

**G. MONTESANO, F. GRANDIZIO,
A. FEO, C. SPOSATO**

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Processi e Materiali per Applicazioni Energetiche
Centro Ricerche Trisaia

M.A. CAPONERO, A. POLIMADEI

Dipartimento Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche e Sicurezza
Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica
Centro Ricerche Frascati

SVILUPPO E TESTING DI UN SISTEMA WIM CON SENSORI IN FIBRA OTTICA FBG

RT/2024/8/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

G. MONTESANO, F. GRANDIZIO,
A. FEO, C. SPOSATO

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Processi e Materiali per Applicazioni Energetiche
Centro Ricerche Trisaia

M.A. CAPONERO, A. POLIMADEI

Dipartimento Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche e Sicurezza
Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica
Centro Ricerche Frascati

SVILUPPO E TESTING DI UN SISTEMA WIM CON SENSORI IN FIBRA OTTICA FBG

RT/2024/8/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

SVILUPPO E TESTING DI UN SISTEMA WIM CON SENSORI IN FIBRA OTTICA FBG

G. Montesano, F. Grandizio, A. Feo, C. Sposato, M.A. Caponero, A. Polimadei

Riassunto

In questo rapporto si presenta il lavoro svolto per lo sviluppo di un sistema WIM (weight-in-motion) finalizzato alla pesatura dinamica di veicoli pesanti, basato su piastre flettenti in acciaio strumentate con sensori in fibra ottica FBG (Fiber Bragg Grating).

Il lavoro svolto ha considerato sia il design e la realizzazione del prototipo della struttura meccanica, sia lo sviluppo sistemistico del sistema di acquisizione e lo sviluppo integrale degli algoritmi di analisi dei dati. Per la realizzazione della struttura sono state eseguite preliminari attività di caratterizzazione dei componenti in laboratorio, mediante prove meccaniche e cicli di aging accelerato in camera climatica su provini in acciaio strumentati. In particolare, le misure di caratterizzazione hanno considerato il confronto comparativo fra sensori FBG con diversa tipologia di coating, al fine di determinare quella più appropriata con riferimento all'efficienza e durabilità della funzione di trasferimento della deformata dalla piastra al sensore. Per lo sviluppo degli algoritmi sono state implementate e comparate procedure di analisi implementabili a basso livello ed in tempo reale su microprocessore di modesta potenza di calcolo. In particolare, è stata definita ed ottimizzata la procedura di decodifica del segnale dei sensori FBG corrispondente al passaggio dei veicoli, con sviluppo dell'algoritmo più opportuno per la riduzione dell'errore nella determinazione del peso dinamico del veicolo in transito.

Il sistema sviluppato è stato validato con la realizzazione di un sito dimostratore su sede stradale all'interno del C.R. ENEA Trisaia, eseguendo campagne di prove con transiti controllati di veicoli pesanti. I risultati hanno permesso di testare il sistema prototipale e di acquisire dati idonei alla definizione di interventi migliorativi per la realizzazione di sistema idoneo ad installazione su viabilità autostradale.

Parole chiave: pesatura dinamica WIM, sensori ottici, sensori FBG (Fiber Bragg Grating), algoritmi di fit.

Abstract

This report presents the work carried out for the development of a WIM (weight-in-motion) system aimed at the dynamic weighing of heavy vehicles, based on steel bending plates instrumented with fiber optic sensors FBG (Fiber Bragg Grating).

The work carried out considered both the design and the prototype realization of the mechanical structure, and the systemic development of the acquisition system and the integral development of data analysis algorithms. For the realization of the structure, preliminary characterization activities of the components were carried out in the laboratory, through mechanical tests and accelerated aging cycles in the climatic chamber on instrumented steel specimens. In particular, characterization measures considered the comparative comparison between FBG sensors with different coating types, to determine the most appropriate one for the efficiency and durability of the deformation transfer function from the plate to the sensor. For the development of algorithms procedures implementable at low-level and in real-time on microprocessors of modest computing power have been implemented and compared. In particular, the procedure to decode the signal of the FBG sensors corresponding to the passage of vehicles has been defined and optimized, with the development of the most appropriate algorithm for reducing the error in the determination of the dynamic weight of the vehicle in transit.

The developed system has been validated with the realization of a demonstration site on the road inside the C.R. ENEA Trisaia, performing test campaigns with controlled transits of heavy vehicles. The results made it possible to test the prototype system and to acquire data suitable for the definition of improvements for the construction of a system suitable for installation on highways.

Keywords: WIM (weight-in-motion), optical fiber sensors, FBG (Fiber Bragg Grating) sensors, fitting algorithms.

INTRODUZIONE	7
1. WIM CON SENSORI IN FIBRA OTTICA	9
1.1. Sistemi WIM	9
1.2. Sensori in fibra ottica	10
1.2.1. Caratteristiche generali dei sensori in fibra ottica	11
1.2.2. Componenti di un sistema di misura in fibra ottica	11
1.3. Reticoli di Bragg (FBG)	14
1.4. Uso di sensori FBG per applicazioni WIM	22
2. PROGETTO SENTINEL: TEST PRELIMINARI	23
2.1. Test sulla scheda elettronica di comando con un sistema di pesatura ottico	23
2.2. Caratterizzazione di provini in acciaio sensorizzati con FBG	27
2.2.1. Normativa di riferimento per i sensori in Fibra Ottica	27
2.2.2. Preparazione dei provini per le prove sperimentali	27
2.3. Piano sperimentale per la caratterizzazione dei provini con sensori FBG	38
2.3.1. Prove di trazione e flessione pre-aging	39
2.3.2. Aging accelerato in camera climatica	45
2.3.3. Prove di trazione e flessione post-aging	46
2.3.4. Risultati	50
3. DEFINIZIONE DEGLI ALGORITMI DI PROCESSAMENTO DEL SEGNALE	51
3.1. Algoritmo per il calcolo del peso	52
3.2. Procedura baricentrica per individuazione del picco	54
3.2.1. Risultati applicazione algoritmo di tipo baricentrico	59
4. SITO DIMOSTRATORE NEL C.R. ENEA TRISAIA	63
4.1. Strumentazione delle piastre con sensori FBG	63
4.2. Installazione del sistema	67
4.3. Testing del sistema in ambiente esterno controllato	70
CONCLUSIONI	75
BIBLIOGRAFIA	76

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni la crescente necessità di aumentare la sicurezza sulla rete stradale ha indirizzato la ricerca verso soluzioni tecnologiche sempre più *smart* in grado di gestire e controllare il traffico, soprattutto quello pesante.

La ricerca è stata condotta, nell'ambito del Progetto SENTINEL (Sistema di pEsatura diNamica inTElligente per la gestioNE deL traffico pesante), finanziato a valere sul PON R&I 2014-2020 - Bando MIUR «Progetti di Ricerca Industriale e non preponderante Sviluppo Sperimentale» nelle 12 Aree di specializzazione individuate dal PNR 2015-2020 - Area di specializzazione "Mobilità Sostenibile". Il progetto è stato coordinato da ENEA, impegnata con il personale della sezione TERIN-PAEN (C.R. Trisaia) e dei laboratori TERIN-DEC-MOST (C.R. Casaccia) e NUC-TECFIS-MNF (C.R. Frascati). Il partneriato comprendeva: Takius Srl, Consorzio TRAIN (soggetti attuatori: UNISA e ETT SpA) e ANAS. La ricerca è stata soprattutto indirizzata allo sviluppo di sistemi di pesatura dinamica dei veicoli pesanti in transito (WIM - *weight-in-motion*) affidabili e paragonabili ai sistemi di pesa statica, e pertanto dotati di un'elevata precisione, in modo da effettuare la pesatura durante le normali condizioni di marcia dei veicoli, per avere un impatto minimo sul normale flusso di traffico. Inoltre, un sistema di pesa dinamica consente un controllo su tutti i veicoli in transito piuttosto che un controllo a campione.

Un siffatto sistema può avere una triplice funzione: individuare i veicoli in sovraccarico per scopi sanzionatori, salvaguardare le infrastrutture viarie critiche da carichi eccessivi e, infine, implementare un sistema di manutenzione predittiva basato sulle effettive condizioni di traffico.

Nell'ambito del Progetto SENTINEL, ENEA, in collaborazione con gli altri partner, ha sviluppato un sistema integrato intelligente di pesatura dinamica dei veicoli, denominato SENTINEL (Sistema di pEsatura diNamica inTElligente per la gestioNE deL traffico pesante), che, integrandosi con altri sistemi, collabora in una gestione intelligente e predittiva del traffico di veicoli pesanti aventi effettive condizioni di carico non compatibili con le caratteristiche della struttura viaria, con smistamento in tempo reale su viabilità alternativa. L'installazione del sistema in prossimità di nodi di infrastrutture stradali, quali ponti, viadotti, tratti delicati per le caratteristiche altimetriche e/o ambientali/climatiche, ne consente l'impiego sia per la manutenzione predittiva delle infrastrutture stesse sia a supporto del controllo dei veicoli pesanti in sovraccarico.

Il sistema SENTINEL è costituito da:

- una piastra flettente di acciaio, strumentata con sensori FBG, che rappresenta l'elemento meccanico sensibile in quanto, flettendo al passaggio dei veicoli, induce nei sensori FBG una deformazione che viene poi elaborata per la stima del peso;
- optoelettronica di acquisizione ed elaborazione del segnale ottico;
- telecamera per l'individuazione dei veicoli e per la misura della velocità degli stessi per migliorare la stima del peso;
- algoritmi di elaborazione dei dati provenienti dai sensori e dalla telecamera per la stima del peso del veicolo.

Il peso, oltre ad essere un output di SENTINEL, è un input per modelli predittivi e strategie decisionali automatiche o semiautomatiche, in base a studiati criteri di regolamentazione del traffico pesante, da assumere in relazione alle effettive condizioni di carico dei veicoli e non alla classificazione per portata massima. Inoltre, è un input per modelli di manutenzione preventiva basati sulle effettive condizioni di utilizzo delle infrastrutture.

L'attività si è focalizzata sulla possibile applicazione di sensori in fibra ottica, basati su reticoli di Bragg (FBG), come elementi sensibili su sistemi "smart sensing" per il monitoraggio/controllo del traffico veicolare e la misura dinamica del peso del veicolo.

Nell'ambito del Progetto PON SENTINEL, ENEA ha svolto un'attività sperimentale prima in laboratorio per la caratterizzazione e calibrazione dei sensori e dell'elettronica di interrogazione degli stessi e poi sul campo mediante la realizzazione di un sito dimostratore nel C.R. ENEA Trisaia.

L'attività di laboratorio ha riguardato il *testing* su provini strumentati con FBG di diversa tipologia, sensibili alla deformazione e alla variazione di temperatura. Sono stati effettuati test di caratterizzazione dei provini, a trazione e flessione, prima e dopo cicli di invecchiamento accelerato al fine di determinare il sensore FBG più appropriato per il sistema WIM di SENTINEL, valutandone anche la durabilità nel tempo.

Successivamente sono stati esaminati i diversi algoritmi per l'analisi del segnale proveniente dai sensori ed è stato scelto il più opportuno per la nostra applicazione; inoltre è stato definito l'algoritmo di processamento del segnale per la determinazione del peso dinamico del veicolo in transito.

L'attività sul campo è consistita nella realizzazione di un sito dimostratore mediante l'installazione di piastre flettenti strumentate con sensori FBG per la stima del peso e di una telecamera ANPR (*Automatic Number Plate Recognition*) in un tratto di strada del C.R. ENEA Trisaia. Successivi transiti controllati di veicoli pesanti sulle piastre hanno permesso di testare il sistema e di acquisire dati a sufficienza per effettuare eventuali azioni correttive.

1. WIM CON SENSORI IN FIBRA OTTICA

1.1. Sistemi WIM

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

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

Tali sistemi di pesatura dinamica, sono in grado di descrivere in modo dettagliato numerosi parametri caratteristici del traffico veicolare, quali:

- volume di traffico;
- classificazione veicolare;
- numero di assi;
- distanziamento tra gli assi;
- peso complessivo;
- peso per singolo asse;
- velocità;

I dati di peso, che si possono misurare, e gli altri parametri, che si possono ricavare, sono particolarmente importanti per l'implementazione di alcune applicazioni, quali la progettazione di strade e ponti, la manutenzione delle pavimentazioni, il controllo di soglie di sicurezza legate al carico, la gestione del traffico veicolare.

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

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

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

A seconda della velocità dei veicoli, i sistemi *WIM* si distinguono [1](Figura 1):

- *LS-WIM* a bassa velocità
- *HS-WIM* ad alta velocità

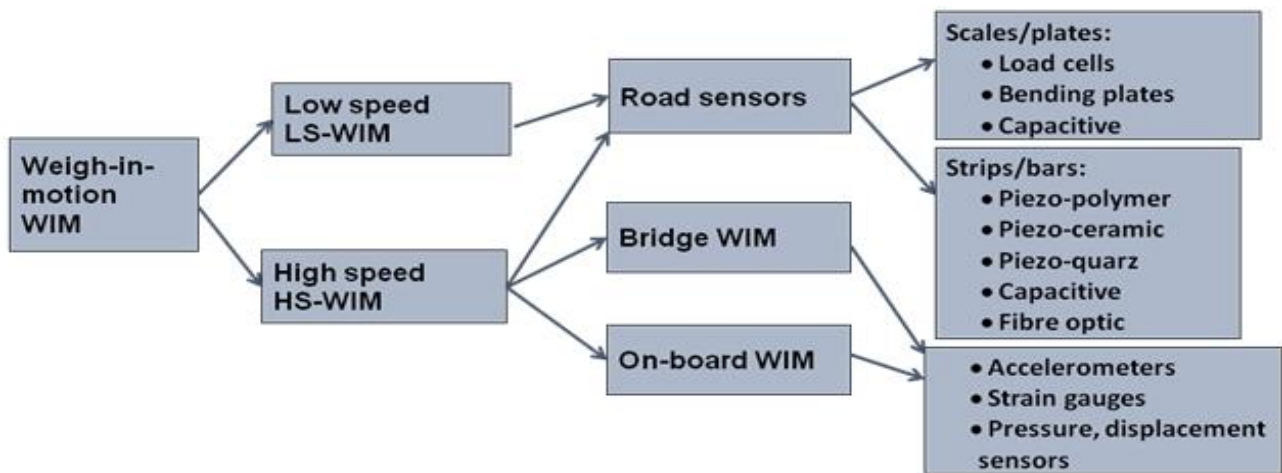


Figura 1. classificazione dei sistemi WIM in base alla velocità del veicolo

1.2. Sensori in fibra ottica

Una fibra ottica [2] (Figura 2) è un cavo costituito da due strati concentrici di materiale vetroso opportunamente drogato: 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). Inoltre, 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 [3] (Figura 3): 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 e ad evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno.

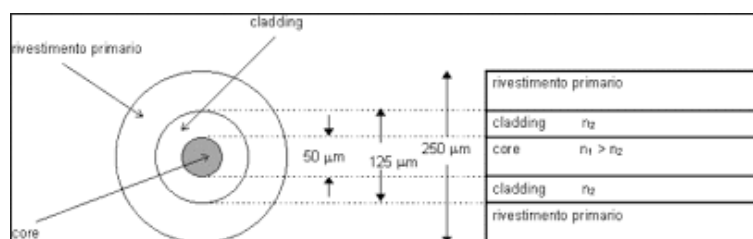


Figura 2. struttura fisica della fibra ottica

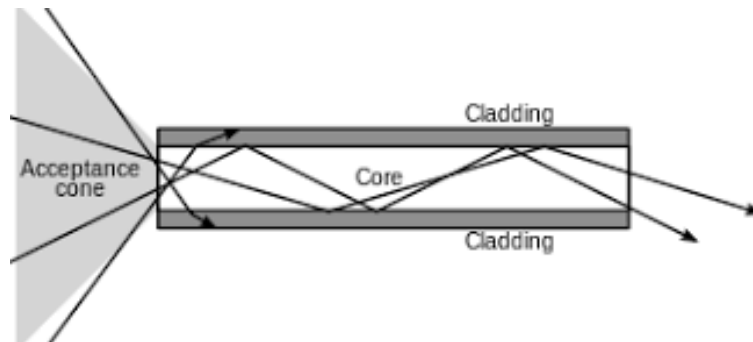


Figura 3. propagazione del segnale luminoso nella fibra ottica

1.2.1. Caratteristiche generali dei sensori in fibra ottica

La capacità della fibra "tal quale" di prestarsi come elemento sensore di deformazione è dovuta al fatto che una sollecitazione che agisce su un tratto di fibra ottica è codificata nella variazione di alcune caratteristiche del fascio di luce che la attraversa. Pertanto, possono essere usate differenti tecnologie basate su noti principi fisici:

- *phase technology* con una sorgente di luce coerente, che misura lo shift di fase tra l'onda in ingresso e quella in uscita;
- *tunnel technology* che usa gli effetti fisici che si verificano quando la luce attraversa una piccola apertura;
- *polarization technology* che misura i cambiamenti nella polarizzazione della luce;
- *spectral technology* che misura le variazioni spettrali della luce;
- *amplitude technology* che misura la variazione dell'intensità luminosa.

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, della configurazione e della calibrazione e pertanto non vengono usate molto frequentemente. L'ultima tecnologia, invece, è semplice in termini di implementazione e di costi ma ha una accuratezza più bassa. Infatti, 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* che 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 tecnologie di sensori, il segnale di uscita è tanto più piccolo quanto più grande è il carico. Un'altra limitazione della *amplitude technology* è legata al comportamento non lineare dei sensori che la utilizzano [4].

Un altro fenomeno che spesso viene usato nella misura delle deformazioni mediante fibre ottiche è la retrodiffusione. Infatti, quando la fibra è sollecitata con un segnale ottico, la natura intrinseca della matrice vetrosa, di cui la fibra è costituita, genera una radiazione luminosa che si diffonde in tutte le direzioni. Una parte di essa, dunque, risulta avere direzione parallela all'asse della fibra e contro-propagante, tale radiazione può essere utilizzata per leggere le proprietà locali della fibra stessa.

1.2.2. Componenti di un sistema di misura in fibra ottica

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

- Fibra ottica

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 4) 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 la attraversa [5].

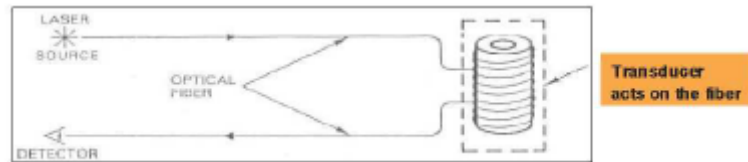


Figura 4. sensore in fibra ottica estrinseco

Nei sensori intrinseci (o diretti) (Figura 5), invece, la sollecitazione agisce direttamente sulla fibra [5].

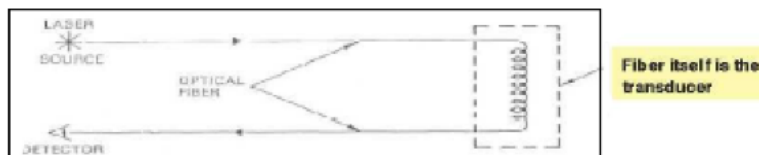


Figura 5. sensore in fibra ottica intrinseco

I sensori intrinseci sono più sensibili, dato che la sollecitazione agisce direttamente sulla fibra. Tuttavia, per la realizzazione di sistemi di pesatura dinamica dei veicoli (WIM) sono maggiormente soggetti a facili danneggiamenti 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 anche in fibre ottiche 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.

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 $S(\lambda)$ ampere/watt, la misura della potenza rilevata, nota la lunghezza d'onda del filtro ottico (λ), permette di determinare l'intensità della singola componente spettrale λ [6] (Figura 6).

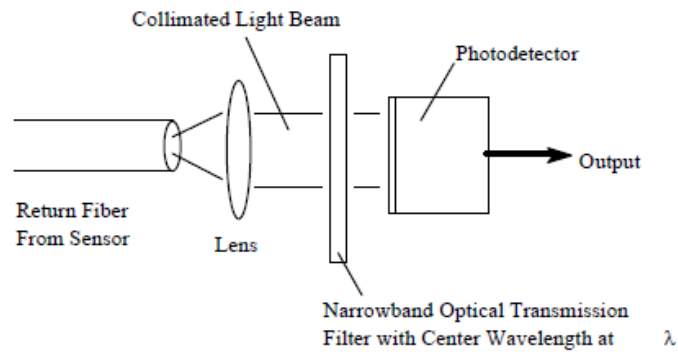


Figura 6. rilevamento di una singola componente spettrale

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 limitata larghezza di banda che non permette 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 7 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 [6].

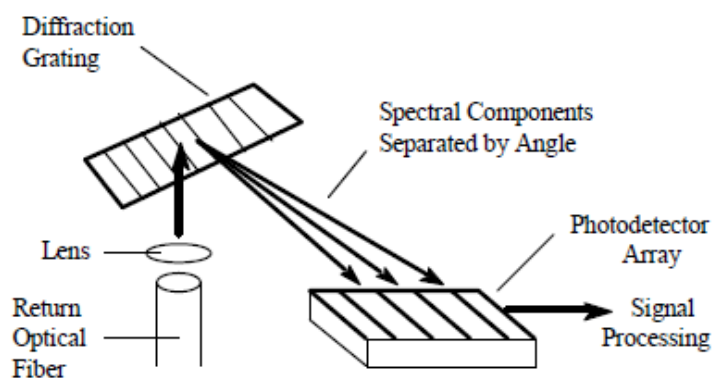


Figura 7. misura dello spettro del segnale di uscita

- Modulatore ottico

I modulatori ottici sono un altro componente fondamentale di un sistema in fibra ottica, essi implementano 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 usate 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 mediante un'azione meccanica.

1.3. Reticoli di Bragg (FBG)

Un reticolo di Bragg (*Fiber Bragg Grating - FBG*) è una struttura costituita da un reticolo di diffrazione, ottenuto per mezzo di una variazione periodica dell'indice di rifrazione del *core* della fibra. La modulazione periodica dell'indice di rifrazione 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*. 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 [7](Figura 8).

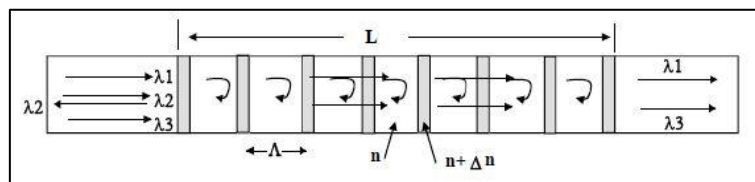


Figura 8. struttura a reticolo di Bragg.

In base alla direzione in cui viaggiano le onde che hanno subito interferenza costruttiva si possono classificare i reticoli come reticoli di Bragg, o di riflessione e reticoli di trasmissione, detti anche *Long Period Gratings*.

In Figura 9 illustra il funzionamento di entrambi i tipi di reticoli [8].

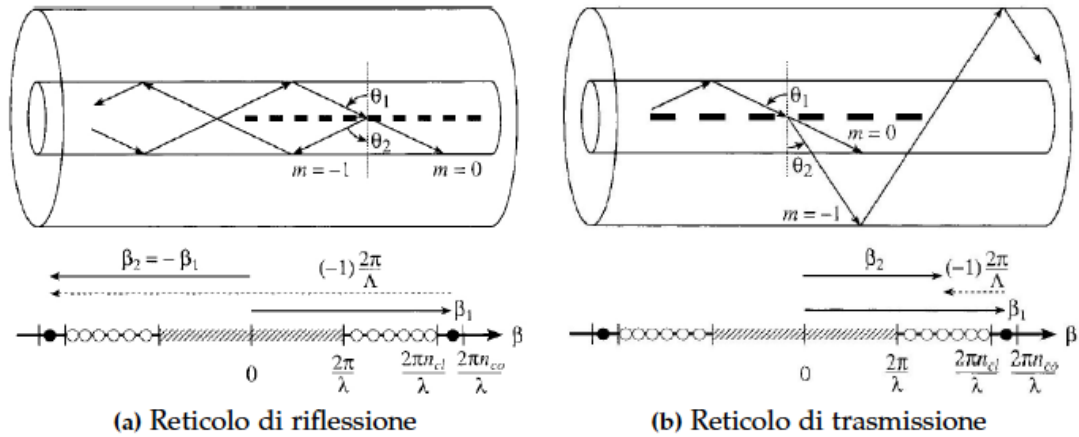


Figura 9. tipologie di reticoli iscritti in fibra ottica.

La condizione di Bragg, che fornisce la lunghezza d'onda λ_B per la quale si ha un massimo del segnale riflesso è definita nella (1):

$$l_B = 2n_{eff}L \quad (1)$$

dove n_{eff} è l'indice di rifrazione efficace del core della fibra e Λ è il periodo del reticolo.

Valori tipici sono per $n_{eff} \sim 1.5$ e per Λ 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 temperatura. Il fatto poi che sono poco invasivi consente di inserirli in strutture di vario tipo. Un ulteriore vantaggio non trascurabile è la linearità della dipendenza di λ_B da Λ 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 [11] (Figura 10). Se invece sul sensore agisce una deformazione variabile cambia anche la forma dello spettro, rendendo molto complessa, se non impossibile, l'identificazione della deformazione. In presenza di una deformazione che varia linearmente, la variazione di lunghezza d'onda di Bragg consente di rilevare la deformazione media sul sensore [11].

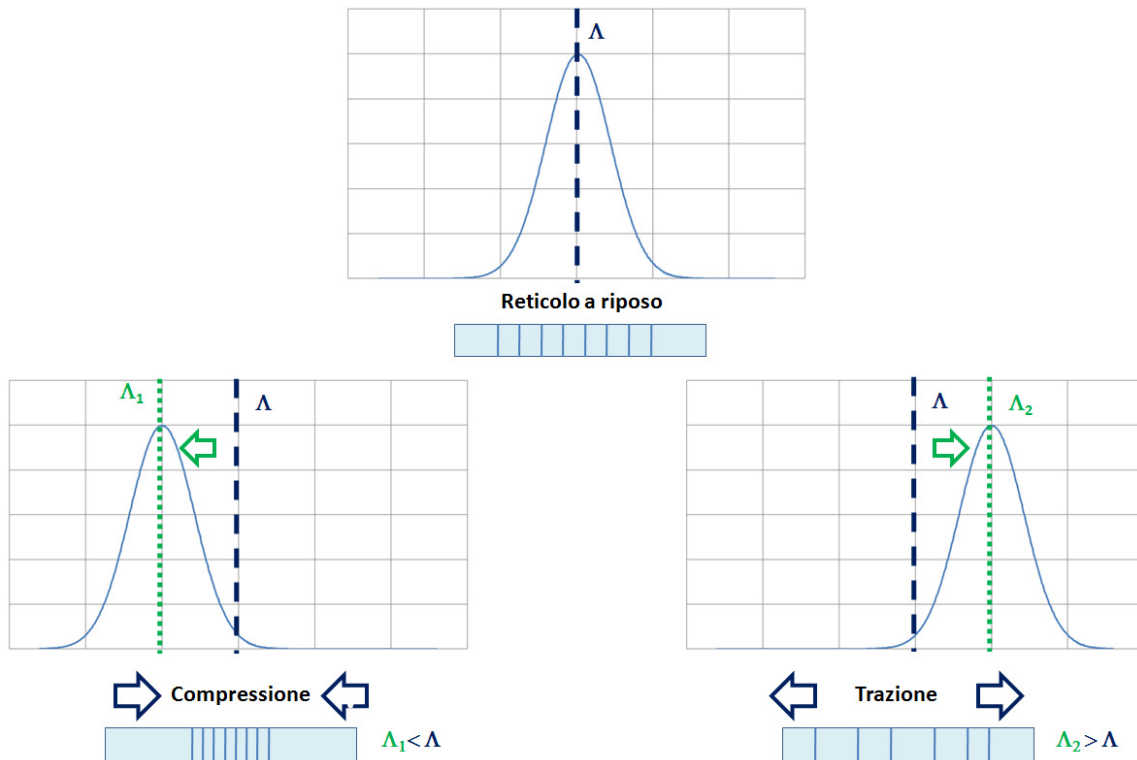


Figura 10. risposta del reticolo a una sollecitazione meccanica

In Figura 11 sono mostrati gli spettri riflessi e trasmessi da un sensore FBG [11].

