



POLITECNICO DI MILANO
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI
UNA STRUTTURA DINAMOMETRICA IN
MATERIALE COMPOSITO BASATA SU
SENSORI A FIBRA OTTICA**

Relatore

Dott. Ing. Stefano MANZONI

Correlatore

Dott. Ing. Marco BELLOLI
Prof. Andrea BERNASCONI

Tesi di laurea di

Marco BOROTTO matricola 720621

Enrico de CAIS matricola 725704

Anno Accademico 2009/2010

RINGRAZIAMENTI:

*I nostri più sentiti ringraziamenti vanno ai Prof. Stefano Manzoni,
Marco Belloli e Andrea Bernasconi
che ci hanno seguito durante la realizzazione del lavoro,
alle nostre famiglie,
alle fidanzate che ci hanno sopportato e speriamo lo facciano ancora,
agli amici che ci hanno seguito negli studi,
agli amici che ci hanno seguito al di fuori di quel di Bovisa,
e a noi stessi, che, a dirla tutta, ce lo meritiamo dopo tutti questi anni.*

INDICE

INTRODUZIONE	1
ABSTRACT	3
1 SENSORI A FIBRA OTTICA: STATO DELL'ARTE	5
1.1 Introduzione sulle fibre ottiche	5
1.1.1 Breve storia delle fibre ottiche	5
1.2 Costituzione delle fibre ottiche	5
1.2.1 Funzionamento	7
1.3 Sensore ottico a reticolo di Bragg	8
1.3.1 Caratteristiche delle fibre ottiche a reticolo di Bragg	8
1.3.2 Funzionamento dei Fiber Bragg Grating Sensors (FBGS)	10
1.3.3 Compensazione della temperatura	17
1.3.4 Metodi di scrittura del reticolo di Bragg nella fibra ottica	19
1.4 Vantaggi dell'integrazione di fibre ottiche nei materiali compositi	21
1.5 Considerazioni sull'integrazione dei sensori a fibra ottica	22
1.5.1 Orientamento e disposizione dei sensori a fibra ottica annegati nel materiale composito	22
1.5.2 Influenza delle fibre ottiche annegate nel materiale composito	22
1.5.3 Interfaccia sensore/materiale composito e resistenza a fatica	23
1.6 Sensori a fibra ottica integrati in strutture	24
1.6.1 Funzionamento delle fibre	24
1.6.2 Effetti di carichi e deformazioni trasversali sui FBGS	25
1.6.3 Carichi longitudinali e trasversali in un laminato in materiale composito	26
1.7 Sensibilità alla temperatura e deformazione apparente	29
1.7.1 Misurazione delle deformazioni residue	33
1.7.2 Prove a carichi unidirezionali e risposta dei sensori FBG annegati	34
1.8 Effetto di carichi puramente trasversali e della temperatura	36
1.9 Sviluppi della ricerca	38
2 CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA	39
2.1 Introduzione	39
2.2 Spettro dei sensori a riposo	43
2.3 Prove statiche	49
2.3.1 Prove condotte in forno	52
2.3.2 Prove condotte in frigo	67

2.3.3	Prove condotte in freezer	73
2.4	Conclusioni prove statiche	75
2.5	Prove dinamiche	78
2.5.1	Collegamenti di fibre ottiche ed estensimetri	78
2.5.2	Calcolo della sensibilità trasversale	84
2.5.3	Definizione delle prove dinamiche	88
2.6	Risultati per le prove con i sensori longitudinali	90
2.6.1	Metodo di analisi utilizzato	90
2.6.2	Risultati	101
2.6.3	Conclusioni delle prove dinamiche	109
2.7	Confronto fibre-estensimetri in termini di rumore di fondo	111
2.8	Abbattimento del rumore di fondo	112
2.9	Calcolo della PSD per le prove dinamiche	115
3	INTEGRAZIONE DEI SENSORI IN FIBRA OTTICA NEL MATE- RIALE COMPOSITO	117
3.1	Definizione dei provini in fibra di carbonio	117
3.1.1	Descrizione dei FBGS da integrazione	118
3.1.2	Scelta del materiale composito da utilizzare	120
3.1.3	Scelta delle tipologie di prove da effettuare	122
3.1.4	Provino per prove a flessione	122
3.1.5	Provino per prove a trazione	126
3.1.6	Costruzione del telaio per le prove flessionali	128
3.2	Integrazione dei sensori in fibra ottica nel materiale composito	131
3.3	Ciclo di curing	133
3.4	Monitoraggio degli spettri riflessi dei FBGS inglobati nel materiale composito	136
3.4.1	Analisi degli spettri dei FBGS integrati in materiale composito durante il processo di curing	136
3.5	Conclusioni sull'integrazione dei FBGS in materiale composito	142
4	RISULTATI PER I SENSORI INTEGRATI	145
4.1	Introduzione	145
4.2	Descrizione preliminare della prova	145
4.2.1	Provino a flessione	146
4.2.2	Provino a trazione	148
4.3	Prove dinamiche	149
4.3.1	Risultati delle prove a flessione	150
4.3.2	Risultati delle prove a trazione	152
4.4	Conclusioni delle prove con sensori a fibra ottica integrati	154
	CONCLUSIONI	155
	BIBLIOGRAFIA	159

ELENCO DELLE FIGURE

1.1	Fibra ottica single mode	6
1.2	Fibra ottica single e multi mode	6
1.3	Funzionamento fibra ottica	8
1.4	Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi in una fibra ottica	8
1.5	Funzionamento di un Fiber Bragg Gratin Sensor (FBGS)	11
1.6	Riflessione delle frange del reticolo di Bragg	11
1.7	Riflessione calcolata e normalizzata di un reticolo di Bragg a bassa riflessione ($< 20\%$ di riflessione) di 6 mm e con una lunghezza d'onda riflessa pari a $\lambda = 1550$ nm	12
1.8	Stessa funzione della Figura(1.7) ma con l'asse Y logaritmico	13
1.9	Reticolo di Bragg (15% di riflessione) misurato	14
1.10	Shift del picco del sensore a fibra di Bragg a seguito di una deformazione	15
1.11	Reticolo di Bragg scritto con un laser ed a phase mask	19
1.12	Reticolo di Bragg prodotto "on the fly"	20
1.13	Picchi riflessi di un FBGS ad alta riflessione (sinistra) e bassa riflessione (destra)	21
1.14	"resin-eye" causato da una fibra ottica disposta perpendicolarmente a due strati di rinforzo collineari tra di loro	23
1.15	Comportamento ideale di un FBGS incollato sulla superficie di una trave in alluminio: a trave scarica (picco di sinistra) e con trave soggetta ad uno sforzo longitudinale (picco di destra)	24
1.16	Spettro di un FBGS annegato in un laminato in materiale composito unidirezionale vicino ad un giunto: in assenza di carico (spettro di destra) e sottoposto ad un carico non longitudinale (spettro di sinistra)	25
1.17	Schema dell'esperimento effettuato per i carichi trasversali sulla fibra con reticolo di Bragg	26
1.18	Variazione della lunghezza d'onda dei picchi dei due sensori sottoposti a un carico trasversale di compressione	26
1.19	Schema del provino	27
1.20	Andamento della temperatura e della lunghezza d'onda del FBGS durante il processo di curing	28
1.21	Andamento della lunghezza d'onda di Bragg λ al variare della temperatura durante il processo di curing	28
1.22	Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) GF/E-1, (b) GF/E-2, (c) GF/E-3, (d) GF/E-4	30

1.23	Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) CF/E-1, (b) CF/E-2	30
1.24	Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) FML-1, (b) FML-2, (c) FML-3	31
1.25	Deformazione della regione del sensore da parte delle fibre di rinforzo degli strati adiacenti	31
1.26	Sensore FBG annidiato nella direzione delle fibre di rinforzo a 0°	32
1.27	Stima delle deformazioni residue	33
1.28	Grafico del singolo picco per i provini (a) GF/E-1, (b) GF/E-3	34
1.29	Evoluzione dello spettro per il provino GF/E-1	35
1.30	Evoluzione dello spettro per il provino GF/E-3; in particolare si nota il salto di lunghezza d'onda a $147 \mu\epsilon$ e a $1770 \mu\epsilon$	35
1.31	Evoluzione dello spettro del provino GF/E-4 che mostra il cambiamento dello spettro durante l'applicazione dei carichi	35
1.32	Carico trasversale applicato ad una lastra di resina epossidica con annesso un sensore FBG	36
1.33	Variazione della larghezza dello spettro per una prova a carico trasversale in una lastra di resina epossidica	37
1.34	Variazione della larghezza dello spettro ottenuta riscaldando una lastra di resina epossidica	37
1.35	Variazione della larghezza dello spettro per carichi longitudinali per un sensore FBG annesso: (a) variazione del FWHM e (b) variazione del FWQM	37
2.1	Sensore A	40
2.2	Sensore B	41
2.3	Sensore C	42
2.4	Sensori A collegati alla centralina	43
2.5	Sensori A: rilevazione di quattro picchi invece di due	44
2.6	Ingrandimento del picco di sinistra del sensore A: evidenzia la bassa riflessività	44
2.7	Rilevazione di due picchi da parte della centralina	44
2.8	Ingrandimento del picco di destra del sensore A: evidenzia la bassa riflessività	44
2.9	Rilevazione dei picchi da parte della centralina	44
2.10	Ingrandimento del primo picco dei sensori B	45
2.11	Rilevazione di un solo picco da parte della centralina	45
2.12	Ingrandimento del secondo picco dei sensori B	45
2.13	Rilevazione del picco da parte della centralina	45
2.14	Sensori C collegati alla centralina	45
2.15	Sensori C: rilevazione di tre picchi	46
2.16	Ingrandimento del picco di sinistra dei sensori C	46
2.17	Rilevazione di due picchi per il sensore di sinistra di tipo C	46
2.18	Ingrandimento del picco di destra dei sensori C	46
2.19	Rilevazione di un picco per il sensore di destra di tipo C	46
2.20	Centralina Micron Optics sm125 utilizzata per l'acquisizione delle fibre ottiche durante le prove termiche	50
2.21	Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia	52

2.22	Confronto tra le PSD di uno stesso sensore a temperature differenti . . .	53
2.23	Errore di compensazione per i diversi sensori e grafico dell'andamento della temperatura durante la prova	55
2.24	Errore di compensazione dei sensori in funzione della temperatura . . .	56
2.25	Sensibilità alla temperatura per ogni coppia di sensori in funzione della temperatura	57
2.26	Differenza di sensibilità alla temperatura in funzione della temperatura per i sensori analizzati	58
2.27	Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i tre sensori compensati	59
2.28	Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori A . . .	61
2.29	Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori B . . .	62
2.30	Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori C . . .	63
2.31	Confronto tra le PSD dei sensori su finestre temporali a temperatura costante	65
2.32	Confronto tra le PSD di uno stesso sensore a temperature differenti . . .	66
2.33	Andamento della temperatura durante le prove svolte in frigo	67
2.34	Risultati ottenuti con la prova nel frigo per i tre diversi sensori	68
2.35	Errore di compensazione in funzione del tempo e grafico dell'andamento della temperatura durante la prova	69
2.36	Errore di compensazione dei sensori in funzione della temperatura . . .	69
2.37	Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i tre sensori . .	71
2.38	Media viaggiante \pm deviazione standard calcolata su finestre viaggianti di 1 minuto per le diverse coppia di sensori nelle prove in frigo	72
2.39	Confronto tra le PSD dei sensori su una finestra temporale a temperatura costante	73
2.40	Errore di compensazione per i diversi sensori durante la prova in freezer	74
2.41	Confronto tra le PSD su una finestra temporale a temperatura costante	75
2.42	Confronto delle PSD per uno stesso sensore a temperature diverse . . .	77
2.43	Disegno del provino in acciaio	78
2.44	Disposizione dei due provini durante la prova a trazione	79
2.45	Incollaggio sensore A	80
2.46	Incollaggio sensore B	80
2.47	Incollaggio sensore C	80
2.48	Schema a ponte intero	81
2.49	Schema a mezzo ponte	82
2.50	Grafici ottenuti dalla cella di carico, dal ponte e dal mezzo ponte estensimetrico	84
2.51	Configurazione di prova per determinare la sensibilità trasversale delle fibre ottiche	85
2.52	Deformazione misurata dai sensori di tipo A senza considerare la sensibilità trasversale	86
2.53	Deformazione misurata dai sensori di tipo C senza considerare la sensibilità trasversale	87
2.54	Layout delle prove a trazione	89
2.55	Grafici ottenuti dalla cella di carico, dal ponte e dal mezzo ponte estensimetrico	90

2.56	Grafici ottenuti dalla fibra compensatrice, da quella sottoposta a trazione e dal segnale compensato per il sensore A	91
2.57	Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore A	92
2.58	Modulo trasformata di fourier fino a 500 Hz per la cella di carico, il ponte ed il mezzo ponte estensimetrico	93
2.59	Ingrandimento fino a 70 Hz	93
2.60	Modulo trasformata di fourier fino a 500 Hz per le fibre ottiche del sensore A	94
2.61	Ingrandimento fino a 70 Hz	94
2.62	Grafici ottenuti dalla fibra compensatrice, da quella sottoposta a trazione e dal segnale compensato per il sensore B	95
2.63	Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore B	96
2.64	Modulo trasformata di fourier per le fibre del sensore B	97
2.65	Ingrandimento fino a 70 Hz	97
2.66	Grafici ottenuti dalla fibra sottoposta a trazione, da quella compensatrice e dal segnale compensato per il sensore C	98
2.67	Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore C	99
2.68	Rapporto deformazione reale/deformazione misurata riferita al solo sensore C	99
2.69	Modulo trasformata di fourier per le fibre del sensore C	100
2.70	Ingrandimento fino a 70 Hz	100
2.71	Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 0,5 Hz	101
2.72	Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 5 Hz	102
2.73	Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 16 Hz	102
2.74	Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore A a diverse frequenze	104
2.75	Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore B a diverse frequenze	106
2.76	Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore C a diverse frequenze	108
2.77	Confronto a diverse deformazioni e frequenze per ogni sensore analizzato	110
2.78	Risultati ottenuti mediando dieci volte ogni secondo i segnali del ponte, del mezzo ponte estensimetrico e dei sensori a fibra ottica	112
2.79	Abbattimento del rumore di fondo per le fibre ottiche	113
2.80	Abbattimento del rumore di fondo per il ponte estensimetrico intero	114
2.81	Abbattimento del rumore di fondo per il mezzo ponte estensimetrico	114
2.82	Calcolo della PSD fino a 500 Hz	115
3.1	Fibra ottica “nuda”	118
3.2	Andamento della temperatura registrato dalla termocoppia per la caratterizzazione dei sensori D	119
3.3	Errore di compensazione termica per il sensore D	120
3.4	Esempio di struttura sandwich	122
3.5	Provino sottoposto a flessione	123
3.6	Disposizione delle pelli di rinforzo per il provino sottoposto a prove di flessione	124
3.7	Provino sottoposto a flessione	125
3.8	Schema dei collegamenti elettrici del ponte intero estensimetrico	125
3.9	Schema di prova a flessione e relativa disposizione degli estensimetri	125

3.10	Stratifica del provino con 4 pelli di rinforzo trasversale	127
3.11	Barra utilizzata come telaio per le prove flessionali	128
3.12	Assemblato totale per le prove flessionali	129
3.13	Telaio e provino a flessione nella configurazione finale	130
3.14	Particolare delle prove a flessione in cui si evidenzia l'aggancio del telaio alla macchina di prova	130
3.15	Fasi dell'integrazione di un sensore in fibra ottica tra due strati di fibra di carbonio	132
3.16	Temperatura registrata dalla termocoppia durante il ciclo di curing . . .	133
3.17	Esempio di un provino prima del ciclo di curing	135
3.18	Particolare di come la resina contenuta nel materiale composito abbia fatto aderire òla fibra ottica ai fogli distaccanti	135
3.19	Provino per le prove di trazione nella sua configurazione finale	136
3.20	Confronto tra gli spettri dei sensori dei provini per le prove a flessione .	137
3.21	Confronto tra gli spettri dei sensori del provino per le prove a trazione .	138
3.22	Andamento dei picchi del provino a flessione e di quello a trazione durante il ciclo di curing	140
3.23	Andamento degli spettri durante il riscaldamento per il provino a flessione	141
3.24	Andamento degli spettri durante il riscaldamento per il provino a trazione	142
4.1	Schema di prova a flessione e relativa disposizione degli estensimetri . .	146
4.2	Schema elettrico e disposizione degli estensimetri elettrici per le prove a trazione sul provino in materiale composito	148
4.3	Valori dei rapporti tra fibre ottiche ed estensimetri, ottenuti mediante il calcolo dei moduli delle trasformate di Fourier	151
4.4	Valore dei rapporti delle deformazioni misurate dagli sensori ottica in- tegrati nel materiale composito con quelle misurate dagli estensimetri elettrici posti in superficie per la prova a trazione	152

ELENCO DELLE TAVOLE

1.1	Elenco degli esperimenti	29
2.1	Data sheet sensore A	40
2.2	Data sheet sensore B	41
2.3	Data sheet sensore C	42
2.4	Confronto tra i valori dei picchi dei sensori A, B e C	48
2.5	Data sheet della centralina di acquisizione per le fibre ottiche nelle prove termiche	50
2.6	Formule per ricavare il valore di deformazione per i tre diversi tipi di sensori	54
2.7	Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in forno	60
2.8	Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in forno	60
2.9	Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in frigo	70
2.10	Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in frigo	70
2.11	Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in freezer	74
2.12	Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in freezer	74
2.13	Valore medio della deviazione standard per i segnali compensati e per i singoli sensori in tutte le prove svolte	76
2.14	Valori della deformazione trasversale misurati dagli estensimetri elettrici e dal sensore A privo del contributo della sensibilità trasversale	86
2.15	Valori massimi registrati dagli estensimetri ottici di tipo C senza considerare la sensibilità trasversale	88
2.16	Elenco delle prove dinamiche che si vogliono effettuare	88
2.17	Data sheet della centralina di acquisizione per le fibre ottiche nelle prove dinamiche	89
2.18	Confronto dei risultati tra sensore A ed estensimetri	91
2.19	Confronto dei risultati tra sensore B ed estensimetri	96
2.20	Confronto dei risultati tra sensore C ed estensimetri	98
2.21	Prove dinamiche ancora da analizzare	101
2.22	Risultati ottenuti con i sensori A	103
2.23	Risultati ottenuti con i sensori B	105

2.24	Risultati ottenuti con i sensori C	107
2.25	Deformazione minima che ciascun sensore può leggere in maniera distinta	111
2.26	Valore della deviazione standard al variare del numero di medie	113
2.27	Valore della deviazione standard al variare del numero di medie per il ponte ed il mezzo ponte estensimetrico	115
3.1	Data sheet sensore D	119
3.2	Valore della deviazione standard per i sensori D	120
3.3	Data sheet della fibra di carbonio utilizzata per la costruzione dei provini	121
3.4	Dati necessari al calcolo del valore del momento di serraggio dei bulloni	135
4.1	Elenco delle prove fatte sui provini in fibra di carbonio con FBGS integrati	150
4.2	Valore delle deviazioni standard per le prove a flessione	152
4.3	Valore delle deviazioni standard per le prove a flessione	154

INTRODUZIONE

Le fibre ottiche sono state immesse sul mercato ormai da anni soprattutto nel campo delle telecomunicazioni e della sensoristica: la loro elevata capacità e velocità nel trasmettere dati anche a distanze elevate sfruttando il segnale luminoso, la loro insensibilità ad interferenze elettromagnetiche, la possibilità di collegare numerosi sensori ad un singolo ingresso della centralina di acquisizione, nonché l'opportunità di usarli in ambienti con atmosfere esplosive grazie alla loro intrinseca passività, sono alcuni aspetti che hanno motivato la ricerca.

Una delle possibili applicazioni che ci ha spinto a studiare questa tipologia di sensori è la possibilità di realizzare strutture dinamometriche in fibra di carbonio leggere, resistenti e di facile utilizzo da impiegare, ad esempio, in galleria del vento in cui queste caratteristiche sono fondamentali.

Nel campo delle analisi delle deformazioni si sono ultimamente affacciati i sensori a fibra ottica a reticolo di Bragg (FBGS): essi presentano un reticolo foto-inciso sulla fibra stessa, che permette la riflessione di una determinata lunghezza d'onda dello spettro luminoso immesso. In base alla variazione di quest'ultima viene stimata l'eventuale deformazione applicata.

Nella letteratura scientifica internazionale non è ancora però presente uno studio che caratterizzi in modo approfondito le proprietà metrologiche fondamentali di questi sensori: gli unici articoli a riguardo che si sono trovati descrivono semplici prove statiche mirate a studiare il comportamento dello spettro a carichi longitudinali e trasversali, ma poco o nulla è stato scritto circa risultati ottenuti da differenti metodi di compensazione termica e da prove dinamiche.

Durante un incontro con una delle aziende leader nella costruzione di estensimetri elettrici ed ottici, le nostre domande circa gli aspetti più problematici dell'utilizzo delle fibre ottiche non hanno ottenuto risposte esaustive: da ciò si è inteso che la compensazione termica, il metodo di integrazione del sensore in materiali compositi ed il comportamento dinamico sono argomenti ancora in profonda fase di ricerca al fine di creare un prodotto che possa garantire evidenti vantaggi rispetto ai sistemi di misura finora utilizzati.

Si è per questo deciso di avviare un programma di sperimentazione che stabilisca i vantaggi e gli svantaggi rispetto ai tradizionali estensimetri elettrici, nonché i limiti e le possibili future applicazioni in campo misuristico.

