseguentemente la risposta dei sensori in termini di variazione di lunghezza d'onda, sono sufficientemente differenti affinché sia possibile risolvere il sistema (4.18) senza che vi siano problemi di malcondizionamento della matrice dei coefficienti. Ciò comporta l'utilizzo di sorgenti luminose in grado di emettere onde in entrambe le finestre.

Il sistema di misura può essere inglobato senza problemi e a differenza delle tecniche facenti uso di tubi capillari o polimerici essa ha un grado di invasività decisamente inferiore. Inoltre, essendo i sensori collocati sono soggetti alle medesime sollecitazioni in tutte le condizione di carico.



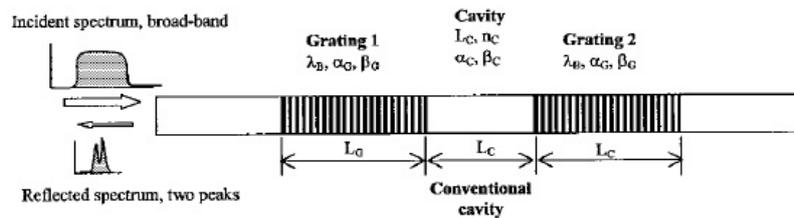
**Figura 35 Sensori FBG sovrascritti**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

**4.6.8. Sistemi basati su sensori *phase-shifted***

La tecnica di misura basata su sensori p-shift presenta l’impiego di due sensori FBG aventi le medesime lunghezze d’onda di Bragg ( $\lambda_B$ ) posti iscritti nella medesima fibra e separati da un tratto avente indice di rifrazione differente (Figura 36).

La zona frapposta tra i sensori provoca una variazione di fase dello spettro del segnale riflesso dipendente dalle proprie caratteristiche ottiche e geometriche.



**Figura 36** Schema di sensori *phase-shifted*

La differenza della fase dei due spettri (phase-shift), se correttamente realizzata, permette di modificare lo spettro di riflessione scomponendo il picco iniziale centrato su  $\lambda_B$  in due differenti picchi centrati a lunghezze d’onda diverse. Per il disaccoppiamento si può riscrivere il sistema introducendo un coefficiente  $M$  dipendente dall’ampiezza dei due picchi:

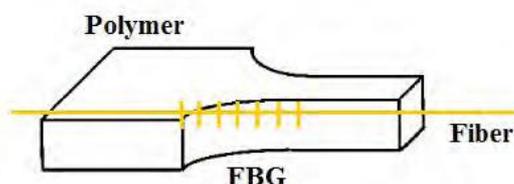
$$\begin{Bmatrix} D / \text{picco} \\ DM \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e \\ DT \end{Bmatrix} \quad (4.23)$$

dove  $\Delta\lambda_{\text{picco}}$  si riferisce alla variazione di uno qualsiasi dei due picchi.

Essendo necessario che entrambi i reticoli siano soggetti alla deformazione strutturale perché sia garantito il corretto funzionamento della tecnica ed essendo il sistema poco invasivo (perché costituito dalla sola fibra) esso ben si presta ad essere utilizzato inglobato. Di contro la risoluzione del sistema richiede l’analisi dello spettro del segnale essendo necessaria la determinazione della lunghezza d’onda di uno dei due picchi e l’intensità di entrambi.

**4.6.9. Sistemi basati sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo**

L’ultima tecnica presentata, che esaurisce l’analisi dello stato dell’arte relativo all’utilizzo dei sensori in fibra per l’analisi delle deformazioni, consiste nell’inglobare un sensore FBG all’interno di un volume di polimero a sezione opportunamente rastremata, come mostrato in Figura 37.



**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

**Figura 37 Sensore FBG inserito in un volume polimerico rastremato**

Per effetto della sua rastremazione una sollecitazione assiale applicata al volume provoca la *chirpatura* del sensore FBG. Diminuendo la sezione resistente la zona rastremata subisce una deformazione crescente e si ottiene un reticolo con risposta di tipo *chirped*. La misura dello sforzo e della variazione di temperatura è realizzata osservando la variazione della larghezza dello spettro di risposta (conseguenza della *chirpatura* che si genera sul reticolo) e lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg. Noto lo sforzo è possibile ricavare a posteriori la deformazione della struttura. Il sistema di misura non è adatto all'inglobamento, in quanto il polimero, se vincolato, subisce la medesima deformazione per tutta la sua lunghezza, mantenendo così il passo del reticolo uniforme.

#### 4.6.10. Confronto tra le diverse tecniche di misura

I parametri di confronto scelti si basano su indici in grado di definire la facilità realizzativa e di utilizzo del sistema di misura, i costi che è necessario affrontare e la possibilità di inglobamento all'interno di strutture in composito evidenziandone il grado di invasività. Il confronto è stato reso possibile definendo una scala di valori in grado di valutare, in prima approssimazione, il peso degli indici considerati.

**Tabella 1: Confronto tra i diversi sistemi di misura**

Sistema di misura	Facilità realizzativa	Costi	Facilità di impiego	Possibilità di inglobamento	Non invasività
Giunzione splice di fibre diverse	Medio	Medio	Alto	NO	
Giunzione overlap di fibre	Medio	Medio	Medio	NO	
Variazione del coefficiente di dilatazione termica	Medio	Alto	Medio	NO	
Isolamento meccanico del reticolo con tubo passante	Medio	Medio	Medio	NO	
Isolamento meccanico del reticolo con tubo non passante	Alto	Medio	Alto	SI	Medio
Sistema con segnale compensato in T		Medio	Alto	SI	Basso
FBG sovrascritti	Alto	Medio	Alto	SI	Alto
Sensori p-shift	Medio	Basso	Basso	SI	Alto
Trasformazione	Basso	Medio	Alto	NO	

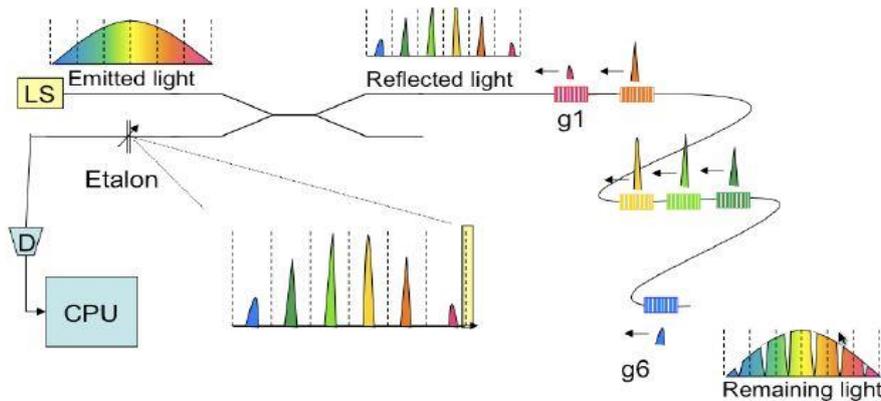
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

uniforme/chirped			
------------------	--	--	--

### 4.7. Tecniche di Multiplexing

L'interrogazione di un sensore FBG deve permettere di risalire alla deformazione che ha causato lo spostamento della lunghezza d'onda rilevata. Chiaramente l'esistenza delle catene di sensori FBG richiede tecniche di interrogazione che permettano ai singoli FBG di essere interrogati indipendentemente l'uno dall'altro. Le più comuni forme di multiplexing sono WDM, TDM e SDM:

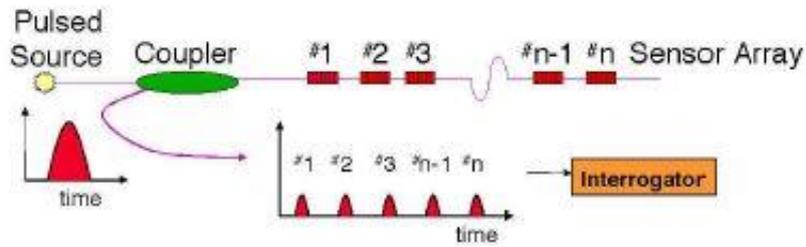
- L'interrogazione Wavelength-Division-Multiplexing (WDM) è in grado di interrogare più sensori FBG multiplexati su una singola fibra con un'unica unità di interrogazione, differenziando ogni singolo sensore dalla rispettiva lunghezza d'onda di Bragg che varia in conseguenza di uno strain o di una variazione di temperatura. La tecnica richiede una sorgente di luce tale da illuminare tutti i reticoli dell'array e con spettro sufficientemente largo da prevenire sovrapposizione degli spettri dei singoli FBG tenendo presente che una volta deformati la lunghezza d'onda varia di ~5-6 nm (Figura 38).