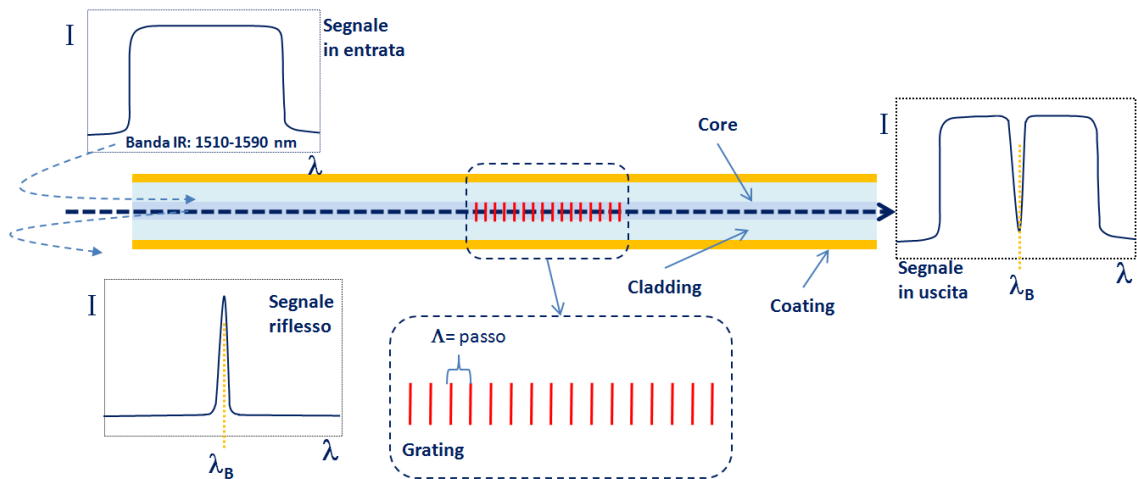


Figura 11. principio di funzionamento reticolo di Bragg.

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 [12] (Figura 12a).

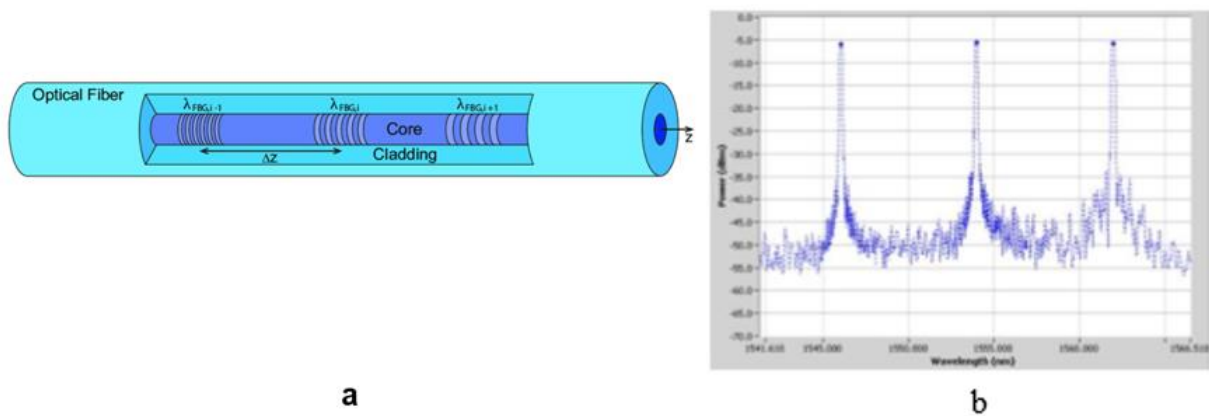


Figura 12. a) array di FBG multipunto b) spettro di un array di FBG

Moderni metodi di incisione (*drawing tower*) possono fabbricare fino a 50 FBG per singolo array, con lunghezze d'onda di Bragg distanti $\sim 2\text{nm}$. Lo spettro risultante sar  la combinazione di tutti gli spettri dei singoli FBG (Figura 12b) [13]. L'incisione dei reticoli pu  avvenire sia durante il processo di estrusione sia successivamente svestendo il *core* del *cladding* ed esponendolo a radiazione UV, tuttavia l'incisione dei reticoli durante il 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 [7][9][15](Figura 13).

Dallo spostamento delle lunghezze d'onda $\Delta\lambda$, pertanto,   possibile risalire alla causa dello spostamento, una deformazione meccanica $\Delta\varepsilon$ o una variazione di temperatura ΔT o entrambi.

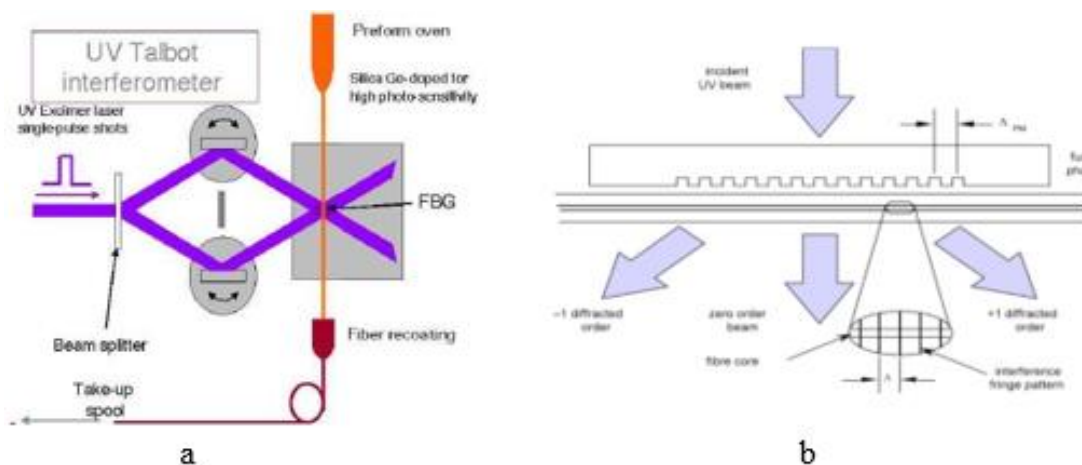


Figura 13. a) drawing tower b) maschera di fase

Sono riportati di seguito i parametri caratteristici dei sensori FBG.

Caratteristiche geometriche e meccaniche:

- lunghezza FBG: 6 - 15 mm;
- resistenza alla temperatura: riduzione della riflettivit  $T=200^\circ\text{C}$ 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 [16] (Figura 14).

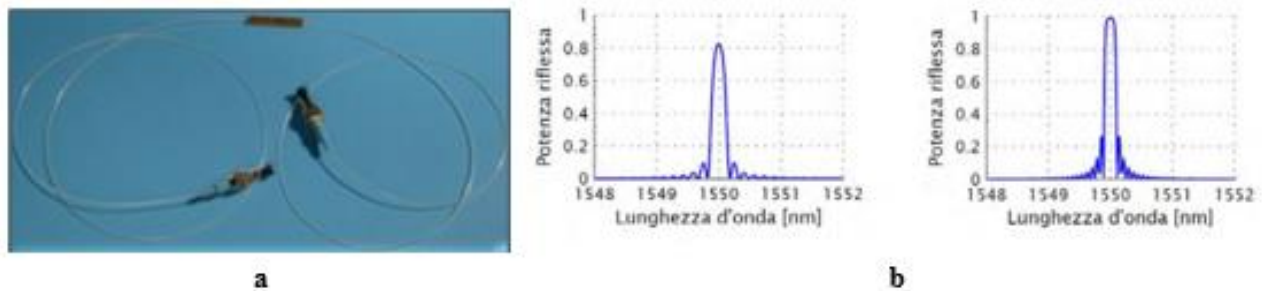


Figura 14. a) sensore FBG inserito nella fibra b) riflettività per $L=5\text{mm}$ e $L=10\text{mm}$

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 (1×10^{-7}) e inoltre presenta un'elevata accuratezza;
- 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. Una volta installati, quindi, 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 dalla rete dei sensori.

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

I sensori FBG sfruttano il legame termo-fotoelastico: 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 l'effetto si può facilmente formalizzare. Infatti, se si considera la variazione della lunghezza d'onda in funzione della variazione del periodo del reticolo, si ha:

$$\frac{D\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{DL}{L} + \frac{Dn_{eff}}{n_{eff}} = e_z + \frac{Dn_{eff}}{n_{eff}} \quad (2)$$

in cui si evidenzia la deformazione lungo l'asse del sensore e_z . Il termine Δn_{eff} rappresenta la variazione di indice di rifrazione del reticolo dovuta alla sollecitazione meccanica o termica. Al fine di separare la componente meccanica e termica la deformazione assiale l'equazione 3 può essere riscritta come segue:

$$e_z = e_z^t + e_z^m = \alpha DT + e_z^m \quad (3)$$

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

$$Dn_{eff} = -\frac{n_{eff}^3}{2} \left[p_{12}e_z + (p_{12} + p_{11})e_r - \left(\frac{2}{n_{eff}^3} \frac{dn}{dT} \right) DT \right] \quad (4)$$

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

$$D\lambda_B = \lambda_B \left[e_z - \frac{n_{eff}^3}{2} (p_{12}e_z + (p_{12} + p_{11})e_r) \right] + \lambda_B \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right) \right] DT \quad (5)$$

La formula 5 si può semplificare introducendo una costante foto-elastica (6) e un coefficiente termo-ottico (7):

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - (p_{12} + p_{11})\nu) \quad (6)$$

$$Z = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (7)$$

Pertanto, l'equazione finale risulta:

$$D\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) e_z + \lambda_B (\alpha + Z) DT \quad (8)$$

Per i sensori FBG, valori tipici del coefficiente deformazione-ottico e del coefficiente termo-ottico sono rispettivamente: $k_\varepsilon = 1 - p_e \sim 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ e $k_T = \alpha + Z \sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [10].

Tecniche di multiplexing

L'interrogazione di un sensore FBG deve permettere di risalire alla deformazione che ha causato lo spostamento della lunghezza d'onda rilevato. 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 [7][11]:

- 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*, con spettro sufficientemente largo da permettere di distanziare sufficientemente gli spettri riflessi dai sensori in modo da prevenire la sovrapposizione degli spettri dei singoli FBG, tenendo presente che una volta deformati la lunghezza d'onda varia di ~5-6 nm [7](Figura 15).

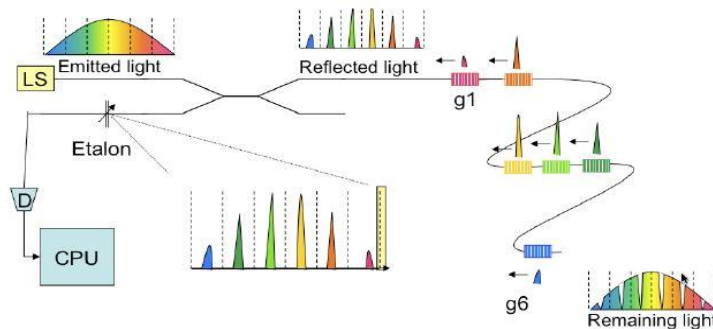


Figura 15. sistema WDM

- 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. Il riconoscimento dei singoli sensori è ottenuto dal tempo di arrivo dei singoli spettri. La distanza tra i vari sensori, però, influisce sulla velocità del sistema di interrogazione [7](Figura 16).

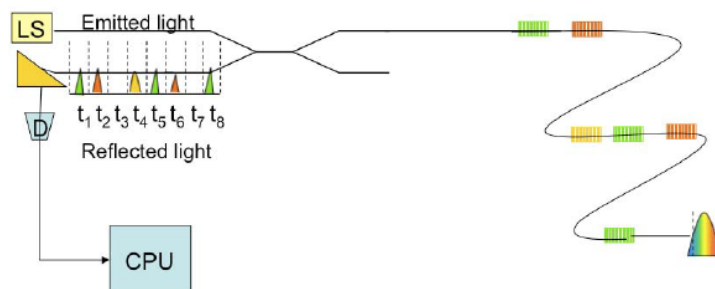


Figura 16. sistema TDM

- 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 segnali riflessi dagli FBG di stringhe diverse non interferiscono tra loro e lunghezze d'onda di Bragg uguali possono essere usate su ogni stringa [17](Figura 17).

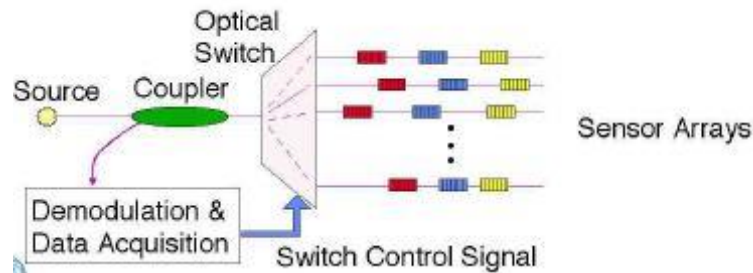


Figura 17. sistema SDM

Metodi di interrogazione

Lo schema di lettura di sensori FBG applicati ad una struttura di test è riportato in Figura 18 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 [18].

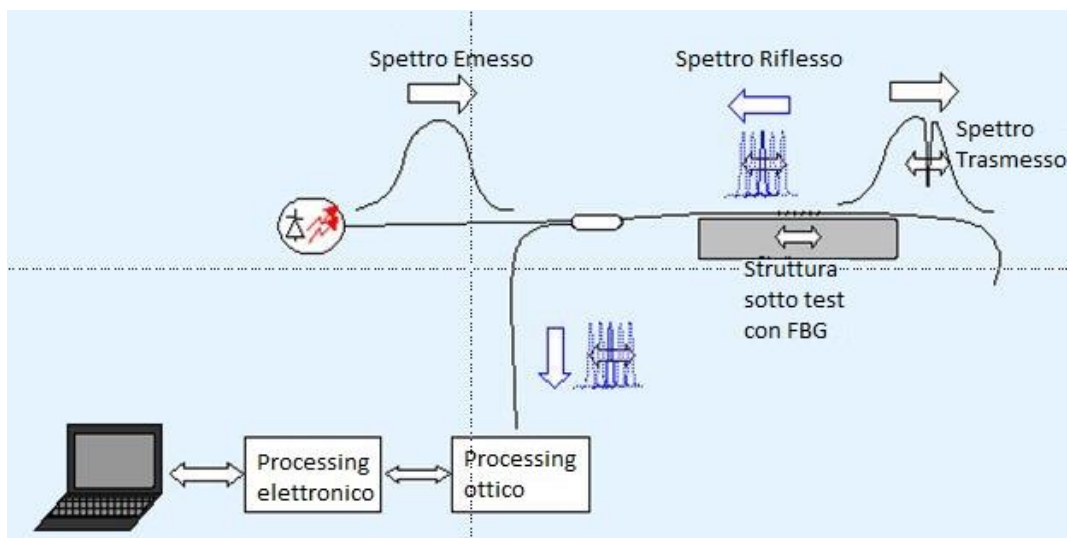


Figura 18. schema di lettura di sensori FBG

Il segnale retroriflesso può essere analizzato con diverse tecniche ottiche:

- analizzatore di spettro;
- spettrometro CCD;
- spettrometro FFT;
- filtri ottici;
- filtro accordabile Fabry-Perot con sorgente a larga banda;
- interferometri (Mach-Zehnder);
- sorgente ottica accordabile.

Ognuno dei metodi di misura elencati ha vantaggi e svantaggi, che ne 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.).

1.4. 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" come il monitoraggio del transito di veicoli o la misura del peso del veicolo tramite pesatura dinamica (WIM) senza la necessità di interrompere necessariamente il traffico. Il principio di *sensing* è sempre basato sulla misura della deformazione del reticolo di Bragg integrato sulla fibra, causata da una forza esterna agente sulla fibra stessa.

Gli FBG, grazie alle loro caratteristiche intrinseche (bassa invasività, alta integrabilità in infrastrutture, come ad esempio nell'asfalto, alta resistenza alla corrosione, immunità alle interferenze elettromagnetiche) sono ideali per essere incorporati nell'asfalto per sostituire i sensori tradizionali e aggiungere nuove funzionalità ai sistemi di monitoraggio e controllo del traffico.

Se un veicolo in transito, a causa del suo peso, comprimesse una piattaforma opportunamente integrata nell'asfalto e strumentata con sensori FBG produrrebbe una deformazione che, opportunamente elaborata, può indicare se il peso del veicolo sia superiore o meno al valore di soglia sopportabile dall'infrastruttura. 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 in sovrappeso o smistare il traffico su viabilità alternativa.

2. PROGETTO SENTINEL: TEST PRELIMINARI

Le prime prove effettuate nei laboratori del C.R. ENEA Trisaia hanno avuto lo scopo di testare le funzionalità delle apparecchiature elettroniche di interrogazione e condizionamento del segnale dei sensori FBG appositamente sviluppate. Si è proceduto poi a caratterizzare i sensori FBG mediante prove di trazione e flessione eseguite su provini di acciaio AISI316L equipaggiati con due tipologie di sensori FBG. Le prove sono state eseguite prima e dopo cicli di invecchiamento accelerato in modo da verificare la tenuta nel tempo del "sistema" acciaio-colla-sensore e della stabilità del sensore.

2.1. Test sulla scheda elettronica di comando con un sistema di pesatura ottico

È stata sviluppata una scheda elettronica di controllo per l'acquisizione e il condizionamento dei segnali provenienti dai sensori FBG. Questa scheda è stata testata mediante un sistema di pesatura opto-meccanico (*cantilever*) (Figura 21) costituito da un tondino di acciaio vincolato ad un'estremità e libero dall'altra. Un interrogatore (sensore ottico) *I-MON Ibsen* è stato collegato da una parte alla scheda di controllo e dall'altra, tramite fibra ottica, ad un sensore FBG incollato, mediante resina, al tondino d'acciaio, per rilevare le deformazioni prodotte (Figura 19).

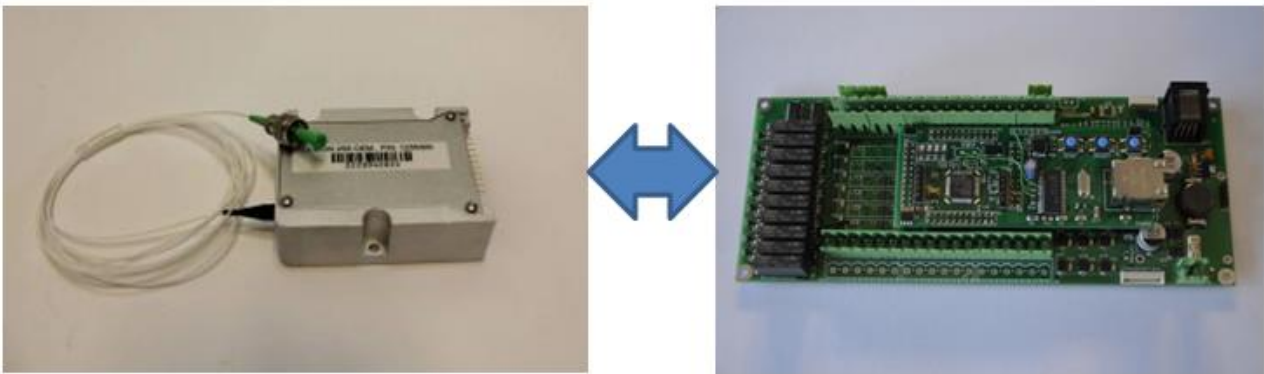


Figura 19. a) interrogatore ottico I-MON Ibsen b) scheda elettronica di controllo

Questa tipologia di interrogatore ottico presenta due modelli I-MON 256 (intervallo di lunghezza d'onda 1525-1570nm) e I-MON 512 (intervallo di lunghezza d'onda 1510-1595nm) con interfaccia USB o in versione OEM. Il numero di sensori FBG collegabili è pari a 70 con una distanza tra le lunghezze d'onda degli FBG di 1200pm e con una risoluzione di 0.5pm. Le massime frequenze di misura sono pari rispettivamente a 6kHz e 3kHz per il modello USB. L'*I-MON Ibsen* necessita di una sorgente di luce esterna a larga banda. Per la demodulazione dei segnali riflessi dai sensori FBG questo interrogatore utilizza una tecnologia basata su *array* CCD [20].

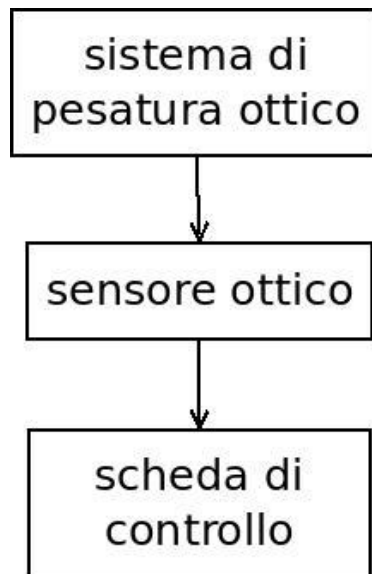


Figura 20. schema generale dell'intero sistema di test

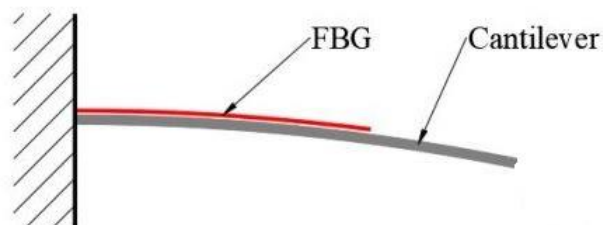


Figura 21. schema Cantilever

I test sono stati eseguiti, secondo lo schema di Figura 20, flettendo l'apparato meccanico di test in modo da provocare una deformazione rilevata dal sensore in fibra ottica. Tale deformazione è stata rilevata mediante misura dello spostamento del picco, visualizzato dal software tramite grafico cartesiano. Per validare tale risultato si è provveduto a confrontare il grafico prodotto dal sistema sviluppato con quello di un oscilloscopio digitale Tektronix serie TBS che visualizzava direttamente l'uscita analogica del sensore ottico. Si è così potuto verificare la coerenza dell'*output* del sistema sviluppato con la rilevazione dell'oscilloscopio (Figura 22).

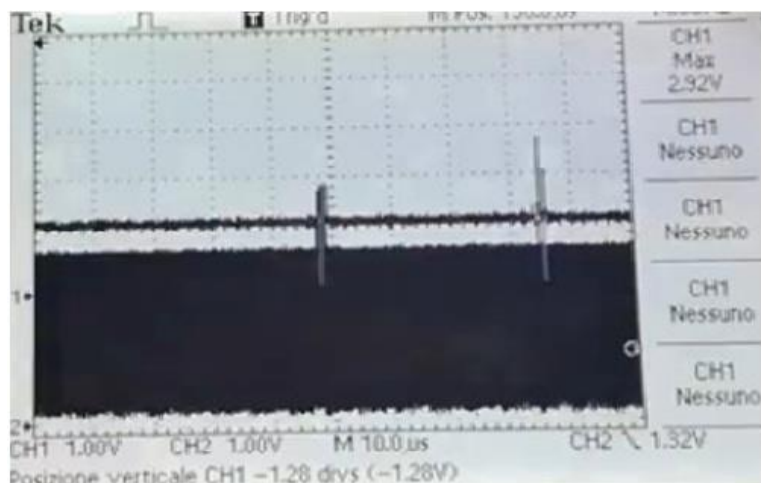


Figura 22. rilevazione diretta con oscilloscopio con evidenza di sovrapposizione dei due picchi in frequenza rilevata

Successivamente sono stati effettuati ulteriori test con un software, 'Sentinel Client', appositamente sviluppato e implementato sull'hardware e sul firmware realizzato. A tal proposito per questi test è stato utilizzato un secondo kit di sensori collegato all'interrogatore e alla sorgente interna, proprio per testare l'intero sistema con un maggior numero di sensori.

Per eseguire i test è stata realizzata una piastra in alluminio, vincolata ai quattro angoli, di dimensioni 150mm x 200mm x 2mm e posizionata su un box con i sensori rivolti verso il basso come in Figura 23. Tale piastra è stata realizzata per consentire di acquisire più sensori in serie (il cantilever ne aveva uno solo) al fine di simulare il sistema che poi verrà realizzato nel prototipo finale. La piastra funge da 'coperchio' del box che contiene la 'scheda portagiunti', dove i capi delle fibre ottiche sono giuntati per mettere i sensori in serie; i due capi della serie sono giuntati su fibra con connettore.

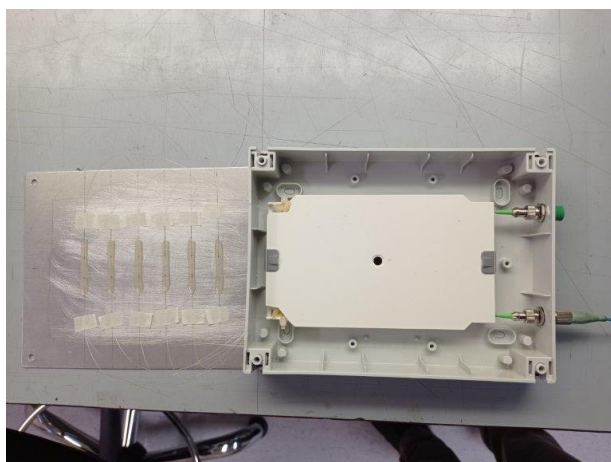


Figura 23. piastra strumentata con sensori FBG

I test funzionali eseguiti hanno riguardato l'analisi delle forme d'onda rilevate dall'interrogatore ottico I-MON, all'interfaccia AtoD sulla scheda di controllo, al variare della potenza dell'illuminatore e del tempo di integrazione.

Si può osservare nelle figure seguenti il risultato dei test per diverse potenze di uscita della sorgente, da 1mW a 4mW, con un tempo di integrazione crescente da 13μs a 100μs (Figura 24-Figura 25-Figura 26-Figura 27 e Figura 28).