Avendo acquistato alcuni sensori FBG delle marche più importanti tra i produttori di FBGS, si è quindi investigato il loro comportamento statico, valutandone la sensibilità alla temperatura e la capacità nel compensare tali effetti in un ampio intervallo (da -20°C a 50°C), si è quantificato il rumore di fondo confrontandolo con i più diffusi sistemi di misura e si è successivamente valutato il loro funzionamento durante prove dinamiche, variando i valori di ampiezza e frequenza.

Le caratteristiche morfologiche dei sensori a fibra ottica sono ottimali per poter integrare il sistema di misura direttamente all'interno di un materiale composito: il ridotto diametro della fibra ottica permette infatti l'inglobamento tra le fibre di rinforzo del materiale. Volendo impostare lo studio al fine di verificare la possibilità di costruire una struttura dinamometrica che garantisca un'elevata rigidità abbinata ad un peso ridotto, si è scelto di utilizzare fibra di carbonio come materiale di rinforzo.

Avendo ottenuto buoni risultati durante le prove statiche e dinamiche, si è quindi deciso di intraprendere tale strada, con la consapevolezza, tuttavia, che ad oggi esistono pochi riscontri in letteratura scientifica.

I risultati ottenuti sono stati sorprendenti: l'integrazione del sensore a fibra ottica nudo non ha provocato evidenti danneggiamenti o peggioramenti nella qualità di misura, il rumore di fondo si è mantenuto ai livelli iniziali e la risposta alle sollecitazioni dinamiche è stata assolutamente comparabile a quella offerta dagli estensimetri elettrici. Le diverse soluzioni per compensare eventuali effetti termici hanno offerto diversi spunti di analisi e le basi per un futuro impiego di tali sensori anche per prove statiche o semi-statiche.

La possibilità di integrazione dei sensori a reticolo di Bragg in un materiale che garantisce queste caratteristiche apre nuove frontiere: è possibile infatti ottenere dei vantaggi nella costruzione di dinamometri da utilizzare in galleria del vento, caratterizzati da elevate rigidità abbinata a pesi limitati o addirittura creare delle patch adesive da applicare a scafi nautici per monitorare le deformazioni. Si è inoltre, negli ultimi anni, parlato dell'integrazione degli FBGS all'interno degli alberi maestri in fibra di carbonio per barche a vela da regata, caratterizzati da lunghezze elevate fino a 60 metri: l'utilizzo di un'unica fibra ottica, dotata di numerosi sensori foto-incisi, offre l'opportunità di monitorare per tutta la lunghezza la deformazione a cui è sottoposto, utilizzando un solo canale di acquisizione.

ABSTRACT

The fiber optic sensors (FBGS) have been recently introduced: they present a photo-record grating on the fiber itself, which allows the reflection of a certain wavelength of the light spectrum entered. The applied deformation is estimated based on changes of the reflected wavelength.

One of the possible applications that has prompted us to study this type of sensors is the ability to create dynamometric structures based on carbon fiber: these kinds of structures are lightweight, strong and can be used, for example, in the wind tunnel where these characteristics are fundamental.

The metrological characteristics of FBGS have been tested and compared to strain gages ones, which represent the actual reference measurement systems. The most expensive FBGS enable on the market have shown to offer metrological performances comparable to electrical strain gages, both in terms of static and dynamic behaviour. Otherwise low-cost FBGS are expected to be characterized by worse performances.

It was decided to integrate the measurement system directly into a composite material, having achieved good results during the static and dynamic tests. We made carbon fiber specimens with FBGS integrated in them. The results were surprising: the integration of “nude” fiber optic sensor did not cause damage or deterioration in the quality of measurement, the background noise was maintained at baseline levels and response to dynamic stress was absolutely comparable to that offered by electrical strain gauges. The various solutions to compensate for thermal effects have offered several points for analysis and the basis for a future use of these sensors for static or semi-static tests.

The possibility of integration of FBG sensors in a material that provides these features opens up new frontiers: it is possible to gain advantage in the construction of dynamometers for use in wind tunnel, characterized by high stiffness combined with limited weights, or even create adhesive patches to be applied to water craft to monitor the deformations.

CAPITOLO 1

SENSORI A FIBRA OTTICA: STATO DELL'ARTE

Le fibre ottiche saranno al centro del lavoro che andremo a svolgere. Risulta dunque utile capire in maniera accurata il loro funzionamento ed introdurre gli studi riguardanti i FBGS (sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg) annegati in materiali compositi.

1.1 Introduzione sulle fibre ottiche

Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche. Esse, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno un campo elettromagnetico di frequenza sufficientemente alta (in genere in prossimità dell'infrarosso) con perdite estremamente limitate. Vengono comunemente impiegate nelle telecomunicazioni anche su grandi distanze e nella fornitura di accessi di rete a banda larga cablata.

1.1.1 Breve storia delle fibre ottiche

La storia delle fibre ottiche parte intorno agli anni '50.

Nel 1956 fu fisicamente prodotta la prima fibra ottica, ma venne applicata nelle telecomunicazioni solamente nel 1969 grazie alla cooperazione tra la Nippon Sheet Glass Co. e la Nippon Electric Co. Le fibre allora utilizzate avevano uno smorzamento di 100 dB/km causato principalmente dalle impurità chimiche del vetro. Charles K. Kao della STC e George A. Hockham del British Post Office dimostrarono che le fibre ottiche potevano essere un mezzo pratico per la comunicazione, nel caso in cui l'attenuazione fosse stata ridotta al di sotto dei 20 dB/km. In questa misura, la prima fibra ottica per le comunicazioni fu inventata nel 1970 dai ricercatori Robert D. Maurer, Donald Keck, Peter Schultz e Frank Zimar, impiegati presso la Corning, azienda statunitense produttrice di vetro: essi costruirono una fibra con 17 dB di attenuazione ottica per chilometro, drogando il silicio del vetro con il titanio. Negli anni successivi furono fatti grandi progressi e già nel 1976 erano disponibili in Giappone, USA e Gran Bretagna fibre ottiche con uno smorzamento < 1 dB/km in cui al posto della luce visibile veniva utilizzato l'infrarosso. Ai nostri giorni lo smorzamento è $< 0,2$ dB/km[1].

1.2 Costituzione delle fibre ottiche

Le fibre ottiche sono filamenti di materiali vetrosi o polimerici, realizzati in modo da poter condurre la luce. Sono normalmente disponibili sotto forma di cavi flessibili,

immuni ai disturbi elettrici ed alle condizioni atmosferiche più estreme. Hanno un diametro di $125\ \mu\text{m}$ (circa le dimensioni di un capello) e pesano molto poco: una singola fibra pesa infatti circa $60\ \text{g/km}$, compresa la guaina che la ricopre.

Ogni singola fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o “core”, ed un mantello, o “cladding” attorno ad esso. Le fibre si differenziano in monomodali (chiamate anche “single-mode”) e multimodali (o “multi-mode”) a seconda del diametro del core: nelle prime questo vale circa $10\ \mu\text{m}$, nelle seconde circa $50\ \mu\text{m}$. Il diametro del cladding vale per entrambe circa $125\ \mu\text{m}$. I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso: quello del cladding (tipicamente vale $1,475$) deve essere minore rispetto a quello del core (vale circa $1,5$). La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare. La luce che entra nel core con un certo angolo (angolo limite) si propaga mediante una serie di riflessioni sulla superficie di separazione fra i due materiali del core e del cladding. All'esterno della fibra vi è una guaina protettiva polimerica detta “jacket” che serve a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione ed evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno.

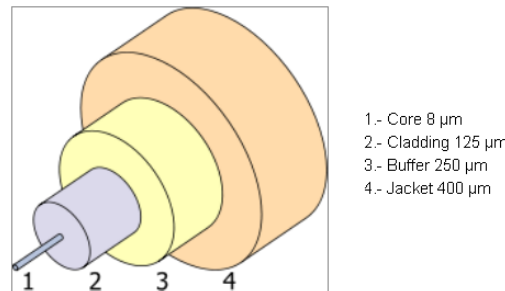


Figura 1.1: Fibra ottica single mode

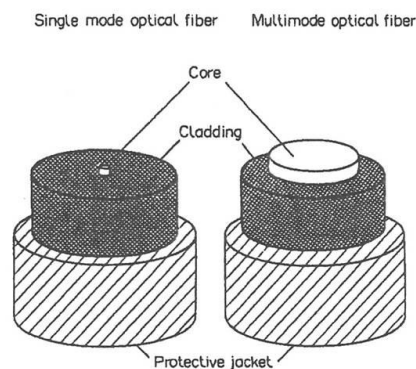


Figura 1.2: Fibra ottica single e multi mode

Diversi tipi di fibre si distinguono per diametro del core, indici di rifrazione, caratteristiche del materiale, profilo di transizione dell'indice di rifrazione e drogaggio (aggiunta di piccole quantità di altri materiali per modificare le caratteristiche ottiche).

Il core e il cladding della fibra ottica possono essere realizzati in silice oppure in polimeri plastici[2].

Fibre ottiche in silice

La fibra ottica è una singola fibra di vetro.

Le fibre vengono realizzate a partire da silice ultrapura, la quale viene ottenuta dalla reazione fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Nel materiale destinato alla produzione del core viene aggiunto del germanio (sotto forma di tetracloruro di germanio) in modo da aumentarne l'indice di rifrazione senza variarne l'attenuazione. Nella silice destinata al cladding invece viene aggiunto del boro allo scopo di ridurne l'indice di rifrazione. Il principale svantaggio delle fibre ottiche realizzate in silice è la loro fragilità.

Fibre ottiche polimeriche

Le fibre ottiche polimeriche anziché essere realizzate in vetro sono realizzate in materiale polimerico: i materiali più utilizzati sono i policarbonati, i policianurati ed i polisilossani.

Rispetto alle fibre ottiche realizzate in vetro questo tipo di guide ha:

- diametro del core più grande;
- elevata facilità delle operazioni di posa;
- caratteristiche specifiche del polimero con cui sono realizzate;
- resistenza meccanica elevata;
- attenuazione più elevata;
- scarsa resistenza termica.

Le fibre ottiche polimeriche sono molto più facili da maneggiare rispetto alle fragili fibre in silice. La dimensione del loro core è molto più grande (1 mm), quindi si ha la possibilità di realizzare fibre multimodali.

Le loro caratteristiche fanno sì che questo tipo di fibre sia utilizzato su piccole distanze, nelle applicazioni aerospaziali, o automotive, in illuminotecnica e in medicina. I polimeri utilizzati per la fabbricazione di fibre ottiche polimeriche devono essere trasparenti alla radiazione utilizzata, quindi è necessario che essi siano completamente amorfi.

1.2.1 Funzionamento

Nelle fibre ottiche avviene un fenomeno di riflessione totale interna, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente, in pratica finché la fibra non compie curve troppo brusche.

In Figura(1.4) è rappresentato come due raggi luminosi, cioè due treni di radiazione elettromagnetica, incidono sull'interfaccia tra nucleo e mantello all'interno della fibra ottica. Il fascio a incide con un angolo θ_a superiore all'angolo critico di riflessione totale e rimane intrappolato nel nucleo; il fascio b incide con un angolo θ_b inferiore all'angolo critico e viene rifratto nel mantello e quindi perso. È importante ricordare che in ottica si indica l'angolo tra la radiazione e la normale alla superficie, cioè $\theta = 90^\circ - \alpha$, dove α è l'angolo tra la radiazione e la superficie.

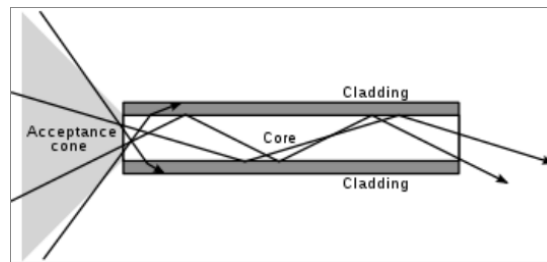


Figura 1.3: Funzionamento fibra ottica

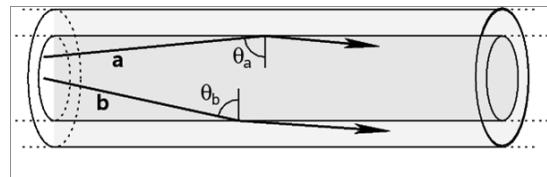


Figura 1.4: Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi in una fibra ottica

Le fibre ottiche single-mode sono in grado di trasmettere solo un singolo segnale luminoso, ma il diametro molto piccolo del nucleo limita la dispersione del fascio luminoso con il risultato di permettere la trasmissione a distanze elevate.

Le fibre ottiche multi-mode sono in grado di trasmettere più percorsi luminosi indipendenti, ma il maggiore diametro del nucleo rende più probabili le riflessioni sulle superfici interne del nucleo stesso: questo comporta una maggior dispersione ed una minore distanza di trasmissione fra i ripetitori rispetto alle fibre single-mode.

1.3 Sensore ottico a reticolo di Bragg

Nel 1978 Ken O. Hill scoprì l'effetto della sensibilità ottica per le fibre drogate con il Germanio. L'esposizione alla luce ultravioletta produce una variazione permanente dell'indice di rifrazione. Il passo successivo fu quello di utilizzare questo effetto e di scrivere il reticolo di Bragg nelle fibre in modo che potessero riflettere un picco di luce molto stretto. I primi Fiber Bragg Grating Sensors (FBGS) furono disponibili nel 1995 distribuite dalla 3M e dalla Photonetics. Dal 2000 più di 20 compagnie sono entrate nel commercio dei FBGS[3].

1.3.1 Caratteristiche delle fibre ottiche a reticolo di Bragg

I sensori FBG possono misurare le deformazioni e non gli spostamenti: così come i classici estensimetri elettrici, possono essere utilizzati per costruire trasduttori atti a misurare diverse quantità fisiche.

Anche se i FBGS non possono competere completamente con gli estensimetri elettrici per quanto riguarda il prezzo e la precisione, essi forniscono alcune caratteristiche superiori che li rendono adatti per applicazioni speciali:

- si accoppiano molto bene con i materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio o di vetro che sono largamente utilizzate nelle costruzioni moderne, come ad

esempio negli aeroplani. I FBGS possono essere direttamente integrati nel materiale composito oppure possono essere fissati sulla loro superficie come avviene normalmente con gli estensimetri elettrici[3];

- possono misurare anche grandi deformazioni ($> 10000 \mu m/m$) e sono anche particolarmente adatti per costruzioni in materiale composito sottoposte ad elevati carichi[3]. Infatti i materiali compositi sono caratterizzati da moduli elastici E inferiori rispetto a quelli dell'acciaio ($E_{comp} \leq E_{acciaio}$), ma da valori di carichi di rottura R superiori ($R_{comp} \geq R_{acciaio}$). Di conseguenza a parità di rapporto σ/R il materiale composito è caratterizzato da una deformazione ε maggiore;
- sono molto piccoli e molto leggeri[3];
- sono intrinsecamente immuni al rumore elettromagnetico. Questa caratteristica è dovuta al materiale con cui sono realizzate le fibre ottiche, il vetro: essendo un materiale dielettrico, i campi elettromagnetici non possono ovviamente indurre correnti elettriche in esso, come invece succede in presenza di cavi in rame. Inoltre i campi elettromagnetici non possono modificare la luce che attraversa la fibra ottica. Pertanto i sensori a fibra ottica FBG possono attraversare o essere posti in ambienti con forte rumore elettromagnetico, dovuto ad esempio a macchinari elettrici, linee elettriche o antenne[3];
- sono intrinsecamente passivi (non necessitano infatti di un collegamento elettrico) ed inoltre possono essere posizionati nelle zone in cui è presente un alto voltaggio o anche in atmosfere potenzialmente esplosive[3];
- il loro segnale subisce piccoli decadimenti all'aumentare della distanza del sensore rispetto all'acquisitore (è possibile collegarli fino ad una distanza massima di $50km$)[3];
- in un unico canale della centralina di acquisizione possono essere collegati in serie fino ad un massimo di 20 FBGS. Inoltre non è necessario avere il ritorno del cavo[3];
- *risposta lineare* – il valore della lunghezza d'onda del FBGS è una funzione lineare del valore misurato, quindi non si possono avere ambiguità nella misura per qualsiasi range di deformazione[3];
- la stabilità per acquisizioni di lunga durata è garantita fino a 20 anni[3];
- buona resistenza alla corrosione[3];
- versioni speciali possono essere utilizzate a temperature molto elevate ($> 700^\circ C$)[3];
- sono di facile installazione (in termini di tempo, di collegamento, di ingombro e numero di cavi)[3].

Ovviamente, ci sono anche alcune caratteristiche dove i FBGS mostrano alcuni punti deboli:

- mostrano un' elevata dipendenza dalla temperatura ($\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ causato da $1^\circ C$ è equivalente ad un $\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0}$ dovuto da $8\mu m/m$ di deformazione meccanica). La compensazione termica richiede la presenza di due FBGS e una configurazione misuristica speciale[3];

- non permettono una compensazione automatica delle deformazioni apparenti (coefficiente di espansione termica α dell'acciaio, alluminio o dei materiali compositi). La compensazione termica deve essere fatta attraverso una misurazione indipendente della temperatura ed una post-elaborazione dei dati[3];
- il gage factor ha valori di $k = 0.78$ (0.77 ...0.81) e può essere diverso a seconda dei tipi di sensori, mentre per gli estensimetri elettrici si hanno valori di $k = 2$ [3];
- la parte sensibile dalla fibra ottica è posizionata ad una grande distanza dalla superficie del modello. Questo può portare ad errori di calibrazione quando la patch è applicata su superfici curve[3];
- mostrano un'alta sensibilità alle forze o pressioni laterali che causano una birifrangenza della luce riflessa. Questo comporta la nascita di un secondo picco riflesso[3].

1.3.2 Funzionamento dei Fiber Bragg Grating Sensors (FBGS)

Un sensore a reticolo di Bragg è costituito da un segmento di fibra ottica, generalmente del tipo single mode, nel quale è stata creata una periodica variazione dell'indice di rifrazione del core mediante l'esposizione a luce ultravioletta ad alta intensità (di circa 245 nm). Per scrivere il reticolo di Bragg nel core della fibra bisogna estrarre il core dal coating e poi successivamente coprirlo nuovamente. Questo processo deve essere fatto in maniera molto attenta, altrimenti la stabilità della fibra potrebbe essere compromessa e questa potrebbe addirittura rompersi anche per piccole deformazioni.

Per misurare le deformazioni il sensore deve essere fissato al modello: normalmente lo si incolla sulla superficie, mentre per i materiali compositi può anche essere direttamente inglobato nel modello stesso.

Lo spettro ottico riflesso dal reticolo di Bragg è caratterizzato da una larghezza in banda molto stretta: si parla quindi di riflessione di un solo picco (Figura(1.5)). Questa elevata riflessione avviene ad una determinata lunghezza d'onda, λ_B , chiamata *lunghezza d'onda di Bragg*, che può essere associata all'effettivo indice di rifrazione del core, n , e al valore della spaziatura del reticolo che causa la variazione dell'indice di rifrazione, Λ , attraverso la relazione:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1.1)$$

Il reticolo è formato da alcune centinaia di frange. Ogni singola frangia riflette solo una piccola parte di tutte le lunghezze d'onda in ingresso. Il fattore di riflessione per ognuna di esse è nell'ordine del 0.001%...0.1% ed è funzione di quanta energia è stata usata per scrivere il reticolo di Bragg e della percentuale di drogaggio di Germanio del core della fibra.

Ogni singola frangia riflette luce con diversa fase: quando si verifica un'interferenza la maggior parte della luce viene distrutta, se invece le riflessioni hanno uguale fase si sommano e formano un ben definito picco riflesso. La riflessione totale del sensore è la somma di tutte queste centinaia di piccole singole riflessioni. La Figura(1.6) spiega questa caratteristica in maggior dettaglio. In alto c'è un sensore di Bragg con 10 frange. La luce entra dal lato sinistro. Sotto ci sono tre fasci di luce con differenti lunghezze

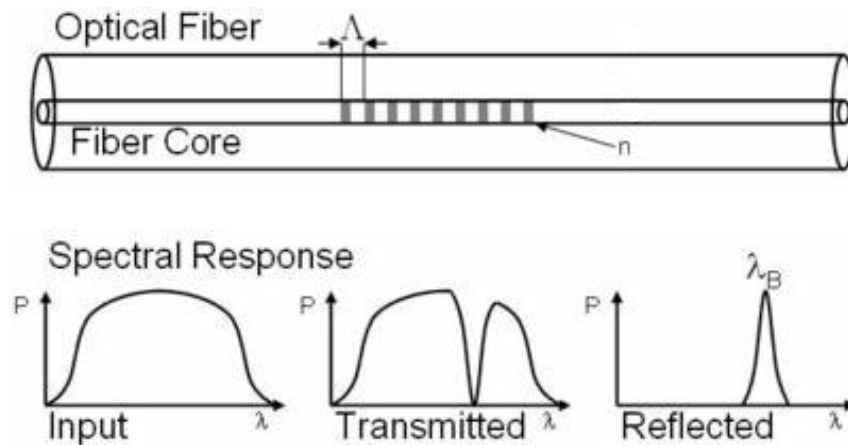


Figura 1.5: Funzionamento di un Fiber Bragg Gratin Sensor (FBGS)

d'onda. Quello più in alto ha la stessa lunghezza d'onda del periodo del reticolo quindi tutte le frange producono una riflessione con la stessa fase: l'energia totale riflessa sarà 10 volte più elevata di quella riflessa da ogni singola frangia. Il successivo fascio di luce ha una frequenza più elevata del 10%: 11 periodi del fascio di luce hanno la stessa lunghezza dei 10 periodi del reticolo. In questo modo però ogni singola riflessione ha una fase diversa: si crea interferenza tra di loro fino a raggiungere una riflessione nulla. Lo stesso accade con l'ultimo fascio di luce che presenta una frequenza minore del 10% in modo che 9 periodi di luce hanno la lunghezza dei 10 periodi del reticolo.