**Figura 38 Sistema WDM**

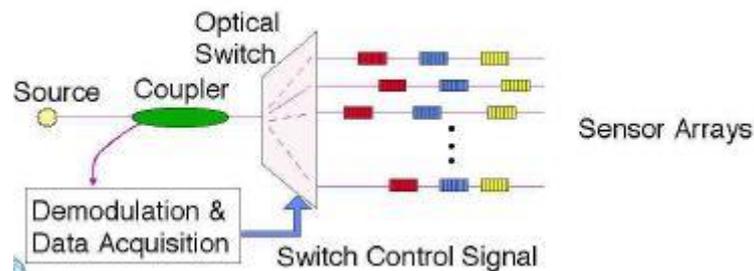
- Il funzionamento di un sistema Time Division Multiplexing (TDM) è basato sulla tecnologia OTDR (Optical time domain reflectometry) dove una sorgente pulsata di luce è inviata nella fibra ottica in cui è stato inciso un array di reticoli a bassa riflettività. Tutti i sensori FBG hanno la stessa lunghezza d'onda di Bragg ed il numero di FBG multiplexati è maggiore non essendoci la limitazione di banda della tecnica WDM. La distanza tra i vari sensori però influisce sulla velocità del sistema di interrogazione (Figura 39).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 39 Sistema TDM**

- Un sistema Spatial Division Multiplexing (SDM) comporta lo splitting della sorgente in diverse stringhe mediante un accoppiatore e pertanto necessita di uno switch ottico per selezionare i canali dei sensori, che possono essere multiplexati in serie. Il processing elettronico inoltre deve inviare un segnale di controllo allo switch ottico. I segnale riflessi dagli FBG di stringhe diverse non interferiscono tra loro e lunghezze d’onda di Bragg uguali possono essere usate su ogni stringa (Figura 40).

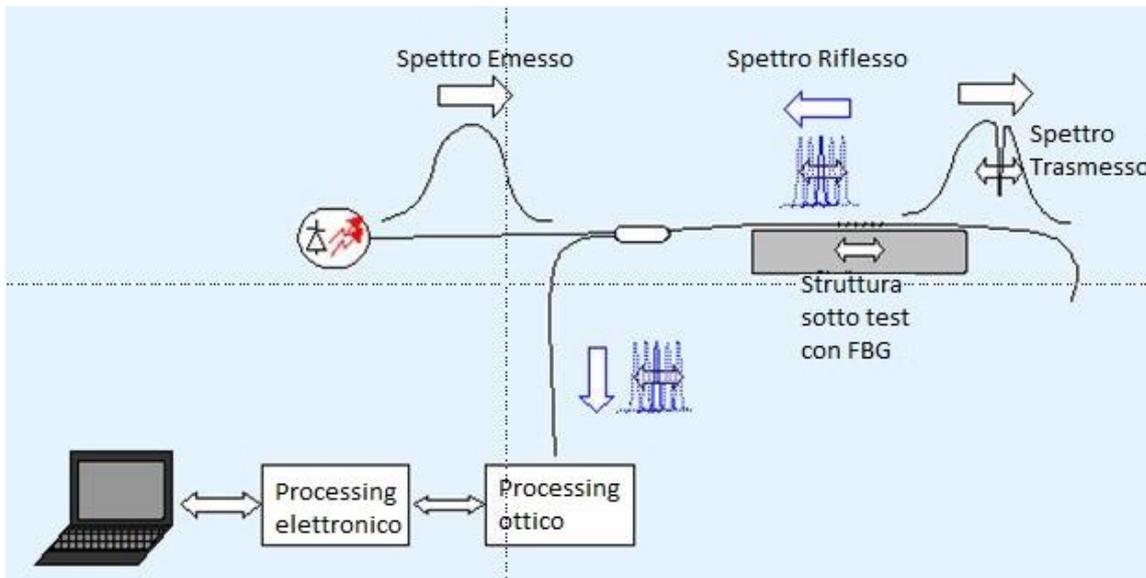


**Figura 40 Sistema SDM**

#### 4.8. Metodi di interrogazione

Lo schema di lettura di sensori FBG applicati ad una struttura di test è riportato in Figura 41 dove si evidenzia che il segnale retroriflesso viene analizzato mediante un processing ottico per l’interrogazione dei sensori ed un processing elettronico per l’elaborazione e l’invio dei dati ad un PC.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 41 Schema di lettura di sensori FBG**

Il segnale retroriflesso può essere analizzato con diverse tecniche ottiche:

- ✓ Analizzatore di spettro
- ✓ Spettrometro CCD
- ✓ Spettrometro FFT
- ✓ Filtri ottici
- ✓ Filtro accordabile Fabry-Perot sorgente a larga banda
- ✓ Interferometri (Mach-Zehnder)
- ✓ Sorgente ottica accordabile

Ognuno dei metodi di misura elencati ha vantaggi e svantaggi, che determinano il campo di applicazione più appropriato. La scelta si basa su più fattori:

- Misure statiche o quasi-statiche
- Misure dinamiche
- Sensibilità, risoluzione, accuratezza, ripetibilità
- Velocità di lettura
- Numero di sensori sulla stessa fibra ottica
- Robustezza dello strumento (al movimento, ecc.)

#### **4.9. Applicazioni con sensori FBG**

Nelle varie applicazioni i sensori FBG possono essere incollati o inseriti (embedded) dentro la struttura da monitorare.

Nel primo caso (Figura 42a) la fibra ottica è inserita in una guaina PTFE protettiva mentre i sensori FBG sono lasciati scoperti per poter essere incollati mediante resine epossidiche sulla struttura da monitorare. L'installazione deve essere effettuata a mano con cura per evitare di stressare i punti della fibra ottica in cui sono stati inseriti i sensori FBG. Inoltre a seconda dell'applicazione e

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

dell'ambiente più o meno umido in cui deve essere effettuato il monitoraggio va scelto il recoating più appropriato tra acrilato e poliammide.



**Figura 42 Sensori FBG a) incollabili b) embedded**

Nel secondo caso (Figura 42b) i sensori sono pre-fabbricati, incapsulati in armature di acciaio inox e pertanto non richiedono ulteriori protezioni contro l'umidità e sono pronti per essere installati e affogati nel materiale da monitorare (sensori embedded). Tali sensori sono preferiti per applicazioni di monitoraggio continuo durante tutto il ciclo di vita della struttura e vengono installati durante la costruzione della struttura da testare.

I sensori FBG ha avuto uno sviluppo molto rapido negli ultimi decenni per quanto riguarda il passaggio dal laboratorio alle applicazioni pratiche. I campi di applicabilità diventano sempre più numerosi. Tra le tante applicazioni con i sensori FBG si evidenziano:

- Analisi e monitoraggio di beni architettonici ed artistici
- Indagine sui materiali compositi
- Monitoraggio in ambiente nautico, aerospaziale
- Monitoraggio strutturale in zone sismiche
- Applicazioni biomedicali
- Monitoraggio pozzi e miniere
- Monitoraggio linee di potenza elettriche

Le applicazioni sviluppate con sensori FBG più vicine al nostro campo di applicabilità (WIM) sono:

1. Monitoraggio strutturale statico e dinamico dei ponti
2. Monitoraggio strade e autostrade
3. Monitoraggio rotaie

Un duplice aspetto dello *Structures Health Monitoring* (SHM) nell'ambito di strutture ingegneristiche quali ponti, viadotti, strade, autostrade, rotaie è quello sia di monitorare la struttura per la salvaguardia della stessa che salvaguardare l'integrità di quanti la utilizzano o che sono nelle vicinanze.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Un sistema sperimentale di monitoraggio con sensori FBG può essere applicato preventivamente in particolari punti critici individuati nella struttura o in alcune fessurazioni già rilevate per studiarne il decorso nel tempo.

1. Strumentare un ponte con sensori FBG permette di monitorare le vibrazioni del ponte soggetto al passaggio degli autoveicoli in particolar modo dei mezzi pesanti, la distribuzione delle deformazioni che si presentano per decadimento strutturale, la corrosione lungo i pilastri di cemento armato che sostengono i ponti.

Inoltre è possibile nello stesso tempo monitorare l'entità del traffico e se combinato con un sistema di telecamere valutare il carico gravante sul ponte. I sensori FBG difatti possono essere utilizzati in tal senso per misurare i carichi dinamici (Weigh in motion – WIM) sui ponti per stimare la probabilità che sia stato superato il limite del massimo carico sul ponte e predire il tempo rimanente di vita della struttura.

Questo può essere fatto sia per ponti nuovi con sensori FBG embedded installati durante la costruzione e sia per ponti già esistenti con sensori FBG incollati sulla superficie (Figura 43).



**Figura 43 Ponte strumentato con sensori FBG**

2. La strumentazione delle strade e autostrade con i sensori FBG permette anche qui di avere informazioni sull'entità del traffico (passaggio di autoveicoli, velocità, accelerazioni, ecc.) ed anche sul processo di aging dell'asfalto stradale o autostradale per prevenire crack e deformazioni strutturali dovute al traffico e alle sollecitazioni climatiche e quindi per assicurare un più lungo ciclo di vita.

Anche in questo caso è possibile attrezzare le strade o con sensori FBG embedded in campioni prefabbricati di asfalto durante la costruzione delle strade o inseriti su uno strato più superficiale in un secondo momento (Figura 44).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 44 Strada asfaltata con sensori FBG embedded**

3. Strumentare le rotaie con sensori FBG permette di avere informazioni sul traffico dei treni sulle singole tratte, sulla composizione dei treni attraverso sistemi Weigh in motion – WIM e sulle relative velocità e accelerazioni. Inoltre permette di individuare e misurare difetti sulle ruote e sui binari dei treni in real-time senza necessità di interruzione dell’operatività della ferrovia (Figura 45).