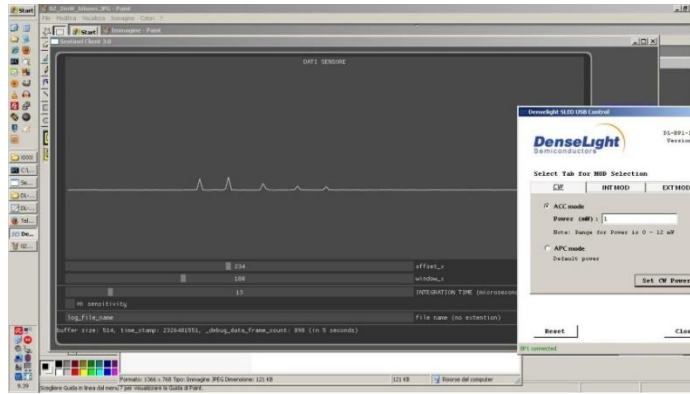


Figura 24. test con 1mW di potenza della sorgente e con 13 μ s tempo di integrazione

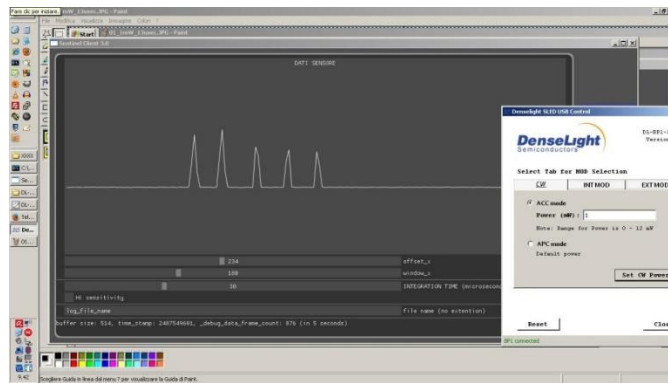


Figura 25. test con 1mW di potenza della sorgente e con 30 μ s tempo di integrazione

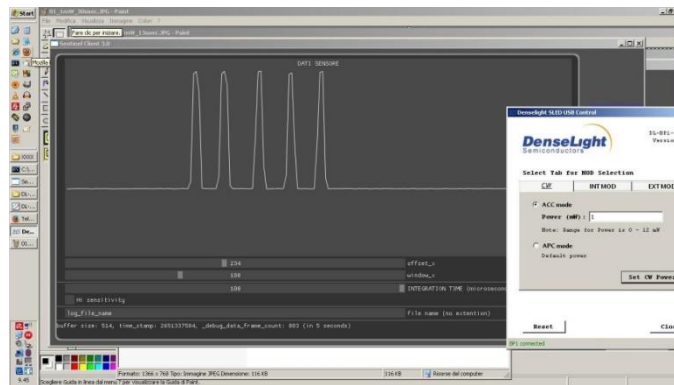


Figura 26. test con 1mW di potenza della sorgente e con 100 μ s tempo di integrazione

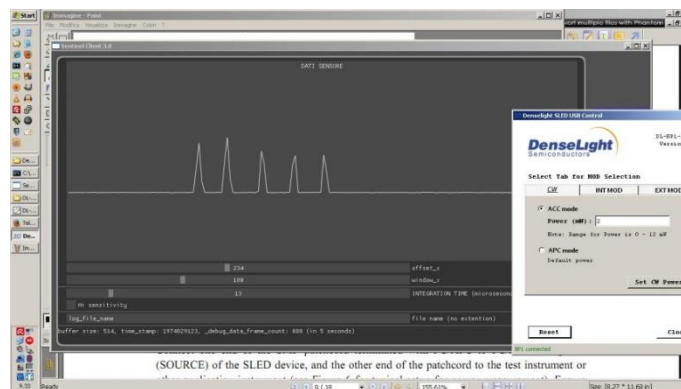


Figura 27. test con 2mW di potenza della sorgente e con 13 μ s tempo di integrazione

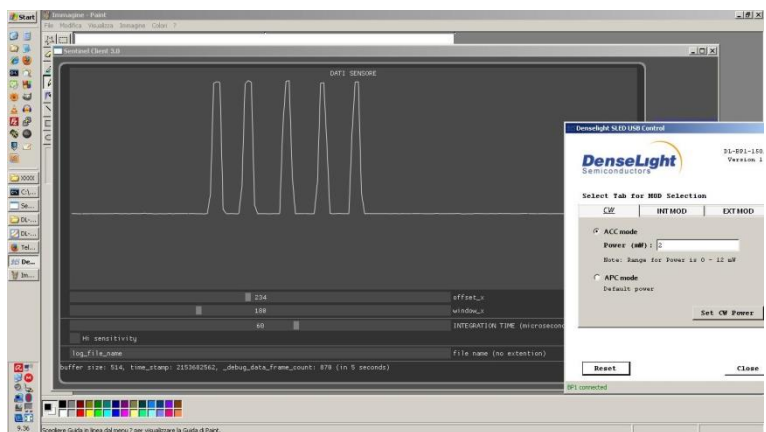


Figura 28. test con 2mW di potenza della sorgente e con 60 μ s tempo di integrazione

2.2. Caratterizzazione di provini in acciaio sensorizzati con FBG

2.2.1. Normativa di riferimento per i sensori in Fibra Ottica

La normativa di riferimento per i sensori in fibra ottica è la *IEC 61757-1-1:2016* che definisce le specifiche generiche per i sensori in fibra ottica e offre uno strumento di lavoro comune ai fornitori di componenti e sotto-assemblaggi destinati ad essere integrati nei sensori a fibra ottica, nonché ai progettisti, produttori e utilizzatori di sensori a fibra ottica, indipendentemente dalla loro applicazione o montaggio.

La Norma CEI EN *IEC 61757-1-1:2018*, invece, definisce le specifiche di dettaglio per sensori a fibra ottica che utilizzano uno o più reticoli di Bragg (FBG) come elemento sensibile per misure di deformazione. Questo documento specifica le proprietà e le caratteristiche più rilevanti di un sensore a fibra ottica per misure di deformazione, basato sull'uso di FBG come elemento sensibile, e definisce le procedure per la loro determinazione. Specifica, inoltre, i parametri e le caratteristiche basilari di prestazione del relativo strumento di misura per la lettura del segnale ottico dall'FBG. La norma si riferisce a misurazioni dei valori di deformazione sia statiche che dinamiche in un dato intervallo di frequenza [14].

2.2.2. Preparazione dei provini per le prove sperimentali

Verrà descritto di seguito il piano sperimentale per la caratterizzazione del sistema resina-sensore-supporto eseguito dai ricercatori ENEA del C.R.Trisaia. Oltre alla caratterizzazione, la campagna sperimentale ha la finalità di individuare la tipologia di sensore FBG più adatta all'applicazione sul prototipo finale del progetto e la scelta della resina per l'incollaggio dei sensori sulla piastra flettente. Il mercato attuale degli FBG è dominato da tre tipologie di sensori che differiscono tra di loro per il materiale usato per il *recoating*:

- *recoating* in *poliacrilato*: facilmente strippabile, facile da maneggiare e giuntare, con caratteristiche meccaniche non elevate. Avendo una temperatura di transizione vetrosa attorno a 85 °C risente del degrado qualora la temperatura superi eccessivamente tale limite con problemi di deformazione della fibra ottica, indebolimento dell'interfaccia, nel caso di sensori inglobati, ed eventuale perdita del segnale;
- *recoating* in *poliammide*: rivestimento con caratteristiche meccaniche superiori all'*acrilato*, garantisce omogeneità di forma e protezione del *core* a temperature maggiori, necessità di maggior attenzione nelle operazioni di *stripping*;
- *recoating* in *ormocer (organic modified ceramic)*: rivestimento adatto alle alte temperature, superiore a 300 °C, dalle elevate caratteristiche meccaniche le quali garantiscono adeguata

protezione al vetro e permettono il trasferimento di elevate deformazioni tra il supporto e la zona sensibile dell'FBG.

Tra i tre tipi di sensori FBG quelli di interesse per la realizzazione della WIM sono i primi due sia per il basso costo che per l'assenza di vincoli particolarmente stringenti sulle temperature di esercizio e sulle caratteristiche di resistenza meccanica richiesta.

I sensori in *poliammide* e quelli in *acrilato* hanno caratteristiche che ben si adattano alla realizzazione della WIM ma, mentre i sensori in *acrilato* hanno il vantaggio di un costo più basso, i primi si fanno preferire per una migliore risposta meccanica (capacità di trasferimento della deformazione alla parte sensibile del sensore e resistenza meccanica), per una maggiore resistenza a temperature più alte e all'umidità.

Al fine di testare la resistenza dell'incollaggio sono state realizzate 5 piastre di acciaio AISI 316L di dimensioni 350x29x5 mm (Figura 29).



Figura 29. piastra di acciaio AISI 316L

Per strumentare le piastre di test sono stati usati 5 sensori FBG in fibra ottica in *acrilato recoating acrilato* con lunghezze d'onda di Bragg λ_B rispettivamente pari a 1530 nm, 1535 nm, 1540 nm, 1545 nm e 1550 nm e 5 sensori FBG in fibra ottica in *acrilato recoating poliammide* con lunghezze d'onda di Bragg λ_B rispettivamente pari a 1533 nm, 1537 nm, 1541 nm, 1553 nm e 1557 nm.

Mediante la procedura di giunzione, sono state realizzate cinque catene, ciascuna delle quali è costituita da un sensore con *recoating in acrilato* e un sensore con *recoating in poliammide*. Ciascuna delle cinque catene di sensori è stata usata per realizzare i provini di test incollando su ciascuna delle suddette piastre di acciaio i due sensori di ogni catena in direzione parallela al lato lungo del provino.

I sensori FBG rilevano sia deformazioni longitudinali ε che variazioni di temperatura ΔT proporzionali alla variazione della lunghezza d'onda di Bragg λ_B . Per le prove di carico effettuate sui provini, vista la breve durata delle stesse, si può trascurare l'effetto delle deformazioni dei sensori dovute alle sole variazioni termiche, però verificando, come prescritto dalla normativa *IEC 61757-1-1 Edition 1.0 2016-02*, che le variazioni rimangano nel range $\pm 0,5$ °C. Pertanto, durante le prove sarà misurata la temperatura ambiente mediante un sensore FBG incapsulato in un contenitore di acciaio inossidabile appositamente progettato per misure di temperatura (Figura 30).



Figura 30. sensore FBG di temperatura

Le piastre sono state sottoposte a prove di trazione e di flessione a 4 punti (secondo la norma *IEC 61757-1-1 Edition 1.0 2016-02*) mediante una macchina universale *Instron 3369* e le deformazioni indotte sugli FBG sono state misurate mediante un interrogatore ottico *National Instruments PXIe-4844*.

Il primo passo per la realizzazione dei provini da testare è consistito nella realizzazione di una catena di sensori. La realizzazione *in house* delle catene di sensori, effettuata con apparecchiature e competenze di cui l'ENEA dispone presso il C.R. ENEA di Frascati, permette una notevole flessibilità nella scelta del numero e nella configurazione dei sensori, oltre alla possibilità di effettuare modifiche nella catena ove se ne verifichi la necessità.

Il collegamento per giunzione consiste nel "fondere" permanentemente due terminali in fibra ottica mediante un arco elettrico. Per le giunzioni è stata usata una *splicer Fujikura FSM-60S*.

I sensori da collegare non hanno nessun tipo di placchetta di supporto; il reticolo di Bragg è semplicemente integrato nella fibra e appare quindi come una normale fibra ottica priva di cavo di protezione esterno. Alle due estremità del sensore poi è collegato un tratto di fibra con *recoating in acrilato*. Quest'ultimo è stato saldato con un tratto di fibra di lunghezza opportuna per collegarlo al sensore successivo. La fibra di collegamento utilizzata ha il *recoating in acrilato* per rendere più facile ed economica la saldatura rispetto alla fibra con *recoating in poliammide*. Le operazioni di giunzione sono state svolte con la massima attenzione, perché ogni piccola incisione sulla superficie della fibra compromette la riuscita della fusione.

La procedura di giunzione segue principalmente i seguenti passi:

1. la fibra viene fatta passare all'interno di un piccolo pezzo di cavo di *hytrel* (un elastomero termoplastico che abbina alla resistenza dei termoplastici la flessibilità della gomma) da 900 micron. In questo modo il termorestringente che verrà usato per irrobustire il punto di giunzione stringerà sul cavo di *hytrel* evitando piegamenti della fibra;
2. viene inserito il termorestringente della lunghezza di 60 mm;
3. viene rimosso il *buffer coating* della fibra mediante una pinza Miller FO-103-D-250 (*stripper cable*);
4. la fibra viene pulita con alcol isopropilico. La pulizia della fibra è importantissima e va ripetuta ogni volta che ci sia stata la possibilità di deposito di sporcizia sulla fibra;
5. viene effettuato il taglio della fibra con la taglierina per fibre ad alta precisione *Fujikura CT 30-A*, nella configurazione per fibra singola e con cassetto di raccolta. Questa taglierina ha al suo interno una ruota diamantata; per ottenere un taglio adeguato la fibra deve essere, al momento del taglio, perfettamente ortogonale all'asse della ruota diamantata;
6. l'estremità della fibra così preparata viene posizionata nella sede della giuntatrice (Figura 31);
7. vengono ripetute le operazioni 1,3,4,5,6 per l'estremità dell'altra fibra da giuntare;
8. una volta inserite le fibre e chiuso il coperchio esterno della giuntatrice, inizia il processo automatico di fusione. In una prima fase l'apparecchio produce una scintilla di debole potenza

(prefusione) che serve a pulire la parte di contatto delle due fibre. Successivamente tenta di allineare i due *core* (Figura 32); in caso di buon allineamento eseguirà la fusione, altrimenti sarà necessario ripetere tutti o parte dei punti precedenti. A fine fusione viene data una stima della perdita in dB che di solito si aggira intorno ai 0.01-0.02 dB;

9. la fibra viene liberata dalle apposite sedi e viene fatto scorrere il termorestringente con i cavetti di *hytrel* in corrispondenza del punto di fusione; il tutto viene inserito nel fornello (Figura 33).

Per l'applicazione dei connettori la procedura rimane invariata salvo rimuovere il cavo di protezione esterno del *pigtail*.

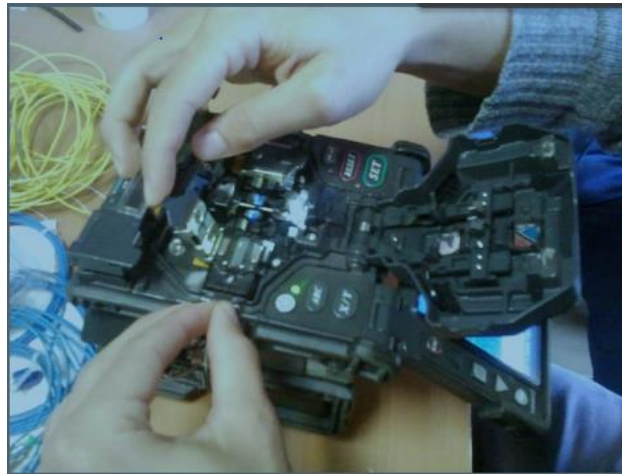


Figura 31. posizionamento della fibra nella giuntatrice.



Figura 32. allineamento delle fibre prima della fusione.



Figura 33. inserimento del termorestringente.

Per ottenere una misura veritiera della deformazione, o di altri parametri che si vogliono monitorare, è necessario che la deformazione del materiale, sia che derivi dall'applicazione di un carico alla struttura o da una variazione dei parametri chimico fisici dell'ambiente in cui la struttura è immersa, raggiunga il core della fibra in cui è inciso l'FBG. Per ottenere ciò la deformazione deve essere efficacemente trasferita dalla struttura al sensore attraverso una serie di interfacce la cui resistenza gioca un ruolo decisivo per l'accuratezza della misura. Le deformazioni passano attraverso sforzi di taglio dalla struttura alla resina e da questa alla fibra di vetro attraverso il *coating* polimerico. In alcuni casi particolari si può rimuovere il *coating* polimerico in modo da avere un trasferimento diretto struttura/resina/vetro che sicuramente rende più efficace il trasferimento della deformazione, eliminando un'interfaccia, ma più difficoltosa la manipolazione del sensore "nudo".

La resistenza di queste interfacce e la loro capacità di trasferire la deformazione da un materiale all'altro deve essere garantita non soltanto al momento dell'applicazione del carico ma anche per tutta la durata della sollecitazione. Questa proprietà risulta particolarmente importante in tutte le applicazioni in cui le strutture da monitorare rimangono sollecitate a lungo, come nel monitoraggio di una trave di un edificio. Inoltre, in situazioni di monitoraggio continuo nel tempo, la resistenza deve essere garantita nel tempo e non deve essere compromessa dall'invecchiamento dei materiali (resina, polimeri di *recoating*) e da situazioni ambientali sfavorevoli come variazioni di temperatura e di umidità. Nel caso di sensori incollati, che sarà la configurazione finale della WIM oggetto della nostra applicazione, la deformazione passa dalla struttura da monitorare alla resina, dalla resina al *recoating* e dal *recoating* al sensore FBG.

Poiché l'incollaggio dei sensori FBG è fondamentale per l'accuratezza della misura di deformazione, devono essere particolarmente curate tutte le fasi del processo:

1. scelta della resina;
 2. preparazione della superficie su cui incollare il sensore;
 3. incollaggio.
1. Scelta della resina

Le colle sono dei composti che, nel nostro campo di applicazione, sono di solito liquide e, una volta applicate, solidificano per polimerizzazione, cioè per unione di più molecole a formare macromolecole. La polimerizzazione si verifica in certe condizioni di temperatura e pressione a partire da una causa esterna (catalizzatore, umidità).

Al termine del processo il liquido si è trasformato in un'unica massa solida che ha creato legami con la base e con il materiale sottostante e sovrastante.

Un collante farà sicuramente presa se applicato su superfici perfettamente pulite. Una resina di comune impiego per applicazione di estensimetri è il ciano acrilato che polimerizza pressoché istantaneamente. Il suo pregio è quindi la velocità di presa ma ha il difetto di una scarsa affidabilità nel tempo. Può essere impiegato in un campo che va da $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La polimerizzazione completa avviene in 24 ore ma già dopo 15 minuti la presa è sufficiente per effettuare le misure.

In ENEA, in collaborazione con altri partner, sono stati svolti in altri progetti prove con diversi tipi di colle. In particolare, si sono confrontate tre colle commerciali: l'Araldite® 2011, l'Araldite® 2021 e Dow Corning RTV 3145. Le prime due sono colle epossidiche bi-componente indicate per incollaggi di diversi tipi di materiali (metalli, ceramiche, vetro, gomme vulcanizzate e plastiche) che reticolano in un range di temperature compreso tra $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ in tempi rispettivamente tra 15 ore e 5 minuti. Il Dow Corning RTV 3145 è invece un adesivo siliconico anch'esso indicato per diversi tipi di materiali (metalli, ceramiche, vetri, gomme siliconiche e plastiche) che reticola a temperatura ambiente e ha in aggiunta proprietà sigillanti.

Dai test si è evidenziato che le due colle epossidiche hanno comportamenti molto simili: mostrano un comportamento molto rigido con moduli elastici pressoché identici. Il cedimento avviene in genere con modalità mista adesiva-coesiva con prevalenza della componente adesiva (distacco resina-substrato) e i valori di resistenza al taglio sono abbastanza simili (leggermente superiori per l'Araldite® 2011).

L'adesivo siliconico presenta invece una rigidità notevolmente inferiore. Inoltre, mentre le due epossidiche si rompono per spostamenti molto piccoli cedendo di schianto, l'adesivo siliconico riesce a sopportare spostamenti superiori (circa 5 volte maggiori) e ha un cedimento graduale e sempre con modalità adesiva.

I test hanno evidenziato che le colle epossidiche riescono a garantire un corretto trasferimento della deformazione dal supporto al sensore mentre l'adesivo siliconico non dà garanzie di un corretto trasferimento della deformazione né di tenuta all'interfaccia resina fibra che sembra subire cedimenti o scorrimenti già dalla prima applicazione del carico. Tuttavia, gli adesivi siliconici possono essere ulteriormente studiati per valutare la possibilità di realizzare un'attenuazione controllata della deformazione e di permettere quindi la misura di deformazioni più elevate.

Esistono poi altre colle come le miste epossidico-fenoliche e le colle ceramiche (cementi) che hanno eccellenti proprietà, come la capacità di resistere a temperature di utilizzo notevolmente maggiori, ma la loro polimerizzazione richiede cicli abbastanza lunghi (maggiori di 1 ora) a temperature molto alte che le rendono inadatte per applicazioni di incollaggio di sensori FBG.

Per quanto sopra esposto e per le esperienze già condotte in ENEA la scelta della resina è ricaduta sull'Araldite® 2011 che si presta benissimo per la nostra applicazione anche perché per quanto concerne la durata nel tempo dell'araldite nelle condizioni effettive di utilizzo si hanno a disposizione notevoli quantità di informazioni provenienti da progetti di ricerca precedenti che hanno mostrato una buona tenuta anche a distanza di anni. Inoltre, l'"Araldite® 2011", da esperienze in altri progetti di ricerca è risultata ~~che~~ la resina migliore per l'incollaggio dei sensori su supporti di tipo metallico

L'Araldite® 2011 è un adesivo epossidico bicomponente caratterizzato da:

- lungo tempo di lavorabilità;
- basso ritiro;
- buona resistenza ai carichi dinamici;
- ampia varietà di materiali incollabili.

Araldite® 2011 polimerizza a temperatura ambiente e ha una elevata resistenza. È adatto ad incollare un'ampia varietà di metalli, ceramiche, vetro, gomme, plastiche e molti altri materiali. La

resistenza e la durabilità dei giunti incollati dipendono da un appropriato trattamento delle superfici.

I tempi di polimerizzazione completa sono variabili a seconda della temperatura. Nella Tabella 1 sono riportati i tempi necessari per ottenere una polimerizzazione tale da ottenere resistenze al taglio per trazioni rispettivamente maggiori di 1 MPa e di 10 MPa.

Temperatura	°C	10	15	23	40	60	100
Tempo di polimerizzazione per raggiungere	ore	24	12	7	2	-	-
RTT > 1MPa	minuti	-	-	-	-	30	6
Tempo di polimerizzazione per raggiungere	ore	36	18	10	3	-	-
RTT > 10MPa	minuti	-	-	-	-	45	7

Tabella 1. Tempi di polimerizzazione per ottenere resistenze a taglio maggiori di 1 MPa e 10 MPa

2. Preparazione superficie

Altra fase importante nell'incollaggio degli FBG è, perché si abbia un adeguato trasferimento della deformazione dalla struttura al sensore, la preparazione della superficie. La superficie deve essere chimicamente pulita e deve avere una rugosità adeguata all'incollaggio, inoltre sarebbe preferibile avere una linea tracciata visibile per facilitare il corretto posizionamento dell'FBG.

In linea di principio le fasi sono le seguenti:

- sgrassaggio;
- carteggio.

Queste operazioni possono variare in funzione della compatibilità tra i diversi materiali.

Lo sgrassaggio permette di rimuovere oli, grassi, contaminanti organici e residui chimici solubili. Materiali porosi come il titanio, la ghisa e l'alluminio devono essere scaldati per far evaporare eventuali liquidi di cui sono impregnati. Lo sgrassaggio può essere effettuato con ultrasuoni o con sostanze chimiche sgrassanti come spray a base di clorotene o come l'alcool isopropilico.

Il carteggio è usato per togliere strati superficiali come ossidi, ruggini, vernici ecc. ed ottenere così una superficie adatta all'incollaggio. Inoltre, il carteggio, opportunamente eseguito, consente di avere una rugosità adeguata all'incollaggio. In genere una rugosità di 2.5µm è sufficiente a garantire un buon incollaggio e risulta anche facilmente pulibile. Finita l'operazione di carteggio è necessario pulire la superficie con un solvente come l'alcool isopropilico o l'acetone.

3. Incollaggio

Le fasi dell'incollaggio sono:

- applicazione di una maschera;
- applicazione resina;
- eliminazione maschera;
- posizionamento fibra.

Per posizionare correttamente il sensore ci si può servire di linee di riferimento tracciate sul provino e di pesetti che servono a tenere la fibra ben tesa. Una volta posizionato il sensore si può usare del nastro adesivo per tenerlo fermo fino a quando la resina non è completamente polimerizzata.

Una volta preparata la superficie si può applicare una maschera per circoscrivere la zona in cui andrà applicata la resina. L'operazione di incollaggio va effettuata nel minor tempo possibile dopo la pulizia per evitare nuove contaminazioni o ossidazioni superficiali del supporto metallico. La maschera si può realizzare mediante dei nastri adesivi posizionati in maniera tale da lasciare libera solo la parte (che deve essere la più piccola possibile intorno al sensore) su cui andrà deposta la resina. Nella realizzazione della maschera è preferibile usare nastri adesivi (come il *kapton*) che siano facilmente rimovibili senza rischi di danneggiamenti per il sensore e lascino pochi residui sul provino (Figura 34).

Una volta preparata la resina, la si applica con una spatola e per far sì che il sensore aderisca perfettamente al supporto, soprattutto per colle che induriscono rapidamente, si distende sulla parte incollata un foglio di *teflon* su cui si va ad esercitare una pressione abbastanza energica. La pressione ci assicura che durante la reticolazione la resina non provochi tensioni che possano spostare localmente il sensore. Una soluzione alternativa, e preferibile alla pressione esercitata dall'alto, è quella di vincolare una delle estremità al piano di lavoro e l'altra estremità a un peso, sospeso al di fuori del piano stesso. In tal modo si assicura il perfetto allineamento della fibra durante la fase dinamica di cura della resina e si assicura un precarico costante e stabile sul sensore.

Dopo la completa polimerizzazione della resina si toglie la maschera facendo attenzione a non danneggiare l'incollaggio.

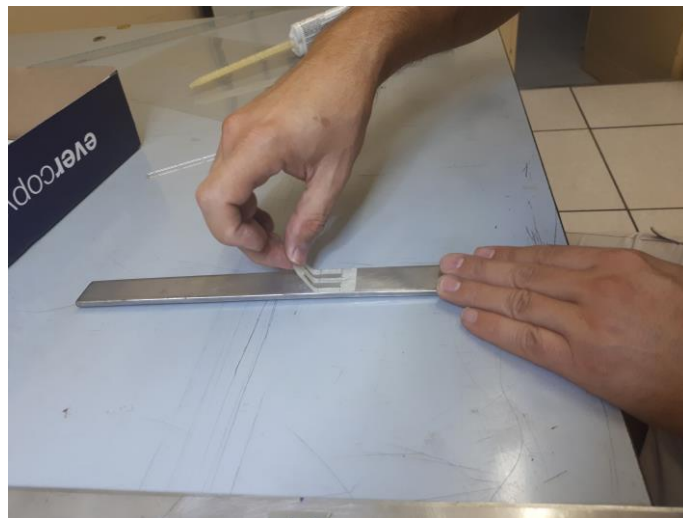


Figura 34. posizionamento della maschera



Figura 35. provino dopo la rimozione della maschera

Una volta deposto lo strato di resina (Figura 35), vengono posizionati al suo interno i sensori FBG, tenendoli leggermente pretensionati sia per assicurare il perfetto parallelismo tra i due sensori sia per far sì che lavorino in zona lineare anche in caso di compressione del provino. Gli estremi dei sensori vengono incollati con nastro carta al provino di acciaio per mantenere la pretensionatura e per tenere i sensori fissi nella loro posizione fino a che la resina non è completamente polimerizzata (Figura 36).