Il risultato generale è che la funzione della riflessione varia come una $\sin(x)/x$.

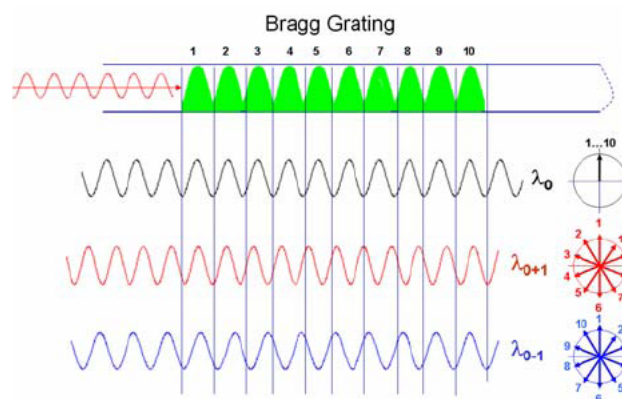


Figura 1.6: Riflessione delle frange del reticolo di Bragg

La Figura(1.7) mostra lo spettro riflesso calcolato in un reticolo di 6 mm con un valore della lunghezza d'onda del picco riflesso pari a 1550 nm.

Questa semplice teoria è adeguata per i reticoli di Bragg a bassa riflessione (fattore di riflessione del picco $< 20\%$) mentre la teoria dei reticoli di Bragg ad alta riflessione (fattore di riflessione del picco $> 90\%$) è molto più complicata.

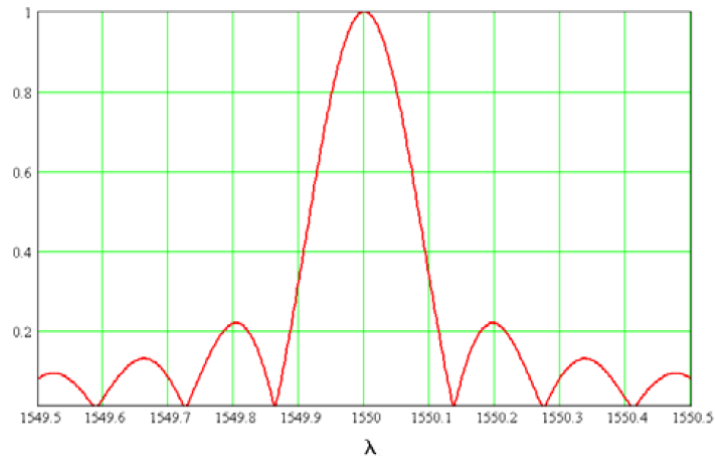


Figura 1.7: Riflessione calcolata e normalizzata di un reticolo di Bragg a bassa riflessione (< 20% di riflessione) di 6 mm e con una lunghezza d'onda riflessa pari a $\lambda = 1550$ nm

Calcoliamo ora la funzione spettrale di un reticolo di Bragg a bassa riflessione. La spaziatura della griglia del reticolo di Bragg si calcola semplicemente:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \cdot n} \quad (1.2)$$

$n = 1.46$ tipico per i FBGS;

se $\lambda_0 = 1550$ nm

$\rightarrow \Lambda = 530$ nm

Conoscendo la lunghezza del reticolo, ad esempio $Gl = 6$ mm, possiamo calcolare il numero delle frange N presenti nel reticolo stesso:

$$N = \frac{Gl}{\Lambda} \quad (1.3)$$

L'equazione (1.2) inserita nella (1.3) restituisce:

$$N = \frac{2 \cdot n \cdot Gl}{\lambda_0} \quad (1.4)$$

Il risultato è $N = 11300$ griglie. La larghezza Pd dei lobi laterali sarà pari a:

$$Pd = \frac{\lambda_0}{N} \quad \rightarrow Pd = 137nm \quad (1.5)$$

L'equazione (1.4) inserita nella (1.5) porta a:

$$Pd = \frac{(\lambda_0)^2}{2 \cdot n \cdot Gl} \quad (1.6)$$

Il lobo principale ha una larghezza doppia rispetto ai poli laterali (274 pm)(Figura(1.7) e Figura(1.8).

L'intera funzione dello spettro riflesso R_i può essere calcolata tramite l'equazione (1.7):

$$R_i = \frac{\lambda_0}{\pi \cdot N \cdot \Delta\lambda_i} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot N \cdot \Delta\lambda_i}{\lambda_0}\right) \quad (1.7)$$

La lunghezza d'onda λ_i dell'asse x è pari a: $\lambda_i = \lambda_0 + \Delta\lambda_i$. $\Delta\lambda_i$ nella Figura(1.7) e nella Figura(1.8) è di circa 1000 pm.

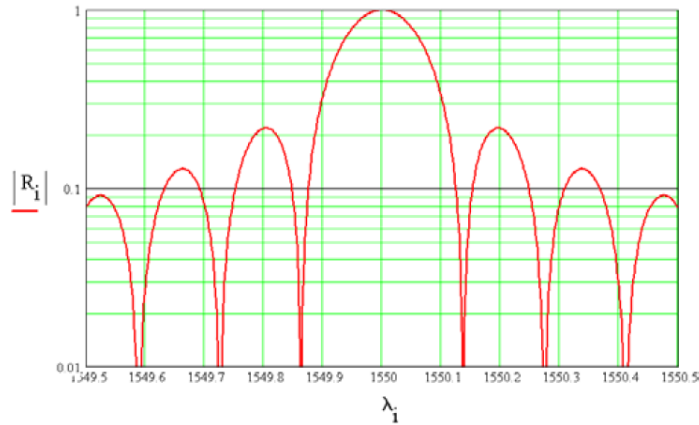


Figura 1.8: Stessa funzione della Figura(1.7) ma con l'asse Y logaritmico

Normalmente la larghezza del picco riflesso dal reticolo di Bragg non è però definita dal valore di Pd ma attraverso la definizione del $FWHM$ (Full-Width-Half-Maximum) che è la larghezza al 50% del livello del picco principale. La funzione $\sin(x)/x$ è pari a 0.5 per $x = 1.8955$. Il $FWHM$ può allora essere calcolato attraverso l'equazione (1.8):

$$FWHM = 2 \cdot \frac{1.8955 \cdot \lambda_0}{\pi \cdot N} \quad (1.8)$$

$$FWHM = 1.2067 \cdot Pd$$

L'equazione (1.4) inserita nella (1.8) restituisce:

$$FWHM = \frac{1.8955 \cdot \lambda_0^2}{\pi \cdot n \cdot Gl} \quad (1.9)$$

n = indice di rifrazione (1.46); Gl = lunghezza del reticolo (6 mm); $\lambda_0 = 1550$ nm;
 $\rightarrow FWHM = 165$ pm.

La Figura(1.9) mostra uno spettro reale misurato di un FBGS di 6 mm, mentre la Figura(1.8) mostra lo spettro calcolato: entrambe le figure mostrano lo stesso andamento.

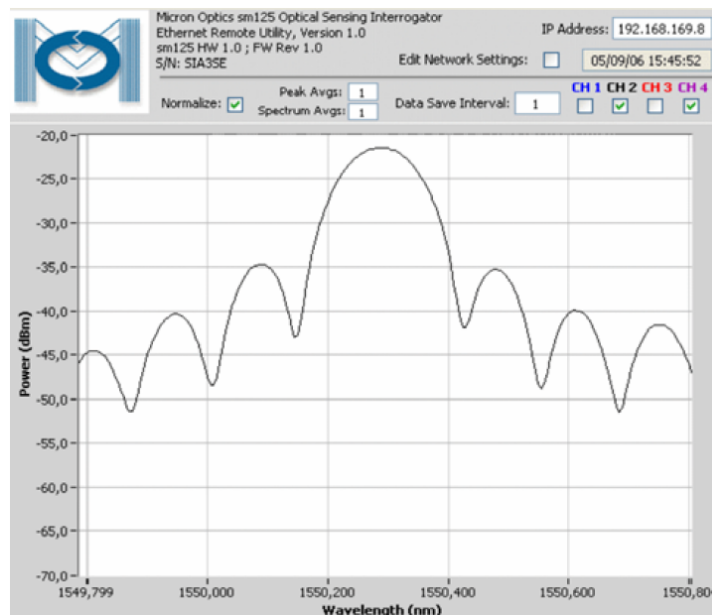


Figura 1.9: Reticolo di Bragg (15% di riflessione) misurato

Se si allunga un sensore a fibra ottica con reticolo di Bragg si causa un cambiamento di Λ (Figura(1.10)): come conseguenza si avrà un cambiamento della lunghezza d'onda riflessa. Il monitoraggio della lunghezza d'onda del picco dello spettro riflesso permetterà di determinare il cambiamento delle condizioni, ad esempio deformazioni e temperatura, ai quali la fibra ottica è soggetta.

La lunghezza d'onda di un FBGS, espressa dalla (1.1), varia a causa o di un campo di deformazione oppure di una variazione di temperatura in accordo all'espansione (1.10):

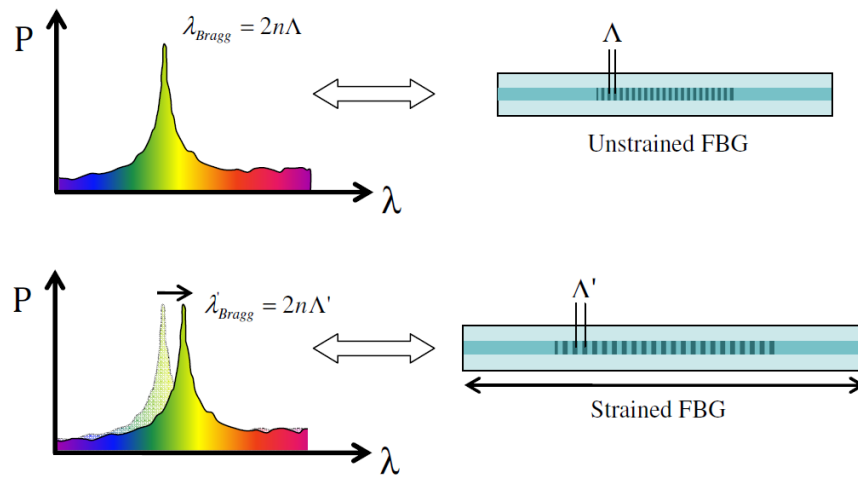


Figura 1.10: Shift del picco del sensore a fibra di Bragg a seguito di una deformazione

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \cdot \varepsilon + \alpha_\delta \cdot \Delta T \quad (1.10)$$

dove

$\Delta\lambda$ = variazione della lunghezza d'onda

λ_0 = "stato di riferimento" della lunghezza d'onda di Bragg all'inizio della prova

$$k = 1 - p \quad (1.11)$$

p = photo-elastic coefficient, $p = 0,22$

k = gage factor, $k = 0,78$

ε = deformazione

ΔT = variazione di temperatura in °K

α_δ = variazione dell'indice di rifrazione, $\alpha_\delta = 5 \div 8 \cdot 10^{-6}/K$

$$\alpha_\delta = \frac{\delta n/n}{\delta T} \quad (1.12)$$

La prima parte ($k \cdot \varepsilon$) dell'equazione (1.10) descrive la deformazione dovuta sia alla forza (ε_m) che alla temperatura (ε_T). La seconda parte ($\alpha_\delta \cdot \Delta T$) descrive invece la variazione dell'indice di rifrazione n causato solamente dalla temperatura.

$$\varepsilon = \varepsilon_m + \varepsilon_T \quad (1.13)$$

ε_m = deformazione “meccanica”

ε_T = deformazione “apparente” causata dalla variazione di temperatura

$$\varepsilon_T = \alpha_{sp} \cdot \Delta T \quad (1.14)$$

α_{sp} = coefficiente di dilatazione termica del provino

Le equazioni dalla (1.11) alla (1.14) inserite nell'equazione (1.10) portano alle equazioni (1.15) e (1.16) che descrivono il comportamento di un FBGS sotto l'azione congiunta di deformazione e temperatura:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p) \cdot (\varepsilon_m + \alpha_{sp} \cdot \Delta T) + \frac{\delta n/n}{\delta T} \cdot \Delta T \quad (1.15)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \cdot (\varepsilon_m + \alpha_{sp} \cdot \Delta T) + \alpha_\delta \cdot \Delta T \quad (1.16)$$

$$\alpha_{sp} \text{ dell'acciaio} = 11 \div 13 \cdot 10^{-6}/K$$

$$\alpha_{sp} \text{ dell'alluminio} = 22 \div 23 \cdot 10^{-6}/K$$

$$\alpha_\delta \text{ di rifrazione} = 5 \div 8 \cdot 10^{-6}/K$$

Nel caso in cui un reticolo di Bragg sia esposto solo a variazioni di temperatura e ad uno sforzo nullo ($\varepsilon_m = 0$, la fibra è quindi fissata in un solo punto, sufficientemente lontano dal reticolo di Bragg) il segnale del FBGS $\Delta\lambda/\lambda_0$ cambia solo al variare della temperatura in accordo con l'equazione (1.17). In questo caso l' α è il coefficiente di espansione termica della fibra $\alpha_{sp} = \alpha_{glass} = 0.55 \cdot 10^{-6}/K$.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p) \cdot \alpha_{glass} \cdot \Delta T + \frac{\delta n/n}{\delta T} \cdot \Delta T \quad (1.17)$$

oppure

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (k \cdot \alpha_{glass} + \alpha_\delta) \cdot \Delta T \quad (1.18)$$

$$\Delta T = \frac{1}{(k \cdot \alpha_{glass} + \alpha_\delta)} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (1.19)$$

Queste sono le equazioni per un FBGS che misura solamente temperatura.

Il coefficiente di espansione termica α_{glass} della fibra è molto piccolo, quasi zero. Il risultato di maggior importanza sulla dipendenza dalla temperatura è dovuto dal cambiamento dell'indice di rifrazione α_δ del reticolo. Quando una fibra è incollata al provino, il segnale del FBGS $\Delta\lambda/\lambda_0$ cambia con la deformazione ($\varepsilon_m + \varepsilon_T$) del provino e quindi anche con il coefficiente di espansione termica α_{sp} del provino e non a causa di α_{glass} .

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = k \cdot \varepsilon_m + (k \cdot \alpha_{sp} + \alpha_\delta) \cdot \Delta T \quad (1.20)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} - (\alpha_{sp} + \frac{\alpha_\delta}{k}) \cdot \Delta T \quad (1.21)$$

Queste sono le equazioni per la misura della deformazione in un FBGS.

Quando il FBGS è fissato al provino in una regione senza deformazioni meccaniche ($\varepsilon_m = 0$) esso lavora come un FBGS compensatore di temperatura. Il suo segnale si può calcolare in accordo con le equazioni (1.22) e (1.23):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (k \cdot \alpha_{sp} + \alpha_\delta) \cdot \Delta T \quad (1.22)$$

$$\Delta T = \frac{1}{k \cdot \alpha_{sp} + \alpha_\delta} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (1.23)$$

Queste sono le equazioni per un FBGS compensatore di temperatura.

1.3.3 Compensazione della temperatura

La temperatura ha un grosso effetto sul segnale del FBGS: per questo motivo se si vogliono effettuare accurate misure di deformazione bisogna effettuare un'appropriata compensazione. Attualmente, i FBGS non consentono alcuna possibilità di autocompensazione, quindi in caso di variazioni di temperatura del provino, la variazione di

lunghezza d'onda del picco è funzione sia delle deformazioni sia della variazione di temperatura[5]. Normalmente viene utilizzato un altro FBGS per misurare solamente la temperatura ed il segnale del FBGS utilizzato per calcolare il valore della deformazione è corretto attraverso una successiva elaborazione dei dati ottenuti. Questo può avvenire in due modi diversi:

1. vengono usati due FBGS meccanicamente identici. Uno viene posizionato dove si vuole effettuare la misura. L'altro deve essere posto in una zona del provino in cui non si abbiano deformazioni meccaniche ($\varepsilon_m = 0$) ma che risenta della stessa temperatura del primo. Si possono raggiungere risultati accurati per le deformazioni meccaniche ε_m in accordo all'equazione (1.25) semplicemente sottraendo il segnale del FBGS utilizzato come compensatore a quello del FBGS attivo. Equazione (1.24) = (1.20) - (1.22)

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_{0m}} - \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_{0c}} = k \cdot \varepsilon_m \quad (1.24)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_{0m}} - \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_{0c}} \right) \quad (1.25)$$

$\Delta\lambda_m$ = variazione di lunghezza d'onda del FBGS che misura la deformazione

λ_{0m} = lunghezza d'onda a riposo del FBGS che misura la deformazione

$\Delta\lambda_c$ = variazione di lunghezza d'onda del FBGS utilizzato come compensatore

λ_{0c} = lunghezza d'onda a riposo del FBGS utilizzato come compensatore

Ma non è sempre possibile trovare una posizione sul provino in cui non si abbiano deformazioni meccaniche in cui poter fissare un FBGS da utilizzare come compensatore. In questo caso il metodo appena menzionato non può essere utilizzato.

2. la temperatura deve essere misurata con un "pure temperature-measuring" FBGS. Quando la temperatura è misurata da uno di questi sensori in accordo con le equazioni (1.17) e (1.19) il calcolo del valore della deformazione diventa un po' più complicato. Sostituendo il ΔT nell'equazione (1.21) con il termine di ΔT ricavato nell'equazione (1.19) ricaviamo l'equazione (1.26):

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_{0m}} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_{0T}} \cdot \left(\frac{k \cdot \alpha_{sp} + \alpha_\delta}{k \cdot \alpha_{glass} + \alpha_\delta} \right) \right) \quad (1.26)$$

$\Delta\lambda_T$ = variazione della lunghezza d'onda del FBGS che misura solo la temperatura

λ_{0T} = lunghezza d'onda base del FBGS che misura solo la temperatura

Siccome $k \cdot \alpha_{glass}$ è quasi zero, questo termine può essere trascurato oppure può essere inglobato in α_δ incrementandolo di una quantità pari a $0.4 \cdot 10^{-6}$. L'equazione (1.26) può essere allora semplificata e si giunge all'equazione (1.27):

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_{0m}} - \frac{\Delta\lambda_T}{\lambda_{0T}} \cdot \left(\frac{k \cdot \alpha_{sp}}{\alpha_\delta} + 1 \right) \right) \quad (1.27)$$

Se le equazioni (1.26) o (1.27) sono usate, è necessario conoscere in maniera molto accurata il coefficiente di espansione termica α_{sp} del provino e la variazione dell'indice di rifrazione causato dalla temperatura α_δ .

1.3.4 Metodi di scrittura del reticolo di Bragg nella fibra ottica

Per scrivere il reticolo di Bragg nella fibra ottica vengono utilizzati laser ad eccimeri con lunghezze d'onda nell'ordine dei $240 \div 250nm$. Il modello dell'interferenza può essere generato attraverso l'utilizzo di una phase mask (Figura(1.11)) o dividendo fasci di luce (Figura(1.12)).

La procedura standard per creare FBGS ad alto valore di riflessione ($> 90\%$ di riflessione del picco) è quella di rimuovere il cladding da una normale fibra ottica usata per le telecomunicazioni, esporla al modello di interferenza agli ultravioletti e rivestirla nuovamente del suo cladding.

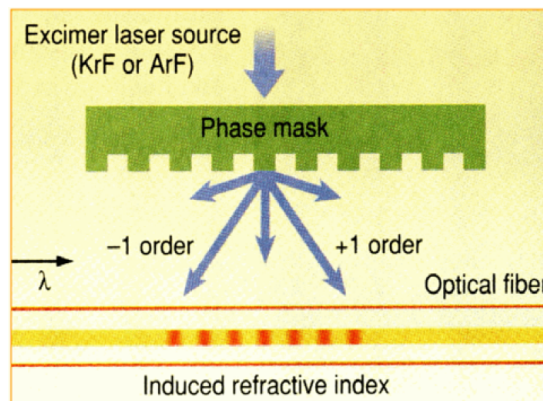


Figura 1.11: Reticolo di Bragg scritto con un laser ed a phase mask

Se il FBGS deve misurare deformazioni, il cladding in polymide è la scelta giusta perchè l'acrilato è troppo morbido e non riesce a trasferire in modo adeguato la deformazione dal provino alla fibra; in modo particolare alle alte temperature. L'energia di esposizione è nel range di diverse centinaia di J/cm^2 e causa una variazione dell'indice di riflessione di $0.01\% \div 0.1\%$. Mentre le fibre ottiche standard usate per le telecomunicazioni possono essere deformate fino a $60000\mu m/m$, le fibre di Bragg ad alta riflessione si rompono spesso per deformazioni molto minori. Questo è causato dal processo di estrazione del core dal cladding che deve essere fatto con molta cura. Per evitare questo problema è stato sviluppato un altro metodo per la creazione dei FBGS. La scrittura del reticolo di Bragg è fatta "on the fly" durante il processo di produzione della fibra (Figura(1.12)) e solo successivamente viene aggiunta la sua guaina protettiva. Non è quindi necessario una successiva rimozione del cladding protettivo.