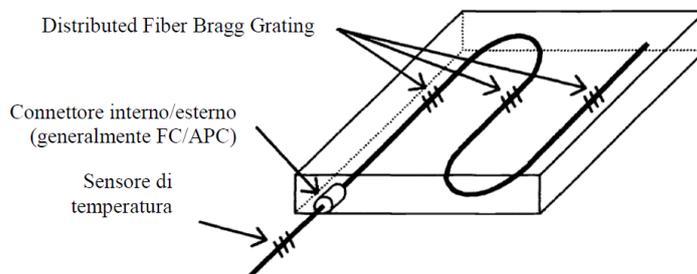
**Figura 45 Rotaia con sensore FBG**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

## 5. Stato dell’arte sull’uso di sensori FBG per applicazioni WIM

Sistemi di sensori distribuiti basati su reticoli di Bragg come elemento sensibile possono essere impiegati in diverse applicazioni “smart sensing” per il monitoraggio/controllo del transito di veicoli nonché del monitoraggio del peso del veicolo tramite una loro pesatura dinamica (weight-in-motion o WIM). Il principio di sensing è basato sempre sulla deformazione del reticolo di Bragg integrato in fibra dovuto alla pressione esercitata sulla fibra ottica.

Un sistema in grado di supportare questa applicazione è l’impiego di una cella al cui interno sia ospitata una fibra ottica su cui siano iscritti dei reticoli di Bragg distribuiti lungo tutta la sua lunghezza (DFBG o Distributed Fiber Bragg Grating). Tale sistema è schematicamente esemplificato in Figura 46.

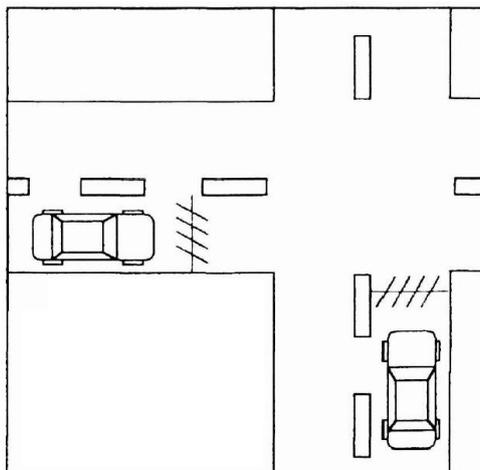


**Figura 46** Cella di carico con sensore distribuito integrato DFBG (Distributed Fiber Bragg Grating). La cella consiste anche di un sensore di temperatura per tenere conto, nelle misure, della dilatazione termica a cui sono sottoposti i reticoli di Bragg.

Questa cella “intelligente” (*smart cell*) è costituita non solo da sensori di deformazione FBG trasversali, distribuiti lungo la fibra per tenere conto anche di un carico irregolare, ma anche di un sensore esterno di temperatura, integrato nella stessa fibra, in grado di eliminare ex-post il contributo della dilatazione termica a cui sono sottoposti i reticoli di Bragg.

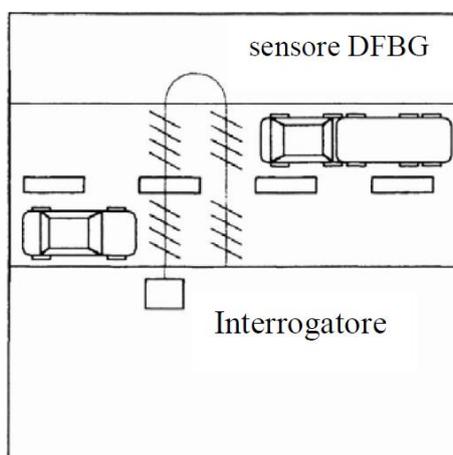
Un esempio applicativo è proprio il monitoraggio e il controllo del peso di un veicolo dinamicamente senza interrompere necessariamente il traffico per effettuare una pesatura statica. Infatti, grazie alle caratteristiche dei sensori integrati in fibra ottica, al fatto che sono scarsamente invasivi ed integrabili in infrastrutture, come ad esempio nell’asfalto, altamente resistenti alla corrosione, i sensori a fibra ottica sono ideali per essere incorporati in strade per sostituire i sensori tradizionali e aggiungere nuove funzionalità ai sistemi di monitoraggio e controllo del traffico. Un esempio è illustrato in Figura 47.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 47** Integrazione di sensori FBG in strade per il controllo del transito degli autoveicoli e pesatura dinamica.

Se un veicolo in transito a causa del suo peso comprimesse una piattaforma opportuna integrata nell’asfalto esso produrrebbe una deformazione in grado di comprendere se il peso del veicolo sia superiore o nella norma consentita dal traffico in quella strada. Il sensore, opportunamente interrogato tramite una elettronica adeguata viene collegato a un sistema di allerta per fornire avvisi precisi ai conducenti ed eventualmente avviare una pesatura statica (più accurata) del veicolo. Un sistema siffatto è illustrato in Figura 48.



**Figura 48** Sistema integrato per il controllo e la pesatura di veicoli in transito su una carreggiata.

Nei prossimi paragrafi sono descritte alcune applicazioni WIM con sensori FBG.

## 5.1 WIM con sensori FBG su strada

### 5.1.1 Bridge WIM – New Mexico (Stati Uniti)

Il sistema sviluppato ed implementato dal Naval Research Laboratory – NRL riguarda il monitoraggio del traffico di un ponte sull’autostrada I-10 a Las Cruces in New Mexico, Stati Uniti,

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

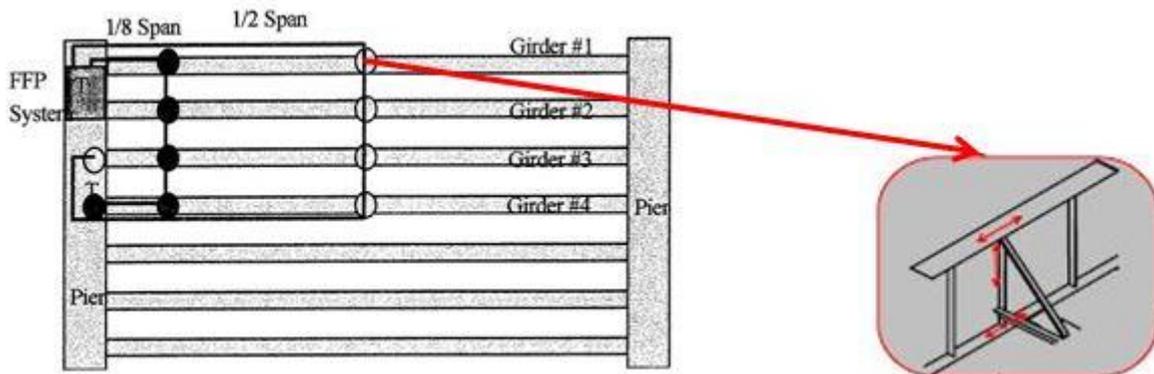
costituito da 2 campate in cemento rinforzate con travi in acciaio. I sensori utilizzati sono sensori FBG che rilevano il passaggio dei carichi pesanti sul ponte e le risonanze sulla struttura causate da questo carico dinamico (Figura 49).



**Figura 49** Ponte sull’autostrada I-10 a Las Cruces in New Mexico, Stati Uniti

**Sensori FBG**

32 sensori FBG (2 array da 16 sensori) sono stati incollati alla struttura con adesivo istantaneo in cianoacrilato utilizzato per strain gauges tradizionali, e spazialmente distribuiti sia in senso longitudinale che laterale sulle prime 4 travi (in totale 7), a gruppi di 3 per ogni punto di osservazione. Inoltre un sensore FBG di temperatura è stato posizionato vicino al sistema di interrogazione ed utilizzato per compensare i restanti 31 FBG (Figura 50).



**Figura 50** Posizione dei sensori FBG e close-up

**Sistema di Interrogazione**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Il sistema di interrogazione è stato posizionato in prossimità di un pilastro del ponte. Una sorgente di luce Edge Light Emitting Diode (ELED) ad ampio spettro, è stata inviata ai sensori FBG. I segnali riflessi dai sensori sono stati interrogati mediante un filtro accordabile Fabry-Perot (FFP) con un sampling rate di 45 Hz e successivamente inviati ad un fotodetector e ad un data processing elettronico che salva dati per deformazioni significative maggiori di 20  $\mu\epsilon$ . Un sistema WDM del genere è in grado di rilevare deformazioni di 1  $\mu\epsilon$  (5  $\mu\epsilon$  considerando il rumore del sistema elettronico) corrispondenti ad una minima variazione di lunghezza d’onda rilevabile pari a 0.7 pm (Figura 51).