Figura 36. posizionamento dei sensori durante la fase di polimerizzazione della resina

Le apparecchiature utilizzate per l'esecuzione dei test sono:

- macchina a trazione *Instron 3369* con capacità di carico fino a 50 KN (Figura 37) con relativo software di acquisizione *BlueHill 3* che permette, una volta impostati le dimensioni del provino e i parametri della prova (velocità, metodo e report), di acquisire le deformazioni del provino in funzione del carico;

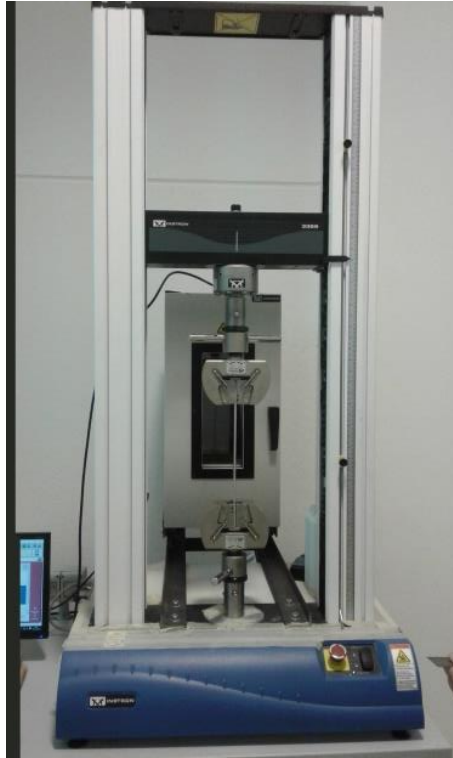


Figura 37. macchina a trazione Instron 3369

- interrogatore ottico (Figura 38) dei sensori FBG, inserito in un sistema modulare PXI della *National Instruments*. L'intero sistema di misura è così strutturato:



Figura 38. sistema di acquisizione National Instruments

- un modulo di interrogazione ottico PXIe-4844 per sensori FBG;
- un controller PXIe-8135;
- uno chassis PXIe-1062Q;
- un PC portatile dotato di software LabVIEW per l'acquisizione, la visualizzazione grafica e l'elaborazione dati.

L'interrogatore *National Instruments PXIe-4844* è basato su piattaforma PXI e quindi integrabile con una grande varietà di moduli per acquisizione dati da molteplici tipologie di sensori e moduli di output analogici e digitali per funzioni di controllo. L'interrogatore non è uno strumento *stand-alone* ma è

integrato con un controller PXI che ha tutte le caratteristiche di un PC industriale con interfacce di comunicazione USB, Ethernet, ecc. Il PXIe-4844 utilizza una sorgente laser a larga banda e come tecnologia di demodulazione appartiene alla classe degli interrogatori con filtro accordabile. Possiede 4 canali separati interrogabili simultaneamente su ciascuno dei quali si possono collegare fino a 20 sensori FBG nell'intervallo di lunghezze d'onda 1510-1590nm. La frequenza di campionamento operativa è di 10Hz con una risoluzione di 1pm. Per questo interrogatore è possibile aumentarne la capacità collegando un *multiplexer* per ogni canale [21].

Il controller PXIe-8135 è dotato di un sistema operativo *dual boot* Windows/LabVIEW Real-time. Questo permette due modalità operative: la prima, preferibile in laboratorio, mediante un software dedicato, *NI-OSI Explorer*, gestisce l'acquisizione e la visualizzazione grafica dei dati misurati dai sensori FBG inseriti sulle fibre ottiche (deformazioni o variazioni di temperatura); la seconda, preferibile per applicazioni *stand-alone* sul dimostratore, permette di scrivere ed eseguire il codice definito dall'utente, in ambiente LabVIEW sul pc portatile e scaricabile in un secondo momento sul controllore, per azioni di memorizzazione dati, controllo in remoto ed elaborazione dei dati acquisiti in modalità *real-time* dai sensori FBG.

Una volta terminata l'installazione sia *hardware* che *software* dell'interrogatore ottico, si è passati alla fase di test e caratterizzazione di due diverse tipologie di sensori FBG, uno in *acrilato recoating acrilato* e l'altro in *acrilato con recoating poliammide*.

Il *software* di acquisizione dati dai sensori FBG è stato implementato in ambiente LabVIEW, riceve in ingresso un file di configurazione .csv costruito con il software di visualizzazione in tempo reale *NI-OSI Explorer* che permette di configurare i sensori FBG in *acrilato* e in *poliammide* collegati ad un canale dell'interrogatore ottico come sensori di deformazione, in modo tale da acquisire in tempo reale la deformazione rilevata dal sensore come variazione della lunghezza d'onda rispetto alla λ_B in nm (Figura 39).

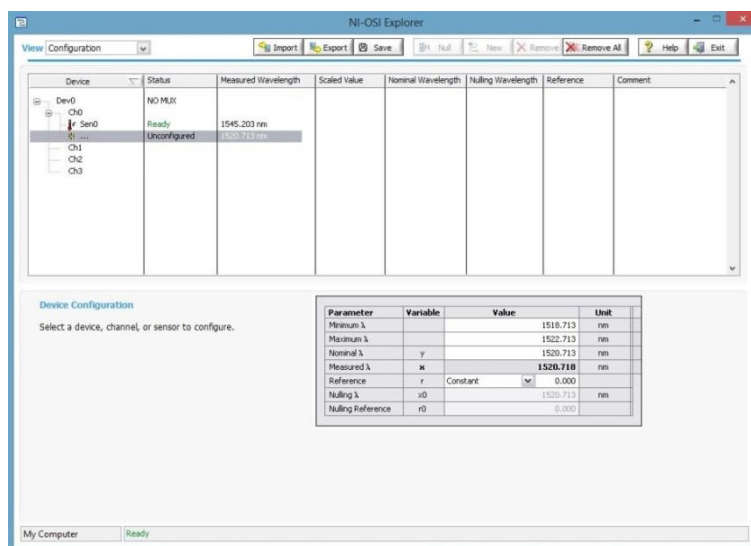


Figura 39. configurazione dei sensori con NI-OSI Explorer

Il *software* .vi implementato in ambiente LabVIEW legge i valori delle lunghezze d'onda acquisiti dai 2 sensori collegati all'interrogatore ottico PXIe-4844, ad una frequenza di 10Hz, e li memorizza in un file distinto per prova .tdms compatibile con i comuni fogli elettronici commerciali (Figura 40). Questi dati sono stati poi elaborati per risalire alla deformazione in $\mu\epsilon$ ($\mu\text{m}/\text{m}$), noto il *gauge factor* k dei sensori FBG.

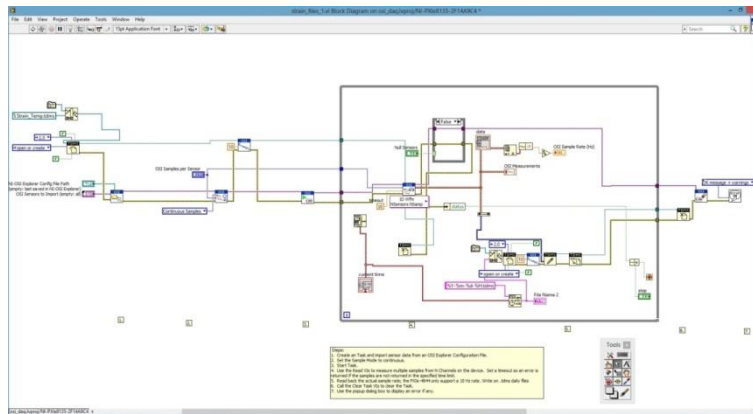


Figura 40. block diagram del .vi per l'acquisizione dati dai sensori FBG

2.3. Piano sperimentale per la caratterizzazione dei provini con sensori FBG

Per effettuare la caratterizzazione delle due tipologie di sensori FBG considerati si è utilizzato un sistema in divisione di frequenza, le cui componenti sono essenzialmente:

- la sorgente laser di classe 1 interna all'interrogatore NI PXIe-4844 che invia il segnale ai sensori FBG;
- i 10 sensori FBG con lunghezze d'onda comprese tra 1510 e 1590 nm. Per evitare sovrapposizioni del segnale, vi è una differenza di almeno 4-5 nm tra le frequenze nominali di Bragg dei sensori usati;
- l'interrogatore ottico *PXIe-4844 National Instruments* che analizza il segnale di ritorno riflesso dai sensori FBG l'interrogatore ottico;
- il software di elaborazione realizzato in ambiente LabVIEW che analizza il segnale proveniente dall'interrogatore ottico, esegue il fitting e salva le lunghezze d'onda lette in un file.

I provini sensorizzati da testare sono riportati in Tabella 2:

	λ_{Bpoly} [nm]	λ_{Bacry} [nm]
Provino 1	1541	1530
Provino 2	1553	1535
Provino 3	1557	1540
Provino 4	1537	1545
Provino 5	1533	1550

Tabella 2. Lunghezze d'onda di Bragg nominali dei sensori

Descrizione esperimento

Le prove di trazione e flessione sono state effettuate prima su provini di acciaio non sensorizzati per caratterizzarne il comportamento meccanico al fine di evitare che durante la fase di test il provino di acciaio passi nella fase plastica, dovendo poi sottoporre gli stessi provini a cicli di trazione-rilascio o flessione-rilascio per valutarne il comportamento nel tempo in seguito a sollecitazioni cicliche come quelle che si verificheranno sulla piastra finale montata sulla strada a causa dei successivi passaggi dei veicoli.

Poiché, da esperienze precedenti, la massima deformazione che ci aspettiamo sull'FBG a causa del passaggio di un mezzo pesante non supera i 500 $\mu\epsilon$, la deformazione applicata mediante la macchina a trazione sarà di 1000 $\mu\epsilon$ per sottoporre il sistema a deformazioni che possano verificarsi in casi eccezionali. Tenendo conto che una deformazione di 1 $\mu\epsilon$ produce uno *shift* della lunghezza d'onda di ≈ 1 pm, rispetto alla lunghezza d'onda nominale di Bragg, la prova è stata eseguita secondo i seguenti step:

1. iniziale trazione fino a uno *shift* di 300 pm (letto sul sensore in *poliammide*) per precarico iniziale;

2. mantenimento della situazione di precarico per 2 minuti;
3. *restart* della macchina per una trazione che porti a uno *shift* della lunghezza d'onda di ulteriori 1000 pm (letti sul sensore in *poliammide*);
4. scarico della macchina.

Al termine dei tre cicli è stato eseguito un quarto ciclo identico ai primi tre ma con un mantenimento del provino in trazione alla deformazione raggiunta al punto 3 per 5 min.

La fase di precarico si rende necessaria per depurare la prova da eventuali iniziali cedimenti delle ganasce della macchina a trazione e soprattutto per attendere che il sistema supporto-colla-sensore si stabilizzi dopo i possibili iniziali scorrimenti alle due interfacce piastra-colla e colla-sensore oltre che a possibili scorrimenti tra *recoating* e parte sensibile della fibra.

Al termine delle prove di trazione sono state effettuate prove di flessione a quattro punti con gli stessi criteri della prova di trazione.

I provini successivamente sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento accelerato in camera climatica per valutare gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla durabilità della colla e dei sensori stessi.

I cicli di invecchiamento simulano quella che accadrà sulla WIM durante l'esercizio a causa di variazioni termiche, piogge e neviccate sulla sede stradale.

Alla fine delle prove di *aging* accelerato i provini sono stati di nuovo sottoposti a prove di trazione e flessione per valutare se è variata la tenuta della colla e se sono ancora in grado di dare misure affidabili.

I dati ottenuti saranno utili per valutare dopo quanto tempo le prestazioni si degradano a tal punto da richiedere una sostituzione dei sensori o una ricalibrazione della WIM.

2.3.1. Prove di trazione e flessione pre-aging

Su ciascuno dei 5 provini sono stati effettuati test preliminari con bassi valori di carico tali da determinare uno spostamento di 300pm dalla lunghezza d'onda nominale di Bragg. Sono stati effettuati pertanto dei cicli di carico e scarico per i 5 provini rilevando la deformazione ($\mu\epsilon$) con l'interrogatore fino al valore impostato e leggendo il carico (N) corrispondente dal software della macchina a trazione (Figura 41).



Figura 41. macchina a trazione e interrogatore ottico

Tali test preliminari hanno dato risultati simili in termini di sensibilità per 4 provini su 5 mentre il provino numero 1 ha avuto un comportamento che si discostava sensibilmente da quello dei restanti 4. Tale comportamento probabilmente è da imputare ad una non perfetta adesione della resina tra i sensori e la piastra in acciaio del provino che ha determinato uno scorrimento del sensore all'interno della resina e quindi valori di deformazione decisamente più bassi rispetto agli altri provini a parità di carico. Per i motivi su esposti il provino 1 è stato scartato poiché i risultati non sarebbero stati significativi.

Durante le prove a trazione è stata misurata la temperatura ambiente mediante un sensore FBG incapsulato in un contenitore di acciaio inossidabile appositamente progettato per misure di temperature. Le variazioni rilevate sono state comprese nel range $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e pertanto è stato possibile trascurare l'effetto delle deformazioni dei sensori dovute alle sole variazioni termiche, come prescritto dalla normativa IEC 61757-1-1 Edition 1.0 2016-0 (Figura 42).



Figura 42. sensore FBG di temperatura

I 4 provini sono stati sottoposti a trazione (Figura 43) secondo la procedura precedentemente descritta.



Figura 43. provino2 sottoposto a trazione

I risultati dei test sono riassunti nella Tabella 3:

	$\Delta\lambda_{\text{precarico}}$ [pm]	$\Delta\lambda_{\text{carico}}$ [pm]	Precarico [KN]	Carico [KN]
Provino 2	300	800	3,5	16
Provino 3	300	800	12	36
Provino 4	300	900	7,5	31
Provino 5	300	1000	5,5	25,5

Tabella 3. Test provini sottoposti a trazione

Si riportano nei grafici seguenti, per ciascun provino, la variazione di lunghezza d'onda rilevata, proporzionale alla deformazione subita dai due sensori FBG incollati sul provino (acrilato in blu e poliammide in rosso) e la variazione del carico impostato (Figura 44, Figura 45, Figura 46 e Figura 47).

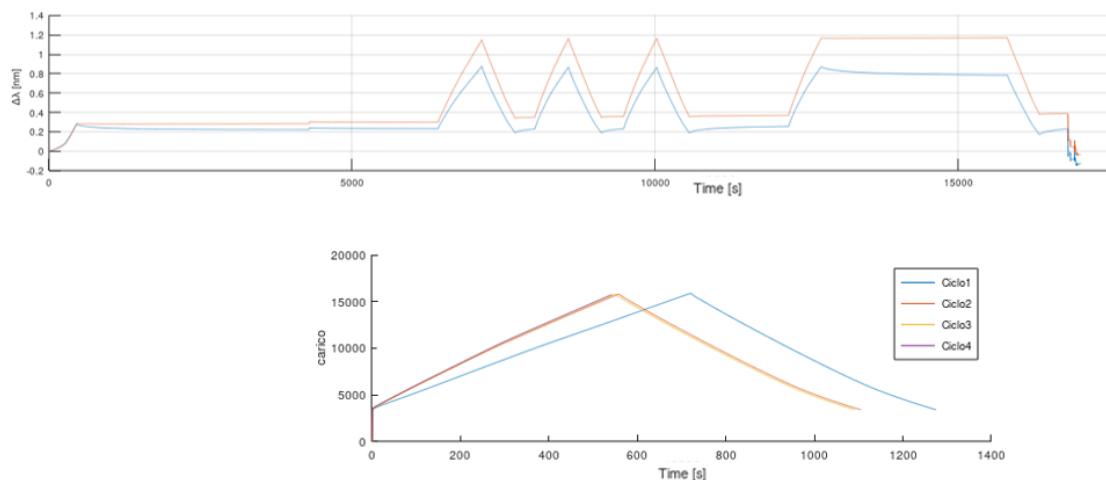


Figura 44. $\Delta\lambda$ e carico provino2 prova di trazione

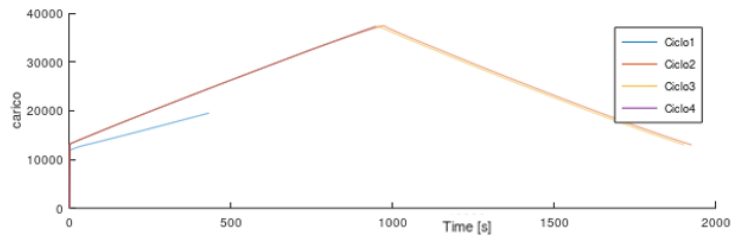
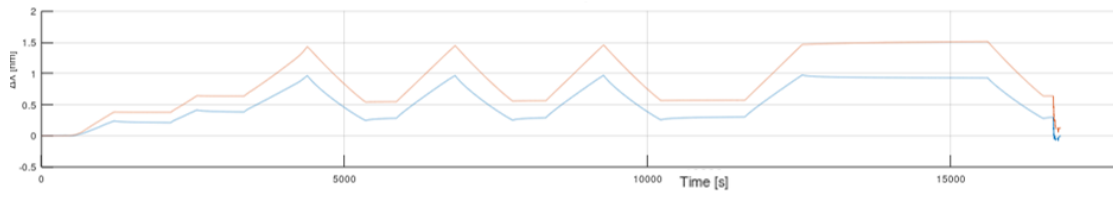


Figura 45. $\Delta\lambda$ e carico provino3 prova di trazione

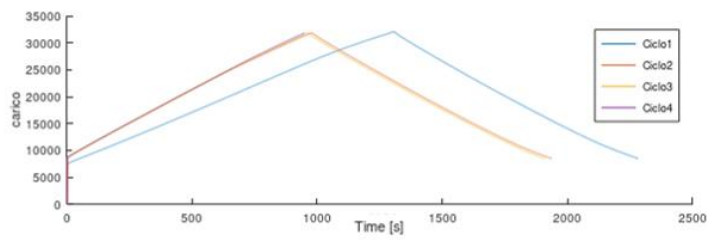
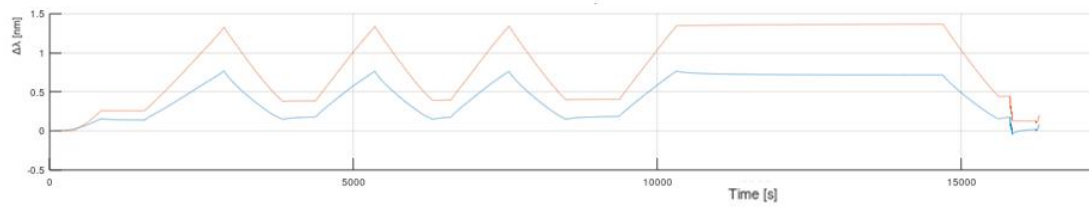


Figura 46. $\Delta\lambda$ e carico provino4 prova di trazione

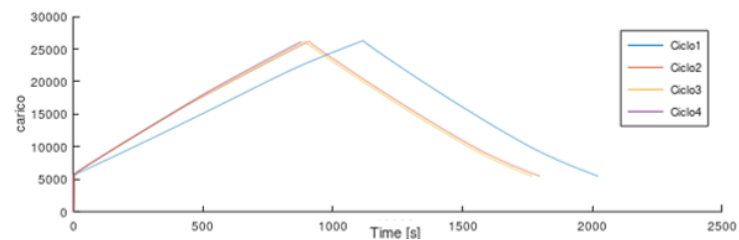
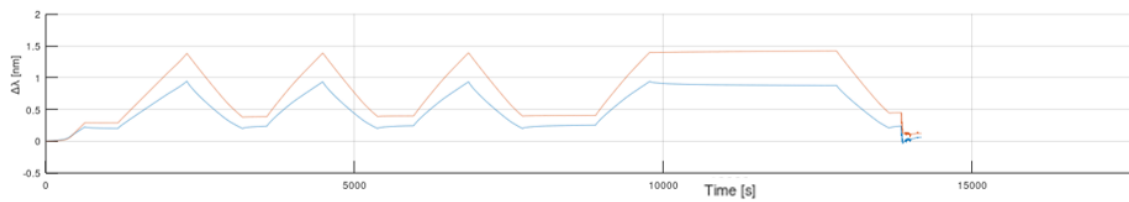


Figura 47. $\Delta\lambda$ e carico provino5 prova di trazione

Analogamente alle prove di trazione sono state effettuate le prove a flessione per i 4 provini con le stesse modalità. La deformazione impostata sui provini è stata la stessa, con un carico a flessione rilevato dalla macchina ovviamente minore rispetto alla trazione.

Anche per le prove a flessione è stata misurata la temperatura ambiente mediante un sensore FBG incapsulato in un contenitore di acciaio inossidabile appositamente progettato per misure di temperature. Anche per queste prove le variazioni rilevate sono state comprese nel range $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e pertanto è stato possibile trascurare l'effetto delle deformazioni dei sensori dovute alle sole variazioni termiche, come prescritto dalla normativa *IEC 61757-1-1 Edition 1.0 2016-0* (Figura 48).



Figura 48. provino 3 sottoposto a flessione

I quattro provini sottoposti a flessione hanno dato i seguenti risultati in Tabella 4:

	$\Delta\lambda_{\text{precarico}}$ [pm]	$\Delta\lambda_{\text{carico}}$ [pm]	Precarico [N]	Carico [N]
Provino 2	300	1000	120	500
Provino 3	300	1000	120	450
Provino 4	300	1000	120	470
Provino 5	300	1000	120	470

Tabella 4. Test provini sottoposti a flessione

I grafici seguenti riportano, per ciascun provino, la variazione di lunghezza d'onda rilevata proporzionale alla deformazione subita dai due sensori FBG incollati sul provino e la variazione del carico impostato durante la prova di flessione (Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52).

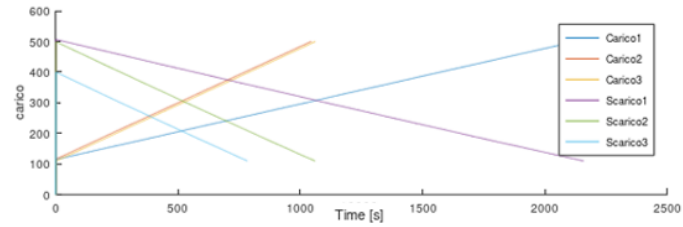
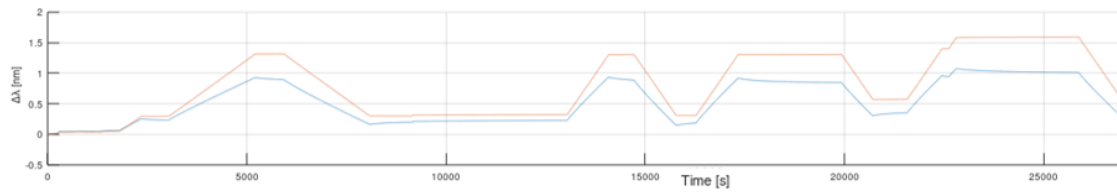


Figura 49. $\Delta\lambda$ e carico provino2 prova di flessione

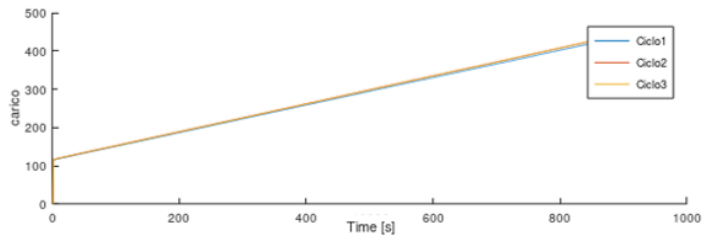
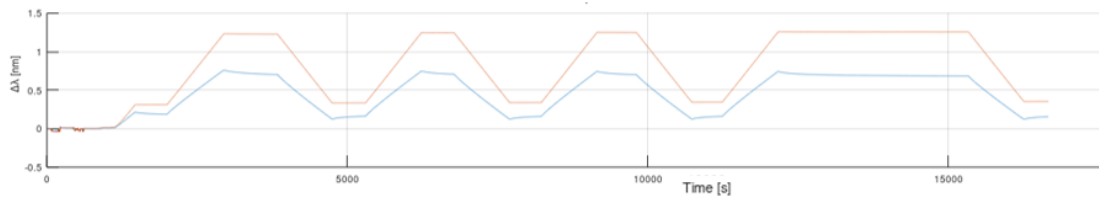


Figura 50. $\Delta\lambda$ e carico provino3 prova di flessione

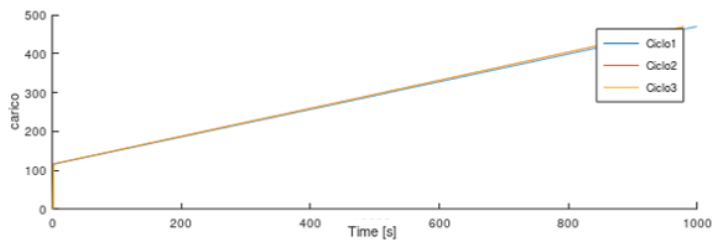
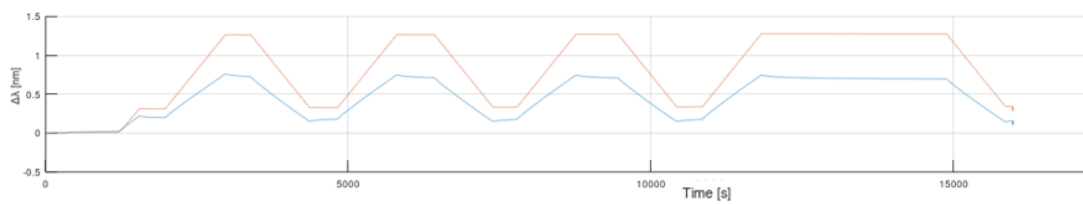


Figura 51. $\Delta\lambda$ e carico provino4 prova di flessione

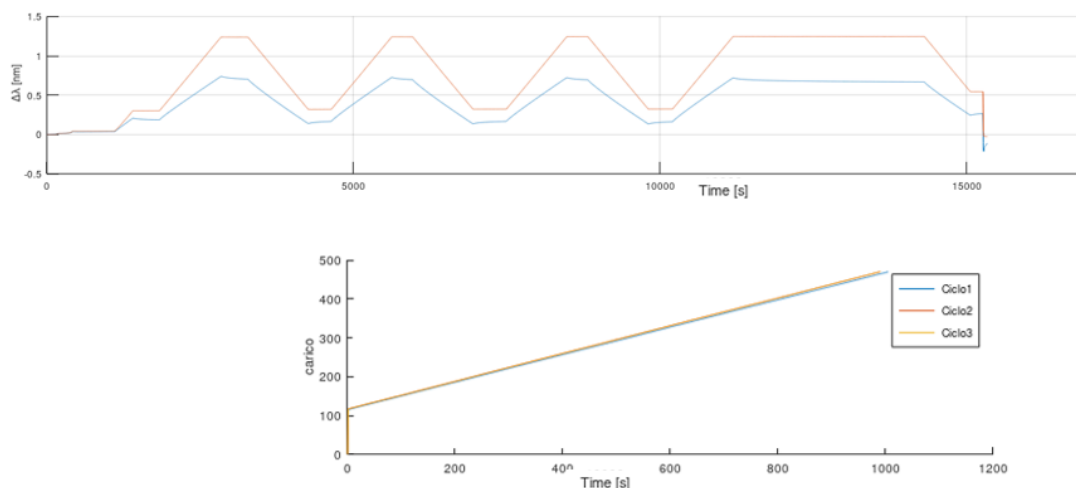


Figura 52. $\Delta\lambda$ e carico provino5 prova di flessione

2.3.2. Aging accelerato in camera climatica

I provini sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento accelerato in una camera climatica Angelantoni 1200 per valutare gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla durabilità della colla e dei sensori stessi (Figura 53).