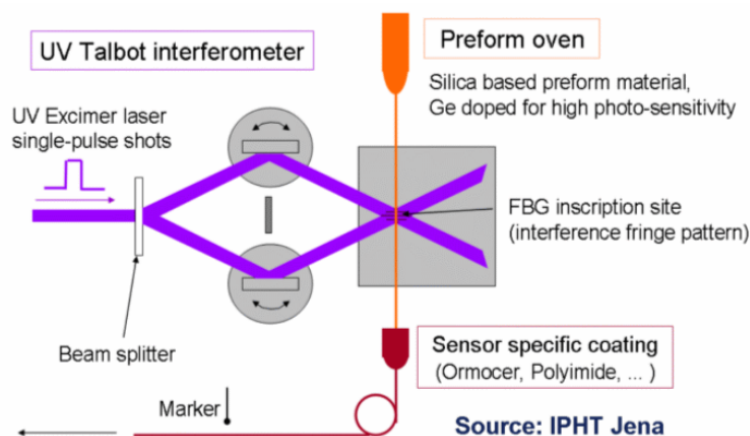


Figura 1.12: Reticolo di Bragg prodotto "on the fly"

Il materiale migliore per il cloating di questo processo è ORMOCER (organic modulated ceramic) poichè il suo modulo di Young è abbastanza elevato.

Con il metodo on the fly è possibile effettuare un'unica esposizione ai raggi ultravioletti per ciascun reticolo di Bragg. Il tempo di scrittura deve essere molto piccolo (nell'ordine dei nano-secondi) per ottenere reticoli precisi. Quindi l'energia totale di esposizione è all'incirca di $1/1000$ di quella per scrivere i FBGS ad alta riflessione. Ma poichè la "photo-sensitivity" del core della fibra è molto alta anche a bassi livelli di energia, è possibile ottenere una riflessione nell'ordine del $10\% \div 20\%$.

La Figura(1.13) mostra i tipici picchi riflessi da un FBGS ad alta e bassa riflessione. Lo spettro del FBGS a bassa riflessione ($< 20\%$, sul lato destro) è molto simile alla funzione derivante dalla teoria e la larghezza del picco (FWHM) è piccola. La risposta del FBGS ad alta riflessione ($> 90\%$, lato sinistro) mostra un picco più alto e lobi laterali praticamente nulli.

I FBGS ad alta riflessione alcune volte presentano indesiderati picchi di ampiezza minore come quello al centro della Figura(1.13).

È importante notare che nel caso di sensori a reticolo di Bragg la sensibilità alla deformazione è indipendente dalla lunghezza del reticolo di Bragg, mentre dipendono

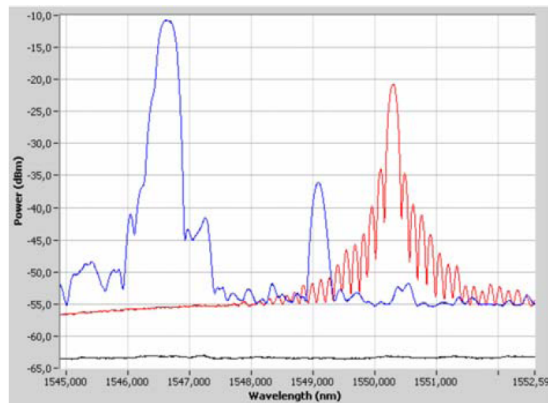


Figura 1.13: Picchi riflessi di un FBGS ad alta riflessione (sinistra) e bassa riflessione (destra)

da essa la nitidezza dello spettro riflesso e l'ampiezza del suo picco. Uno dei più importanti vantaggi di questi sensori è la possibilità di fare misure assolute di deformazione attraverso la valutazione della lunghezza d'onda di Bragg[2].

1.4 Vantaggi dell'integrazione di fibre ottiche nei materiali compositi

Strutture costruite in materiale composito con annesso un sistema di rilevamento in fibra ottica permettono un monitoraggio costante delle deformazioni interne, dello stato di sforzo, delle vibrazioni, della temperatura e dell'integrità strutturale. Con questa configurazione è persino possibile aumentare la qualità del controllo della lavorazione della struttura durante il processo di fabbricazione [2].

L'utilizzo di questa tecnologia permette una maggior confidenza nell'impiego dei materiali compositi, perchè può portare alla riduzione di manutenzione, del numero di riparazioni, del tempo di fermo e migliorare la qualità dei controlli durante il processo di fabbricazione e misurare lo stato di sforzo residuo. L'uso di questa nuova tecnologia può così essere esteso a componenti in cui è importante conoscere esattamente lo stato di sforzo e di deformazione, con conseguente risparmio anche in termini di peso: questo aspetto non può certo essere trascurato in alcuni ambiti quali l'aviazione e le strutture marine[2].

Inoltre, monitorando costantemente i carichi e le deformazioni di un componente, saremo in grado di conoscere in ogni momento il suo reale stato di fatica[4].

I sensori in fibra ottica sono estremamente piccoli e leggeri, resistono alla corrosione e alla fatica, sono immuni alle interferenze elettromagnetiche, non possono innescare scintille oppure esplosioni: tutte queste caratteristiche li rendono ideali per la loro integrazione nei materiali compositi[2].

1.5 Considerazioni sull'integrazione dei sensori a fibra ottica

L'integrazione dei sensori a fibra ottica nelle strutture in materiale composito richiede l'acquisizione di un nuovo know-how. Questo include numerosi campi:

- l'orientamento e la disposizione del sensore;
- l'influenza del sistema di rilevamento sul materiale e sulle sue proprietà strutturali;
- la micromeccanica e la dinamica nell'interazione tra sensore e materiale;
- la ricerca del metodo più affidabile e meno invadente per l'interfaccia[2].

1.5.1 Orientamento e disposizione dei sensori a fibra ottica annegati nel materiale composito

È stato dimostrato, dopo una lunga serie di esperimenti, che se le fibre ottiche vengono utilizzate come sensori di temperatura\deformazione devono essere disposte, se possibile, tra due strati collineari del materiale composito ed essere allineate con le fibre di rinforzo.

In alternativa, se le fibre ottiche sono utilizzate come sensori per il danneggiamento della struttura, con l'intenzione di causare la loro rottura oltre un certo valore di carico, allora la miglior configurazione è quella di annegarle il più vicino possibile alla superficie in cui è presente la massima tensione e di disporre le fibre stesse in modo ortogonale tra due strati di rinforzo collineare[2].

1.5.2 Influenza delle fibre ottiche annegate nel materiale composito

Un problema fondamentale che deve essere affrontato se si vuole annegare i sensori a fibra ottica nei materiali compositi è la possibilità che queste compromettano la resistenza a trazione e quella a compressione, che aumentino la vulnerabilità al danneggiamento e che riducano la resistenza a fatica del materiale.

Le fibre ottiche immerse con un' inclinazione rispetto agli strati adiacenti creano, a causa della loro forma, il cosiddetto "resin-eye" (Figura(1.14)). La dimensione di questo eye è maggiore quanto più grande è l'angolo tra la fibra ottica ed la direzione del rinforzo del materiale e raggiunge il suo valore massimo quando la fibra ottica è perpendicolare agli strati adiacenti.

Le fibre ottiche annegate collinearmente alle fibre di rinforzo non creano il resin-eye e non modificano le caratteristiche del materiale in maniera apprezzabile. Il resin-eye è a tutti gli effetti assimilabile ad un fattore di intensificazione degli sforzi e può assumere valori superiori a 10 nelle vicinanze dell'interfaccia tra fibra ottica e fibra di rinforzo[2].

Negli esperimenti più recenti[2] è stato verificato che la presenza di fibre ottiche annegate nel materiale non fa decrescere né la resistenza a compressione né quella a trazione. È stato dimostrato anche che le fibre ottiche non riducono la resistenza alla rottura interlaminare; l'unico effetto verificato è un piccolo miglioramento della resistenza del materiale al danno.

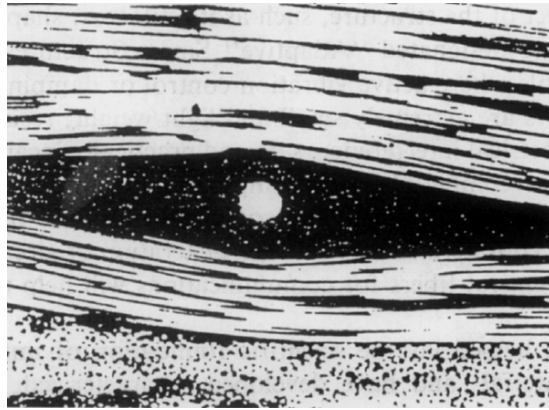


Figura 1.14: “resin-eye” causato da una fibra ottica disposta perpendicolarmente a due strati di rinforzo collineari tra di loro

Durante le campagne sperimentali[2] è stato verificato che fibre ottiche con un diametro inferiore a $d \leq 140\mu m$ non riducono nè la resistenza a trazione nè quella a fatica del materiale composito.

Ovviamente, considerazioni più accurate sul valore del diametro delle fibre ottiche e del loro rivestimento dovranno essere date se si vuole che funzionino correttamente durante la vita della struttura. Saranno altresì necessarie altre campagne sperimentali per prendere piena confidenza con questi nuovi tipi di procedimenti, poichè non è ancora totalmente chiara l'influenza che le fibre ottiche hanno sul materiale adiacente[2].

1.5.3 Interfaccia sensore/materiale composito e resistenza a fatica

L'interfaccia tra la fibra ottica e la matrice in resina che la ospita determina il grado di adesione tra i due e quindi anche l'accuratezza delle misure. È possibile che alti carichi concentrati nella vicinanza del sensore in fibra ottica possano causare il distacco tra questa e la matrice del materiale composito. Questo rappresenta un problema abbastanza serio per quanto riguarda le performance del sensore. Dovranno essere fatti ulteriori esperimenti sul diametro delle fibre ottiche e sul tipo di rivestimento da adottare se si vuole inglobare i sensori nei materiali compositi senza avere decadimenti delle performance del sensore per l'intera vita della struttura. La presenza del rivestimento può avere una profonda influenza nell'interfaccia fibra/matrice e può permettere una ottimizzazione della sensibilità del sensore e della sua durata nel tempo attraverso una riduzione di sforzi concentrati nella vicinanza della fibra.

Come abbiamo detto pocanzi, le fibre ottiche devono essere disposte in maniera collineare al rinforzo del materiale composito per limitare il più possibile il resin-eye e ridurre di conseguenza il fattore di amplificazione degli sforzi. Ma alla fine della fibra ottica si crea comunque una discontinuità che può portare ad un principio di distacco del sensore dalla matrice. Questo ci suggerisce di collocare il sensore ad una certa distanza dalla fine della struttura se si vogliono usare i FBGS in applicazioni con elevati numeri di cicli[4].

1.6 Sensori a fibra ottica integrati in strutture

I due più importanti parametri strutturali che devono essere misurati dai sensori in fibra ottica sono deformazione e temperatura. Il problema che si presenta è che tali sensori sono sensibili ad entrambi i parametri: una variazione di temperatura produce una variazione del valore della lunghezza d'onda riflessa. Questo problema dovrà essere trattato e le due soluzioni più ovvie sono o misurare contemporaneamente deformazione e temperatura oppure fabbricare sensori a fibra ottica speciali già compensati in temperatura. Entrambi gli approcci sono molto difficili e devono ancora essere perfezionati[2].

Altro punto critico è la localizzazione della sezione della fibra ottica in cui è ricavato il sensore: il rischio è che la deformazione lungo il materiale influenzi il segnale riflesso, rendendo impossibile il suo utilizzo. Attualmente non è presente alcun sensore in fibra ottica “distribuito” che sarebbe molto utile nelle rilevazioni di deformazione nelle strutture in materiale composito [2].

1.6.1 Funzionamento delle fibre

I FBGS sono sempre stati usati come sensori di deformazione longitudinale in un gran numero di applicazioni, mostrando quasi la stessa precisione degli estensimetri elettrici. Nella maggior parte delle applicazioni usate in cui sono applicati i FBGS, lo stato di sforzo e di deformazione nell'intorno del sensore è tipicamente unidirezionale, e il gradiente di sforzo lungo il reticolo può essere considerato trascurabile. Il reticolo si comporta quindi come un semplice estensimetro elettrico, nel quale la dipendenza lineare alla deformazione della lunghezza d'onda di Bragg λ_B può essere facilmente determinata, come mostra la Figura(1.15).

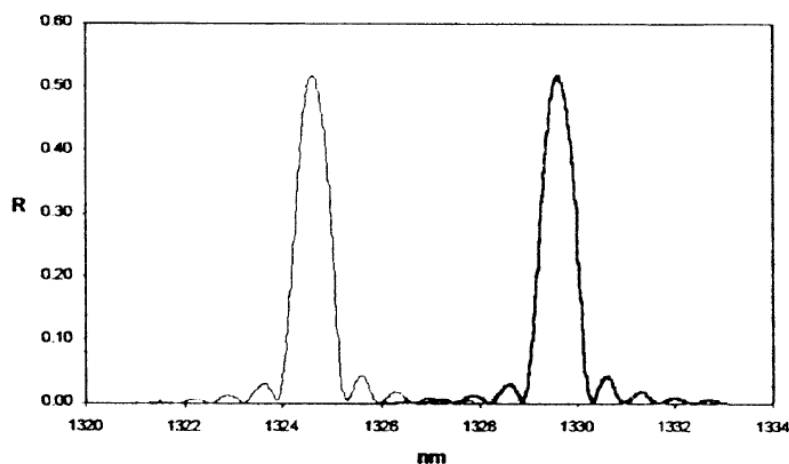


Figura 1.15: Comportamento ideale di un FBGS incollato sulla superficie di una trave in alluminio: a trave scarica (picco di sinistra) e con trave soggetta ad uno sforzo longitudinale (picco di destra)

Al giorno d'oggi sono già disponibili diversi metodi per ricavare dal segnale in uscita il profilo di deformazione reale sul provino. Queste tecniche sono state utilizzate per analizzare lo stato di deformazione in diversi casi di interesse nel campo dei materi-

ali compositi, come nel caso dei giunti oppure nell'analisi della meccanica della frattura.

La situazione che complica l'utilizzo e l'integrazione dei FBGS è la loro risposta alle deformazioni e agli stress non longitudinali. Questo effetto è particolarmente importante quando si vuole inglobare i sensori nei laminati in materiale composito e successivamente sottoposti al processo di curing. Quello che si verifica è lo split del picco riflesso in due picchi gemelli, dovuto alla bi-rifrangenza della fibra causato dalla presenza di un forte stato di sforzo residuo all'interno del laminato (Figura(1.16)).

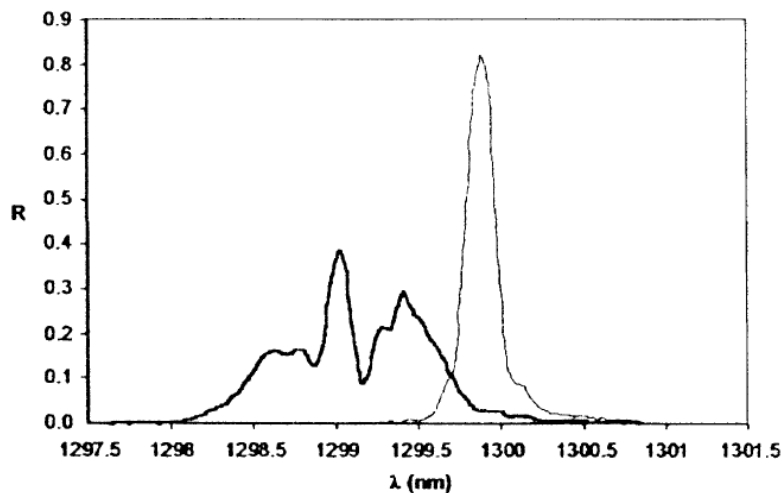


Figura 1.16: Spettro di un FBGS annesso in un laminato in materiale composito unidirezionale vicino ad un giunto: in assenza di carico (spettro di destra) e sottoposto ad un carico non longitudinale (spettro di sinistra)

In prima approssimazione, questo sembrerebbe un effetto indesiderato che dovrebbe essere eliminato attraverso un adeguato rivestimento del sensore. Ma una migliore conoscenza del comportamento del sensore soggetto a carichi trasversali può portare maggiori informazioni sul reale stato di sforzo residuo dovuto al processo di fabbricazione della struttura[6].

1.6.2 Effetti di carichi e deformazioni trasversali sui FBGS

Per accertare gli effetti di carichi trasversali sul comportamento della lunghezza d'onda di Bragg, è stato effettuato un semplice quanto importante esperimento come mostra la Figura(1.17)[6].

Due FBGS lunghi 5mm sono stati collocati tra due piatti di vetro e sottoposti ad un carico radiale di compressione. Durante la prova sono stati usati due sensori per compensare eventuali asimmetrie nell'applicazione del carico dovuto a disallineamenti.

Inizialmente lo spettro del reticolo mostra piccole distorsioni (soprattutto a causa della bassa risoluzione dello strumento ottico di analisi usato), mentre per carichi più elevati si ha la comparsa di un altro picco per entrambi i sensori. Uno dei picchi ri-

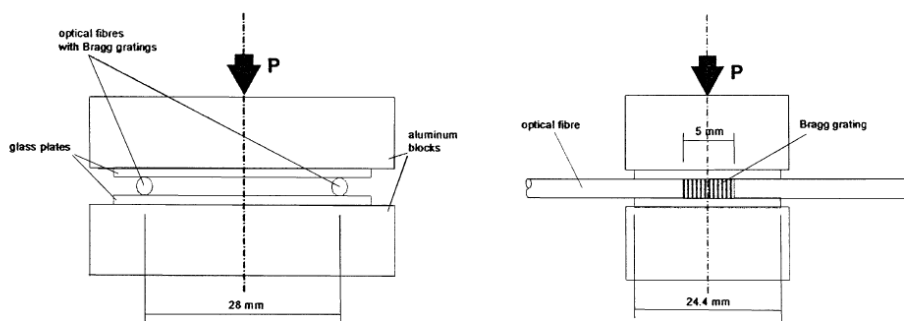


Figura 1.17: Schema dell'esperimento effettuato per i carichi trasversali sulla fibra con reticolo di Bragg

mane pressochè fisso, mentre l'altro si sposta verso lunghezze d'onda maggiori. La Figura(1.18) mostra come la variazione della lunghezza d'onda di entrambi i picchi sia quasi lineare con il carico applicato alla fibra (con una leggera differenza per bassi carichi). Attraverso una media dei risultati dei due reticoli è possibile effettuare una caratterizzazione della sensibilità del sensore ai carichi trasversali[6].

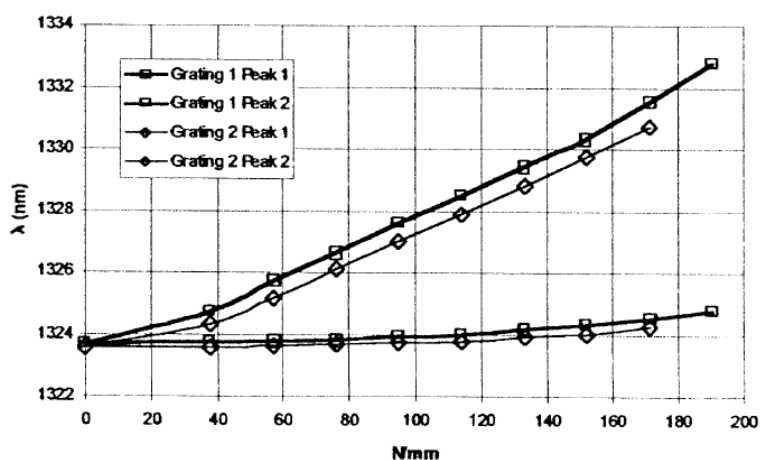


Figura 1.18: Variazione della lunghezza d'onda dei picchi dei due sensori sottoposti a un carico trasversale di compressione

1.6.3 Carichi longitudinali e trasversali in un laminato in materiale composito

L'effetto della distorsione dello spettro descritto precedentemente diventa un inconveniente se si vogliono usare i FBGS come semplici sensori di deformazione longitudinale. Ma d'altra parte può anche essere usato come un sofisticato strumento per ottenere informazioni sullo stato di sforzo e di deformazione residuo del laminato in

materiale composito. Per dimostrare quanto appena detto è stato effettuato il seguente esperimento[6].

In un'autoclave è stato preparato un provino di 42 strati di materiale unidirezionale preimpregnato *AS4-8552* con una configurazione quasi isotropica ($[45/-45/0/90/0/-45/45/0/90/45/-45]_2$). Le dimensioni finali del provino erano $185 \times 135 \times 7.0$ mm e due FBGS sono stati annegati parallelamente a due strati di rinforzo al centro del provino (vedi Figura(1.19)).