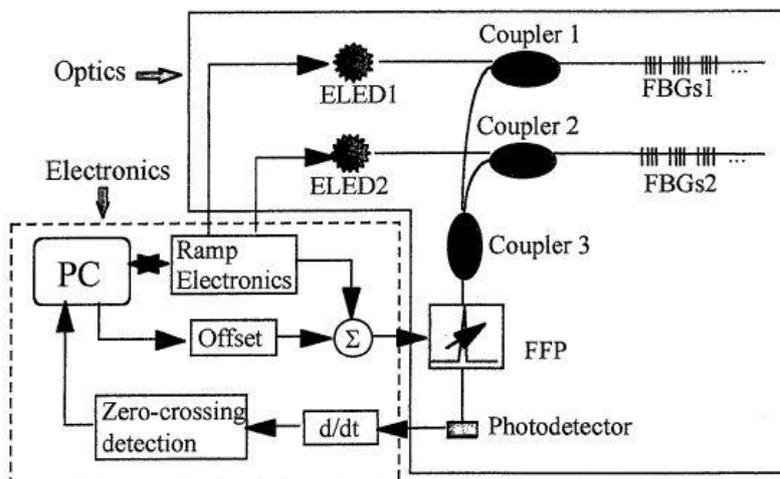


Figura 51 Schema del sistema di interrogazione NRL

**Risultati**

Il sistema ha dato informazioni sulle deformazioni indotte dal passaggio di veicoli in diversi punti delle campate del ponte e sulle diverse corsie, sulla distribuzione temporale delle velocità dei veicoli e del numero di veicoli. Le rilevazioni hanno mostrato che è possibile distinguere il passaggio dei mezzi pesanti dagli autoveicoli mediante un’analisi temporale delle deformazioni acquisite e determinare inoltre le vibrazioni indotte sul ponte mediante un’analisi in frequenza (Figura 52).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

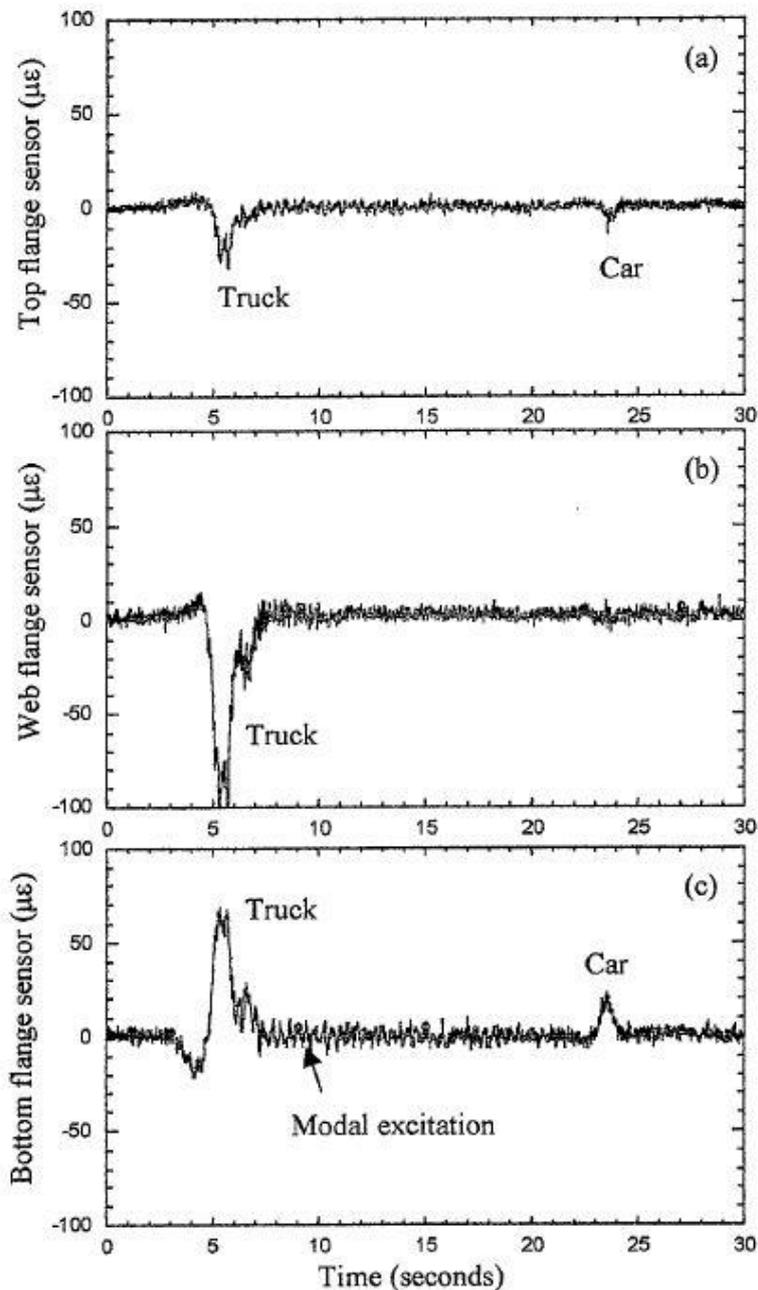


Figura 52 Risposte durante il transito di veicoli su i sensori FBG trave 3 nelle 3 direzioni

**Conclusioni**

I test sul ponte strumentato con sensori FBG hanno dimostrato che tali sensori sono indicati per il monitoraggio strutturale delle infrastrutture e hanno una precisione maggiore e un miglior rapporto segnale/rumore rispetto agli strain gauge tradizionali.

Inoltre si può aumentare la frequenza di sample rate fino all'ordine dei kHz utilizzando un diverso filtro FP per rilevazioni dinamiche, per avere dati migliori sulle deformazioni ripartite sui singoli assi dei veicoli e sulle vibrazioni della struttura.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

**5.1.2 Bridge WIM – Oregon (Stati Uniti)**

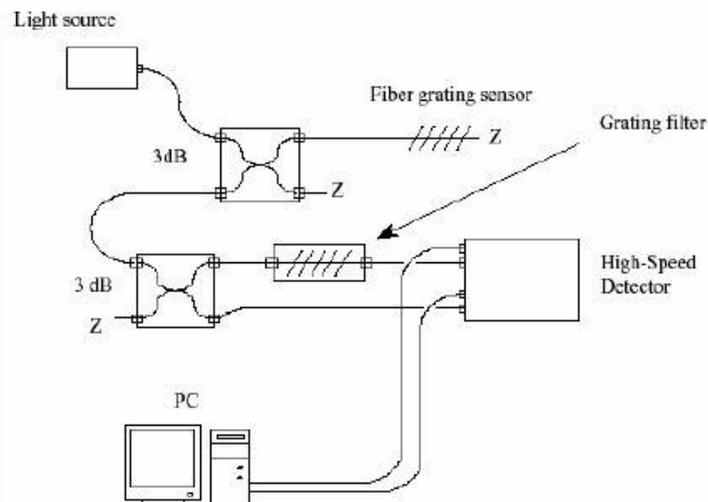
Blue Road Research (BRR) in Oregon, Stati Uniti, ha studiato l'utilizzo dei sensori FBG in applicazioni per strutture civili e in particolar modo le modalità di inserimento nell'asfalto stradale come sensori weigh in motion. La ricerca è partita strumentando il ponte alle cascate Horsetail nella Columbia River Gorge National Scenic Area con 28 sensori FBG (Figura 53).



**Figura 53 Ponte alle cascate Horsetail**

**Sistema di Interrogazione**

I test sono stati effettuati inizialmente con un OSA (Optical Spectrum Analyzer) con una risoluzione ~ 5µε. Per migliorare la risoluzione in seguito è stato progettato dal BRR un sistema di interrogazione costituito da una sorgente di luce ELED, un primo sensore FBG, che riflette la luce e la invia ad uno splitter, dove una parte viene indirizzata direttamente ad un fotodetector mentre l'altra viene prima inviata ad un altro FBG chirped e poi al fotodetector. Il rapporto dei due segnali in uscita è linearmente proporzionale alla variazione di strain o di temperatura (Figura 54).

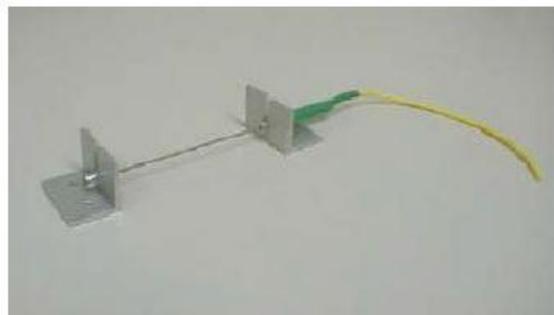


**Figura 54 Schema del sistema di Interrogazione BRR**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

**Sensori FBG**

La parte sensibile di un sensore FBG è approssimativamente 5-15 mm. Nelle applicazioni di monitoraggio di strutture civili onde evitare l'utilizzo di un numero eccessivo di sensori, BRR ha studiato varie tecniche per aumentare la lunghezza del sensore. Il reticolo FBG è stato pertanto inglobato in un tubo di diametro pari a 7mm con una lunghezza variabile tra 2.5-100 cm, in modo tale da essere embedded in compositi, o inserito nel cemento, nell'asfalto, ecc. (Figura 55). Anche la fibra ottica necessita di protezione mediante guaina in quanto possiede un'ottima resistenza a trazione ma è propensa a rottura se annodata o graffiata.

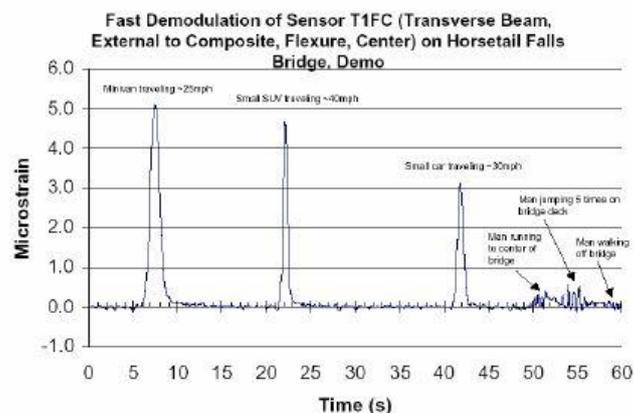


**Figura 55 Sensore long-gauge FBG**

Tali sensori long-gauge FBG sono stati inseriti prima sul ponte alle cascate Horsetail e successivamente immersi in asfalto con l'obiettivo di monitorare il traffico veicolare.