Le azioni di temperatura e umidità hanno riprodotto in maniera accelerata le condizioni a cui saranno sottoposti i sensori durante l'esercizio a causa di variazioni termiche, di precipitazioni piovose e nevose sulla sede stradale.

Il ciclo di invecchiamento accelerato in camera climatica è stato ricavato grazie ad esperienze precedenti fatte in siti con andamento climatico di tipo mediterraneo (temperato) analogo al clima che caratterizza la località in cui la WIM dovrà operare.

Nell'anno è possibile stabilire tre periodi principali:

- un periodo molto caldo nei mesi centrali dell'anno;
- un periodo abbastanza freddo nei mesi invernali;
- un periodo temperato con temperature medie nella restante parte dell'anno.

Per stabilire la correlazione tra energia fornita ai provini dalle camere climatiche in termini di temperatura e l'energia assorbita durante la vita in condizioni normali di esercizio si è cercato di esprimere le varie sollecitazioni climatiche in termini confrontabili.

Per quanto riguarda le differenze di temperatura, e quindi l'energia ceduta dall'ambiente al manufatto durante i periodi caldi e l'energia assorbita dall'ambiente durante i periodi freddi, è stata fatta la supposizione che queste energie siano proporzionali al prodotto tra il tempo di esposizione e la differenza tra la temperatura effettiva e la temperatura di riferimento (temperatura dell'ambiente in cui si trovava il manufatto all'inizio della prova).

In formule la correlazione è:

$$\sum_{\text{mesi}} \Delta T_{\text{reale}} \times \text{temporeale} = \Delta T_{\text{camera}} \times \text{tempocicli} \quad (9)$$

Questa formula è stata adattata ad ognuno dei sottocicli definendo i ΔT_{reale} considerando le temperature medie dei periodi considerati e la temperatura di riferimento che è pari a 20°C.

Allo stesso modo è stato definito il ΔT_{camera} come differenza tra la temperatura della camera climatica e la temperatura di riferimento. Nell'equazione *temporeale* e *tempocicli* sono i tempi di esposizione nella realtà e nella camera climatica alle escursioni termiche.

Da esperienze effettuate in altri progetti sviluppati in situazioni climatiche simili al sito di installazione della WIM (clima temperato) si è calcolato che 14 ripetizioni del ciclo di Figura 54 (della durata di 24 ore) simulano, approssimativamente, la stessa sollecitazione di un anno reale. Sono stati effettuati un numero di cicli sufficienti per simulare un periodo reale pari a 5 anni.



Figura 53. provini in camera climatica

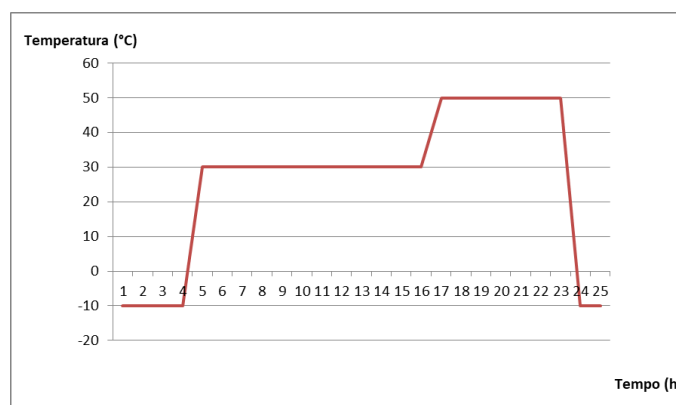


Figura 54. diagramma temporale di 24h delle temperature del ciclo di aging

Al termine delle prove di *aging* accelerato i provini sono stati nuovamente sottoposti a prove di trazione e flessione per valutare se è variata la tenuta della colla e se sono ancora in grado di darci misure affidabili di deformazione. I dati ottenuti saranno utili per valutare dopo quanto tempo le prestazioni si degradano a tal punto da richiedere una sostituzione dei sensori o una ricalibrazione della WIM.

2.3.3. Prove di trazione e flessione post-aging

I 4 provini *post-aging* sono stati sottoposti a prove di trazione secondo la stessa procedura di quelle *pre-aging*. I risultati dei test sono riassunti nella Tabella 5.

	$\Delta\lambda_{\text{precarico}}$ [μm]	$\Delta\lambda_{\text{carico}}$ [μm]	Precarico [KN]	Carico [KN]
Provino 2	300	800	4,1	16
Provino 3	300	800	8,5	24
Provino 4	300	900	8,2	31
Provino 5	300	1000	4,9	21

Tabella 5. Test provini post-aging sottoposti a flessione

Le Figura 55, Figura 56, Figura 57 e Figura 58 riportano l'andamento delle variazioni della lunghezza d'onda e la variazione del carico nel tempo per ciascun provino.

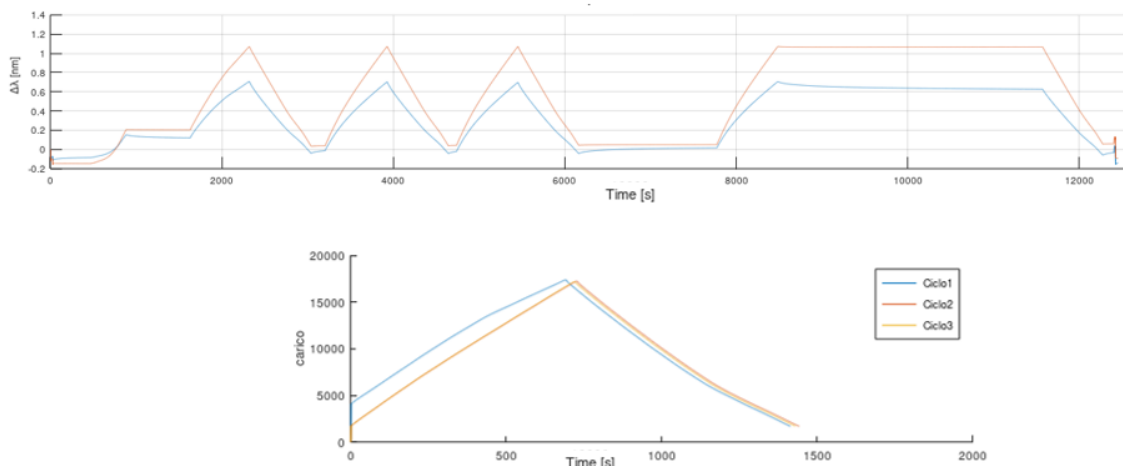


Figura 55. $\Delta\lambda$ e carico provino2 prova di trazione post aging

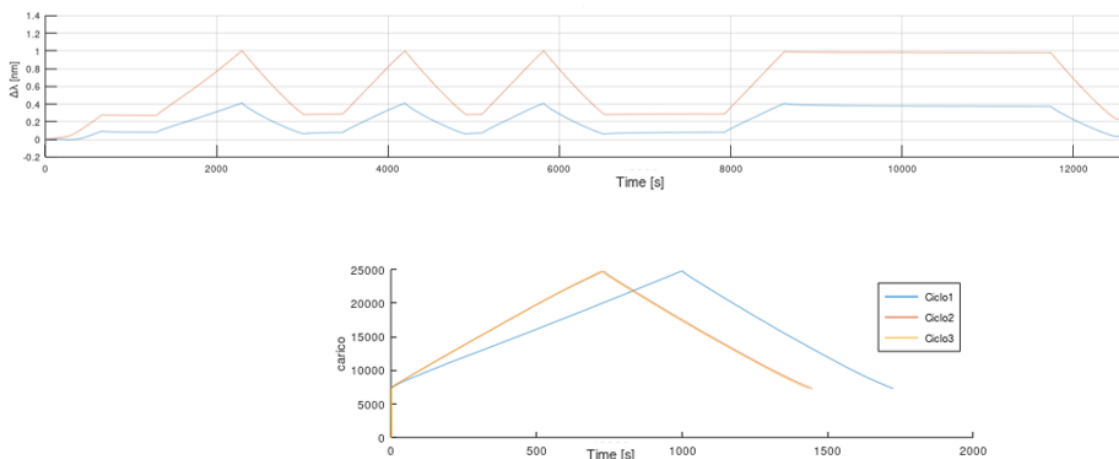


Figura 56. $\Delta\lambda$ e carico provino3 prova di trazione post aging

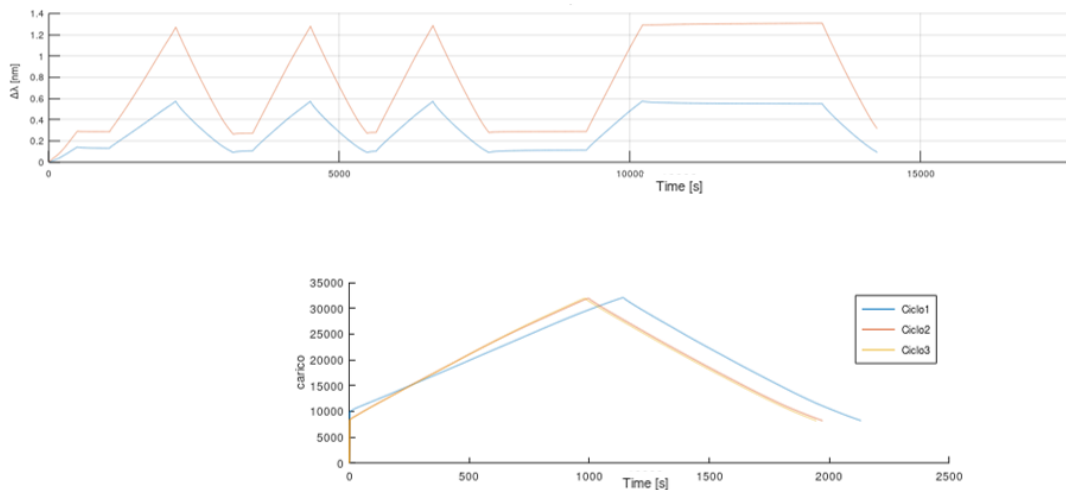


Figura 57. $\Delta\lambda$ e carico provino4 prova di trazione post aging

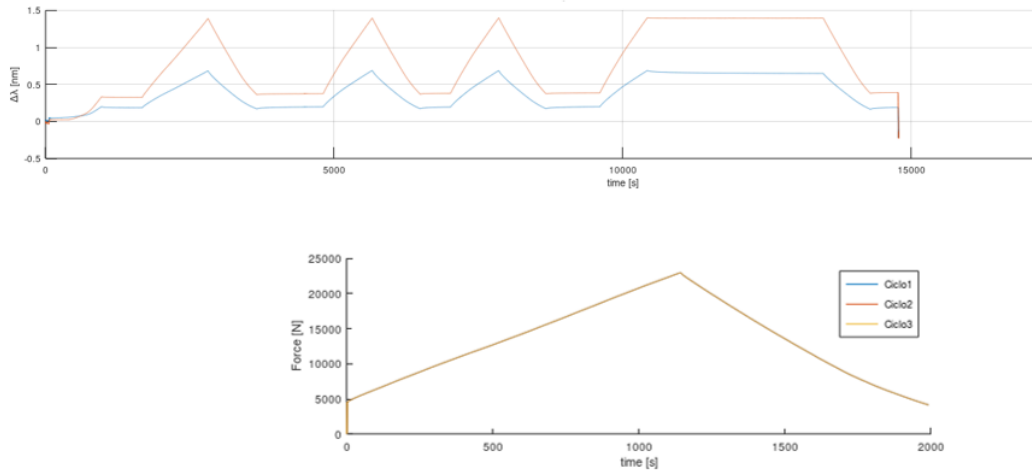


Figura 58. $\Delta\lambda$ e carico provino5 prova di trazione post aging

I 4 provini *post-aging* sono stati sottoposti successivamente a prove di flessione secondo la stessa procedura di quelle *pre-aging*. Di seguito i risultati dei test riportati nella Tabella 6.

	$\Delta\lambda_{\text{precarico}}$ [μm]	$\Delta\lambda_{\text{carico}}$ [μm]	Precarico [N]	Carico [N]
Provino 2	300	1000	115	470
Provino 3	300	1000	115	470
Provino 4	300	1000	115	470
Provino 5	300	1000	115	470

Tabella 6. Test provini *post-aging* sottoposti a flessione

Si riportano nelle Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62, per ciascun provino, la variazione di lunghezza d'onda rilevata, proporzionale alla deformazione subita dai due sensori FBG incollati sul provino, e la variazione nel tempo del carico impostato.

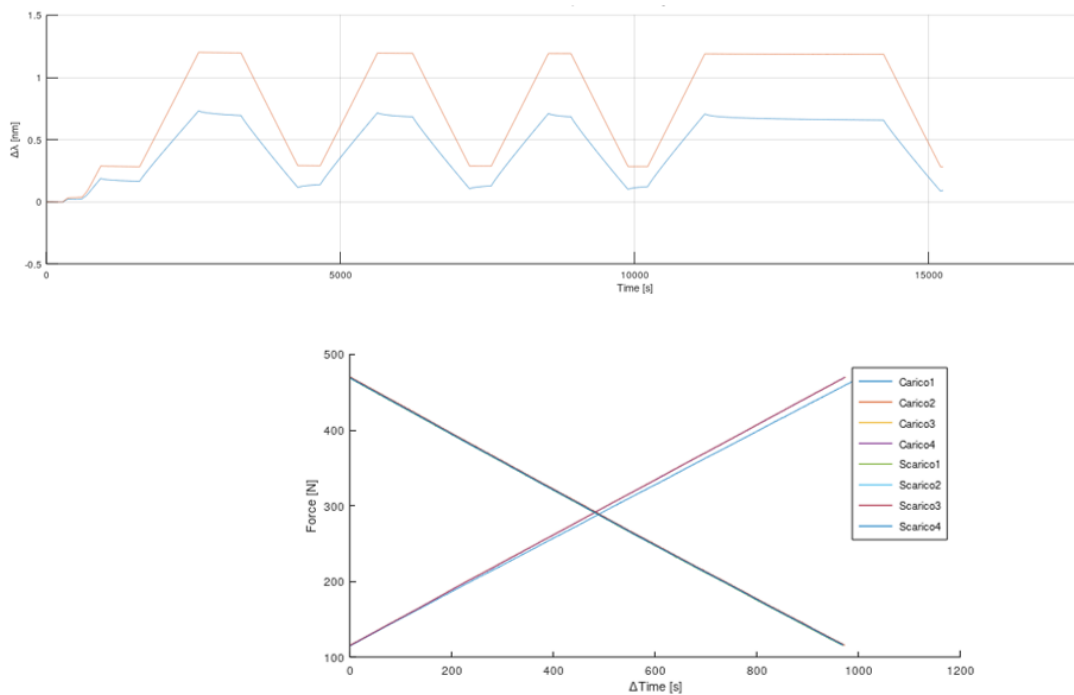


Figura 59. $\Delta\lambda$ e carico provino2 prova di flessione post aging

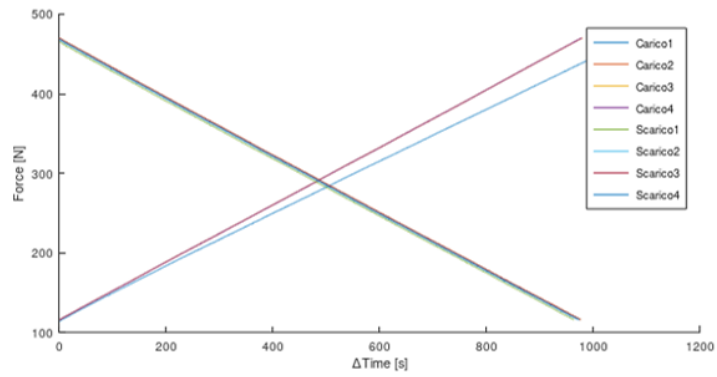
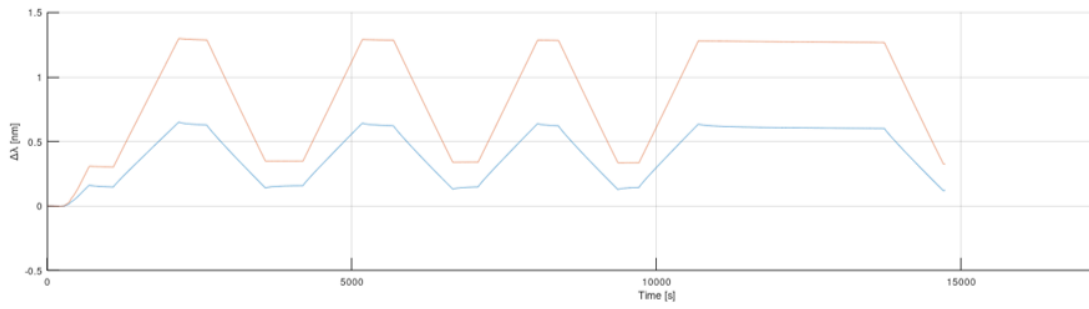


Figura 60. $\Delta\lambda$ e carico provino3 prova di flessione post aging

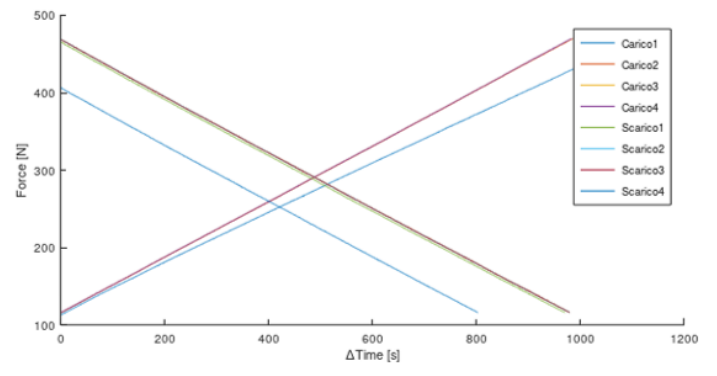
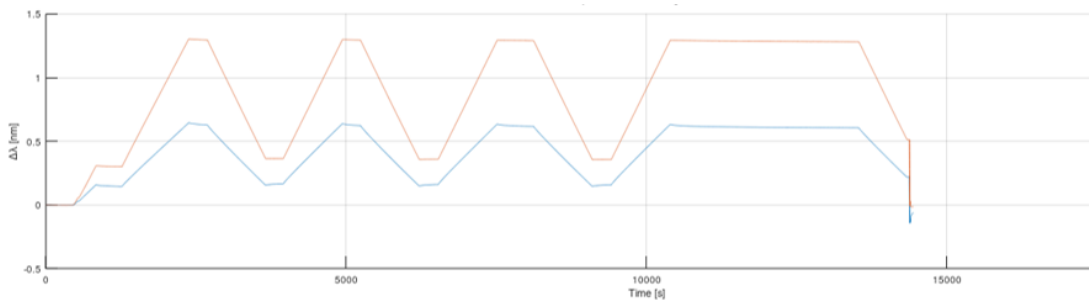


Figura 61. $\Delta\lambda$ e carico provino4 prova di flessione post aging

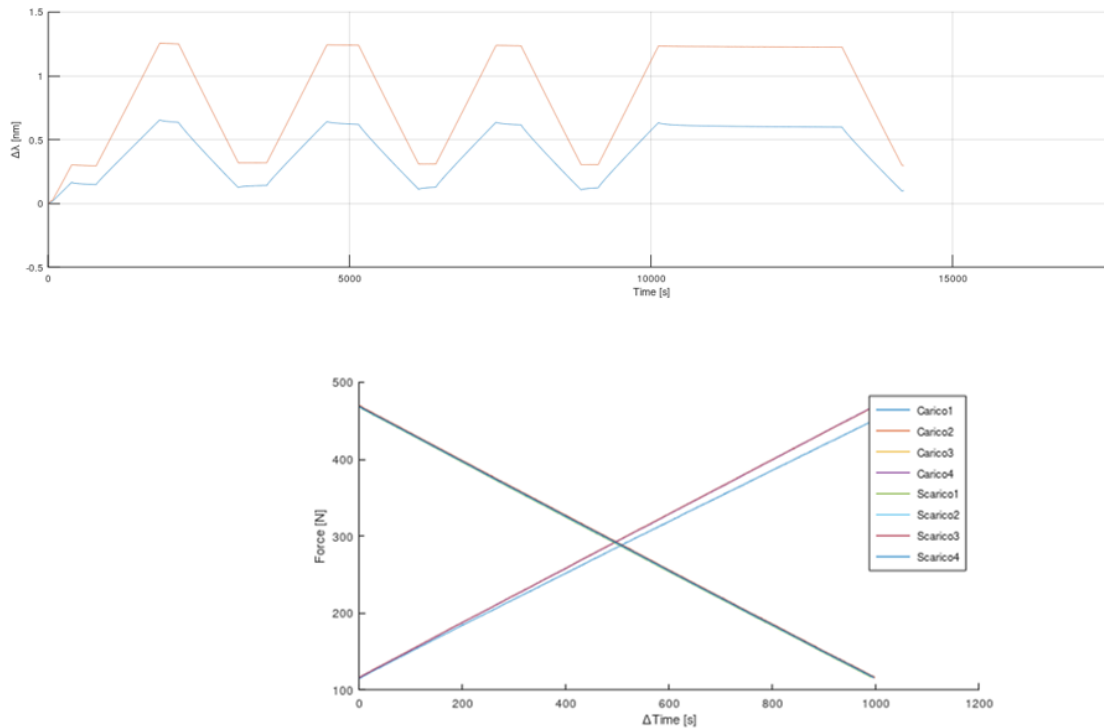


Figura 62. Δl e carico provino5 prova di flessione post aging

2.3.4. Risultati

Dal confronto tra l'andamento delle deformazioni dei grafici precedenti, acquisite prima e dopo l'*aging* accelerato, risulta confermato che la risposta migliore alle sollecitazioni ricevute sia durante le prove di trazione che quelle di flessione è quella del sensore in *poliammide* (grafico in rosso nelle figure precedenti) rispetto al sensore in *acrilato* (grafico in blu). Infatti, il sensore rivestito in poliammide dimostra una maggiore sensibilità alla deformazione in risposta al carico applicato. Inoltre, durante il tempo in cui il provino viene tenuto in trazione o in flessione, una volta raggiunta la deformazione massima, il sensore in poliammide non mostra alcuna riduzione della deformazione misurata a differenza di quello rivestito in acrilato. Comunque, per entrambi i sensori non si notano particolari differenze delle deformazioni acquisite al variare del carico applicato, tra l'andamento, prima e dopo i cicli di *aging* accelerato. Pertanto, possono essere considerati minimi gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla durabilità della colla e dei sensori stessi, almeno per il periodo di invecchiamento studiato pari a 5 anni. Quindi, in queste situazioni di monitoraggio continuo, la tenuta del sensore rivestito in poliammide sarà assicurata nel tempo e non sarà compromessa dall'invecchiamento dei materiali e da situazioni ambientali sfavorevoli. Questo dato è un'ulteriore conferma sulla scelta fatta per l'utilizzo di questi sensori come parte attiva del sistema di sensing per il WIM nella nostra applicazione e probabilmente, visti i dati acquisiti ed elaborati durante questa fase della sperimentazione, i sensori in *poliammide* si fanno preferire ai sensori in *acrilato* sia per capacità di adesione alla resina e sia per mantenimento nel tempo di questa capacità.

3. DEFINIZIONE DEGLI ALGORITMI DI PROCESSAMENTO DEL SEGNALE

La definizione di algoritmi di processamento del segnale in tempo reale è di fondamentale rilevanza per la valutazione del peso del veicolo in transito. Il processamento avviene a diversi livelli, partendo da pre-processamento dei segnali grezzi, con finalità prevalentemente di miglioramento del rapporto segnale-rumore, fino all'applicazione di *fit* dei segnali pre-processati.

L'uso della piastra flettente (*bending plate*) prevede di correlare il peso del veicolo alla deformazione complessiva della piastra.

La Figura 63 mostra schematicamente la configurazione del sistema (disegno non in scala), nella ipotesi di realizzazione con n. 2 piastre affiancate (Piastra A e Piastra B) a coprire l'intera corsia di marcia, disposte trasversalmente sulla carreggiata. Le piastre sono strumentate con n. 7 sensori FBG ciascuna, disposti parallelamente al lato corto della piastra e centrati sulla mezzzeria. Come d'uso per la tecnologia FBG, i sensori sono collegati in serie su di una sola fibra ottica ed operati in WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Ciascun sensore ha una differente lunghezza d'onda di Bragg (LB) di riferimento, che nella specifica realizzazione sono comprese fra 1518nm e 1556nm, con valore crescente passando dal sensore alla estrema sx della piastra A al sensore alla estrema dx della piastra B.

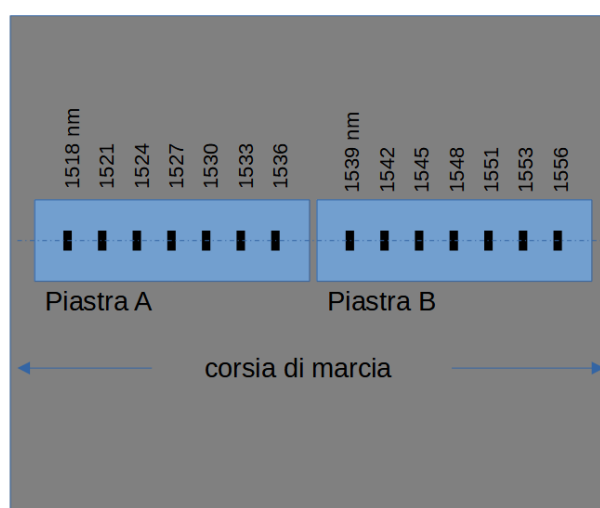


Figura 63. rappresentazione schematica della disposizione dei sensori FBG

Il transito del veicolo determina la flessione delle piastre. I sensori misurano, in corrispondenza della propria posizione, la componente della flessione parallela al lato corto delle piastre. La flessione misurata da ciascun sensore varia nel tempo, dapprima aumentando progressivamente nell'intervallo di tempo in cui la ruota impegna la piastra e raggiunge la mezzzeria, successivamente diminuendo progressivamente nell'intervallo di tempo in cui la ruota supera la mezzzeria ed infine disimpegna la piastra. La flessione massima misurata da ciascun sensore è il parametro correlato al peso del veicolo in transito.

La Figura 64 mostra nel grafico a sx un esempio della misura della flessione massima. In ascissa è riportato il numero identificativo del sensore, dove ID varia da 1 a 14 con ID=1 per il sensore più a sinistra (LB=1518 nm), ID=2 per il sensore successivo (LB=1521) e così via fino a ID=14 per il sensore con LB=1556. Mentre in ordinata è riportato il valore della flessione massima, in unità arbitrarie. Nell'esempio in figura, il transito di una ruota avviene in corrispondenza approssimativamente del sensore con ID=6 (LB=1536) ed il transito dell'altra ruota in corrispondenza approssimativamente fra i sensori ID=13 e ID=14 (LB=1553 ed LB=1556). La posizione delle ruote durante il transito è schematizzata nel disegno in alto. L'evoluzione temporale del segnale di ciascun sensore è del tipo mostrato nel grafico a dx,

essendo riportato in ascissa il tempo ed in ordinata l'ampiezza del segnale (in unità arbitrarie). Considerando il tempo crescente: il segnale è inizialmente nullo perché la piastra è scarica; il segnale aumenta man mano che la ruota impegna la piastra ed avanza verso la mezzeria; il segnale raggiunge il valore massimo quando la ruota è alla mezzeria della piastra; il segnale diminuisce man mano che la ruota si allontana dalla mezzeria fino ad annullarsi quando la ruota disimpegna la piastra. I disegni in basso, contrassegnati da uno a tre, mostrano schematicamente la posizione della ruota sulla piastra per la quale il segnale assume i corrispondenti valori contrassegnati nel grafico. Il valore max raggiunto dal segnale di ciascun sensore (picco del segnale nel grafico a dx) è ciò che viene mostrato nel grafico a sx, che di fatto mostra (in negativo, ovvero invertendo le concavità e convessità) il profilo delle due piastre all'istante di massima sollecitazione.