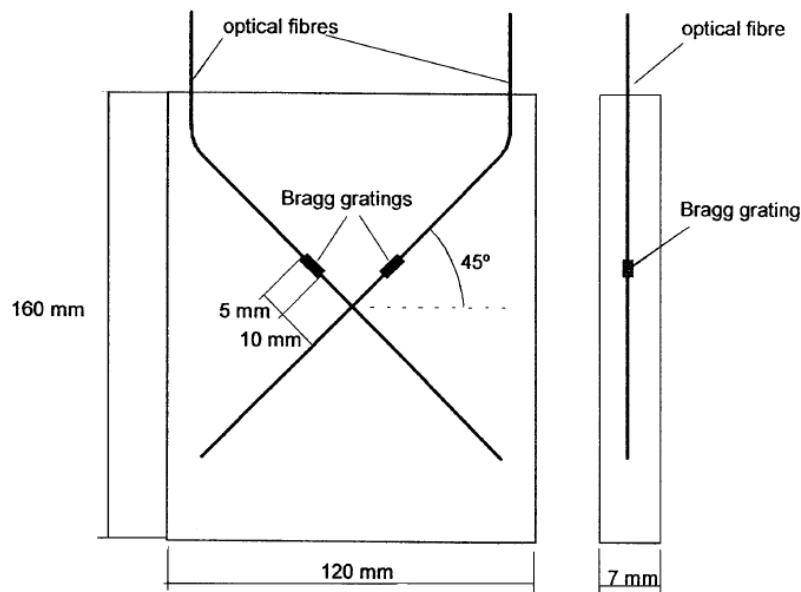


Figura 1.19: Schema del provino

Il processo di curing è stato delineato nel seguente modo:

- primo riscaldamento da temperatura ambiente a 80°C senza applicazione di alcuna pressione;
- mantenimento della temperatura e graduale introduzione della pressione fino ad un valore di 7 bar
- un altro riscaldamento con medesima rampa di salita, a 7 bar, fino al raggiungimento di una temperatura di 190°C ;
- mantenimento di pressione (7 bar) e temperatura (190°C);
- raffreddamento da 190°C a temperatura ambiente;

La Figura(1.20) mostra l'andamento della temperatura e della lunghezza d'onda di uno dei sensori a reticolo di Bragg annegati nel provino durante il processo di curing. Durante il riscaldamento e lo step a temperatura costante, la forma dello spettro riflesso rimane inalterato, con un singolo picco. All'inizio della fase di raffreddamento si manifesta lo sforzo residuo causato dalla contrazione termica.

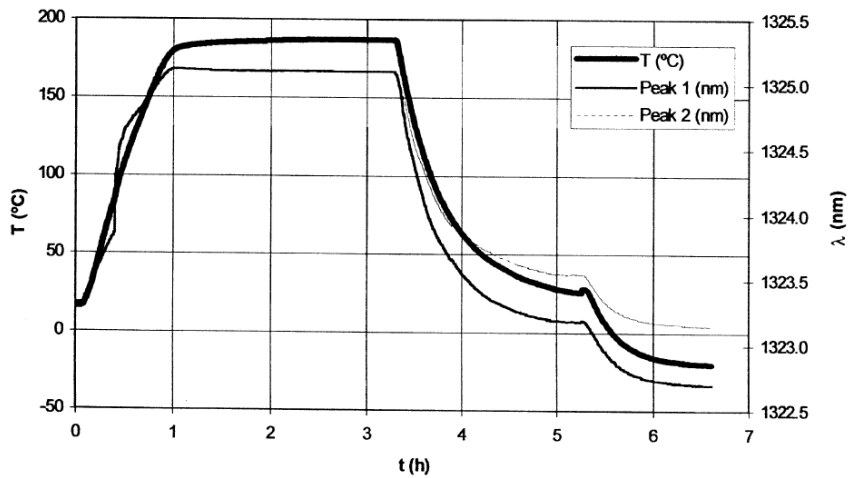


Figura 1.20: Andamento della temperatura e della lunghezza d'onda del FBGS durante il processo di curing

Il risultato più importante nella Figura(1.21) è l'andamento lineare della lunghezza d'onda di Bragg λ_B al variare della temperatura. Il successivo shift nella lunghezza d'onda rappresentato dal grafico dal numero 1 è causato dalla deformazione longitudinale dovuta all'applicazione della pressione di 7 bar.

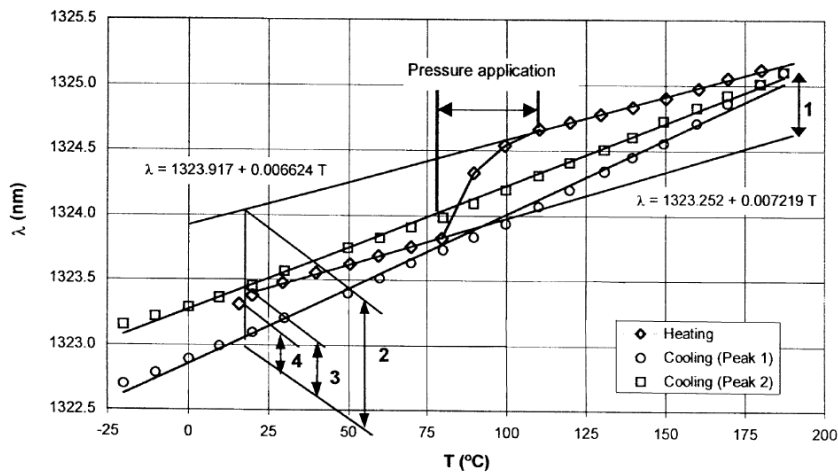


Figura 1.21: Andamento della lunghezza d'onda di Bragg λ al variare della temperatura durante il processo di curing

Durante il raffreddamento del provino, le contrazioni termiche generano elevati carichi radiali sulla fibra causando uno sdoppiamento del picco del reticolo. I due picchi evolvono separatamente, ma entrambi mantengono una dipendenza lineare dalla temperatura. Quello a minor lunghezza d'onda varia con la deformazione, sia di natura meccanica che di natura termica, mentre la distanza tra i due picchi fornisce una misura dei carichi trasversali applicati al sensore in fibra ottica. La variazione di lunghezza d'onda identificata con il numero 2 rappresenta la deformazione longitudinale dovuta

dalla contrazione termica del provino, circa $1000\mu\epsilon$, mentre lo shift di lunghezza d'onda numero 4 corrisponde al carico trasversale applicato al reticolo dalla contrazione termica, circa 85 MPa. Il numero 3 indica lo sforzo trasversale residuo sulla fibra ottica causato dal processo di curing, che corrisponde a circa 110 Mpa[6].

1.7 Sensibilità alla temperatura e deformazione apparente

Per verificare l'influenza della disposizione dei rinforzi sulla distorsione della lunghezza d'onda di Bragg sono stati effettuati diversi esperimenti come riportato in Tabella(1.1). I laminati in fibra e metallo (FML) esaminati sono formati da fogli di alluminio di uno spessore di $300\mu m$ e da fogli prepregs di fibra di vetro/polipropilene (GF/PP)[7].

La parte sensibile del FBGS (lunghezza della parte sensibile di circa 7 mm) è stata sistemata all'incirca al centro di ogni provino.

I provini in fibra di vetro/matrice epossidica e quelli in fibra di carbonio/matrice epossidica sono stati ottenuti attraverso l'impilamento di fogli unidirezionali preimpregnati e sottoposti al processo di curing ad una temperatura di $125^{\circ}C$ e ad una pressione di 7 bar per circa 2 ore di tempo. I FML sono stati invece ottenuti riscaldando il provino fino ad una temperatura di $185^{\circ}C$ e sottoponendolo ad una pressione di 7 bar prima del raffreddamento fino alla temperatura ambiente. Il riscaldamento ed il raffreddamento di tutti e nove i provini sono stati fatti con un andamento di circa $4^{\circ}C/min$ [7].

Tabella 1.1: Elenco degli esperimenti

Tipo di materiale	Disposizione degli strati	Lay-up	Codice del provino	Variazione di λ_{bragg} dopo il curing (nm)	Variazione di FWHM dopo il curing (nm)
Fibra di vetro/epossidica	[90/45/-45/0/{FBG-0}/0/-45/45/90]	Quasi-isotropo	GF/E-1	0.44	0.1016
Fibra di vetro/epossidica	[90/45/-45/0/{FBG-0}/0/-45/45/90]	Quasi-isotropo	GF/E-2	0.43	0.0306
Fibra di vetro/epossidica	[(45/-45) ₂ {FBG-0}/(-45/45) ₂]	Angle-ply	GF/E-3	0.21	0.4246
Fibra di vetro/epossidica	[(45/-45) ₂ {FBG-0}/(-45/45) ₂]	Angle-ply	GF/E-4	0.11	0.4026
Fibra di carbonio/epossidica	[0 ₄ {FBG-0}/0 ₄]	Unidirezionale	CF/E-1	0.26	0.009
Fibra di carbonio/epossidica	[0 ₄ {FBG-0}/0 ₄]	Unidirezionale	CF/E-2	0.38	0.005
FML (GF/PP)	[Alu/0/{FBG-0}/0/Alu/0/0/Alu]	Unidirezionale	FML-1	2.63	0.011
FML (GF/PP)	[Alu/0/{FBG-0}/90/Alu/90/0/Alu]	Cross-ply	FML-2	3.06	0.272
FML (GF/PP)	[Alu/0/{FBG-0}/90/Alu/90/0/Alu]	Cross-ply	FML-3	2.83	0.051

Nella Tabella(1.1) tra parentesi quadre si definisce la legge di stratificazione dei diversi provini: i numeri 0, 45, -45 e 90 indicano la diversa direzione del rinforzo in fibra di vetro o di carbonio, mentre il pedice indica il numero di strati di uno stesso rinforzo.

Gli spettri riflessi di tutti i provini testati sono mostrati nelle figure (1.22), (1.23) e (1.24).

Lo spostamento in lunghezza d'onda del picco dovuto al processo di fabbricazione del provino può essere visualizzato direttamente grazie alle frecce presenti in ogni figura. In Tabella(1.1) si possono visualizzare le variazioni della lunghezza d'onda di Bragg e del valore del FWHM prima e dopo il processo di curing per tutti i provini.

Si osserva una piccola distorsione dello spettro nei provini quasi-isotropi (GF/E-1 e GF/E-2). Al contrario, in entrambi i provini angle ply (GF/E-3 e GF/E-4), lo spettro del FBGS si divide in due distinti picchi durante il ciclo di curing. Per i provini in fibra

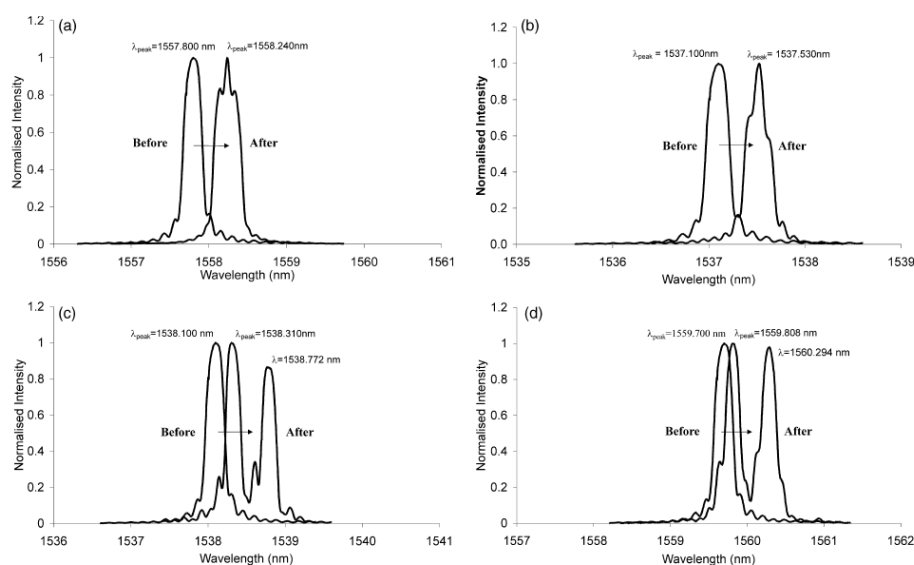


Figura 1.22: Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) GF/E-1, (b) GF/E-2, (c) GF/E-3, (d) GF/E-4

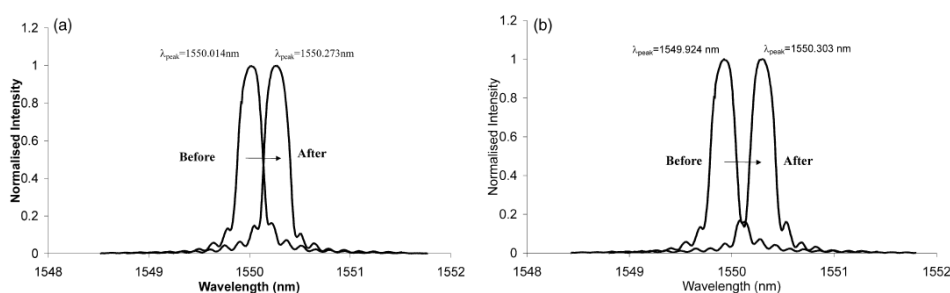


Figura 1.23: Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) CF/E-1, (b) CF/E-2

di carbonio unidirezionali, CF/E-1 e CF/E-2, non si notano apprezzabili distorsioni dello spettro. Allo stesso modo, il provino formato da metallo e rinforzi unidirezionali, FML-1, non mostra distorsioni dello spettro. Invece sia il provino FML-2 sia il FML-3, che sono identici sia nelle dimensioni che nella stratificazione, mostrano due spettri diversi.

Per i FBGS anegati tra due strati di fibre di rinforzo a 0° nei provini quasi-isotropi (GF/E-1 e GF/E-2) è stata notata una piccola distorsione degli spettri. Questo può indicare un disallineamento del FBGS rispetto alla direzione a 0° . Ma è anche possibile che tale distorsione sia dovuta alla presenza di fibre di rinforzo a 45° nel terzo e sesto strato del laminato (ovviamente, data la distanza dal sensore, i loro effetti sono ridotti).

Per la configurazione ad angle-ply, entrambi i provini GF/E-3 e GF/E-4 mostrano due picchi distinti come mostra la Figura(1.22) (c) e (d). La tendenza dello spettro del FBGS di presentare distorsioni accentuate solo nella configurazione angle-ply è dovuta ai carichi asimmetrici sul sensore stesso durante la fase di raffreddamento del provino. Micro-piegature e micro-distacchi sulla regione del reticolo possono contribuire

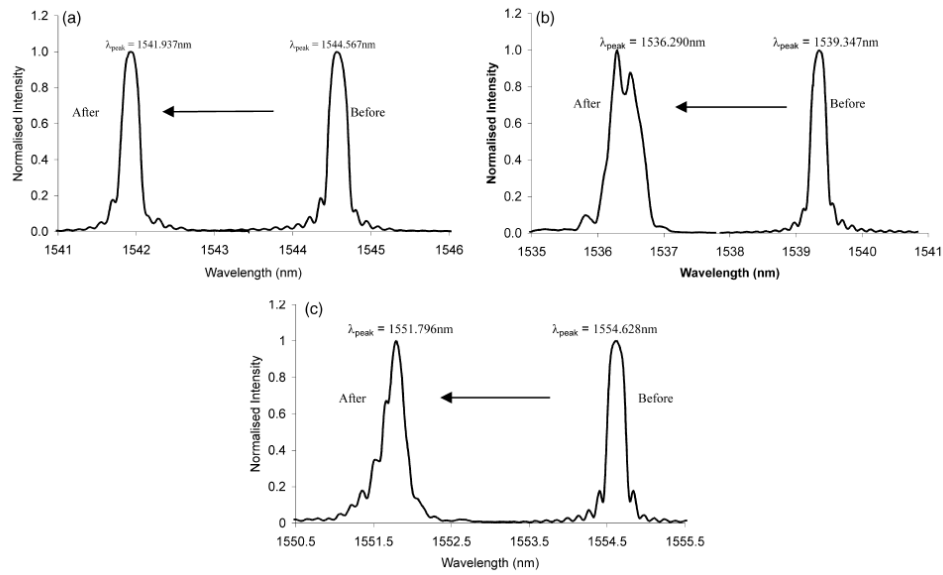


Figura 1.24: Spettri dei FBG prima e dopo il processo di curing del materiale (a) FML-1, (b) FML-2, (c) FML-3

all'intensificazione di sforzi asimmetrici causando una distribuzione di deformazioni non-uniforme. È stato anche riconosciuto che un campo di sforzo non-omogeneo sulla fibra ottica può generare significative birifrangenze che portano quindi ad una distorsione della forma dello spettro. Sebbene queste siano tutte possibili cause per una suddivisione dello spettro del FBGS, la formazione di due picchi distinti con circa lo stesso ordine di riflessione (Figura(1.22) (c) e (d)) può suggerire che il reticolo sia ora formato da due sezioni più piccole con uniforme periodo e/o indice di riflessione. È possibile che le fibre di rinforzo disposte a 45° negli strati adiacenti in contatto con il FBGS possono aver introdotto uno sforzo non-uniforme sul profilo del sensore e che abbia quindi portato alla divisione finale in due picchi distinti. La Figura(1.25) mostra la parte del sensore in cui non si ha un campo di sforzo uniforme a causa della presenza di fibre di rinforzo con angoli diversi da quello della fibra ottica.

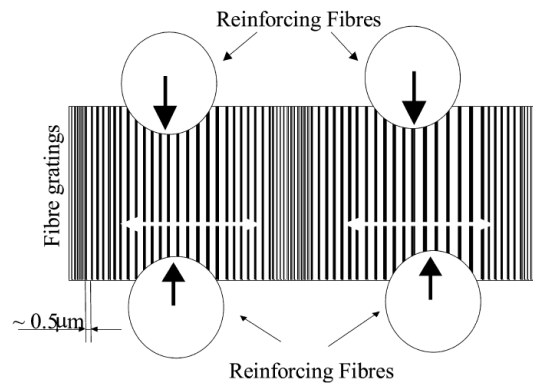


Figura 1.25: Deformazione della regione del sensore da parte delle fibre di rinforzo degli strati adiacenti

Quando i sensori ottici sono annegati nella stessa direzione delle fibre di rinforzo, l'inclusione della fibra ottica non crea nella microstruttura del provino alcuna perturbazione locale significativa nelle vicinanze del FBGS. La forma finale dello spettro del FBGS in tutti e tre i provini unidirezionali esaminati appare invariata. Uno studio svolto da Eaton [8], usando gli elementi finiti per l'analisi di campi di sforzo e deformazione, ha evidenziato una distribuzione uniforme delle deformazioni lungo la fibra ottica in una configurazione puramente unidirezionale. Questo risultato appare consolidato dall'analisi degli spettri dei provini unidirezionali (CF/E-1, CF/E-2 e FML-1) dove gli strati di rinforzo del provino sono tutti unidirezionali. L'assenza di fibre disposte in altre direzioni minimizza la possibilità di trovare campi di sforzo non-uniformi nella vicinanza del FBGS.

Per i provini FML di tipo cross-ply, il comportamento previsto quando il sensore FBG è annegato nella stessa direzione delle fibre di rinforzo a 0° , è la collocazione di queste ultime durante il processo di curing come illustrato in Figura(1.26). Da rilievi ottici si nota che la frazione in volume di fibra di rinforzo nella vicinanza del sensore è di circa il 27% (contro il 35% prima della lavorazione) evidenziando così che la fibra ottica ha generato uno spostamento del tessuto. In questo caso si nota una media distorsione dello spettro (meno rispetto al caso a 45°) dovuto al fatto che la FBGS non riesce ad annidarsi perfettamente tra le fibre a 0° ma risente di uno sforzo radiale dovuto allo strato a 90° adiacente: lo spettro risulta anche visivamente più largo.

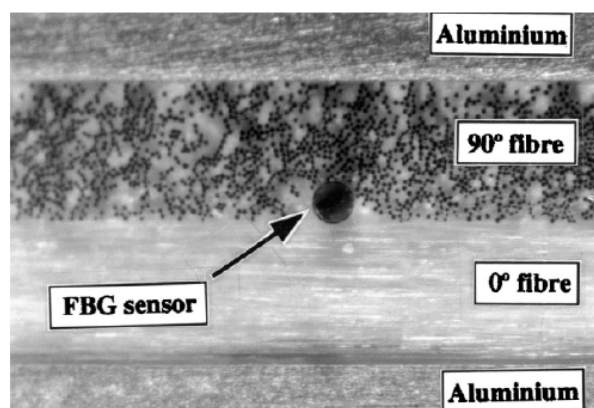


Figura 1.26: Sensore FBG annidato nella direzione delle fibre di rinforzo a 0°

Sebbene lo spettro nei materiali FML-2 (Figura(1.24) (b) e FML-3 (Figura(1.24) (c) mostri piccole distorsioni a seguito del curing, questo è sostanzialmente minore rispetto a quello dei provini in configurazione angle-ply incontrati precedentemente (Figura(1.22)) c) e d). Un comportamento simile ai provini cross-ply è riscontrabile, in termini di divisione del picco e di larghezza del segnale, nel laminato FML-2. È possibile che il sensore non si sia annidato completamente nello strato a 0° e che quindi sia parzialmente esposto agli sforzi trasversali dovuti alle fibre disposte a 90° , subendo così una deformazione non uniforme.

Facendo un paragone con gli spettri ottenuti attraverso provini unidirezionali (Figura(1.23) a) e b) e Figura(1.24) a) si può concludere che le fibre a 90° presenti negli strati adiacenti possono avere un effetto di distorsione sullo spettro riflesso. La larghezza dello spettro è notevolmente più ampia di quella iniziale prima dell'annegamento nel

provino. Okabe [9] ha disposto sensori FBG tra strati di composito a 0° e 90° e registrato uno spettro simile a quello mostrato in Figura(1.24). Sempre gli stessi ricercatori, usando un modello di analisi FEM, hanno mostrato come la bi-riflessione della fibra sia causata dagli sforzi residui presenti nel provino. Sono giunti alla conclusione che quella non è l'unica causa poichè alcuni spettri mostrano comunque due picchi una volta che sono stati rimossi gli sforzi trasversali.

Il provino FML-3 mostra un segnale diverso da quello del FML-2 (Figura(1.24)) b) e c) sebbene entrambi siano per costruzione del tutto identici. La distorsione dello spettro suggerisce un piccolo campo di deformazione lungo il sensore. Questo implica che, in aggiunta all'influenza della configurazione del lay-up (ed in particolar modo degli strati adiacenti alla fibra ottica), possono contribuire alla forma finale dello spettro anche altre variabili di produzione come il movimento del sensore FBG, lo scorrere della resina e il movimento delle fibre di rinforzo durante il curing[7].