**Risultati**

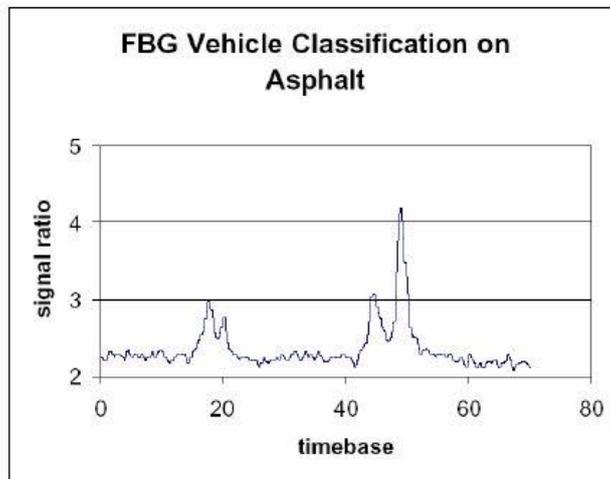
Sono state misurate pertanto le deformazioni rilevate sul ponte alle cascate Horsetail in conseguenza del passaggio sia di veicoli differenti che di corridori. Tali deformazioni sono proporzionali al rispettivo peso. I livelli di sensibilità rilevati sono intorno ai ~ 0.2 µε (Figura 56).



**Figura 56 Deformazioni di un sensore FBG al passaggio sul ponte di veicoli e corridori**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

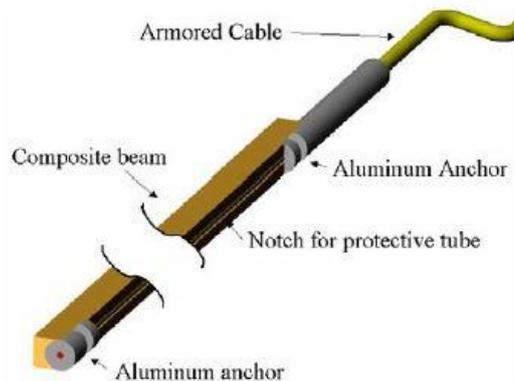
Sono state effettuati numerosi test in laboratorio su una piattaforma di asfalto di 3m X 3m X 10 cm. I sensori sono stati inseriti in fessurazioni nell’asfalto e incollati con resine epossidiche. Il passaggio di un autoveicolo sulla piattaforma ha prodotto una risposta rilevata dal sensore riportata in Figura 57. L’auto è stata fatta transitare sulla piattaforma strumentata con i sensori FBG prima in una direzione e poi nell’altra. La differenza in ampiezza è dovuta al fatto che le ruote non seguono lo stesso percorso in entrambe le direzioni.



**Figura 57** Deformazioni di un sensore FBG al passaggio di un veicolo sull’asfalto

Nei ripetuti test sperimentali sono stati studiati la modalità di installazione dei sensori FBG nell’asfalto al fine di aumentare la loro durabilità e la dipendenza della posizione delle ruote sulla piattaforma strumentata con i sensori.

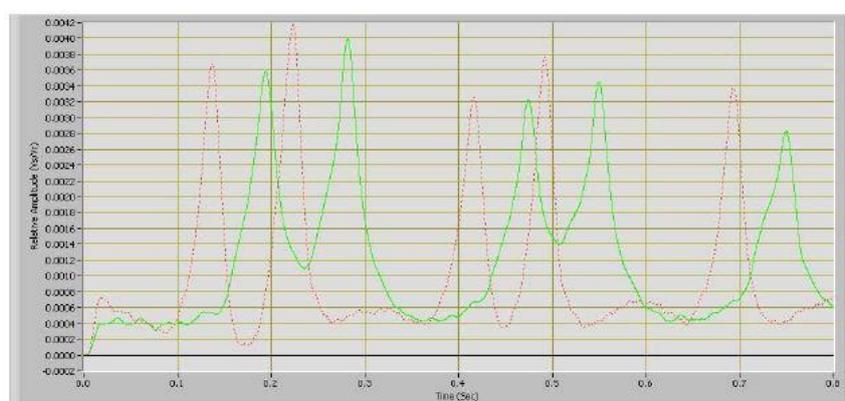
In seguito a questi test sperimentali in laboratorio sono state fatte delle prove sull’autostrada I-84 con sensori FBG simili a quelli della Figura 55 ma con una sbarra di un materiale composito intorno al sensore per una maggiore protezione (Figura 58). L’intera struttura composita misura intorno ai 120 cm. I due tipi di sensori sono stati così inglobati nell’asfalto in un incavo 10 cm sotto la superficie e sono stati sottoposti a test di monitoraggio del traffico.



**Figura 58** Sbarra composita che ingloba il sensore FBG

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

Nella Figura 59 sono visibili chiaramente i picchi dovuti al numero degli assi del veicolo in transito sia per il sensore long-gauge FBG che per il sensore FBG inglobato nel materiale composito. I risultati dimostrano che questi sensori possono essere utilizzati per la classificazione dei veicoli in transito con relativo conteggio di assi. Il sistema sviluppato dal BRR è in grado di raggiungere risoluzioni pari a  $0.2 \mu\epsilon$  con un sample rate  $\sim 5\text{kHz}$ . La maggiore robustezza del sensore composito è garanzia di un ciclo di vita più lungo da parte del sensore mentre nel caso del sensore long-gauge FBG la risposta al passaggio dei veicoli è più veloce in quanto la deformazione è trasferita direttamente al reticolo.



**Figura 59** Deformazioni di un sensore long-gauge FBG (rosso) e FBG composito (verde) al passaggio di un veicolo a 5 assi

## Conclusioni

Il sistema sperimentato dal BRR è pertanto indicato per il monitoraggio del traffico e potenzialmente per futuri sistemi di weigh in motion anche se sono da risolvere varie problematiche quali la posizione precisa del sensore sulla strada, la posizione delle ruote rispetto al sensore, le tecniche di incapsulamento del sensore, l'incidenza della velocità del veicolo.

### 5.1.3 Tsing Ma Bridge WIM – Hong Kong (Cina)

Il Dipartimento di Ingegneria Civile e Strutturale del Politecnico di Hong Kong ha sviluppato un sistema di un monitoraggio strutturale mediante sensori FBG sul ponte Tsing Ma di Hong Kong (1137m) soggetto sia ad un traffico veicolare che ferroviario (Figura 60).

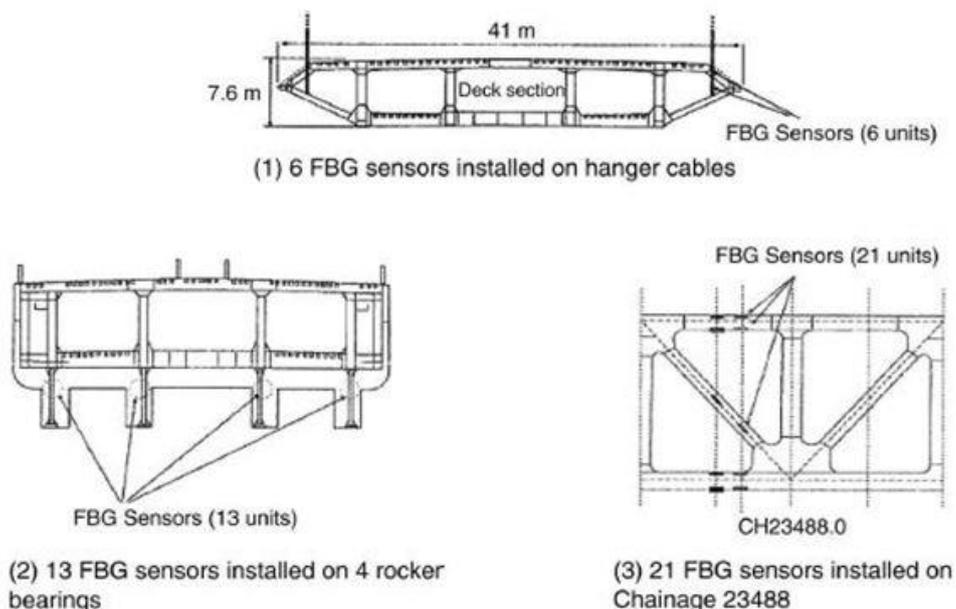
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 60 Punti di applicazione dei sensori FBG sul ponte TSM (Hong Kong)**

**Sensori**

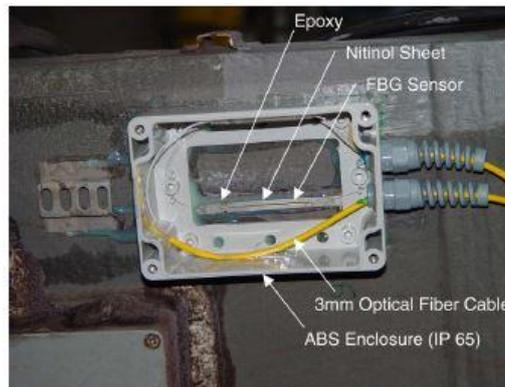
Sono stati installati 40 sensori FBG suddivisi in 3 array incisi su 4 cavi in fibra ottica nei punti strategici indicati in Figura 60 e Figura 61. 6 sensori FBG sono stati montati sui cavi di sospensione del ponte, 13 sui pilastri portanti e 21 sulle travature reticolari costituenti il ponte. Inoltre sensori FBG liberi da strain sono stati installati in vari punti per compensare gli effetti delle variazioni di temperatura giornaliera sulle misurazioni effettuate. In prossimità dei sensori FBG sono stati installati anche tradizionali strain gauge resistivi al fine di confrontare i segnali rilevati dalle due tipologie di sensori differenti.