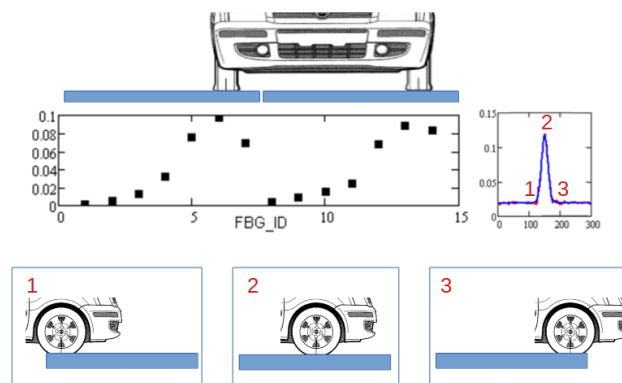


Figura 64. distribuzione della flessione causata da un veicolo in transito

Il peso del veicolo in transito è codificato, in prima approssimazione, nella somma pesata dei valori massimi delle flessioni, essendo il peso determinato dalla posizione del sensore.

3.1. Algoritmo per il calcolo del peso

L'algoritmo per il calcolo del peso considera gli step di seguito specificati:

1) Si prende in considerazione solo il secondo terzo della serie storica, ovvero i valori della flessione misurati nel corso del pieno impegno della piastra.

Nel corso del primo e dell'ultimo terzo della serie storica, le ruote gravano per un intervallo di tempo relativamente ampio sull'appoggio, con conseguente discostamento della piastra dalla condizione assunta di 'bending in appoggio libero'. In particolare, all'impegno e disimpegno della piastra da uno dei lati in appoggio si ha un effetto di carico su tale lato che porta ad un transitorio sollevamento e successiva ricaduta del lato opposto. Tale effetto è atteso anche in caso di una 'perfetta' realizzazione e condizione dell'appoggio, in quanto previsto su materiale elastomerico. Nel caso di una 'buona ma non perfetta' realizzazione o comunque condizione in uso dell'appoggio, tale effetto origina oscillazioni (rumore, alterazione del segnale di bias, falsi picchi) in quanto la piastra è intrinsecamente meno stabile;

2) Per ciascun sensore, si determina il valore massimo della deformazione eseguendo fit gaussiano a 4 parametri sui dati residui dall'operazione di cui al punto 1).

$$a + b \exp \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{t - c}{d} \right)^2 \right] \quad (10)$$

La scelta del *fit* gaussiano è guidata da considerazioni attinenti la meccanica della deformazione elastica della piastra ed in particolare le relative costanti di tempo. Con l'operazione di *fit* si ovvia all'assenza di dati continui per il valore comunque finito della frequenza di campionamento in acquisizione dati, che non garantisce l'esecuzione diretta della misura nell'istante in cui si determina la massima sollecitazione;

3) Si esegue la somma pesata del valore dei massimi determinati al punto 2).

Nella esecuzione della somma si considera un peso specifico per ciascun sensore, relativo alla posizione dello stesso sulla piastra. Il peso è minore per i sensori più prossimi ai lati corti della piastra (ID=1; ID=7; ID=8; ID=14), è massimo per il sensore al centro della piastra (ID=4; ID=11), ha valore intermedio per gli altri sensori. Il principio fisico alla base dell'attribuzione del valore del peso considera la maggiore cedevolezza della piastra in prossimità dei lati corti, essendo la piastra in appoggio soltanto sui lati lunghi. La determinazione dei pesi è eseguita con operazioni di taratura della piastra in laboratorio con prove di carico;

4) Si determina il peso del veicolo mediante correzione del valore ottenuto al punto 3).

Per la determinazione del peso si considera la curva del *fit* di cui al punto 2) del sensore di maggiore ampiezza, definendo parametro correttivo in relazione alla FWHM della curva stessa. Il principio fisico alla base della correzione è da riferire alla meccanica della deformazione elastica e l'inerzia di risposta alla sollecitazione, che comporta minore deformazione per sollecitazioni maggiormente rapide. La determinazione del parametro correttivo è eseguita con operazioni di taratura della piastra installata, con transiti ripetuti a velocità controllata di veicoli di peso noto.

L'algoritmo è stato implementato in ambiente C++ & CodeBlock per essere implementato su interrogatore IBSEN con controllore sviluppato dal partner Takius. La Figura 65 mostra parte del codice con evidenza della GUI.

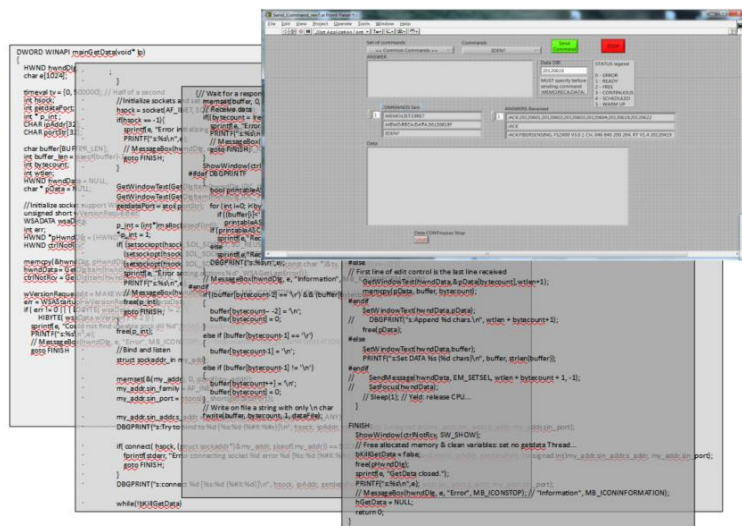


Figura 65. GUI e codice sorgente del software di calcolo del peso

Decodifica del segnale ottico provenienti dai sensori FBG applicati alla piastra

Il processamento del segnale per la valutazione del peso è preceduto dalla decodifica del segnale ottico prodotto dai sensori FBG applicati alla piastra. Tali sensori operano come *strain gauge*, producendo un segnale ottico che codifica in termini spettroscopici lo *strain* (deformazione, nel caso specifico dovuto alla flessione della piastra sollecitata al transito del veicolo). L'elemento sensibile al segnale del sensore FBG adottato per il progetto SENTINEL è un *array* lineare di CCD (in numero di 256 oppure 512; si utilizzano per le prove entrambe le versioni in funzione del numero di piastre flettenti da monitorare).

Il principio di funzionamento dell'elemento sensibile si basa sull'impiego di un elemento diffrattivo come dispersore cromatico: il segnale ottico del sensore in uscita dalla fibra ottica investe tale elemento e viene deflesso con un angolo che dipende dalla lunghezza d'onda del segnale stesso, raggiungendo soltanto alcuni dei *pixel* del CCD. La Figura 66 mostra a sx lo schema di funzionamento del dispersore IBSEN, con evidenza dello schema basato sull'impiego di due elementi diffrattivi ed uno specchio (la figura è tratta da documentazione tecnica IBSEN di pubblico accesso). La luce che proviene dalla fibra ottica viene parzialmente collimata dal sistema di lenti ed indirizzata sul primo elemento diffrattivo che causa una prima dispersione. La luce raggiunge quindi il secondo elemento diffrattivo e viene successivamente riflessa sul sensore CCD. Il disegno del circuito ottico con specchio e la doppia dispersione consente la riduzione dell'ingombro ed elevata risoluzione spettristica. La componente spettrale del segnale di ciascun sensore, tipicamente una 'campana' stretta ma comunque di larghezza finita, è tale da interessare con intensità rilevante soltanto da due a tre *pixel* del CCD. La Figura 66 mostra a destra un esempio di segnale ottenuto da una piastra prototipale realizzata e sottoposta a prove di flessione statica [20]. Il grafico riporta in ascissa il numero d'ordine dei *pixel* ed in ordinata l'ampiezza del segnale in unità arbitrarie. La figura mostra il segnale di tre sensori: ciascun sensore produce un segnale rilevante soltanto su due *pixel* del CCD.

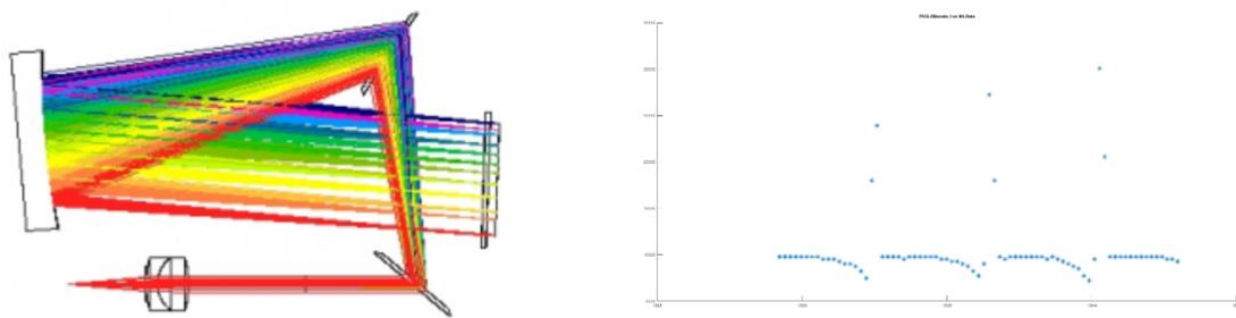


Figura 66. schema ottico dell'elemento dispersivo IBSEN (sx) e segnale ottico di tre sensori FBG (dx)

3.2. Procedura baricentrica per individuazione del picco

Il procedimento di decodifica del segnale prevede la valutazione del picco del segnale, il cui spettro 'a campana' risulta campionato sugli elementi dell'array di CCD. In particolare, vengono considerati procedimenti di analisi intesi a conseguire risoluzione *subpixel*, basati su algoritmi di *fit* ed approssimazione per ricerca di 'centro di gravità' del segnale campionato.

Gli algoritmi sono stati prima testati con sistemi di calcolo *off-line* e poi sono stati implementati in *firmware* a bordo del sistema di controllo. Nel corso di tali attività sono state provate e caratterizzate anche differenti procedure di determinazione dei massimi di tipo non analitico, basate su interpolazione per *spline*. Inoltre, è risultato di interesse provare procedure basate su interpolazioni lineari (in particolare 'baricentrica') invece che su *fit* non lineare. L'interesse per le procedure lineari è da riferire alla possibilità di utilizzare processori di minore potenza e costo per il sistema di controllo.

La procedura 'baricentrica' prevede:

1) Individuazione dei massimi locali, per ciascuna piastra

Considerando come parametro l'intensità del segnale al *pixel* n-esimo $I(n)$, si ricerca il numero d'ordine $N1$ del *pixel* con valore $I(N1) > I(n)$.

Si ricerca il numero d'ordine $N2$ del *pixel* con valore

$$I(N1) > I(N2) > I(n) \text{ con } \text{abs}(N2 - N1) > c \quad (11)$$

essendo c definito in funzione delle specifiche spettroscopiche del segnale dei sensori FBG utilizzati (tipicamente $c=5$, prevedendo segnale di un singolo sensore disperso su non più di tre *pixel*).

Si ricerca il numero d'ordine N_3 del *pixel* con valore

$$I(N_1) > I(N_2) > I(N_3) > I(n) \text{ con } \text{abs}(N_3 - N_1) > c \text{ e } \text{abs}(N_3 - N_2) > c \quad (12)$$

Si procede analogamente fino a N_m , essendo m pari al numero di sensori su singola piastra ($m=7$ nel caso specificato).

2) Determinazione del picco con risoluzione *sub-pixel*, per ciascun sensore

Si determina la posizione del massimo per il sensore i -esimo come

$$X_i = \{ [N_{i-1}] * I(N_{i-1}) + N_i * I(N_i) + [N_{i+1}] * I(N_{i+1}) \} / \{ I(N_{i-1}) + I(N_i) + I(N_{i+1}) \} \quad (13)$$

3) Si procede come per i punti 3) e 4) del paragrafo 3.1. [9].

La Figura 67 mostra il *fit* dei picchi che nella figura precedente erano mostrati come campionati sull'*array* di CCD. Per ciascun picco sono presenti più curve di *fit* (12 in totale), corrispondenti a 12 differenti livelli di carico applicati sulla piastra nel corso del test. Il *fit*, nel caso specifico, è stato ottenuto con interpolazione per *spline* con codice di calcolo sviluppato in ambiente OCTAVE, di cui si mostra *screenshot* di seguito nella Figura 68.

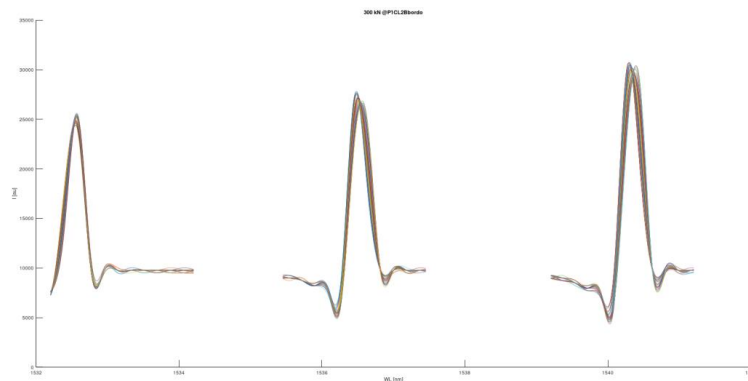


Figura 67. *fit* dei picchi del segnale

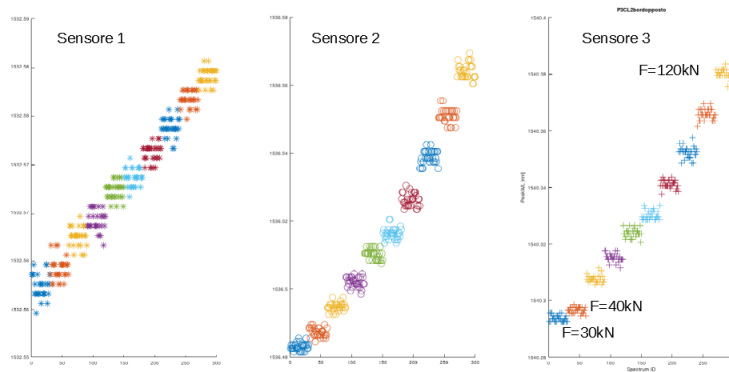


Figura 70. fit con spline semplificato

Ottimizzazione degli algoritmi

Gli algoritmi sono stati poi ottimizzati utilizzando dati di prove WIM eseguite su setup di precedenti sperimentazioni con strutture meccaniche del tipo 'bending plate' e dunque significative allo scopo. L'ottimizzazione degli algoritmi ha comunque tenuto in conto l'esigenza che gli stessi siano implementati in firmware a bordo del sistema di controllo. Conseguentemente non sono state considerate procedure che non potessero essere trasportate, per loro complessità, sul firmware ed hardware previsto.

La Figura 71 mostra schematicamente in dettaglio la differente risposta dei sensori al transito del veicolo. Le misure sono relative a prove di caratterizzazione in ambiente strutturato ed acquisizione dati con strumento di laboratorio. I grafici riportano la storia temporale del segnale di cinque sensori al transito della ruota anteriore e posteriore del veicolo, con evidenza della loro posizione sulla piastra come in disegno (posizionamento del veicolo solo qualitativo). Risulta evidente la differente ampiezza della risposta in funzione della distanza dalla traiettoria e di come la risposta dei diversi sensori sia diversa nella parte iniziale e finale, ovvero in prossimità degli eventi di impegno e disimpegno della piastra da parte delle ruote. L'analoga caratteristica del segnale all'impegno e disimpegno sia della ruota anteriore che posteriore, è da riferire a condizione di appoggio della piastra non omogenea su tutta la lunghezza del bordo della stessa. Lo studio delle caratteristiche del segnale dei sensori in concomitanza con interventi migliorativi nella realizzazione del supporto ha consentito di giungere all'ottimizzazione dello stesso.

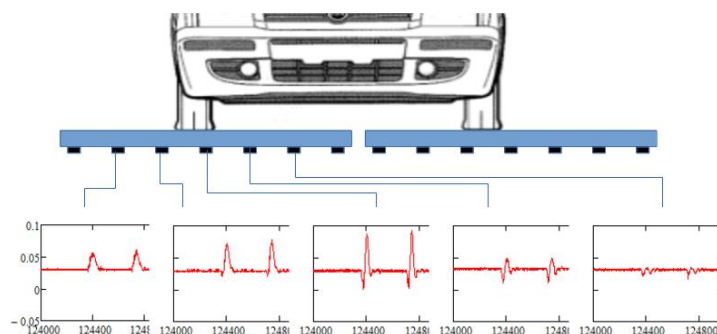


Figura 71. segnali registrati in seguito a transiti

La Figura 72 evidenzia schematicamente l'effetto di 'controflessione e sollevamento' della piastra che viene indotto da una non perfetta realizzazione dell'appoggio e che comunque è atteso essendo l'appoggio reale su materiale cedevole (neoprene) e di superficie finita (non una linea coincidente con il solo bordo della piastra).

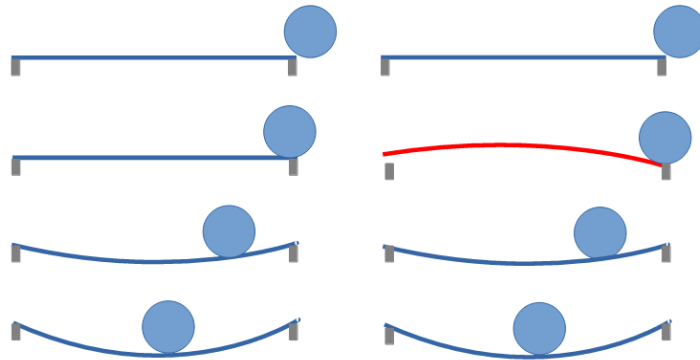


Figura 72. flessione nel caso di appoggio ideale (sx) e reale (dx)

La Figura 73 evidenzia il miglioramento del segnale conseguito con una più accorta realizzazione dell'appoggio. I grafici mostrano la storia temporale del segnale di tutti i sensori al transito di una ruota. Il segnale sperimentale acquisito è mostrato in rosso, il *fit* è mostrato in blu. Risulta evidente la pressoché assenza di 'controflessioni' sia all'impegno che al disimpegno; sono inoltre assenti vibrazioni di ampiezza rilevante. La migliore qualità del segnale migliora il risultato del *fitting*, eseguito con *spline* ed azioni di ottimizzazione dell'algoritmo di *fit*. Le azioni di ottimizzazione dell'algoritmo sono state concentrate prevalentemente su operazioni di *smoothing* provando sia medie correnti sia *fit*, finalizzate alla rimozione del 'rumore' attribuibile principalmente a vibrazioni a maggiore frequenza.

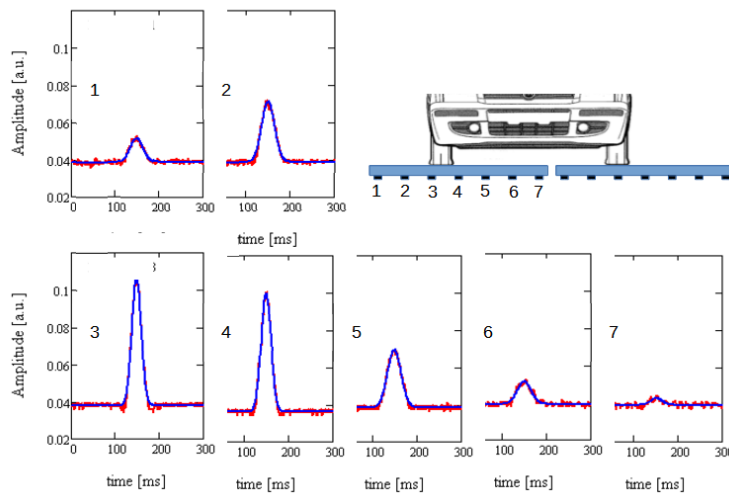


Figura 73. dati sperimentali e fitting

La Figura 74 evidenzia la differente deformazione della piastra al transito di uno stesso veicolo secondo due differenti direttrici, indicate dal disegno in inserto. I grafici riportano in ordinata il valore del segnale dei sensori (proporzionale alla deformazione della piastra), in ascissa c'è ripetizione della coordinata temporale per ciascun sensore (ciascuna 'campana' mostra l'evoluzione temporale del segnale dello specifico sensore; la posizione del sensore sulla piastra è indicata dal disegno sotto il grafico). I picchi delle 'campane' danno evidenza del profilo assunto dalla piastra nell'istante di massima deformazione.

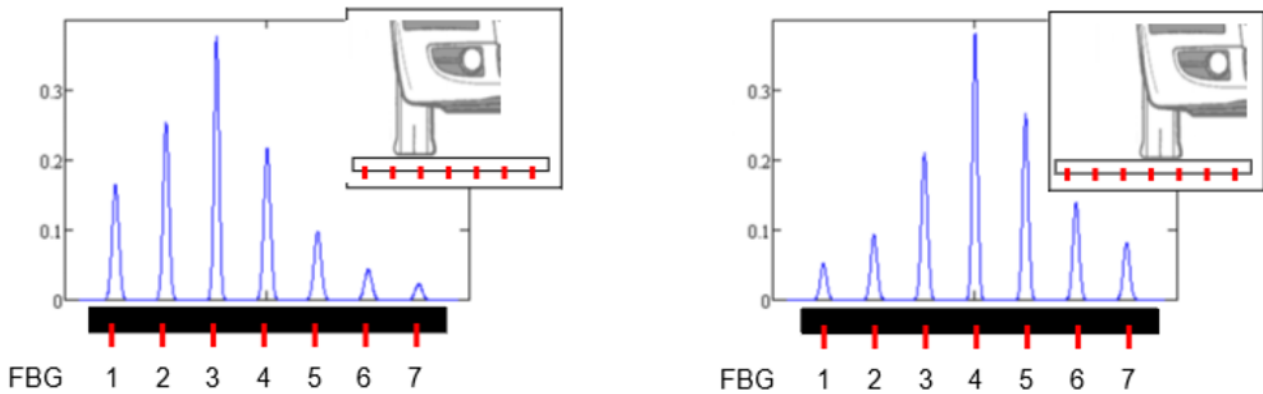


Figura 74. calcolo del parametro di asimmetria

Risulta evidente come la posizione della ruota influenzi il profilo della deformazione e l'ampiezza del segnale del sensore più direttamente sottostante la ruota. Poiché la traiettoria di transito sulla piastra determina, a parità di carico, una differente flessione della stessa è necessario inserire nell'algoritmo un parametro, chiamato parametro di asimmetria (AS), che effettua la correzione del peso stimato con riferimento alla traiettoria.

3.2.1. Risultati applicazione algoritmo di tipo baricentrico

L'algoritmo di individuazione del picco di Bragg è stato poi implementato sul modulo HW per l'acquisizione e processamento del segnale.

Considerazioni sulla capacità di calcolo e risorse del modulo hardware hanno portato a tralasciare procedure di *fit* di tipo non lineare. Si è quindi considerata la ricerca del valore del picco del segnale basandosi su procedura del tipo 'baricentrica' per ottenere una risoluzione *subpixel*. Si richiama l'attenzione sulla circostanza che il segnale dei sensori viene acquisito con CCD lineare, a valle di dispersione cromatica eseguita con elemento dispersivo. Lo spettro ottico viene quindi campionato sul sensore CCD. La Figura 75 mostra, a titolo esemplificativo, il segnale ottenuto dai sette sensori presenti su una delle piastre installate presso il C.R. ENEA Trisaia durante i transiti che verranno descritti di seguito. La figura mostra nove frame corrispondenti al segnale istantaneo acquisito in corrispondenza di 9 istanti temporali. L'acquisizione è stata effettuata a frequenza superiore al kHz. Ciascun frame mostra in ordinata l'intensità del segnale rilevata da ciascun *pixel* individuato dall'ID in ascissa.

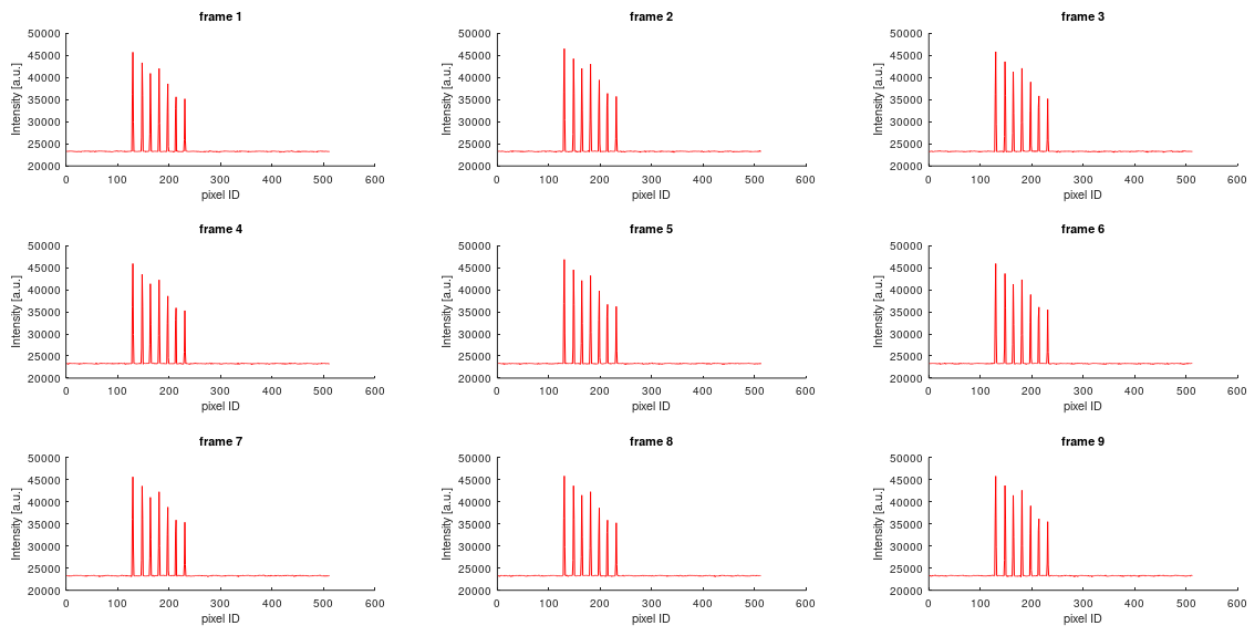


Figura 75. intensità del segnale dei 7 sensori

La Figura 76 mostra in scala espansa uno dei *frame*, con evidenza del valore dell'intensità del segnale (cerchio) al *pixel*, il tratto continuo è solo interconnessione dei valori ai *pixel*. Si nota come ciascun picco sia ben campionato su tre *pixel*.