1.7.1 Misurazione delle deformazioni residue

La variazione di lunghezza d'onda del picco dopo il processo di curing, fornisce informazioni utili sulle deformazioni residue che il sensore FBG e il materiale che lo ospita risentono. Le deformazioni residue dei vari provini sono state stimate in base al valore teorico del "strain gauge factor" pari a $0.78\epsilon^{-1}$ [10] e questi valori sono visualizzati in Figura(1.27).

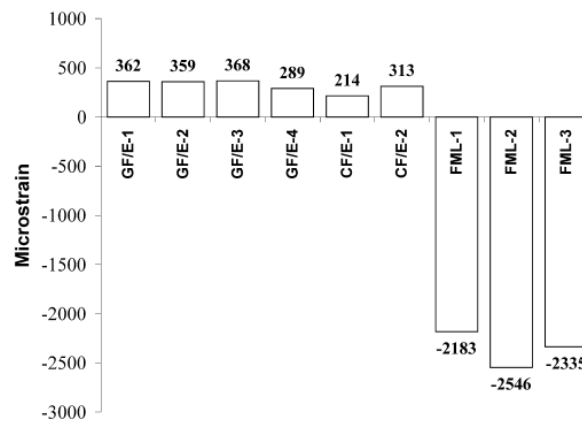


Figura 1.27: Stima delle deformazioni residue

È subito chiaro come si abbiano significative differenze tra le deformazioni residue misurate in un materiale composito e quelle presenti in un laminato metallico con fibre di rinforzo. Per i provini FML sono presenti elevate deformazioni residue, risultato della differenza tra i coefficienti di espansione termica del GF/PP e dell'alluminio presente. Questa differenza tra i coefficienti di espansione termica porta alla formazione di elevate deformazioni residue attorno al sensore quando il provino è raffreddato a partire da una temperatura elevata. Nel provino FML-1, nel quale il sensore FBG è disposto tra due strati di rinforzo longitudinale, la deformazione residua è minore rispetto ai provini con un lay-up di tipo cross-ply. Le fibre di rinforzo a 0° permettono di ridurre in parte le deformazioni radiali sul FBGS. Con l'aumentare del numero di strati di rinforzo a

0° (4 strati nel FML-1), le deformazioni residue di compressione sono minori rispetto ai provini FML-2 e FML-3. In questi due laminati, erano presenti solo due strati a 0° a contrastare le deformazioni trasversali causate dall'alluminio e, di conseguenza, il sensore FBG ha evidenziato una maggiore deformazione residua.

1.7.2 Prove a carichi unidirezionali e risposta dei sensori FBG anegati

Sono state effettuate prove di trazione unidirezionale sui provini per esaminare l'influenza di un carico applicato sulla forma dello spettro del sensore FBG[7]. La Figura(1.28) a) mostra un grafico con andamento lineare per il singolo picco del provino GF/E-1. Si può notare l'eccellente linearità per tutte le deformazioni testate. L'evoluzione dello spettro del provino GF/E-1 durante l'applicazione del carico è visibile in Figura(1.29). La lunghezza d'onda del picco dello spettro corrisponde ai punti indicati con le lettere A-E della Figura(1.28). La forma dello spettro rimane praticamente inalterata durante tutte le prove. Tutti gli altri provini che presentavano un picco singolo sono stati testati con gli stessi valori di deformazione e è stata ottenuta la stessa risposta che possiamo osservare in Figura(1.28).

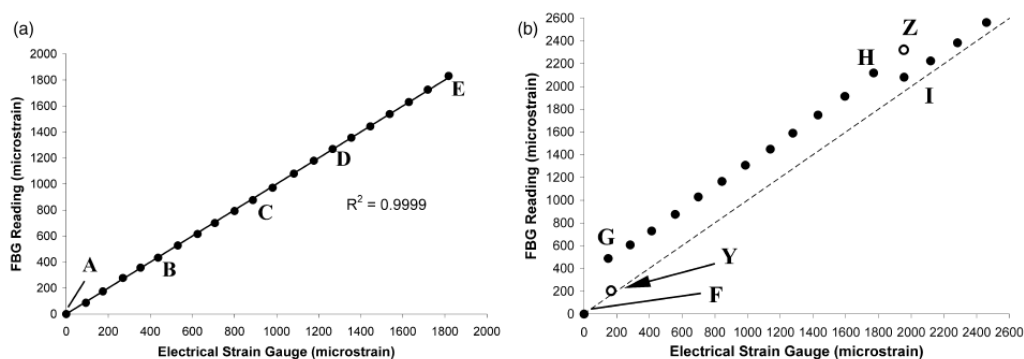


Figura 1.28: Grafico del singolo picco per i provini (a) GF/E-1, (b) GF/E-3

La Figura(1.28) b) mostra il grafico lineare per un provino con spettro a doppio picco (GF/E-3). È chiaro che ci sia un inaspettato incremento e una successiva diminuzione in due punti (rispettivamente G e I). Una più accurata indagine dell'evoluzione dello spettro, come mostrato in Figura(1.30), rivela un cambio nel profilo dello spettro. Qui, la posizione del picco dello spettro cambia dalla sinistra alla destra quando il provino è caricato da 0 a $147 \mu\epsilon$. L'algoritmo peak detection quando passa per il punto G associa questo nuovo picco ad un improvviso incremento di deformazione, mentre il vero valore da leggere sarebbe il punto Y. In questo caso la variazione nella lunghezza d'onda di Bragg sarebbe pari a $145 \mu\epsilon$ ($\lambda_Y = 1538.351nm$, $\lambda_F = 1538.171nm$, FBG strain gauge factor=0.80), in accordo con quanto rilevato dagli estensimetri elettrici. È stato osservato che la risposta del sensore FBG è molto lineare nel tratto compreso tra le discontinuità G e I. Dopo il punto I la posizione del picco cambia da destra a sinistra dello spettro. Se la lunghezza d'onda del picco fosse stata captata al punto Z si sarebbe letto un valore di $2323 \mu\epsilon$ ($\lambda_Z = 1541.029nm$, $\lambda_G = 1538.771nm$, $\epsilon_G = 489 \mu\epsilon$,

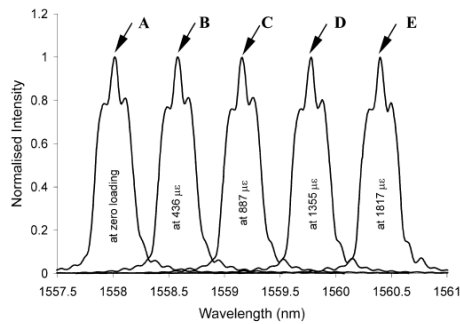


Figura 1.29: Evoluzione dello spettro per il provino GF/E-1

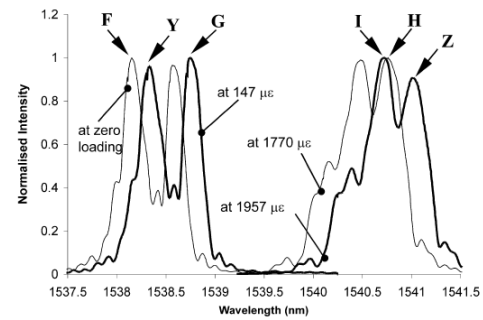


Figura 1.30: Evoluzione dello spettro per il provino GF/E-3; in particolare si nota il salto di lunghezza d'onda a $147 \mu\epsilon$ e a $1770 \mu\epsilon$

FBG strain gauge factor=0.80) che è in accordo con il trend lineare.

Dai grafici è chiaro che il FBGS ha risposto linearmente per tutta la durata dei cicli a cui è stato sottoposto. Inoltre, quello che risulta essere un cambio improvviso nel valore della deformazione è dovuto al sistema di demodulazione del FBGS che non è in grado di riconoscere in tutte le occasioni il picco da seguire per la misurazione. Lo stesso test è stato effettuato per i provini con lay-up di tipo cross-ply, FML-2, con i medesimi risultati: si ha un forte legame lineare, ma si ripresenta anche il fenomeno del “salto” di lunghezza d’onda per determinati valori di deformazione (diversi da provino a provino)[11].

La Figura(1.31) mostra la risposta dello spettro del provino cross-ply GF/E-4 sotto un carico di trazione. È immediatamente chiaro che lo spettro subisce un significativo cambio di forma durante l’applicazione del carico. Comunque, il FBGS risponde in modo lineare ai carichi e non mostra alcun salto di lunghezza d’onda nonostante i numerosi picchi secondari presenti nello spettro. Va ovviamente ricordato che si ha il fenomeno del salto di lunghezza d’onda solo quando varia l’intensità riflessa degli altri picchi.

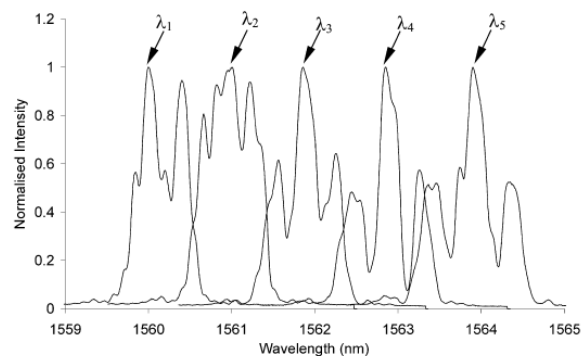


Figura 1.31: Evoluzione dello spettro del provino GF/E-4 che mostra il cambiamento dello spettro durante l’applicazione dei carichi

Le prove hanno evidenziato l'importanza di mantenere uno spettro a singolo picco dopo che il sensore è stato annegato nella struttura poiché la distorsione dello spettro può portare ad una lettura errata delle deformazioni. Anche se il fenomeno del salto di lunghezza d'onda non è stato rilevato in uno dei due provini esaminati, questa tendenza rimane. Risulta quindi evidente che, da un punto di vista pratico, i sensori FBG devono essere annegati nella stessa direzione delle fibre di rinforzo degli strati adiacenti per evitare la formazione nello spettro di picchi multipli che possono portare ad un'errata valutazione del campo di deformazione in gioco[7].

1.8 Effetto di carichi puramente trasversali e della temperatura

Per studiare meglio l'influenza della temperatura e delle deformazioni sulla larghezza dello spettro, sono stati effettuati anche alcuni esperimenti su una lastra di resina epossidica di dimensioni $15\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{mm}$ [12]. Come indice della larghezza dello spettro sono stati usati il "Full Width at Half Maximum" (FWHM) e il "Full Width at Quarter Maximum" (FWQM).

Per approfondire la relazione che intercorre tra deformazione della sezione trasversale della fibra e la larghezza dello spettro, un sensore FBG è stato annegato nel provino e ad esso è stato applicato un carico trasversale (Figura(1.32)). Come mostrato in Figura(1.33) lo spettro è diventato più largo al crescere della deformazione trasversale. In particolar modo, il FWQM cresce con un andamento praticamente lineare, mentre il FWHM ha un andamento più complesso.

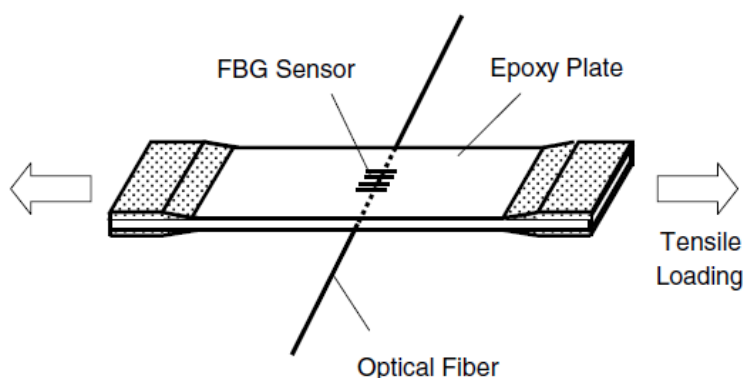


Figura 1.32: Carico trasversale applicato ad una lastra di resina epossidica con annegato un sensore FBG

Per testare il legame tra temperatura e larghezza dello spettro, il provino non è stato sottoposto ad alcun carico, ma solamente riscaldato. La Figura(1.34) mostra che il FWQM decresce linearmente con l'aumentare della temperatura. Il risultato corrisponde alle aspettative teoriche: infatti le tensioni residue in un materiale composito tendono a diminuire con l'aumentare della temperatura. Anche il FWHM mostra lo

stesso trend anche se in modo meno evidente.

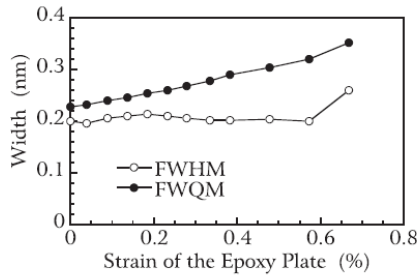


Figura 1.33: Variazione della larghezza dello spettro per una prova a carico trasversale in una lastra di resina epossidica

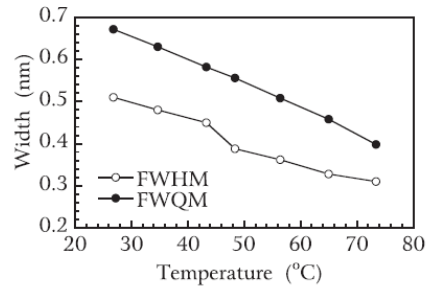


Figura 1.34: Variazione della larghezza dello spettro ottenuta riscaldando una lastra di resina epossidica

Per confermare la relazione tra deformazione longitudinale e larghezza dello spettro, il sensore inglobato nel provino è stato afferrato alle estremità e caricato a diverse temperature: 24, 38 e 55°C. Come è possibile notare in Figura(1.35) b), il FWQM aumenta linearmente all'aumentare della deformazione. Questo è causato dall'elevata rigidità della resina (rispetto alla fibra ottica) che determina due valori diversi del coefficiente di Poisson lungo la larghezza e lungo lo spessore del provino. Invece, l'andamento del FWHM non è lineare come mostra la Figura(1.35) a), anche se l'andamento per tutte le temperature è lo stesso. Questo è dovuto al fatto che lo spettro si divide in due picchi distinti.

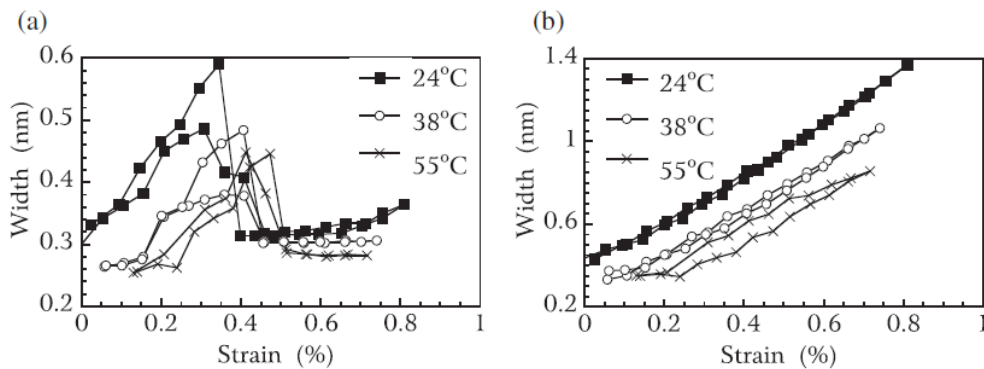


Figura 1.35: Variazione della larghezza dello spettro per carichi longitudinali per un sensore FBG annegato: (a) variazione del FWHM e (b) variazione del FWQM

Da questi test si può concludere che il FWQM risulta essere uno strumento più accurato rispetto al FWHM per determinare la larghezza di uno spettro[12].

1.9 Sviluppi della ricerca

Una volta chiarito il funzionamento fisico dei FBGS e delle sue possibili applicazioni, abbiamo deciso di focalizzare la nostra ricerca su alcuni aspetti che non hanno trovato riscontro negli articoli fino ad oggi pubblicati:

- compensazione termica: i FBGS, così come gli estensimetri elettrici, sono molto sensibili alla temperatura ed è stato descritto un modello fisico per una valida compensazione; abbiamo intrapreso un approccio più ingegneristico, valutando l'errore di compensazione a diverse temperature;
- ricerca di un know-how per inglobare i sensori in materiali compositi: sono state descritte diverse configurazioni di disposizione rinforzo-fibra ottica, ma in nessun caso veniva evidenziato come procedere per la stesura delle fibre ottiche;
- comportamento dinamico: vogliamo capire il comportamento di questi sensori a frequenze diverse da zero e l'andamento delle loro caratteristiche.

Si è deciso per l'acquisto di tre diversi tipi di sensori:

1. sensore di bassa fascia (sensore A)
2. sensore di media fascia (sensore B)
3. sensore di alta fascia (sensore C)

Non avendo precedenti esperienze, abbiamo così deciso di vedere se diversi sensori, che presentano importanti differenze di prezzo (il sensore C costa ben 10 volte il sensore A), sono caratterizzati da prestazioni simili o meno.

Per ogni tipologia sono stati comprati due sensori per poterli così compensare termicamente.

CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA

Dopo aver descritto le caratteristiche fondamentali degli estensimetri a fibra ottica ed i loro vantaggi rispetto agli estensimetri elettrici (tra i più importanti già citati nel Capitolo(1.3.1) ricordiamo l'immunità alle interferenze elettromagnetiche e la possibilità di acquisire fino a 20 sensori utilizzando un solo canale della centralina di acquisizione), vogliamo effettuare una caratterizzazione metrologica che permetta di conoscere le prestazioni di tali estensimetri ottici in termini di compensazione termica, rumore di fondo, deformazione minima misurabile e comportamento in frequenza per applicazioni dinamiche. Nonostante i sensori che si utilizzeranno sono commercialmente disponibili, non esiste in letteratura una loro accurata caratterizzazione metrologica.

2.1 Introduzione

Il primo passo per conoscere meglio i sensori a reticolo di Bragg è quello di effettuare una caratterizzazione metrologica completa e di cercare, qualora esistano, diversi livelli di prestazioni tra i diversi estensimetri a fibra ottica acquistati: sono state comprate tre coppie di sensori tra le marche più diffuse, appartenenti a fasce di prezzo differenti. Il lavoro consiste nell'effettuare:

1. *prove statiche*: l'aspetto più critico riguarda la capacità dei sensori di compensare gli effetti termici dal momento che le variazioni di temperatura comportano la lettura di una deformazione apparente indesiderata; verrà analizzato anche il livello di rumore presente durante queste analisi;
2. *prove dinamiche*: vengono effettuate per confrontare le deformazioni misurate dagli estensimetri a fibra ottica con quelli ottenuti dagli estensimetri elettrici che rappresentano un metodo di misura affidabile e collaudato da anni.

A questo scopo sono stati acquistati tre differenti marche di estensimetri a fibra ottica ognuno composto da una coppia di sensori per poter effettuare le prove di compensazione. Le caratteristiche principali dei sensori acquistati, che chiameremo A, B e C, sono riportate di seguito in Tabella(2.1), Tabella(2.2) e Tabella(2.3). Ogni sensore è dotato di un supporto di installazione diverso come mostrano le Figura(2.1), Figura(2.43) e Figura(2.3): ciò denota come queste scelte non siano standardizzate e normate come succede invece per gli estensimetri elettrici.