**Figura 61 Dettaglio punti di applicazione dei sensori FBG: 1) cavi di sospensione 2) pilastri portanti 3) travature reticolari**

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

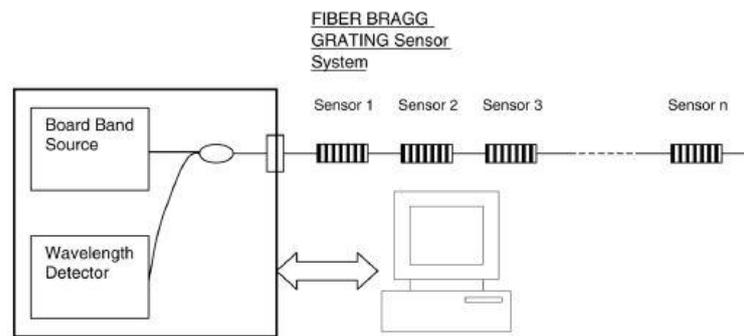
I sensori FBG in primo luogo sono stati incollati con resina epossidica su strisce di nitinol, una lega in nickel-titanio dalle caratteristiche super-elastiche, poi inseriti in box di plastica IP65 al riparo da umidità, polvere e agenti atmosferici in genere e in ultimo incollati alla struttura in acciaio nei punti specifici (Figura 62).



**Figura 62 Alloggiamento e package sensore FBG**

**Sistema di Interrogazione**

Il sistema di interrogazione dei sensori FBG è costituito da una sorgente ottica con filtro accordabile e da un CCD come fotodetector e permette di interrogare simultaneamente i canali fino a 20 kHz (Figura 63).



**Figura 63 Schema del sistema di interrogazione dei sensori FBG**

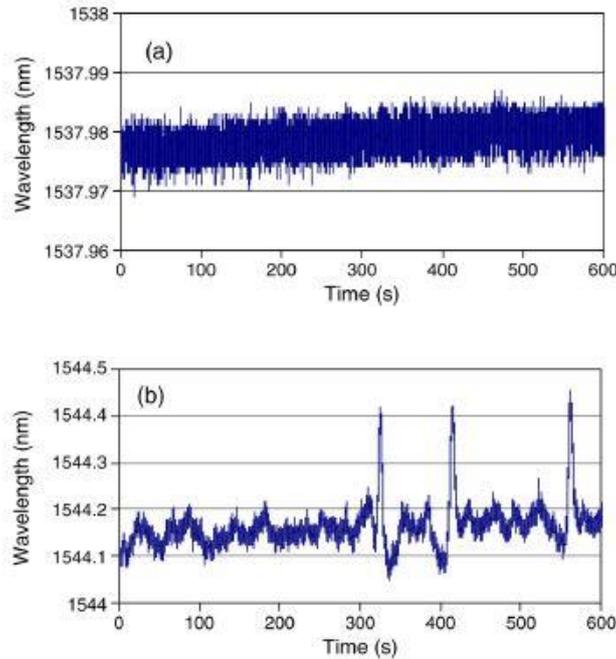
Pertanto sono state effettuate varie misurazioni anche in modalità continuo di 24h con un frequenza di campionamento di 500 Hz per monitorare le risposte dinamiche dei sensori FBG al passaggio dei treni e degli autoveicoli sul ponte.

**Risultati**

Nella Figura 64b è riportata la variazione della lunghezza d’onda di un sensore FBG in conseguenza di variazioni sia di strain che di temperatura per un intervallo di 10 min. Chiaramente per conoscere

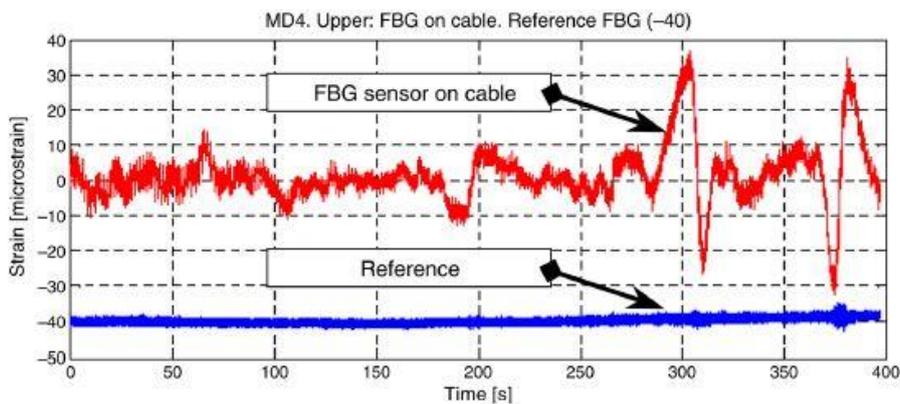
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

solo le variazioni di strain basta depurare tali valori dagli effetti termici registrati dai sensori FBG liberi (Figura 64a). Si possono notare chiaramente 3 picchi corrispondenti a 3 passaggi di treni sul ponte nel periodo di osservazione  $\Delta t = 10$  minuti.



**Figura 64** Variazioni della lunghezza d’onda rilevate da un sensore FBG per  $\Delta t=10$  minuti

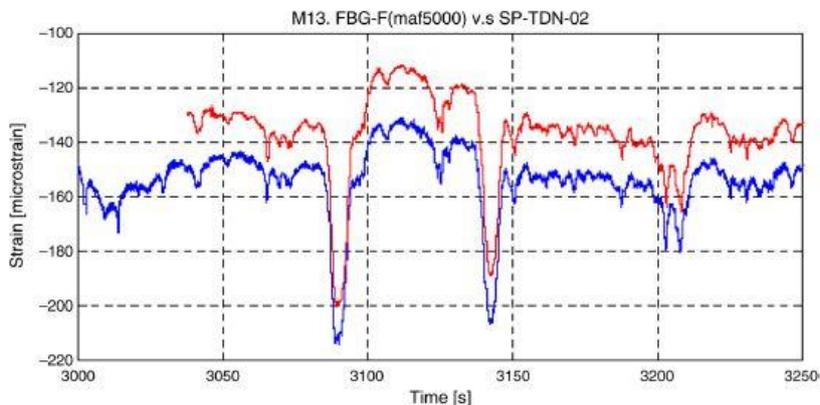
In Figura 65 sono riportate invece, per una frequenza di  $\sim 10$  kHz, le variazioni di strain di uno di questi sensori rispetto ad un sensore FBG di riferimento soggetto ad uno strain costante di  $-40\mu\epsilon$ .



**Figura 65** Variazioni di strain rilevate da un sensore FBG per  $\Delta t=7$  minuti

Nell’arco di tempo considerato, pari a  $\Delta t = 7$  min, sono individuabili dal segnale rilevato chiaramente due treni transitati sul ponte in direzioni opposte e un mezzo pesante a  $t = 195$  s. La risoluzione ottenuta dal sistema è circa pari ad 1pm.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 66 Confronto tra variazioni di strain per FBG e strain gauge dopo filtraggio**

**Conclusioni**

I risultati rilevati dal sistema di interrogazione dei sensori FBG per quanto riguarda le deformazioni sul ponte indotte dal passaggio di treni e veicoli pesanti, sono in accordo con quelli rilevati da strain gauge tradizionali (Figura 66).

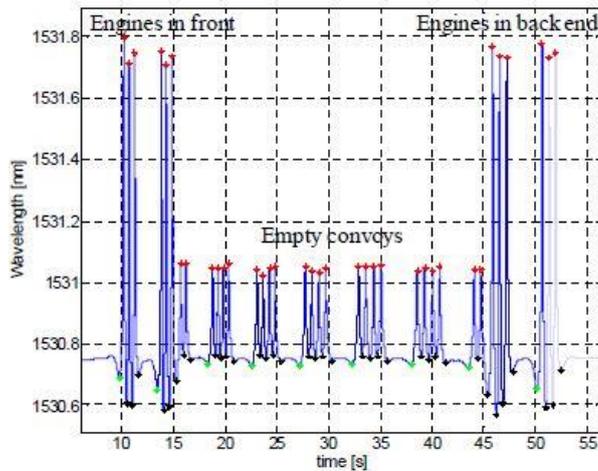
I sensori FBG però si fanno preferire in termini di facilità di installazione, immunità elettromagnetica, remote sensing, resistenza alla corrosione e basso costo di manutenzione anche in questo case-study e pertanto possono rappresentare una valida alternativa per il monitoraggio dinamico delle deformazioni sulle strutture civili.

**5.2 WIM su rotaia**

L'Università del Sannio in collaborazione con Ansaldo STS e Optosmart s.r.l. ha sviluppato un'applicazione di sensori FBG su rotaia. E' stato progettato e sviluppato un sistema TWBCS (Train Weight Balance Check System) per rilevare in tempo reale sia il peso circolante (Weigh in motion – WIM) sui binari ferroviari che difetti eventuali sulle ruote (Wheel flat detection – WFD).