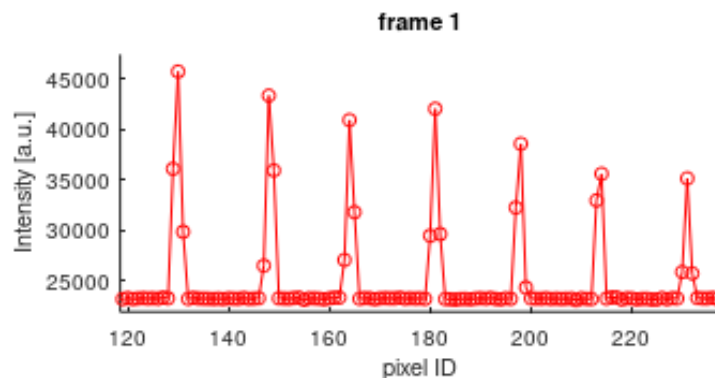


Figura 76. zoom frame 1

La Figura 77 mostra il risultato della implementazione della procedura 'baricentrica' per il calcolo del valore del picco con risoluzione *subpixel*. Il valore dell'ascissa calcolato è riportato nel grafico, con evidenza della quarta cifra decimale, che tuttavia risulta non significativa. La procedura prevede il calcolo come media pesata su $(2*N+1)$ *pixel*, centrati sul *pixel* del picco locale. Il valore di N può essere variato in funzione della larghezza spettrale degli spettri come rilevati al CCD lineare, con valori di riferimento pari a 1 e 2, data la risoluzione spettrale del sistema di analisi (CCD lineare in combinazione con l'elemento disperdente).

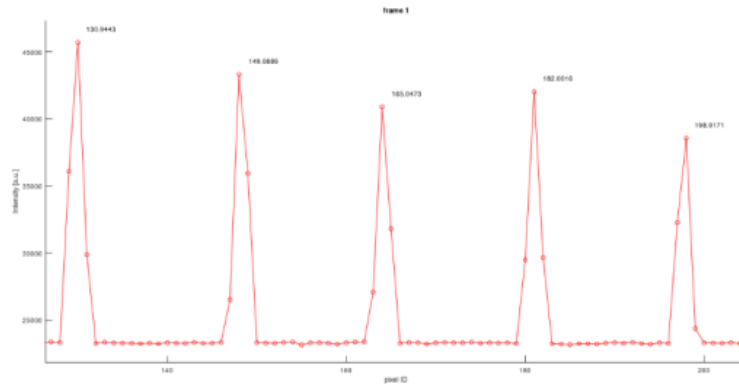


Figura 77. risultato procedura baricentrica

Un esempio di maggior dettaglio dell'implementazione della procedura baricentrica è dato nel seguito con evidenza della variazione dell'intensità ai pixel centrati sui picchi. La Figura 78 mostra la storia temporale dell'intensità del segnale rilevato su cinque pixel al transito del veicolo. I cinque pixel sono centrati su uno dei picchi dei sette sensori. Nel grafico si nota come dal frame 1 (dall'istante iniziale) al frame 80 circa, l'ampiezza del segnale sia stazionaria: l'intervallo temporale corrisponde a condizione di piastra scarica e dunque non si manifesta alcuna deformazione e conseguentemente non si manifesta alcun wavelength shift. All'impegno della piastra, si manifesta la deformazione e conseguentemente il picco del segnale subisce un wavelength shift che determina un diverso posizionamento del picco sul sensore lineare. L'intensità del segnale di ciascun pixel varia conseguentemente: posto che lo spostamento del picco sia verso 'sinistra', il segnale dei pixel a 'sinistra' aumenta ed il segnale dei pixel a 'destra' diminuisce. Nel grafico, la traccia gialla corrisponde al pixel (Pixel # = N) inizialmente più prossimo al picco del segnale del sensore FBG. La traccia rossa corrisponde al pixel a 'sinistra' (Pixel # = N-1), la traccia viola corrisponde al pixel a 'destra' (Pixel # = N+1). Le ulteriori due tracce corrispondono, l'una al pixel ulteriormente a 'destra' e l'altra a quello ulteriormente a 'sinistra'. Nel grafico si osserva appunto l'effetto dello spostamento del picco verso 'destra': progressivamente l'ampiezza del segnale del pixel a 'destra' aumenta e quello del pixel a 'sinistra' diminuisce. La traccia gialla mostra un iniziale incremento evidentemente perché lo spostamento verso 'destra' del picco risulta dapprima centrare meglio il picco stesso sul pixel corrispondente.

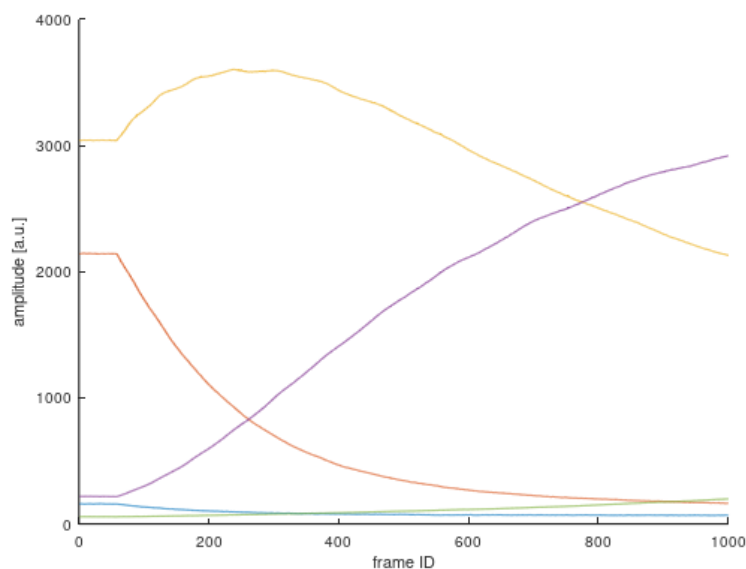


Figura 78. evoluzione temporale del segnale dei pixel

Il processamento con algoritmo del tipo 'baricentrico' dei segnali dei *pixel* mostrati nella figura precedente è esplicitato nella Figura 79, che ne mostra l'implementazione in ambiente Octave. Il codice riporta la sezione di produzione della figura precedente (nel listato, 'figure 4'), appunto con cinque tracce. Nel codice, nella sezione di produzione di 'figure 5' è presente il semplice processamento che implementa la media pesata e la produzione dell'evoluzione temporale del *wavelength shift* così calcolato.

```

56 #
57 figure 4
58 clf
59 n=9
60 #
61 hold on
62 plot(I1(1:1000,n-2))
63 plot(I1(1:1000,n-1))
64 plot(I1(1:1000,n))
65 plot(I1(1:1000,n+1))
66 plot(I1(1:1000,n+2))
67 xlabel('frame ID')
68 ylabel('amplitude [a.u.]')
69 #
70 #
71 figure 5
72 clf
73 Ib=((n-1)*I1(1:1000,n-1) + (n)*I1(1:1000,n) + (n+1)*I1(1:1000,n+1))
74 Ip=I1(1:1000,n-1) + I1(1:1000,n) + I1(1:1000,n+1)
75 II=Ib./Ip
76 plot(II)
77 xlabel('peak coordinate [sub-pixel #]')
78 ylabel('amplitude [a.u.]')
79
80

```

Figura 79. codice Octave per il calcolo dello shift

La Figura 80 mostra il risultato dell'implementazione dell'algoritmo. Il grafico corrisponde all'evoluzione temporale della posizione del 'baricentro' del picco, essendo la posizione riferita all'*array* di CCD con risoluzione *sub-pixel* (a valore inter, corrisponde il centro del *pixel*). La robustezza della procedura trova giustificazione nel carattere 'differenziale' (*shift*) della misura, che quindi risulta poco influenzata da irregolarità dell'*hardware*, come ad esempio imprecisioni del *pitch* dei *pixel*.

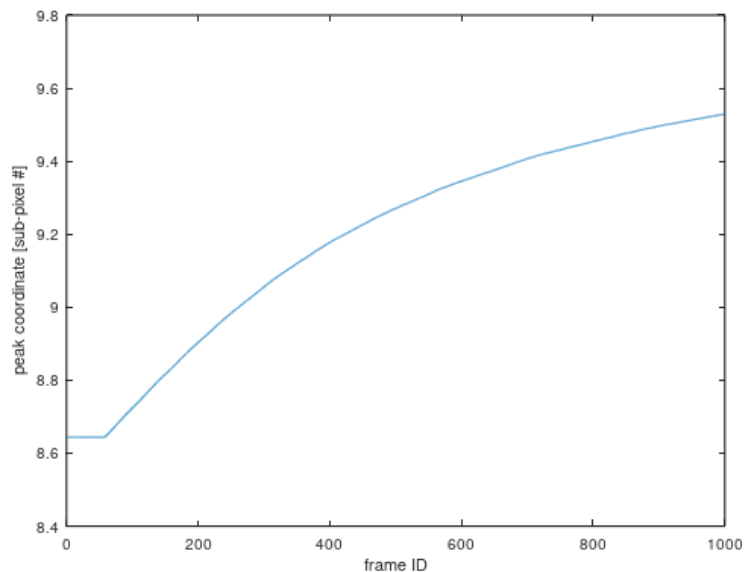


Figura 80. storia temporale della posizione del picco del segnale del sensore FBG

4. SITO DIMOSTRATORE NEL C.R. ENEA TRISAIA

La fase dei test è stata effettuata presso il C.R. ENEA Trisaia dove è stato realizzato un sito dimostratore e sono stati eseguiti dei transiti di veicoli con differenti pesi in ambiente controllato.

4.1. Strumentazione delle piastre con sensori FBG

Una volta saldati i connettori sono stati eseguiti dei test funzionali sulle 4 piastre sensorizzate. In una prima fase di test le 4 piastre sono state collegate ai 4 canali di un interrogatore ottico da banco NI PXIe-4844, in dotazione del laboratorio C.R. ENEA Trisaia (Figura 81). Successivamente le stesse piastre sono state collegate a 4 kit elettronici, forniti dal partner TAKIUS srl, equipaggiati con interrogatori IMON IBSEN e collegati a sorgenti luminose esterne. Tale apparecchiatura costituisce l'elettronica di rilevamento e processamento del segnale proveniente dagli FBG per determinare la deformazione delle piastre, l'output del suddetto kit elettronico rappresenta l'input dell'algoritmo di determinazione del peso. Tali test sono stati concordati secondo un protocollo di prove definito dai ricercatori ENEA in base ai risultati di test precedenti effettuati in laboratorio dal partner TAKIUS srl. Pertanto, tali test effettuati in laboratorio sono stati utili per l'individuazione e la risoluzione di criticità che potranno insorgere durante una futura installazione su un altro sito.



Figura 81. piastre sensorizzate (sx) interrogatore ottico (dx)

In una prima fase sono stati effettuati i test collegando i 28 sensori delle 4 piastre ai 4 canali di un interrogatore ottico NI PXIe-4844 e rilevando la temperatura con un sensore FBG di temperatura anch'esso collegato all'interrogatore, per acquisire le deformazioni dovute a variazioni termiche. Il test è durato 22 ore e l'interrogatore ha acquisito e salvato dati in modalità *real-time* in un file *excel* alla frequenza di 10 hz mediante un *software* dedicato sviluppato in LabVIEW. Successivamente in post-acquisizione i dati sono stati elaborati e campionati ad una frequenza di un campione al minuto. Dai dati acquisiti ed elaborati si è visto che le deformazioni termiche rilevate dai sensori incollati sulle piastre seguono precisamente l'andamento della temperatura variabile nel tempo in conseguenza delle escursioni termiche giorno-notte. In Figura 82 è riportato il *file excel* di acquisizione dove la prima colonna è rappresentata dal tempo (un campione al minuto), la seconda colonna dal sensore che registra la temperatura ambiente e a seguire le altre colonne con i dati registrati dai 28 sensori incollati sulle 4 piastre.

Si riportano nelle Figura 83 e Figura 84 le variazioni delle lunghezze d'onda $\Delta\lambda$ relative all'andamento della temperatura ambiente registrata dal sensore FBG e, a titolo esemplificativo, al primo sensore di

deformazione di ogni piastra in quanto anche gli altri sensori hanno avuto un comportamento simile. Dalle figure si notano andamenti dei grafici perfettamente sovrapponibili.

Tempo	Dev0\Ch0\Sen0_Sample	Dev0\Ch0\Sen1_Sample	Dev0\Ch0\Sen2_Sample	Dev0\Ch0\Sen3_Sample	Dev0\Ch0\Sen4_Sample	Dev0\Ch0\Sen5_Sample	Dev0\Ch0\Sen6_Sample	Dev0\Ch0\Sen7_Sample	Dev0\Ch1\Sen0_Sample	Dev0\Ch1\Sen1_Sample	Dev0\Ch1\Sen2_Sample	
2	0	1531,117196	1533,046033	1536,003423	1539,077304	1541,951198	1545,117075	1548,007503	1551,145366	1532,833833	1536,069012	1538,981094
3	60,1353	1531,116979	1533,046272	1536,003574	1539,077126	1541,952151	1545,117629	1548,008021	1551,145239	1532,834473	1536,069357	1538,980835
4	120,2706	1531,117386	1533,046331	1536,0036	1539,076984	1541,951949	1545,117374	1548,007747	1551,145482	1532,83442	1536,06954	1538,980572
5	180,4059	1531,116843	1533,046181	1536,003414	1539,077245	1541,952249	1545,117469	1548,007981	1551,145313	1532,834497	1536,06959	1538,981031
6	240,5412	1531,117473	1533,046424	1536,003573	1539,076842	1541,952066	1545,117479	1548,00812	1551,144833	1532,834667	1536,069335	1538,980794
7	300,6765	1531,117083	1533,046499	1536,003301	1539,076862	1541,952103	1545,117682	1548,007984	1551,145225	1532,834682	1536,069307	1538,981086
8	360,8118	1531,117376	1533,046449	1536,003696	1539,077478	1541,951942	1545,117578	1548,007779	1551,144839	1532,834554	1536,06911	1538,981064
9	420,9471	1531,116608	1533,046206	1536,003045	1539,076888	1541,951762	1545,117435	1548,007446	1551,144936	1532,834193	1536,06893	1538,980625
10	481,0824	1531,117049	1533,04631	1536,003574	1539,077128	1541,951776	1545,11805	1548,007978	1551,145	1532,833999	1536,069529	1538,980696
11	541,2177	1531,116922	1533,046006	1536,002771	1539,076777	1541,951916	1545,117442	1548,007561	1551,144976	1532,833912	1536,069007	1538,980297
12	601,353	1531,116934	1533,046288	1536,003578	1539,077244	1541,952139	1545,117831	1548,007627	1551,145152	1532,834239	1536,069255	1538,980864
13	661,4883	1531,117182	1533,045902	1536,003445	1539,07676	1541,951928	1545,117774	1548,007317	1551,145042	1532,834146	1536,069532	1538,980983
14	721,6236	1531,116999	1533,046105	1536,002672	1539,076702	1541,951613	1545,117518	1548,007617	1551,144947	1532,834215	1536,068924	1538,980599
15	781,7589	1531,11699	1533,045867	1536,003189	1539,076476	1541,951115	1545,117209	1548,007463	1551,144675	1532,833832	1536,068861	1538,980348
16	841,8942	1531,117042	1533,045689	1536,003171	1539,077402	1541,951704	1545,117136	1548,00719	1551,144812	1532,833548	1536,069159	1538,980883
17	902,0295	1531,116874	1533,045911	1536,003225	1539,07806	1541,951576	1545,117032	1548,007	1551,145144	1532,834142	1536,069288	1538,980213
18	962,1648	1531,116167	1533,045811	1536,002582	1539,078861	1541,951954	1545,117198	1548,006808	1551,144272	1532,833741	1536,068432	1538,980603
19	1022,3	1531,116879	1533,045985	1536,002884	1539,076942	1541,951983	1545,11734	1548,007091	1551,144323	1532,833823	1536,068847	1538,980957
20	1082,435	1531,117197	1533,04635	1536,003453	1539,076775	1541,951543	1545,11702	1548,007937	1551,144979	1532,83476	1536,068909	1538,980751
21	1142,571	1531,116777	1533,045966	1536,00305	1539,076535	1541,951135	1545,11699	1548,007332	1551,14455	1532,83401	1536,0692	1538,980668
22	1202,706	1531,116622	1533,045349	1536,00261	1539,076858	1541,951358	1545,1169	1548,006469	1551,143876	1532,833189	1536,06866	1538,98083
23	1262,841	1531,117093	1533,045638	1536,002982	1539,076569	1541,951471	1545,117098	1548,007081	1551,144113	1532,833522	1536,06889	1538,980675
24	1322,977	1531,116819	1533,04528	1536,003183	1539,078073	1541,951679	1545,117038	1548,006995	1551,143765	1532,83348	1536,06895	1538,979898
25	1383,112	1531,116719	1533,045422	1536,002815	1539,076179	1541,951574	1545,116632	1548,006627	1551,143906	1532,833342	1536,068875	1538,979909
26	1443,247	1531,116771	1533,045828	1536,002696	1539,076164	1541,951597	1545,116897	1548,007382	1551,14395	1532,833708	1536,068948	1538,980125
27	1503,383	1531,116615	1533,045534	1536,00261	1539,076563	1541,951289	1545,116557	1548,006851	1551,143839	1532,833268	1536,068585	1538,980511
28	1563,518	1531,116625	1533,045856	1536,002975	1539,076398	1541,951389	1545,11631	1548,007081	1551,143533	1532,833543	1536,068635	1538,980151
29	1623,653	1531,116704	1533,04551	1536,002631	1539,076647	1541,951675	1545,116723	1548,006462	1551,143274	1532,833247	1536,068505	1538,980612
30	1683,788	1531,116946	1533,045568	1536,002762	1539,075979	1541,951114	1545,117023	1548,006832	1551,143708	1532,833621	1536,068615	1538,980441
31	1743,924	1531,116813	1533,045016	1536,002498	1539,076233	1541,951296	1545,117044	1548,007155	1551,143945	1532,833766	1536,068304	1538,980029
32	1804,059	1531,117096	1533,045671	1536,002636	1539,078813	1541,951613	1545,11685	1548,007171	1551,143916	1532,833796	1536,068887	1538,980402
33	1864,194	1531,117277	1533,045378	1536,003138	1539,07656	1541,951285	1545,117057	1548,006914	1551,144043	1532,833459	1536,069317	1538,980227
34	1924,33	1531,117328	1533,046079	1536,002818	1539,076625	1541,951307	1545,116759	1548,006942	1551,144258	1532,833671	1536,06887	1538,98089
35	1984,465	1531,117492	1533,045178	1536,002635	1539,076209	1541,951232	1545,116705	1548,006638	1551,14372	1532,83355	1536,068476	1538,980078
36	2044,6	1531,117568	1533,045601	1536,003057	1539,076545	1541,951488	1545,116962	1548,007105	1551,14395	1532,833611	1536,069015	1538,980466
37	2104,736	1531,117237	1533,045798	1536,002839	1539,07622	1541,951478	1545,1169	1548,006547	1551,143984	1532,833682	1536,068564	1538,980174
38	2164,871	1531,116879	1533,045275	1536,002687	1539,075949	1541,950979	1545,116448	1548,006782	1551,143947	1532,833475	1536,068432	1538,979887
39	2225,006	1531,117202	1533,045161	1536,003156	1539,07643	1541,950987	1545,116905	1548,006459	1551,1442	1532,83354	1536,068941	1538,980314
40	2285,142	1531,117832	1533,045166	1536,00288	1539,076809	1541,951163	1545,1169	1548,006885	1551,14405	1532,833031	1536,068742	1538,980425

Figura 82. ΔL acquisite dai 28 sensori incollati sulle 4 piastre e dal sensore di temperatura FBG

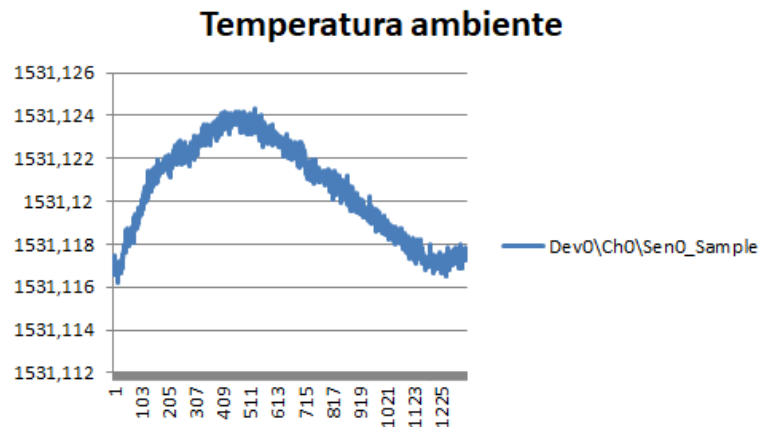


Figura 83. ΔL del sensore FBG che rileva la temperatura ambiente

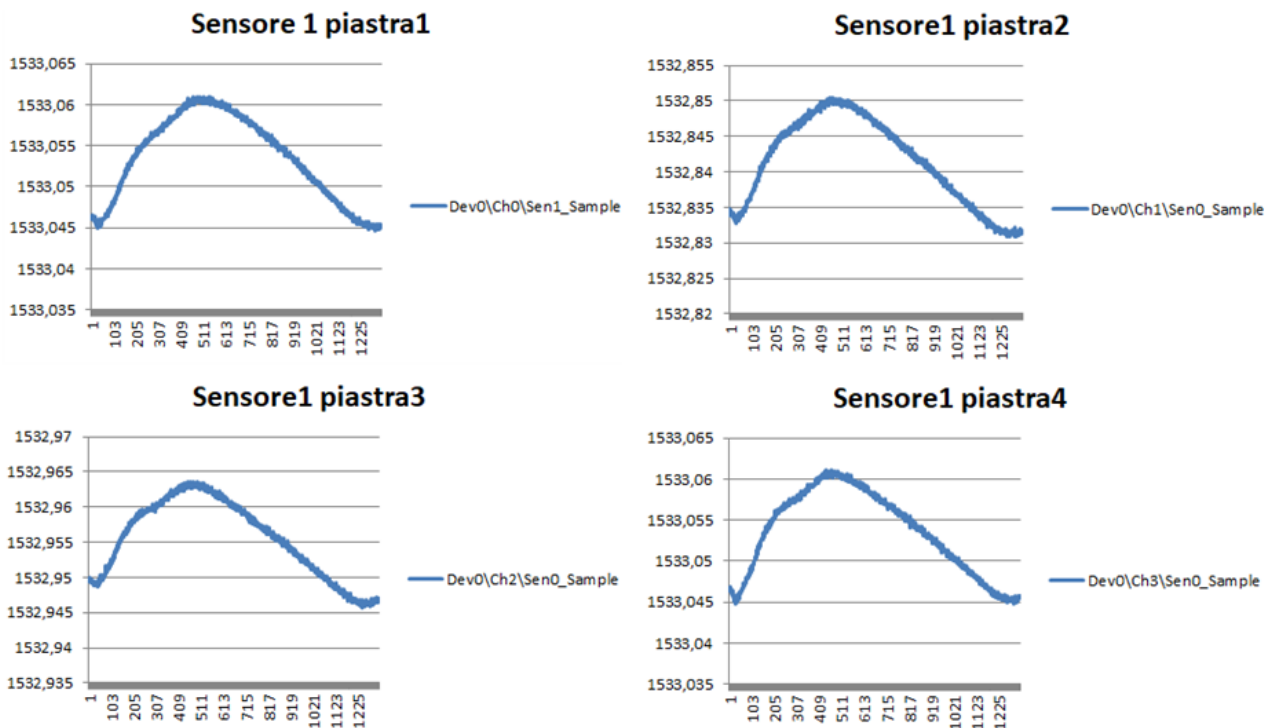


Figura 84. variazioni della lunghezza d'onda in funzione del tempo

Una seconda fase dei test ha riguardato il collegamento di ogni singola piastra con il kit elettronico scheda + interrogatore I-MON Ibsen e sorgente luminosa esterna. In Figura 85 sono visibili la sorgente esterna collegata sia alla piastra sensorizzata che al kit elettronico ed il pc che gestisce sia l'elettronica del sistema tramite un software di test realizzato dal partner Takius e sia la potenza della sorgente esterna.



Figura 85. test con kit Takius

Nell'interfaccia grafica del software che gestisce l'elettronica viene visualizzato il grafico spettrale che indica la potenza luminosa rilavata da ogni pixel. Nell'interfaccia è presente un checkbox 'raw data' che permette di visualizzare i dati raw provenienti dai sensori, i valori salvati indicano l'intensità del segnale luminoso su ciascun pixel del sensore CCD dell'interrogatore, mentre se è disabilitato viene visualizzato un grafico in cui è riportata la posizione del picco luminoso sul CCD, calcolata come centroide dello spettro di ciascuno; tale calcolo si basa su un algoritmo del tipo 'center of gravity' senza interpolazione.

Altri parametri su cui è possibile intervenire sono lo *slide* dell'“*integration time*” che indica i microsecondi di esposizione dei recettori sensibili alla luce, ed il *checkbox* dell'“*high sensitivity*”, che rende molto più sensibili i ricettori stessi.

Il software è in grado di registrare i dati inserendo un nome file nella sezione in basso una volta premuto il pulsante start. In questa operazione viene prodotto un file di tipo .csv con il nome scelto unito alla data e l'ora di esecuzione, per ogni riga viene scritto un UTC *timestamp* in millisecondi, nel caso di dati ‘raw’ seguiranno tutti i valori rilevati, mentre nel caso di dati sintetici (algoritmo del centroide) solo la posizione (compresa di valori decimali) dei *pixel* dei centroidi rilevati.

Sono stati effettuati pertanto numerosi test per la scelta della potenza ottimale della sorgente e del più opportuno tempo di integrazione abilitando e disabilitando il check ‘raw data’.

In Figura 86 è riportato il grafico degli spettri relativi ai 7 sensori collegati su una piastra una volta fissata la potenza della sorgente a 2 mW ed il tempo di integrazione in 13 microsecondi in condizione di *no raw data*.

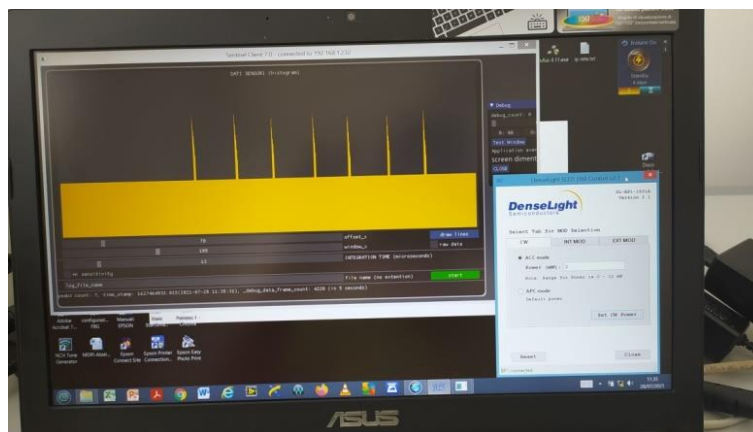


Figura 86. test su piastra1 con potenza pari a 2 mW

Sono stati effettuati numerosi test sia nella condizione a riposo della piastra che sia sotto sollecitazione in punti noti per rilevare la variazione di intensità dei picchi dei sensori interessati dalla sollecitazione.