- Sensore A



Figura 2.1: Sensore A

Tabella 2.1: Data sheet sensore A

Sensore	
Sensibilità	1.2 pm/μ ϵ
Range di misura	±2000μ ϵ
Accuratezza	± 2 μ ϵ
Risoluzione	1 μ ϵ
Caratteristiche ottiche	
Lunghezza d'onda λ_{01}	1535.23 nm
Lunghezza d'onda λ_{02}	1560.21 nm
Larghezza dello spettro(FWHM)	< 0.2 nm
Attenuazione segnale	< 0.1 dB
Inputs/Outputs	
Tipo di cavo	Ø 3 mm
Lunghezza cavo	1 m per ogni lato
Connettori	FC/APC
Condizioni ambientali	
Range di temperatura	-22 fino a 80 °C
Umidità relativa	< 90% a 80°C
Sensibilità alla temperatura	10 pm/°C
STRAIN [μm/m]	

$$\epsilon = \Delta\lambda \cdot S$$

ϵ	Deformazione [μ ϵ]
$\Delta\lambda$	Variazione di lunghezza d'onda [nm]
S	Sensibilità del primo ordine
S_1	817.7 [μ ϵ /nm]
S_2	807.7 [μ ϵ /nm]

- Sensore B

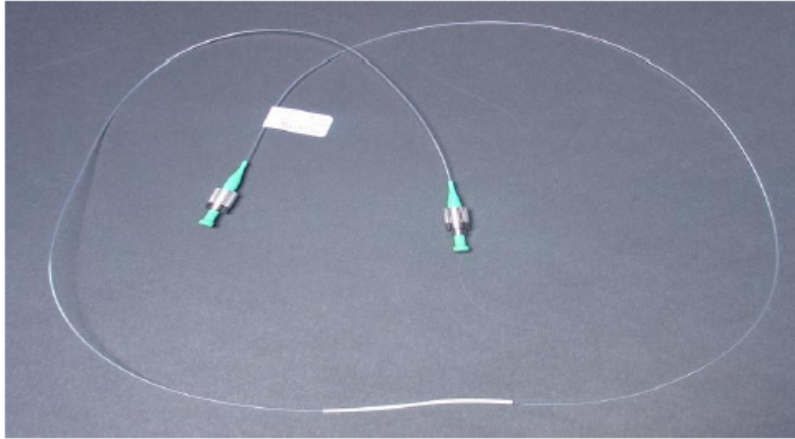


Figura 2.2: Sensore B

Tabella 2.2: Data sheet sensore B

Sensore	
Lunghezza d'onda λ_{01}	1547.74 nm
Lunghezza d'onda λ_{02}	1567 nm
Gage factor K	0.777
Range di misura	3000 $\mu\varepsilon$
Risoluzione	0.85 $\mu\varepsilon$
Caratteristiche ottiche	
Lunghezza attiva del sensore	8 mm
Lunghezza totale del sensore	28 mm
Materiale del coating	ORMOCER®
Diametro della fibra (col il coating)	195 $\mu\varepsilon$
Materiale della guaina	PVDF
Diametro della guaina	0.9 mm
Inputs/Outputs	
Lunghezza totale del cavo	90 cm
Connettori	FC/APC
Condizioni ambientali	
Range di temperatura	-50 fino a 130 °C
STRAIN [$\mu m/m$]	

$$\varepsilon = \log(\Delta\lambda) \cdot (1/K) \cdot 10^6$$

- Sensore C

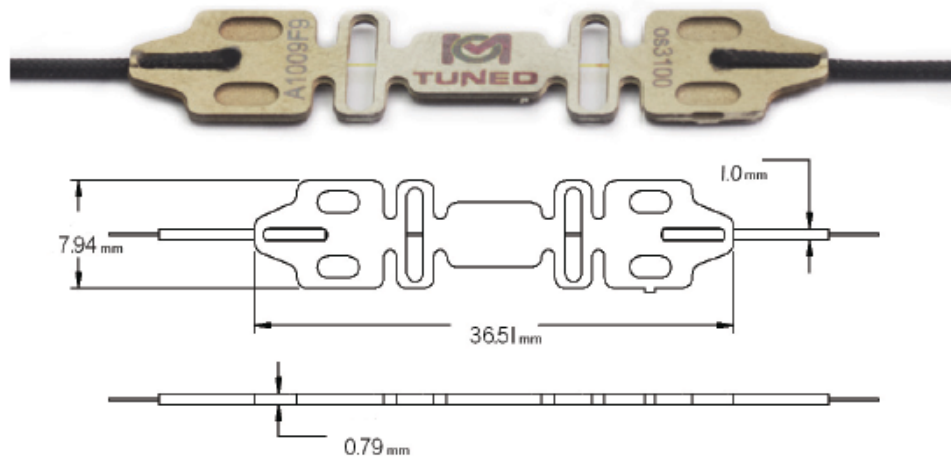


Figura 2.3: Sensore C

Tabella 2.3: Data sheet sensore C

Proprietà del sensore	
Sensibilità	1.4 pm/με
Lunghezza del sensore	22 mm
Range di temperatura	-40 fino a 120°C
Limiti di deformazione	±2500με
Resistenza a fatica	100 × 10 ⁶ cicli, ±2000με
Proprietà fisiche	
Dimensioni del sensore	36.5 × 7.94 × 1.0 mm
Peso	2.6 g
Materiale del supporto	Acciaio inossidabile
Lunghezza del cavo	1 m
Connettori	FC/APC
Proprietà ottiche	
Riflessività del picco	> 70%
FWHM	0.25 nm
Isolamento	> 15 dB
Variabili	
F_G - Gage Factor	1.00 [-]
C_1 - Gage Constant 1	6.156 [μm/m · °C]
$\Delta\lambda$ - Variazione lunghezza d'onda	[nm]
λ_{01} - Lunghezza d'onda nominale	1535.2 [nm]
λ_{02} - Lunghezza d'onda nominale	1559.5 [nm]
STRAIN [μm/m]	

$$\varepsilon = (\Delta\lambda/\lambda_0) \cdot 10^6 / F_G$$

2.2 Spettro dei sensori a riposo

La determinazione del picco dello spettro avviene mediante l'utilizzo da parte della centralina di acquisizione (il cui data sheet è visualizzabile in Tabella(2.5)) di un particolare algoritmo che in seguito chiameremo *peak detection*. La centralina permette un aggiustamento dei parametri della peak detection: possono esistere infatti lobi secondari con caratteristiche confrontabili ai picchi principali, sia in termini di potenza dello spettro riflesso che di lunghezza d'onda. È quindi possibile definire la posizione del picco principale settando i due parametri fondamentali della centralina, ampiezza (Power [dB]) e larghezza ($\Delta\lambda$ [nm]): il picco principale da monitorare è quello posto in prossimità della lunghezza d'onda definita dal data sheet di ogni sensore.

La presenza di un picco difficilmente rilevabile a causa di lobi laterali di ampiezza e larghezza confrontabili, può provocare errori di individuazione non solo durante le fasi di settaggio della centralina, ma soprattutto nel corso della prova poichè i picchi tendono a muoversi e a confondersi, come quelli presentati precedentemente nel Capitolo(1.7.2)

Una prima differenza tra i sensori è stata rilevata non appena sono stati collegati alla centralina di acquisizione.

In Figura(2.4) vengono mostrati gli spettri dei sensori A: i due spettri sono molto diversi tra di loro e quello più a destra mostra un andamento particolare, il che evidenzia un processo produttivo che non consente una perfetta ripetibilità del segnale.

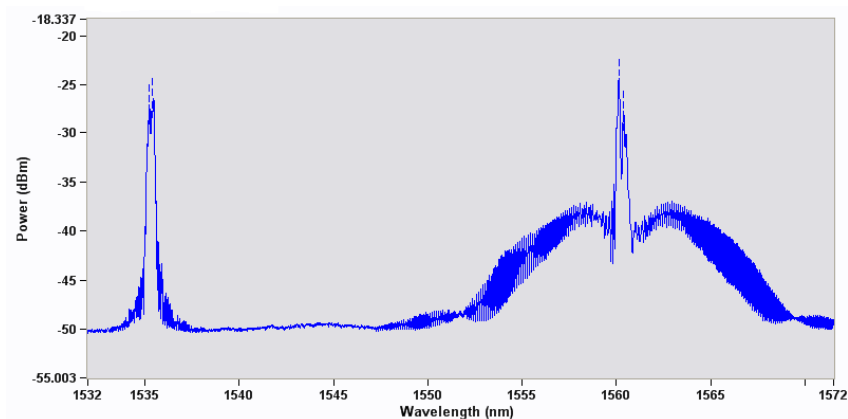


Figura 2.4: Sensori A collegati alla centralina

La centralina rileva inizialmente 4 picchi anzichè 2 (Figura(2.5)) e solo un fine aggiustamento dei parametri dell'algoritmo di peak detection ha permesso di effettuare adeguatamente le nostre analisi: infatti dalla Figura(2.5) si evince come ogni sensore presenti due picchi simili tra di loro (rispettivamente FBG-A1/FBG-A2 e FBG-B1/FBG-B2) sia in termini di lunghezza d'onda che di potenza dello spettro riflesso. Una forma dello spettro riflesso che presenti picchi secondari molto simili a quelli principali può dar luogo a problemi di identificazione dei picchi da seguire.

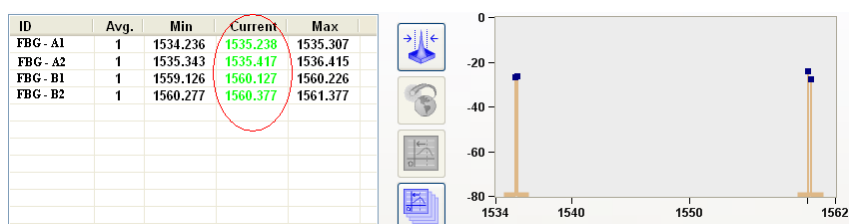


Figura 2.5: Sensori A: rilevazione di quattro picchi invece di due

Facendo un ingrandimento dei due picchi (Figura(2.6) e Figura(2.8)) si può notare come questi siano del tipo a bassa riflessività (potenza dello spettro riflesso $< 20\%$, con riferimento al Capitolo(1.3.4) e alla Figura(1.13)) poiché presentano i tipici lobi laterali.

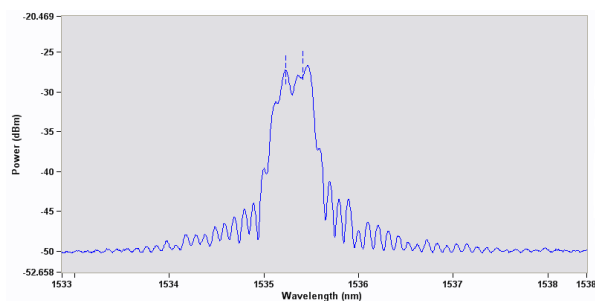


Figura 2.6: Ingrandimento del picco di sinistra del sensore A: evidenzia la bassa riflessività

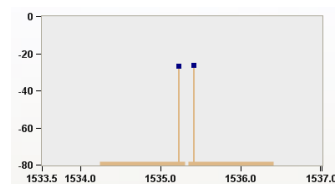


Figura 2.7: Rilevazione di due picchi da parte della centralina

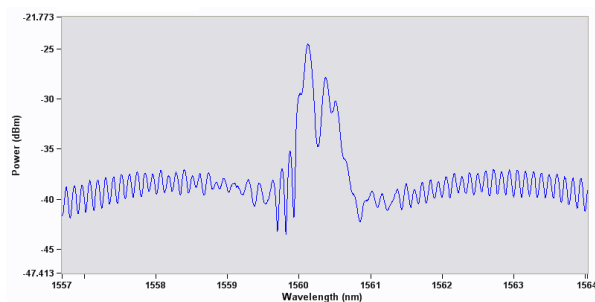


Figura 2.8: Ingrandimento del picco di destra del sensore A: evidenzia la bassa riflessività

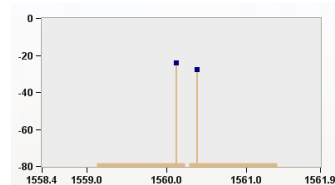


Figura 2.9: Rilevazione dei picchi da parte della centralina

Analizzando i picchi del sensore B (Figura(2.10) e Figura(2.12)) possiamo notare come anch'essi siano a bassa riflessività, ma presentino un andamento simile tra di loro, simbolo di un migliore processo di produzione. Un altro parametro che testimonia la buona qualità dei due sensori è la rilevazione immediata di due soli picchi (e non quattro come per i sensori A) da parte della centralina di acquisizione (Figura(2.11) e Figura(2.13)), poiché i lobi laterali presentano lunghezze d'onda e potenze dello spettro riflesso sensibilmente diverse da quelle del picco principale.

Possiamo concludere che pur essendo i sensori B di tipologia analoga a quelli precedenti, essi presentano spettri simili tra di loro e con picchi principali facilmente indi-

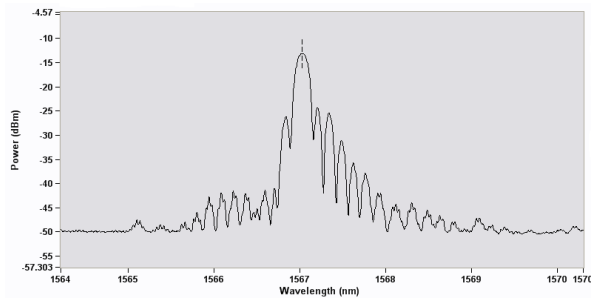


Figura 2.10: Ingrandimento del primo picco dei sensori B

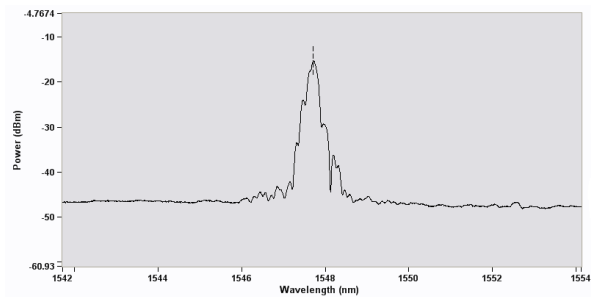


Figura 2.12: Ingrandimento del secondo picco dei sensori B

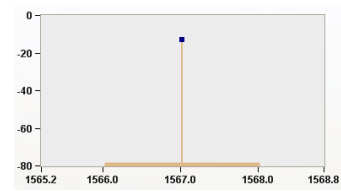


Figura 2.11: Rilevazione di un solo picco da parte della centralina

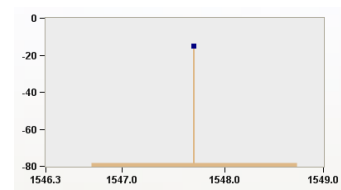


Figura 2.13: Rilevazione del picco da parte della centralina

viduabili.

Collegando i sensori C alla centralina, ci si può rendere immediatamente conto che questi siano di qualità migliore rispetto a quelli precedenti: essi infatti rispecchiano l'andamento dei FBGS ad alta riflessività (potenza dello spettro riflesso $> 90\%$) (già precedentemente descritti in Figura(1.13)) come è possibile visualizzare in Figura(2.14).

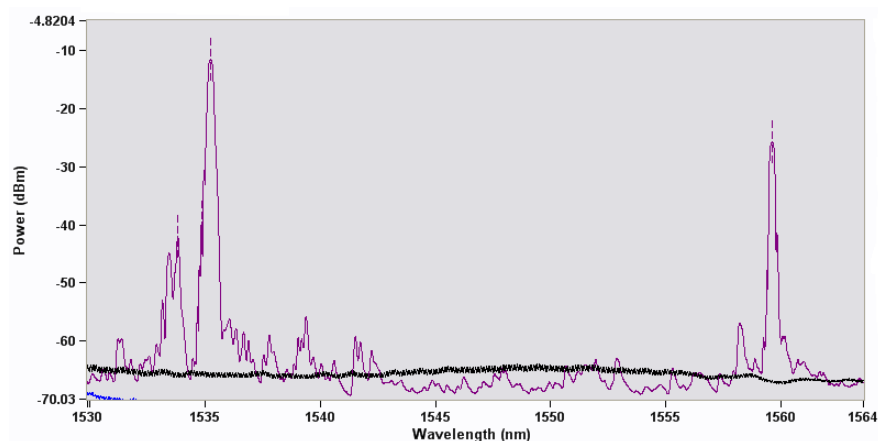


Figura 2.14: Sensori C collegati alla centralina

La Figura(2.15) mostra che la centralina rileva inizialmente tre picchi: tale problematica è già stata trattata nel Capitolo(1.3.4) ed evidenziata nella Figura(1.13) poiché

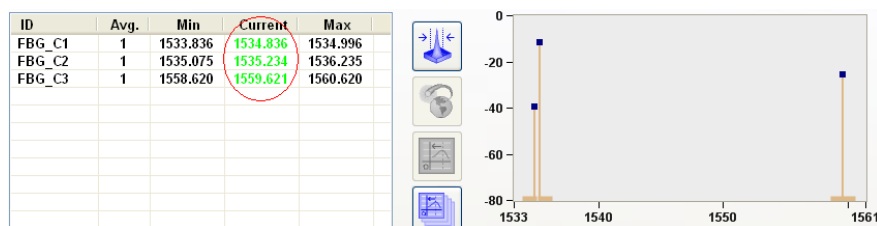


Figura 2.15: Sensori C: rilevazione di tre picchi

risulta essere una caratteristica riscontrabile nei FBGS ad alta riflessività. L'ingrandimento del picco di sinistra (Figura(2.16)) mostra come il picco secondario sia ben distinto rispetto al picco principale (vedi anche Figura(2.17)): è bastato quindi un semplice settaggio dei parametri della peak detection per ottenere la posizione del solo picco fondamentale.

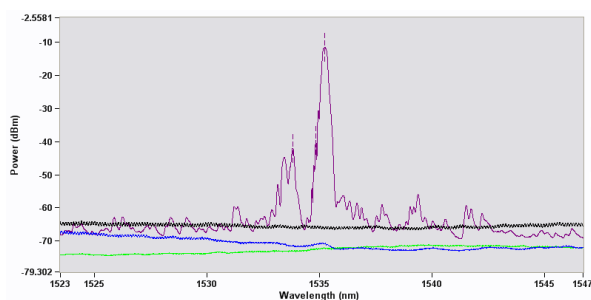


Figura 2.16: Ingrandimento del picco di sinistra dei sensori C

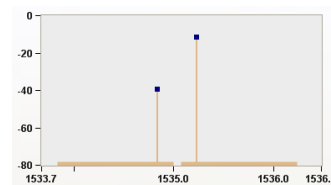


Figura 2.17: Rilevazione di due picchi per il sensore di sinistra di tipo C

Analizzando invece il picco di destra (Figura(2.18)) si può notare come tale picco sia il migliore di tutti quelli analizzati fino ad ora: è ad alta riflessività e non presenta alcun picco secondario.

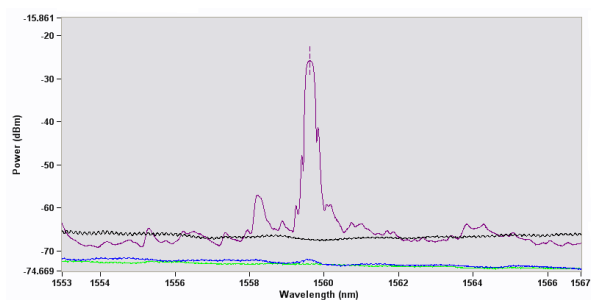


Figura 2.18: Ingrandimento del picco di destra dei sensori C

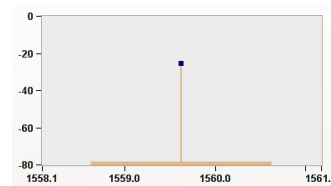


Figura 2.19: Rilevazione di un picco per il sensore di destra di tipo C

Per avere un confronto oggettivo riassumiamo i risultati fin'ora ottenuti nella Tabella(2.4).

I sensori C sono quelli che, a riposo, hanno fino ad ora fornito lo spettro migliore essendo ad alta riflessività e presentando picchi molto ben definiti sia per quanto riguar-

da l'asse X (ossia nella lunghezza d'onda) sia su quello delle Y (potenza dello spettro riflesso).

I sensori B pur essendo a bassa riflessività presentano caratteristiche simili a quelli di tipo C.

I sensori A invece presentano problemi per quanto riguarda l'identificazione del picco principale: infatti ne presentano ben 4, a due a due molto vicini tra di loro sia in termini di lunghezza d'onda che di potenza dello spettro riflesso.

Questa analisi fornisce una prima risposta alla sostanziale differenza di prezzo tra i sensori A e C (ricordiamo che il sensore di tipo C costa quasi 10 volte il sensore A), anche se solamente le ulteriori prove che andremo ad eseguire potranno fornire un'analisi più dettagliata delle prestazioni dei tre diversi sensori.

Tabella 2.4: Confronto tra i valori dei picchi dei sensori A, B e C

	Sensore 1				Sensore 2			
	λ_{princ} [nm]	Potenza riflessa [dB]	λ_{sec} [nm]	Potenza riflessa [dB]	λ_{princ} [nm]	Potenza riflessa [dB]	λ_{sec} [nm]	Potenza riflessa [dB]
Sensore A	1535.41	-26.5	1535.238	-26	1560.226	-24.6	1561.377	-28.2
Sensore B	1547.74	-15.5			1567.1	-13.2		
Sensore C	1535.23	-11.7	1533.83	-42.1	1559.62	-26		

2.3 Prove statiche

L'elevata sensibilità alla temperatura dei sensori a fibra ottica obbliga a compensare eventuali effetti termici nelle prove statiche o semi-statiche, nelle quali la grandezza da misurare varia con una velocità simile a quella di variazione della temperatura.

In questi casi le, seppur lente, variazioni di temperatura influenzano la misura in maniera significativa: si è dunque considerato utile testare la capacità di questi sensori di compensare tali effetti, avendo a disposizione due sensori per ogni tipologia di fibra ottica.

Una tale sperimentazione non trova corrispondenza in letteratura scientifica: l'incontro con una delle aziende leader mondiale nella produzione di estensimetri elettrici ed ottici, ha evidenziato come l'argomento sia ancora in fase di studio e non divulgabile in quanto a nessuna delle nostre domande è seguita una risposta esaustiva.

Queste prove vengono effettuate in assenza completa di carichi (sensori liberi), isolando in questo modo il contributo della temperatura: sottraendo quindi i segnali ottenuti dalle coppie di sensori (trasformati in deformazioni in modo opportuno) verrà stimata la capacità di compensazione termica, per cui solo sensori con sensibilità alla temperatura molto simile potranno dare buoni risultati.

Il primo step affrontato è la verifica della compensazione termica a diverse temperature:

- $T = 32.5^{\circ}\text{C}$
- $T = 38^{\circ}\text{C}$
- $T = 47^{\circ}\text{C}$
- $T = 15^{\circ}\text{C}$
- $T = -20^{\circ}\text{C}$

Le prime tre prove sono state effettuate in un forno dedicato per verificare se la compensazione a temperature diverse da quella ambientale (nel nostro caso pari a circa 30°C) presentasse un trend oppure no; la quarta è stata ricavata inserendo i sensori in un frigorifero di laboratorio per abbassare di una decina di gradi il valore della temperatura mentre l'ultima prova è stata realizzata in un freezer per controllare il comportamento dei sensori a temperature molto basse. È stato scelto questo range di temperatura poiché i sensori si troveranno nella maggior parte dei casi a misurare in queste condizioni.

Per tutte e quante le prove ci si è tenuti entro i limiti di temperatura forniti dai data sheet dei diversi sensori, onde evitare un loro definitivo danneggiamento. Per l'acquisizione delle temperature in gioco è stata utilizzata una termocoppia dedicata. La temperatura è stata fatta variare molto lentamente (come mostra la Figura(2.21)) in modo da condurre le prove in regime quasi statico.