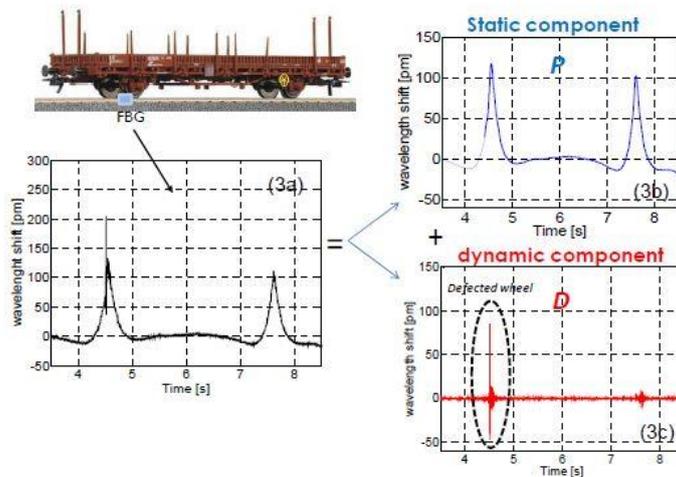
I sensori FBG una volta installati sul binario rilevano al passaggio del treno uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg pari al numero di assi e in misura proporzionale al peso delle motrici e dei singoli vagoni. Inoltre è possibile anche avere informazioni, nota la distanza fisica tra due ruote adiacenti sulla velocità e sull'accelerazione del convoglio ferroviario (Figura 67).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



**Figura 67** Risposta tipica di FBG installato sulla rotaia durante il transito del treno

Applicando rispettivamente un filtro passa-basso e un filtro passa-alto al segnale che ritorna dai sensori FBG si riesce a separare la componente statica da quella dinamica e ad avere informazioni sia sul peso del treno in movimento che sui difetti delle ruote (Figura 68).

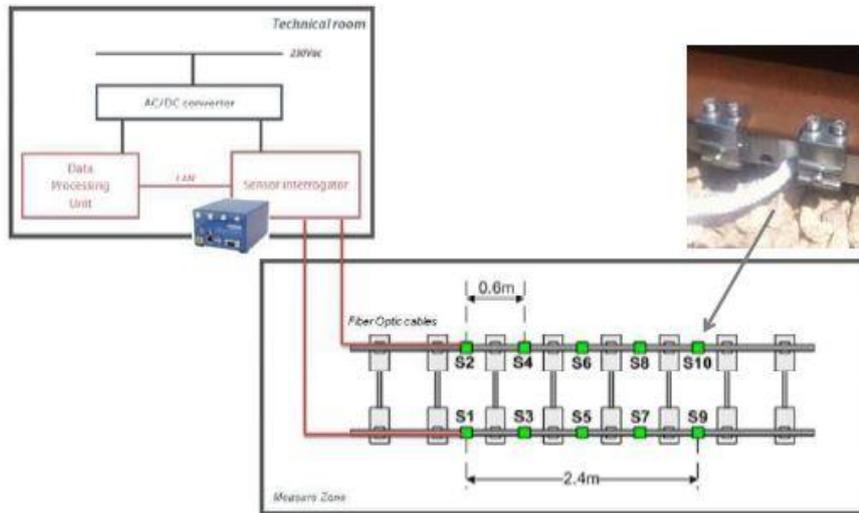


**Figura 68** Componente statica e dinamica del segnale proveniente dai sensori FBG

Sul binario sono stati installati 10 sensori FBG distribuiti su entrambi i lati (5 per ognuno) a distanza di 0.6m l'uno dall'altro, posizionati tra due traverse adiacenti del binario, per un totale di 2.4m. I sensori FBG di deformazione utilizzati sono stati protetti e posizionati in una custodia metallica montata sotto il binario in modo tale da renderli operativi in un ambiente difficile per vibrazioni, temperatura, umidità, polvere, ecc.

La fibra ottica in cui sono stati inseriti i sensori FBG è stata collegata ad un interrogatore ottico, costituito da una sorgente laser accordabile e da un fotodetector, che analizza i segnali retroriflessi dai sensori FBG rilevando le deformazioni e da un'unità data processing che elabora ed invia i dati relativi al peso del treno e ai difetti delle ruote, ad un PC in tempo reale, entrambi posizionati in una cabina in prossimità della rotaia. La frequenza di interrogazione dei sensori FBG è stata di 2.5 kHz con una risoluzione di 1 pm (Figura 69).

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 69 Architettura del sistema TWBCS**

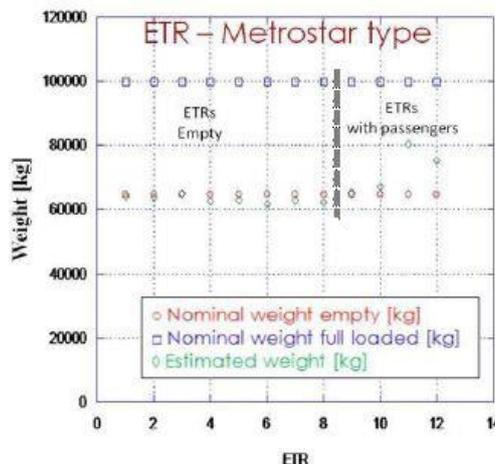
Dopo la fase di progetto in laboratorio, per validare l’hardware e il software sviluppato, il sistema è stato testato sul campo in due scenari lungo la ferrovia ad Abu Dhabi (Emirati Arabi Uniti) e nella stazione centrale Garibaldi di Napoli (Italia) (Figura 70).



**Figura 70 Sistema WIM –WFD installato su rotaia**

Il sistema è in grado di risalire dallo spostamento di lunghezza d’onda di Bragg della componente statica al peso gravante su ogni singola ruota durante il transito del treno. Difatti mediante i test sul campo è stato sviluppato un tool di calibrazione che noto lo spostamento di lunghezza d’onda ed il peso dei vagoni calcola il coefficiente di calibrazione  $\alpha$  [kg/pm] per ogni FBG. Tale coefficiente converte la deformazione rilevata in peso per tre tipi di treno circolanti sulla linea presa in considerazione. Una volta noti i coefficienti  $\alpha$ , sono state testate le WIM in condizioni operative normali con e senza passeggeri.

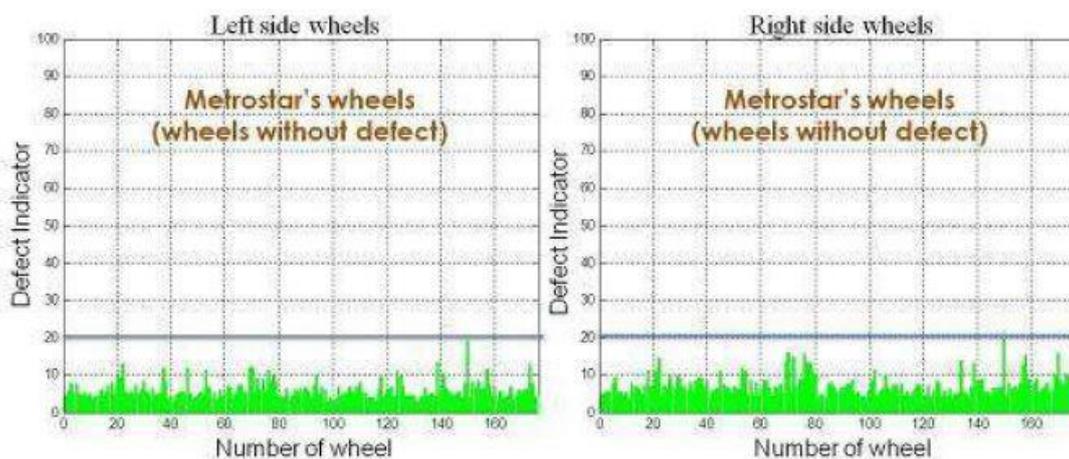
**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 71** Test di pesatura su ETR in condizioni normali (con e senza passeggeri)

E' stato così comparato il peso stimato di 18 treni in totale con il peso nominale vuoto e peso nominale a pieno carico e si è raggiunta un'accuratezza del 2%.

Dall'analisi della componente dinamica dei segnali retroriflessi dei 5 FBG posizionati su un singolo lato della rotaia, è stato possibile individuare invece i difetti eventuali presenti sulle ruote del treno, in quanto ogni FBG posizionato sul binario ha monitorato una porzione di superficie rotolante per ogni ruota. Sono stati comparati i livelli vibrazionali dei treni in movimento con un valore di soglia determinato da treni con ruote nuove ed è stato pertanto definito un Indice di anomalia (Defect Indicator) con un livello proporzionale al difetto riscontrato (Figura 72).