Nella Figura 87, ad esempio, è visibile lo spettro dei 7 sensori dopo una sollecitazione tra il 3 e il 4 sensore, come si può vedere l'intensità del 3 e del 4 picco è aumentata, ma si può notare anche la presenza di due doppi picchi. Questo problema del picco doppio, probabilmente dovuto alla saturazione dei sensori sollecitati, è stato risolto riducendo la potenza luminosa a 1 mW.

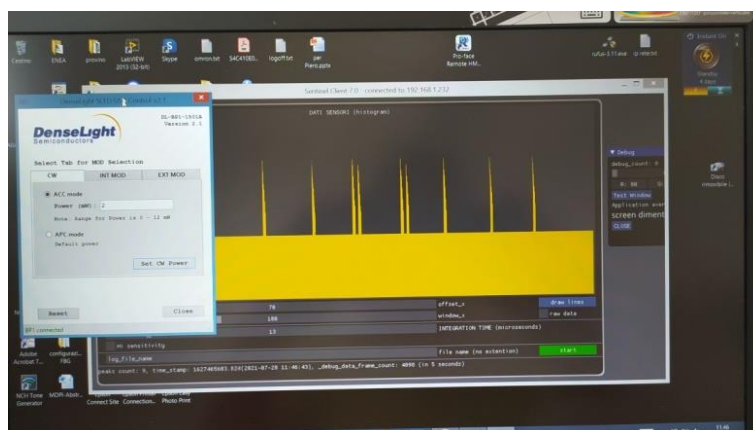


Figura 87. test su piastra1 sollecitata

4.2. Installazione del sistema

La realizzazione del dimostratore ha richiesto le seguenti lavorazioni in situ:

1. taglio dell'asfalto;
2. scavo;
3. compattazione del fondo dello scavo al fine di ricompattare il materiale costituente il corpo stradale;
4. posizionamento dei 3 elementi prefabbricati in calcestruzzo di supporto alle piastre;
5. posizionamento e ancoraggio, mediante tasselli e piastre di ancoraggio, delle 3 piastre d'acciaio sensorizzate, sugli elementi prefabbricati. Tra gli elementi prefabbricati e le piastre in acciaio sono stati posizionati 6 pezzi di gomma neoprene (Figura 88).
6. passaggio dei cavi in fibra ottica fino all'edificio adiacente e scavo di un canale per lo scolo dell'acqua piovana.
7. rifacimento di piccoli ripristini di asfalto in adiacenza alle piastre di raccordo con l'asfalto esistente, per evitare discontinuità nel manto stradale che potrebbero inficiare la misura (Figura 89).



Figura 88. movimentazione piastre



Figura 89. a) posizionamento piastre, b) passaggio cavi collegamento ottico, c) ripristino asfalto

La fase successiva ha riguardato la realizzazione dei collegamenti ottici esterni ed interni tramite giuntatrice *Fujikura FSM-60S*. Pertanto, sono stati posizionati due box, uno esterno ancorato ad un palo elettrico in prossimità delle piastre e uno interno in un edificio adiacente alle piastre insieme al resto della strumentazione necessaria per l'acquisizione dei dati relativi ai transiti controllati sulle piastre (Figura 90). I cavi sono stati poi collegati ad un interrogatore ottico da banco *PXIe-4844 National Instruments* per la verifica del corretto collegamento dei cavi in fibra ottica ai sensori incollati sulle piastre (Figura 91).

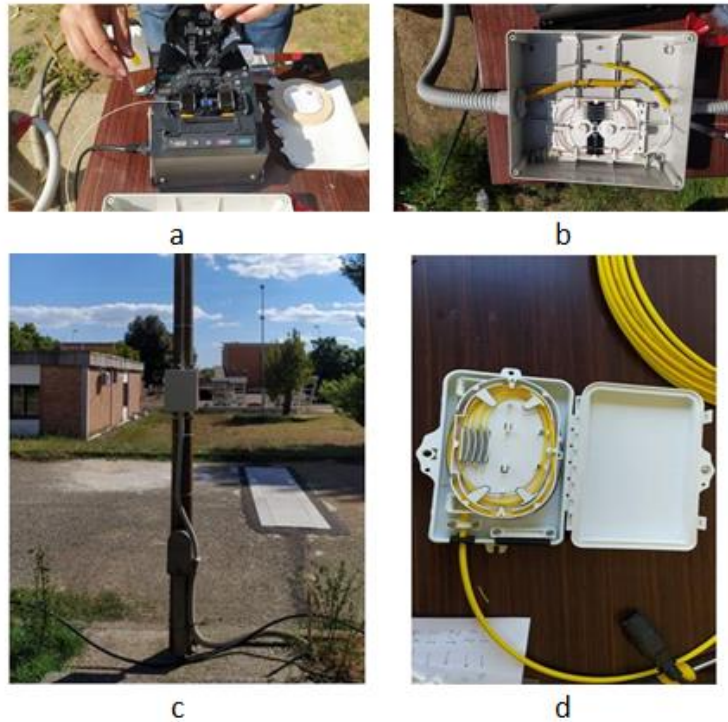


Figura 90. a) giuntatrice Fujikura FSM-60S, b) collegamenti ottici esterni, c) posizionamento box esterno, d) box interno.

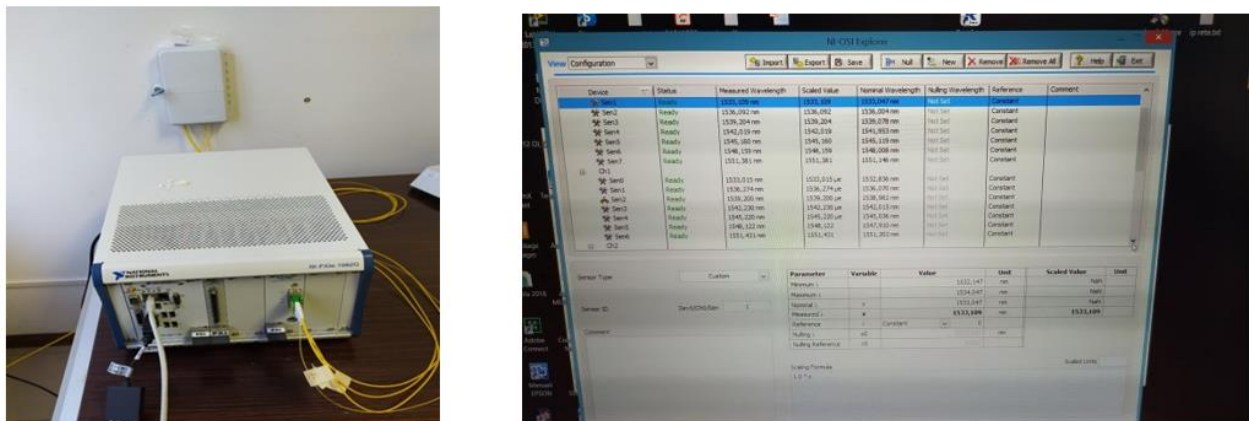


Figura 91. posizionamento box interno (sx) e verifica collegamenti con interrogatore ottico (dx)

Durante l'installazione del sito dimostratore nel C.R. ENEA Trisaia è stata validata la procedura di incollaggio dei sensori sulle piastre in quanto la stessa ha confermato ottime caratteristiche di affidabilità e ripetibilità. Sono emerse però criticità che meritano azioni correttive da apportare in un'eventuale futura installazione. Le criticità sono:

- difficoltà di movimentazione e posizionamento preciso delle piastre a causa del peso elevato;

- difficoltà di montaggio delle piastre di ancoraggio e dei piatti di collegamento in quanto le tolleranze meccaniche richieste sono molto più basse delle tolleranze delle lavorazioni edili: sono sufficienti pochi millimetri di disallineamento dei fori per impedire il montaggio corretto sia delle piastre di ancoraggio che dei piatti di collegamento;
- impossibilità di rimozione di una piastra per manutenzione se non tagliando la fibra e poi risaldandola;
- superficie liscia delle piastre probabile causa di scivolamento dei veicoli a velocità elevata.

Sono state proposte e validate pertanto azioni correttive, di seguito riportate:

- dotare le piastre di opportuni fori (2 per piastra) per potervi avvitare appositi golfari nel momento dell'installazione e quando si renderà necessaria la rimozione della piastra per operazioni di manutenzione o altri interventi;
- eliminare i piatti di collegamento, in quanto nei test di transiti effettuati nel C.R. ENEA Trisaia si è sperimentato che non influiscono sull'accuratezza della misura;
- realizzare in officina un unico manufatto costituito da base e piastra in modo da far allineare i fori in maniera precisa con i fori delle barre di ancoraggio. Tale soluzione è preferibile anche perché riduce i tempi di installazione;
- dotare i cavi direttamente collegati ai sensori ottici di connettori in modo da facilitare eventuali sostituzioni delle piastre;
- lavorare la superficie delle piastre con un procedimento di zigrinatura per dotare le stesse di un profilo antiscivolo.

L'attività successiva ha riguardato l'installazione e la configurazione di una telecamera *Tattile modello Vega-Smart 2HD* in prossimità delle piastre per permettere l'individuazione dei veicoli pesanti in transito mediante il riconoscimento della targa (ANPR - *Automatic Number Plate Reader*) e il rilevamento della velocità (Figura 92).



a



b



c

Figura 92. a) telecamera, b) posizione piastre e telecamera c) immagine restituita dalla telecamera

4.3. Testing del sistema in ambiente esterno controllato

Infine, si è passati alla fase di test tramite transiti controllati di veicoli pesanti, in particolare camion di diversa categoria e peso. Tutti i veicoli sono stati preliminarmente pesati mediante un sistema di pesatura statica, portatile, perfettamente autonomo grazie al funzionamento con batterie di lunga durata, costituito da piattaforme *wireless* pesa-ruote e pesa-assi, dotato di omologazione CE-M.

In Figura 93 è riportata, come esempio, la stampa di una pesatura statica relativa ad un camion a 3 assi il cui peso è circa 31t. Il software di pesatura è in grado di fornire oltre il peso totale anche il peso relativo al singolo asse e alla singola ruota, informazioni necessarie per la successiva validazione della pesatura dinamica (Figura 94).

08/10/21 09:41		
RUOTA 1	as	4150kg
RUOTA 2	ad	4275kg
AXLE 1		8425kg
RUOTA 3	ps	5395kg
RUOTA 4	pd	6050kg
AXLE 2		11445kg
RUOTA 5	pps	5365kg
RUOTA 6	ppd	5925kg
AXLE 3		11290kg

LORDO		31150kg
TARA		0kg
NETTO		31150kg

Figura 93. stampa di una pesatura statica



Figura 94. pesatura statica di alcuni veicoli pesanti utilizzati per i transiti

I camion utilizzati per effettuare i transiti controllati sulle piastre installate nel sito del C.R. ENEA Trisaia avevano le seguenti caratteristiche di categoria e peso: 10t 2 assi, 31t 3 assi, 43t 4 assi.

I dati relativi ai transiti controllati di veicoli pesanti sono stati acquisiti dai sensori FBG incollati sulle piastre con diversi interrogatori ottici, in modo da effettuare una calibrazione del segnale acquisito. Sono stati eseguiti primi test con due interrogatori ottici da banco, il *Micron Optics SM130* a 4 canali con frequenza di acquisizione pari a 1 KHz e l'*HBM FS22* sempre a 4 canali e a 1 KHz di frequenza (Figura 95). L'interrogatore *Micron Optics sm130* è basato sulla tecnologia a sorgente ottica accordabile (*swept laser*). La sorgente laser scansiona l'intervallo di lunghezze d'onda 1510-1590 nm in un range dell'ordine di grandezza dei microsecondi. Il numero massimo di sensori FBG collegabili all'interrogatore è pari a 80 per ciascuno dei 4 canali presenti. L'interrogatore è espandibile mediante un multiplexer a 16 canali in modo da aumentare il numero di sensori interrogabili. La massima frequenza di campionamento è pari a 1kHz con risoluzione di 1pm. Questo interrogatore integra un PC industriale (dotato di interfacce di comunicazione USB, Ethernet, VGA, ecc.), una sorgente laser di alta potenza e basso rumore e analizzatore del segnale ottico di sensori FBG. Questo permette di effettuare con un solo modulo sia misure dinamiche che statiche con alta risoluzione [22].

L'interrogatore ottico *HBM BraggMETER FS22* [23] è utilizzato per misurazioni ottiche sia statiche che dinamiche di sensori FBG in ambienti industriali. Può operare con un *sampling rate* da 1S/s fino a 1000

S/s a seconda del modello. Gli interrogatori *HBM BraggMETER* sono specifici per misurare grandi reti di sensori, in applicazioni su grandi distanze con alta qualità e affidabilità.



Figura 95. Micron Optics (a sinistra) e HBM (a destra)

In una seconda fase l'acquisizione delle deformazioni subite dai sensori FBG al passaggio dei veicoli pesanti è avvenuta con interrogatori ottici *I-MON Ibsen*, uno per ogni piastra installata; questo sia per calibrare i dati acquisiti da diversi interrogatori ottici e sia per mettere a punto gli algoritmi necessari per arrivare poi alla determinazione dinamica del peso dei veicoli pesanti (Figura 96).



Figura 96. strumentazione di acquisizione e controllo

Le prove di transito sono state definite secondo un protocollo ben definito: in una prima fase sono state effettuate, per ogni camion, prove statiche controllate iniziando con lo stazionamento sulle piastre dei diversi assi, disponendo le ruote del mezzo a una certa distanza, parallelamente al bordo della prima piastra, e incrementandola poi a *step* prestabiliti in modo tale da interessare, con il peso del veicolo, tutti i sensori installati sulle piastre e rilevarne le diverse deformazioni misurate (Figura 97).

Si è passati poi alle prove dinamiche controllate utilizzando mezzi pesanti di peso diverso. I transiti avvenivano con le ruote che interessavano diversi punti noti delle piastre, individuati misurando la posizione dell'impronta dello pneumatico sulle piastre stesse rispetto al bordo. Ripetute prove sono

state effettuate al variare del senso di marcia dei camion sulle piastre e al variare della velocità (20 km/h-40 km/h), in modo tale da accumulare una quantità di dati sufficiente per rendere indipendente dalla velocità e dalla posizione di transito il valore finale della pesatura dinamica.



Figura 97. transito sulle piastre di un camion a 4 assi

Si riporta di seguito un esempio di acquisizione di due transiti successivi di un camion a 4 assi sulle 3 piastre. Sono riportati sulle ordinate le deformazioni rilevate dai sensori e sulle ascisse la base dei tempi relativa all'acquisizione. Il primo transito ha interessato, come indicato nel grafico, tutte e 3 le piastre, passando con una ruota sulla zona di confine tra le prime due piastre e con l'altra sulla terza piastra; mentre il secondo transito è avvenuto con una ruota sulla seconda piastra e una sulla terza (Figura 98).

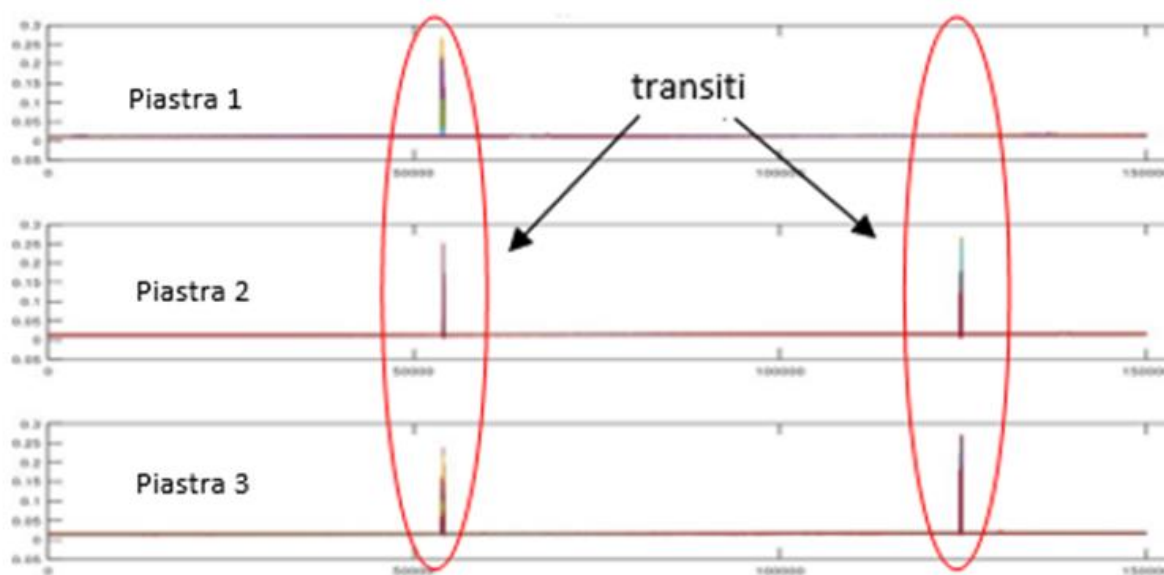


Figura 98. esempio di transito di un camion a 4 assi

Elaborando il segnale, mediante il software Octave, e considerando solo l'arco temporale relativo al secondo transito si è potuto risalire alle singole deformazioni subite da tutti i sensori posizionati sotto le piastre. Come si può vedere dalla Figura 99 in cui è riportata l'esatta posizione di transito delle ruote

del camion, i sensori immediatamente vicini alle ruote subiscono una deformazione maggiore rispetto agli altri sensori più lontani. Dal grafico si evidenziano 4 gruppi di 7 deformazioni ciascuna, una per ogni sensore, e rappresentano le deformazioni subite dai sensori in conseguenza del transito dei 4 assi del veicolo sulle piastre.

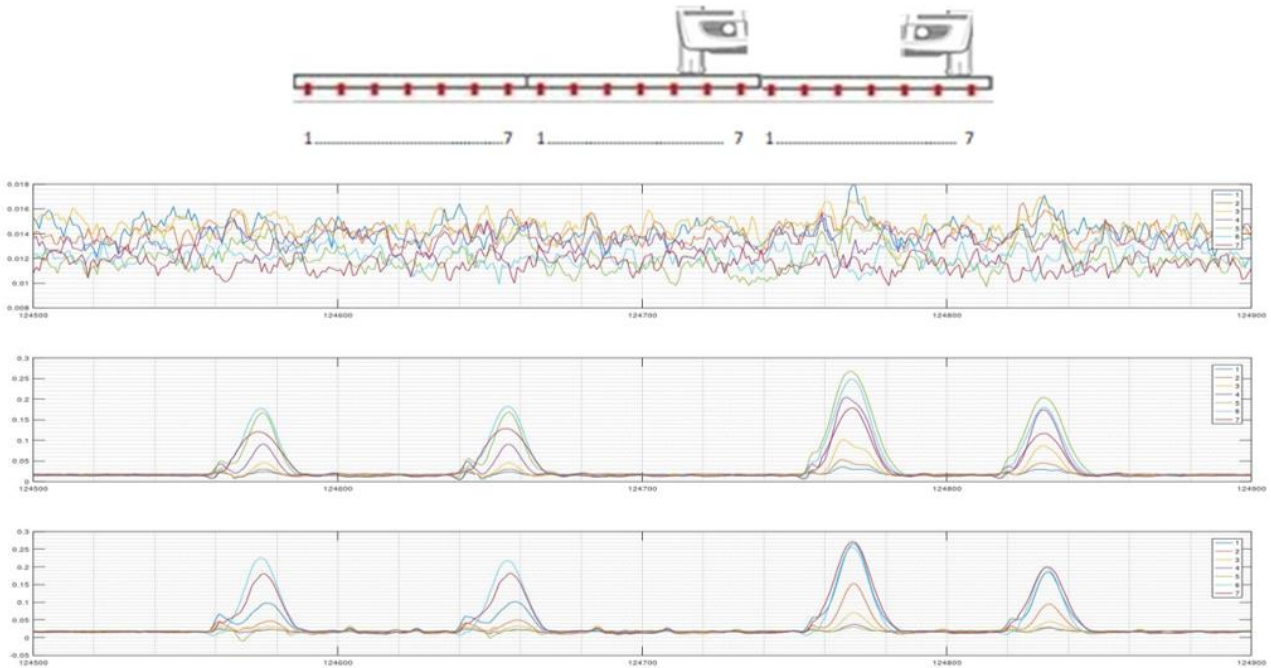


Figura 99. esempio di transito (in alto) - deformazioni subite dai sensori (in basso)

In Figura 100 è riportato un esempio di output del sistema WIM realizzato, con l'immagine scattata dalla telecamera con il riconoscimento della targa del veicolo pesante che transita sulle piastre, i dati del veicolo (targa, velocità, classe, corsie interessate) con il peso dinamico rilevato e infine l'ampiezza dei picchi relativi ai due assi del veicolo.



Figura 100. immagine telecamera (sx) dati e peso veicolo (centro) rilevazione assi del veicolo (dx)

CONCLUSIONI

L'obiettivo di ENEA, nell'ambito del Progetto SENTINEL, era quello di verificare l'applicabilità di sensori FBG ad un sistema smart in grado di monitorare il transito di veicoli pesanti e di calcolare il peso del veicolo tramite una pesatura dinamica.

A tal fine, sono state effettuate prove in laboratorio di caratterizzazione, secondo normativa, sia a trazione che a flessione, di provini in acciaio strumentati con sensori FBG in *acrilato recoating* in *acrilato* e in *acrilato recoating poliammide*. I provini successivamente sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento accelerato in camera climatica per valutare gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla durabilità della resina e dei sensori stessi. Alla fine delle prove di *aging* accelerato i provini sono stati nuovamente sottoposti a prove di trazione e flessione per valutare la tenuta della resina e se sono ancora in grado di darci misure affidabili di deformazione.

Dal confronto tra l'andamento delle deformazioni acquisite prima e dopo l'*aging*, la risposta migliore alle sollecitazioni ricevute risulta essere, sia durante le prove di trazione che di flessione, quella del sensore in *poliammide* rispetto al sensore in *acrilato*. Comunque, per tutti i sensori non si notano particolari differenze delle deformazioni acquisite al variare del carico applicato, tra l'andamento, pre e post cicli di *aging*. Pertanto, possono essere considerati minimi gli effetti della temperatura e dell'umidità sulla durabilità della colla e dei sensori stessi, almeno per il periodo di invecchiamento studiato, pari a 5 anni. Quindi, in queste situazioni di monitoraggio continuo, la tenuta del sensore rivestito in poliammide sarà assicurata nel tempo e non sarà compromessa dall'invecchiamento dei materiali e da situazioni ambientali sfavorevoli. Questo dato è un'ulteriore conferma sulla scelta fatta per l'utilizzo di questi sensori come parte attiva del sistema di *sensing* per il sistema WIM nel Progetto SENTINEL e visti i dati acquisiti ed elaborati durante questa attività di sperimentazione in laboratorio, i sensori in *poliammide* si fanno preferire ai sensori in *acrilato* sia per capacità di adesione alla resina e sia per mantenimento nel tempo di questa capacità.

La definizione di algoritmi di processamento del segnale in tempo reale è di fondamentale rilevanza per la valutazione del peso del veicolo in transito e su questo si è concentrata la seconda attività di ENEA. Pertanto, è stato implementato un algoritmo per il calcolo del peso dinamico a partire dall'individuazione dei valori massimi delle flessioni, rilevate dai sensori FBG, che sarà successivamente implementato sull'interrogatore ottico con controllore sviluppato nell'ambito del Progetto SENTINEL. Il processamento del segnale per la valutazione del peso è stato preceduto dalla decodifica del segnale ottico prodotto dai sensori FBG applicati alla piastra e sono stati riportati i risultati dell'implementazione della procedura 'baricentrica' per il calcolo del valore del picco.

L'attività ENEA si è conclusa con l'effettuazione di test di transito reali di veicoli pesanti e i risultati conseguiti, descritti in conclusione del rapporto tecnico, dimostrano l'efficacia del sistema realizzato nel C.R. ENEA Trisaia, in grado di monitorare il traffico di veicoli pesanti e determinare il peso dinamico dei veicoli in transito. L'intero sistema realizzato è pronto per essere replicato in futuro in altri siti, seppur con l'apporto di alcune azioni correttive, in special modo riguardanti l'installazione delle piastre strumentate nell'asfalto. Il maggior numero di veicoli, dal peso noto, transitanti sulle piastre installate a diverse velocità ci permetterà poi di raffinare gli algoritmi implementati per il calcolo del peso dinamico, il tutto indirizzato ad una possibile futura omologazione dell'intero sistema WIM realizzato.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. <https://www.is-wim.net/what-is-wim/introduction/different-types-of-weighing-in-motion/>
- [2]. <http://erap.it/quintatien/fibreottiche.htm>
- [3]. <https://ilTechnologico.it/settori-produttivi/le-fibre-delle-meraviglie.html>
- [4]. A. Batenko, A. Grakovski, I. Kabashkin, E. Petersons e Y. Sikerzhicki, *Weight-in-motion (WIM), measurements by fiber optic sensor: Problems and solutions*, Transport and Telecommunication, Volume 12, No 4, 2011
- [5]. A. Méndez, T. Graver, *Overview of fiber optic sensors for NDT applications*, IV NDT Panamerican Conference Buenos Aires-October 2007 – NDT.net Issue: 2007-11
- [6]. L. Y. Mimbela, J. Pate, S. Copeland, P. M. Kent, J. Hamrick, *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
- [7]. S.J. Grice, *Optical fibre sensors and their applications in the industrial weighing & aerospace industries*, Aston University, luglio 2010
- [8]. T. Erdogan, *Fiber Grating Spectra*. In: Journal of Lightwave Technology 8 (1997)
- [9]. G. Chartier, *Introduction to Optics*. New York: Springer, 2005
- [10]. R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, CA: Academic Press, 1999
- [11]. 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
- [12]. T. Tiess, C. Chojetzki, M. Rothhardt, M. Jäger, H. O. Bartelt, *Fiber-integrated concept to electrically tune pulsed fiber lasers based on step-chirped fiber Bragg grating arrays*, Optics Express, luglio 2015, DOI: 10.1364/OE.23.019634
- [13]. R. Donà, A. Zoccoli P. Boccaccio, *Proposta dell'esperimento FIBRAGG (Fiber BRAGg Grating)*, INFN Bologna – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sezione di Bologna, 2009
- [14]. <https://webstore.iec.ch/>
- [15]. M. Kreuzer, *Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors*, www.micronoptics.ru, 2013
- [16]. P. V. Raja Shekar, D. Madhavi Latha, Kusum Kumari, V. G. K. M. Pisipati, *Optimal parameters for fiber Bragg gratings for sensing applications: a spectral study*, SN Applied Sciences, maggio 2021
- [17]. A. Mendez, *FBG-Based Sensors*, Winter College on Fibre Optics, Fibre Lasers and Sensors (ICTP), Trieste, febbraio 2007
- [18]. N. C. Pistoni, *Sensori a fibra ottica a reticolo di Bragg: caratteristiche ed applicazioni*, Pavia, dicembre 2006
- [19]. D. Tosi, *Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors*, Sensors, ottobre 2017
- [20]. <https://ibsen.com/>
- [21]. <https://www.ni.com/it-it.html>
- [22]. <http://www.micronoptics.ru/>
- [23]. <https://www.hbm.com/>

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
giugno 2024