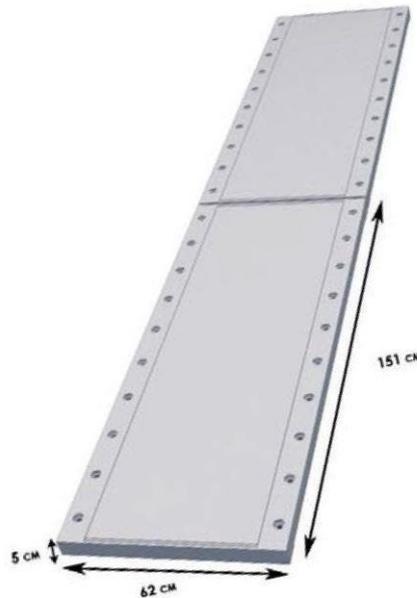
**Figura 72** Defect Indicator rispetto al valore di soglia

### 5.3 Prodotto per pesatura dinamica proposto da IWIM S.r.l.

La società iWIM s.r.l. propone un prodotto basato su tecnologia FBG che è dichiarato essere omologato in classe di precisione 10% per velocità massima pari a 50km/h<sup>1</sup> (Figura 73).

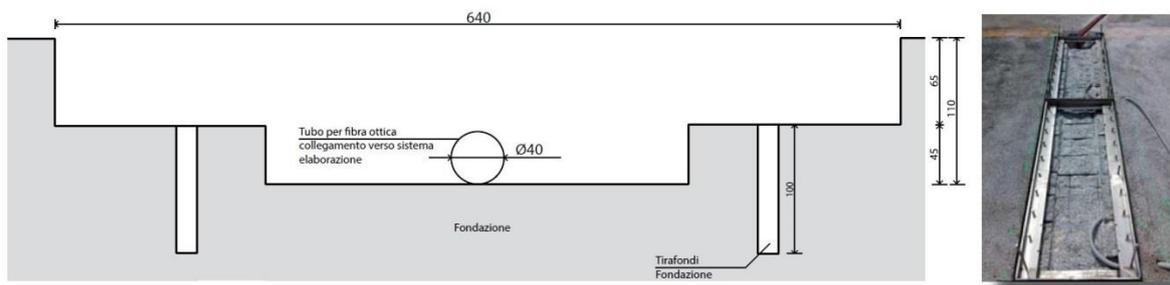
<sup>1</sup> Brochure iWIM 50\_10 <http://www.iwim.it>

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**  
**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**



**Figura 73 Piastra WIM**

Il prodotto non risulta aver trovato applicazioni commerciali; si dichiara esclusivamente applicazione concessa ad Autostrada del Brennero in installazione su porta autovelox di accesso alla viabilità autostradale. Il prodotto è presentato come piastra in configurazione di bending plate, di suddivisa in due componenti a copertura della intera larghezza della corsia, ciascuna di dimensioni 151x62x5 cm, con specifiche di peso minimo per asse 1.5 ton, peso massimo per asse 20 ton e range di velocità da 5 a 50Km/h. Si presenta il prodotto con caratteristiche di installazione mediante esecuzione di scavo in fondazione e getto in opera, con inghisaggio di telaio su cui è alloggiata la piastra (Figura 74).



**Figura 74 Schema scavo per la piastra WIM**

**6 Conclusioni**

Da una approfondita ricerca bibliografica risulta che la possibilità di uso delle fibre ottiche per realizzare WIM è stato ampiamente investigata da ormai più di 20 anni dando dei risultati molto incoraggianti che però non hanno portato ancora, tranne rarissimi casi, uno sviluppo industriale e

***PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL***

***“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”***

commerciale di un prodotto e ove si sia arrivati a uno sviluppo commerciale i prodotti sviluppati non hanno trovato grosse applicazioni.

I case-study trovati in letteratura si riferiscono nella maggioranza dei casi, come dimostrano quelli riportati nel presente deliverable, a studi di monitoraggio del traffico, conteggio veicoli e assi, propedeutici allo sviluppo futuro di sistemi WIM.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**

**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

## 7 Bibliografia

- [1]. Dr. Richard Livingston e Mr. Rais Rizvi, *Applications of Fiber Optic Sensors in Weigh-In-Motion (WIM) systems for monitoring truck weights on pavements and structures*, NM State University, Report NM97ITD-02, Aprile 2003
- [2]. Ramesh B. Malla e Norman W. Garrick, *A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicle on Highways*, Sensors - Aprile 2008, DOI: 10.3390/s8042551
- [3]. Anatoly Batenko, Alexander Grakovski, Igor Kabashkin, Elmars Petersons e Yuri Sikerzhicki, *Weight-In-Motion (Wim), Measurements By Fiber Optic Sensor: Problems And Solutions*, Transport and Telecommunication, Volume 12, No 4, 2011
- [4]. P.S. Theocaris, *Moiré fringes in strain analysis*, Pergamon (1969).
- [5]. R.P. Khetan e F.P. Chiang, *Strain analysis by one -beam laser speckle interferometry*, Appl. Opt. 15, 2205-2215 (1976).
- [6]. C. Belleville e G. Duplain, *White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor*, Opt. Lett. 18, 78-80 (1993).
- [7]. P.B. Tarsa, M. Brzozowski, P. Rabinowitz, e K.K. Lehmann, *Cavity ringdown strain gauge*, Opt. Lett. 29, 1339-1341 (2004).
- [8]. M. Born e E. Wolf. *Principles of Optics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- [9]. C. Palmer e E. Loewen. *Diffraction Grating Handbook*. Rochester, NY: Newton Corporation, 2005.
- [10]. R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, CA: Academic Press, 1999.
- [11]. G. Chartier. *Introduction to Optics*. New York: Springer, 2005.
- [12]. T. Erdogan. *Fiber Grating Spectra*. In: Journal of Lightwave Technology 8 (1997).
- [13]. F. Colpo, L. Humbert e J. Botsis. *An experimental numerical study of the response of a long fibre Bragg grating sensor near a crack tip*. In: Smart Materials and Structures 16 (2007).
- [14]. J. Palaniappan, H.Wang, S.L. Olgin et al. *Use of conventional and chirped optical fibre Bragg gratings to detect matrix cracking damage in composite materials*. In: Journal of Physics: Conference Series 15 (2005).
- [15]. Y. Fan. *Characterization of Fiber Bragg Grating Sensor Array Embedded in Composite Structures*, M.Sc. Thesis. Montreal, Canada: Concordia University, 2004.
- [16]. Y. Wang, B. Han et al. *Integrated measurement technique for curing process-dependent mechanical properties of polymeric materials using fiber bragg grating*. In: Society for Experimental Mechanics 279 (2007).
- [17]. Y. Wang, B. Han, D.W. Kim, A. Bar-Cohen and P. Joseph. *Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurement Using In-fibre Bragg Grating Sensor*, Electronics Letters, Vol. 32 No. 12, 6th June 1996.
- [18]. O. Frazão, L. Marques, J.M. Marques, J.M. Baptista and J.L. Santos. *Simple sensing head geometry using fibre Bragg gratings for strain-temperature discrimination*, Optics Communications, No. 279, 2007.

**PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL**

**“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”**

- [19]. Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Helen L. W. Chan, Chung-Loong Choy and Muhtesem Süleyman Demokan. *Discrimination Between Strain and Temperature With a Single Fiber Bragg Grating*, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 33, No. 3, May 5 2002.
- [20]. Minh Song, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi and ByoungHo Lee. *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube*, Academic Press, 1997.
- [21]. R. Montanini and L. D'Acquisto. *Simultaneous measurement of temperature and strain in glass fiber/epoxy composites by embedded fiber optic sensors: I. Cure monitoring*, IOP Publishing Ltd, 13 August 2007.
- [22]. T. Iwashima, A. Inoue, M. Shigematsu, M. Nishimura and Y. Hattori. *Temperature compensation technique for fibre Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes*, Electronics Letters, Vol. 33 No.5, 27th February 1997.
- [23]. Whitten L. Schulz, Eric Udd, John M. Seim, and Galen E. McGill. *Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highways*, Blue Road Research
- [24]. Sui P. Yam, Greg W. Baxter, Scott A. Wade and Stephen F. Collins *Modelling of an Alternative Pi-phase-shifted Fibre Bragg Grating Operating at Twice the Bragg Wavelength*, CTME, Victoria University, Melbourne.
- [25]. L. Jin, W. Zhang, H. Zhang, B. Liu, J. Zhao, Q. Tu, G. Kai and X. Dong. *An Embedded FBG Sensor for Simultaneous Measurement of Stress and Temperature*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18 No. 1, January 1, 2006.
- [26]. Antonio Iele, Valerio Lopez, Armando Laudati, Nadia Mazzino, Giovanni Bocchetti, Antonello Cutolo e Andrea Cusano, *Fiber Optic Sensing System For Weighing In Motion (Wim) And Wheel Flat Detection (Wfd) In Railways Assets: The Twbcs System*, – 8th EWSHM 2016, 5-8 July 2016, Spain, Bilbao
- [27]. T.H.T. Chana, L. Yu, H.Y. Tam, Y.Q. Ni, S.Y. Liu, W.H. Chung e L.K. Cheng, *Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation*, Engineering Structures 28-2006 Elsevier
- [28]. M. A. Caponero, C. Vendittozzi, F. Felli, A. Brotzu e G. Saviano, *Use of FBG sensors for the monitoring of cultural heritage structures and monuments*, - Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, Giugno 2011, ISBN 978-88-95940-36-6
- [29]. S.T. Vohra, C.C.Chang, B.A. Danver, B. Althouse, M.A.Davis e R. Idriss, *Preliminary Results on the monitoring of an in-sevice bridge using a 32-channel FBG sensor system*, Naval Research Laboratory Washington, NRL/MR/5670-98-8186
- [30]. Daniele Tosi, *Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors*, Sensors, Ottobre 2017
- [31]. <http://www.iwim.it>