Oltre all'analisi della compensazione termica, si è deciso di studiare le caratteristiche del rumore di fondo presente nei segnali, in un primo istante valutando la deviazione

standard su finestre temporali di un minuto per verificare se esistesse un trend al variare della temperatura e successivamente calcolando il valore della PSD (Power Spectral Density) per controllare il suo contributo al variare della frequenza.

Le caratteristiche della centralina utilizzata per l'acquisizione dell'andamento dei picchi delle fibre ottiche (Figura(2.20)) sono riportate in Tabella(2.3). Dato che la temperatura varia in molto lentamente, abbiamo potuto utilizzare una frequenza di campionamento di 2 Hz.



Figura 2.20: Centralina Micron Optics sm125 utilizzata per l'acquisizione delle fibre ottiche durante le prove termiche

Tabella 2.5: Data sheet della centralina di acquisizione per le fibre ottiche nelle prove termiche

Proprietà ottiche	
Numero di canali ottici	4
Frequenza di campionamento	2 Hz
Range di lunghezze d'onda	1510-1590 nm
Accuratezza	1 pm
Ripetibilità della lunghezza d'onda	0.5 pm a 1 Hz, 0.2 pm a 1 Hz
Range dinamico	50 dB
Connettori ottici	FC/APC
Elaborazione dei dati	
Interfaccia	Ethernet
Software	Analisi dello spettro, peak detection, data logger, peak tracking
LabVIEW® Source Code	Ammissa per personalizzazione del software
Caratteristiche generali	
Dimensioni e peso	117 mm x 234 mm x 135 mm; 2 kg
Temperatura di utilizzo	0° fino a 50° C
Tensione d'ingresso	7-36 VDC (100 240 VAC, 47 63 Hz), convertitore AC/DC incluso

Le compensazioni termiche sono state effettuate nel seguente modo:

$$\varepsilon_{compensato} = \varepsilon_{apparente1} - \varepsilon_{apparente2} \quad (2.1)$$

e per ciascuna tipologia di sensore si hanno formule differenti per calcolare $\varepsilon_{termica}$:

Sensore A: $\varepsilon_{apparente} = \Delta\lambda \cdot S$

Sensore B: $\varepsilon_{apparente} = \log(\Delta\lambda) \cdot (1/K) \cdot 10^6$

Sensore C: $\varepsilon_{apparente} = (\Delta\lambda/\lambda_0) \cdot (1/F_G) \cdot 10^6$

in cui i significati di S , K e F_G sono rivati dai data sheet in Tabella(2.1), Tabella(2.2) e Tabella(2.3).

2.3.1 Prove condotte in forno

Come anticipato precedentemente, le prime prove sono state effettuate a temperatura ambientale e superiori.

I sensori sono stati lasciati liberi, senza essere incollati ad eventuali supporti. Si è cercato di non esercitare alcuna trazione ai sensori: nonostante ciò è inevitabile la possibile presenza di un certo “tiro” che potrà essere annullato eliminando l’offset iniziale.

In Figura(2.21) si mostra l’andamento registrato dalla termocoppia.

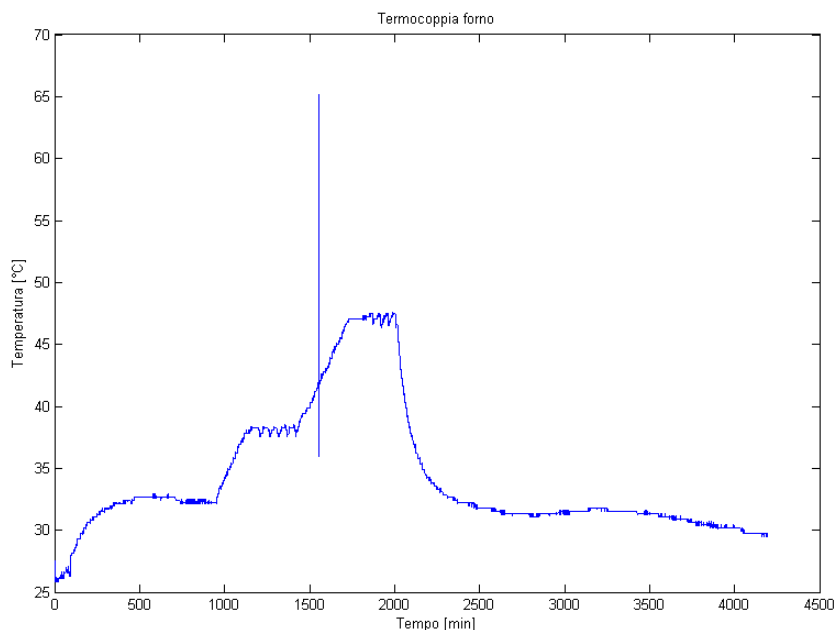
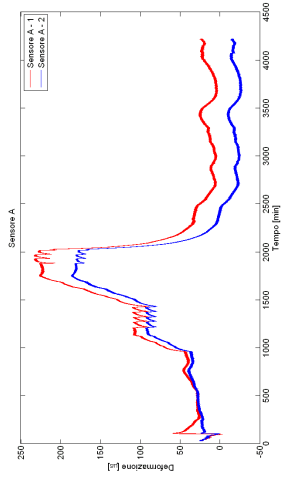


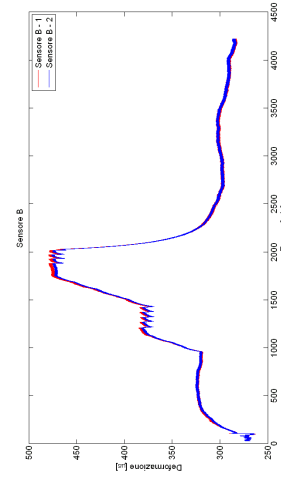
Figura 2.21: Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia

L’evidente errore di lettura della termocoppia dopo circa 1600 minuti è dovuto molto probabilmente ad uno sbalzo di tensione elettrica: risulta interessante come nelle successive figure riguardanti i segnali dei sensori a fibra ottica non si avrà traccia di questo errore essendo immuni da interferenze elettromagnetiche.

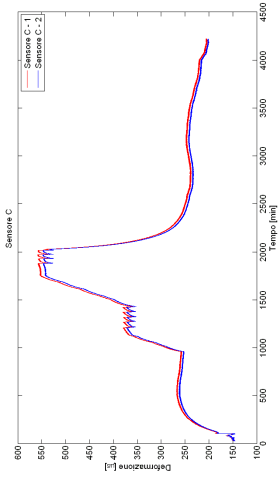
Le prove effettuate garantivano il mantenimento di ogni temperatura per 5 ore, le rampe di crescita della temperatura hanno un andamento di $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ mentre una volta terminato lo step a temperatura maggiore si è lasciato raffreddare il forno molto lentamente in modo da ottenere il maggiore numero possibile di dati. I risultati ottenuti sono quelli presentati in Figura(2.22).



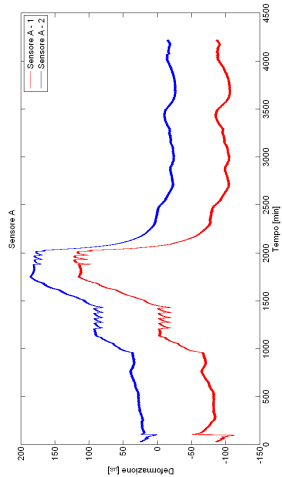
(b) Sensore A sovrapposto



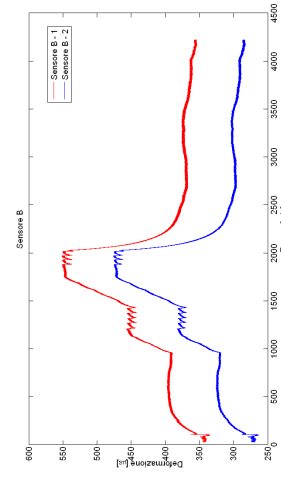
(d) Sensore B sovrapposto



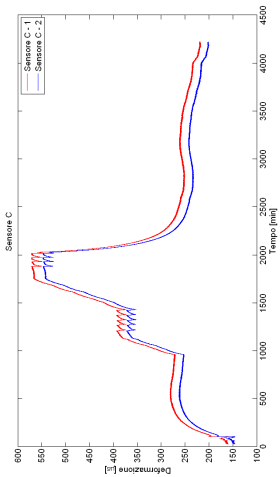
(f) Sensore C sovrapposto



(a) Sensore A



(c) Sensore B



(e) Sensore C

Figura 2.22: Confronto tra le PSD di uno stesso sensore a temperature differenti

Le figure (2.22(a)), (2.22(c)) e (2.22(e)) mostrano i segnali spuri, mentre le figure (2.22(b)), (2.22(d)) e (2.22(f)) mostrano i segnali dopo aver sottratto il valore iniziale di offset, dovuto ad un leggero tiro dei sensori.

Si nota subito che i sensori che forniscono i risultati migliori sono i sensori C e B: entrambi i tipi di sensore infatti presentano un comportamento molto simile e lo scarto tra i due segnali è limitato, come mostrano la Figura(2.22(f)) e la Figura(2.22(d)).

Al contrario i sensori di tipo A hanno un andamento peggiore presentando un andamento diverso tra di loro, sia nelle zone in cui la temperatura varia, sia in quelle in cui la temperatura rimane costante (Figura(2.22(b))).

Il passo successivo è stato quello di trovare, in termini di deformazione, l'errore di compensazione durante tutta la durata della prova.

Ricordiamo che per i tre segnali i dati sheet forniscono tre diversi tipi di formule per ricavare le deformazioni lette dai sensori, come ci suggerisce la Tabella(2.6).

Tabella 2.6: Formule per ricavare il valore di deformazione per i tre diversi tipi di sensori

	Deformazione [$\mu m/m$]
Sensore A	$\varepsilon = \Delta\lambda \cdot S$
Sensore B	$\varepsilon = \log(\Delta\lambda) \cdot (1/k) \cdot 10^6$
Sensore C	$\varepsilon = (\Delta\lambda/\lambda) \cdot (1/F_G) \cdot 10^6$

in cui:

ε = deformazione;

$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ = variazione di lunghezza d'onda;

S, k, F_g = rispettivi gage factor dei sensori;

In Figura(2.23) si riportano i grafici dei valori delle compensazioni termiche in funzione del tempo, ottenuti sottraendo i valori di deformazione apparente misurati dai due sensori.

Dal grafico è possibile estrapolare alcune considerazioni:

- dopo circa 100 minuti si ha l'accensione del forno evidenziato dalla variazione dei segnali della termocoppia, dall'errore di compensazione dei tre sensori (limitato per quelli B e C, mentre risulta molto evidente per quello A);
- i sensori B e C sono affetti da lievi variazioni coerenti con l'innalzamento della temperatura mantenendo in ogni caso un'ottima compensazione, indice di una sensibilità alla temperatura molto simile tra la coppia di sensori. I due sensori presentano un errore di compensazione limitato ($5\mu\varepsilon$ per il sensore B e $12\mu\varepsilon$ per quello C): possiamo dire che le loro prestazioni sotto questo punto di vista sono equivalenti;

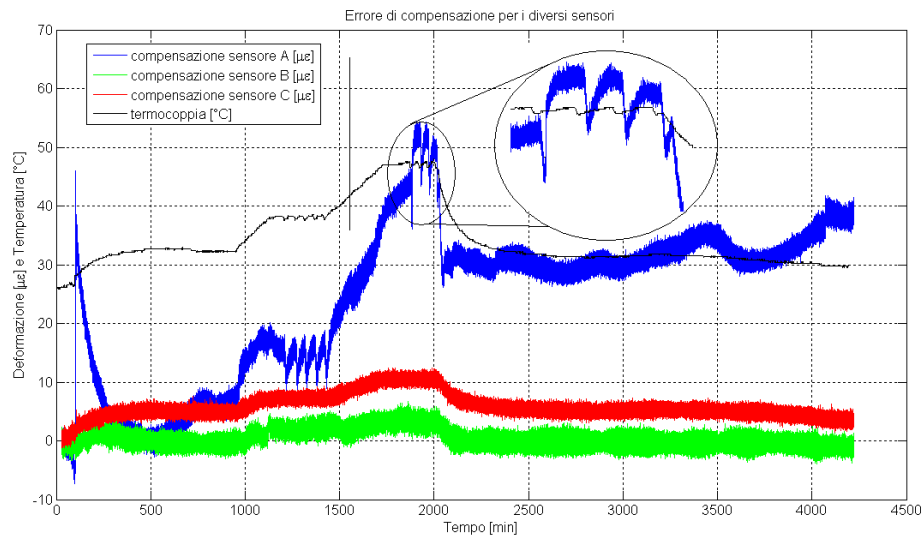


Figura 2.23: Errore di compensazione per i diversi sensori e grafico dell'andamento della temperatura durante la prova

- il sensore A mostra evidenti errori di compensazione, passando da deformazioni apparenti del valore di qualche $\mu\epsilon$ a $55 \mu\epsilon$ seguendo solo in maniera approssimativa la variazione di temperatura;
- le oscillazioni presenti in tutti i segnali nelle zone a temperatura costante, particolarmente rilevanti per il sensore A (vedi ingrandimento della Figura(2.23)) sono dovute ai cicli di accensione e spegnimento del forno stesso;
- l'evidente errore di lettura della termocoppia dopo circa 1600 minuti risulta influente ai fini della prova. La termocoppia è un sensore elettrico ed eventuali variazioni di tensione (dovuti ad esempio all'accensione di un'altra macchina di prova) causano un errato funzionamento: al contrario le fibre ottiche non risentono di questo fenomeno poichè sono intrinsecamente immuni al rumore elettromagnetico essendo costituite di vetro e non avendo passaggio di corrente al loro interno.

Da queste prove è stato dunque possibile evidenziare come i sensori B e C rispondano in modo equivalente tra di loro, mentre il sensore A restituisce risultati fortemente errati: cioè che è utile capire è se la capacità di compensare è funzione della temperatura.

A tale scopo si sono graficati in Figura(2.24) i risultati precedentemente ottenuti, in funzione questa volta della temperatura come suggerito dal grafico di Figura(2.23).

Si nota come i segnali B e C si comportino ancora in maniera confrontabile, denunciando entrambi solo un lieve trend a salire al crescere della temperatura: ad ogni temperatura la variazione della deformazione apparente rimane limitata. Nel caso del sensore A invece i risultati sono totalmente negativi: per ogni valore di temperatura infatti si hanno elevate variazioni di deformazione apparente, il che ci mostra come l'errore di compensazione per questo sensore non è strettamente dipendente dalla tem-

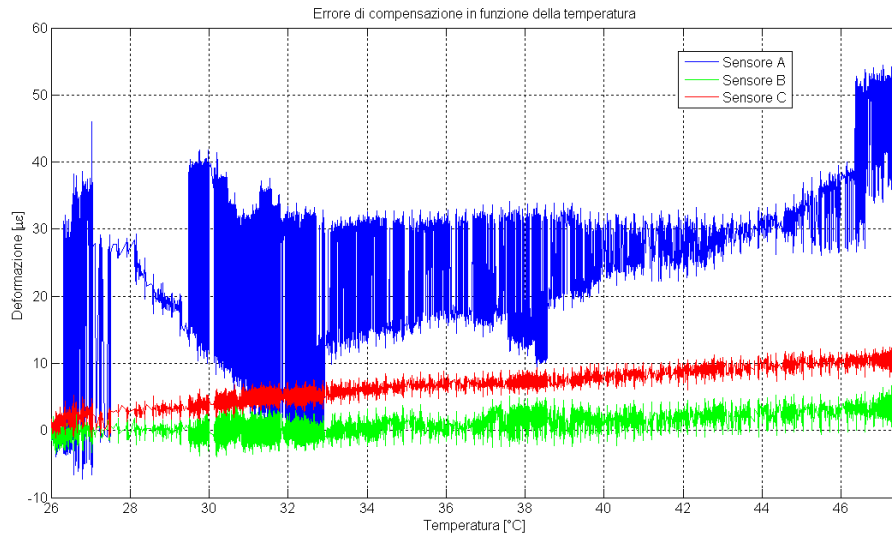


Figura 2.24: Errore di compensazione dei sensori in funzione della temperatura

peratura ma è dovuto alla scarsa qualità del sensore stesso.

Ciò che si è voluto comprendere è la causa di questo errore di misura: si è quindi calcolato il coefficiente di sensibilità alla temperatura per ogni sensore alle diverse temperature per verificare quanto esso variasse durante le prova.

Il coefficiente è stato ottenuto mediante l'equazione (2.2):

$$K_{temp} = \left(\frac{\Delta\lambda/\lambda_0}{\Delta T} \right) \quad (2.2)$$

in cui:

$\Delta T = T - T_0$ differenza di temperatura;

T_0 = temperatura iniziale della prova, pari a 26°C;

$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ variazione di lunghezza d'onda;

λ_0 = lunghezza d'onda di inizio prova.

Sia $\Delta\lambda$ che ΔT rappresentano quindi le variazioni di lunghezza d'onda e di temperatura utilizzando come riferimento l'inizio della prova: il valore della sensibilità alla temperatura viene quindi calcolato valutando la lunghezza d'onda rispetto alla variazione di temperatura.

Di seguito (Figura(2.25)) si inseriscono i grafici relativi ai valori di K_{temp} per ogni coppia di sensori:

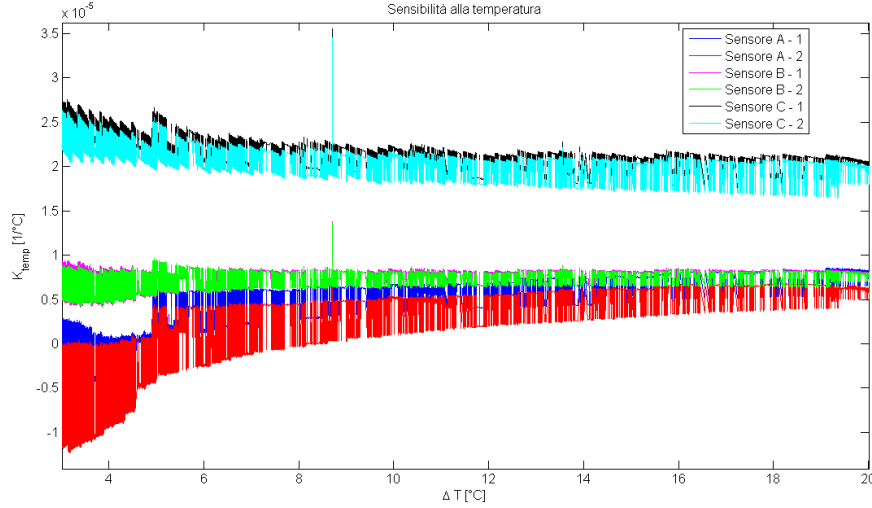


Figura 2.25: Sensibilità alla temperatura per ogni coppia di sensori in funzione della temperatura

Come si nota il grafico non parte da zero: avendo infatti inizializzato sia le lunghezze d'onda sia la temperatura ad un valore di partenza nullo per piccoli ΔT il rapporto segnale/rumore risulta basso e l'andamento di K_{temp} risulta frastagliato per effetto del rumore di misura.

Ciò è dimostrato da una dispersione maggiore dei dati nella parte sinistra del grafico che diminuisce all'aumentare della temperatura: mediamente il valore di K_{temp} risulta comunque, per tutti i sensori, decrescente secondo una legge visibilmente non lineare.

Essendo per ogni coppia di sensori:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = K_{temp1} \cdot \Delta T$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_{temp2} \cdot \Delta T$$

la compensazione termica restituisce:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = (K_{temp1} - K_{temp2}) \cdot \Delta T = \Delta K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Nel caso in cui ΔK_{temp} fosse costante, il valore $(\Delta\lambda_1/\lambda_1) - (\Delta\lambda_2/\lambda_2)$, che rappresenta l'errore di compensazione termica, crescerebbe in modo lineare all'aumentare della temperatura: maggiore è ΔK_{temp} , maggiore è l'errore.

Il reale andamento della differenza di sensibilità ΔK_{temp} è evidenziato nella Figura(2.26).

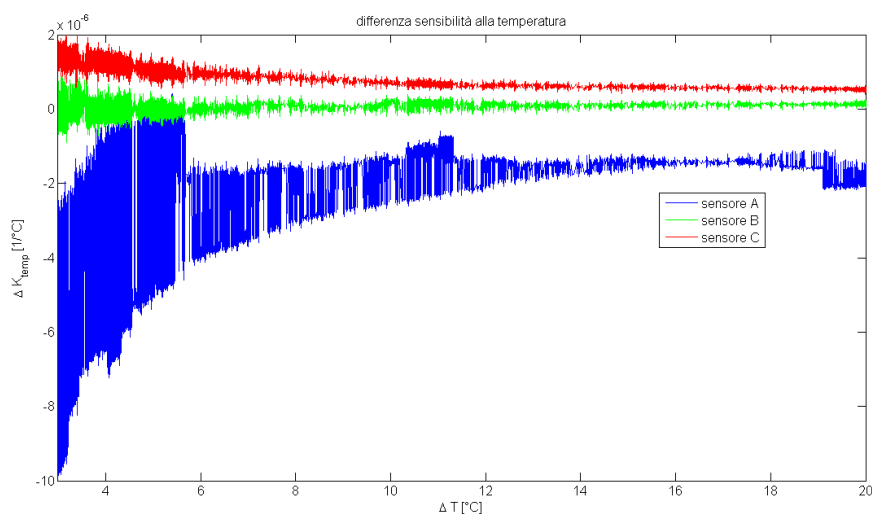


Figura 2.26: Differenza di sensibilità alla temperatura in funzione della temperatura per i sensori analizzati

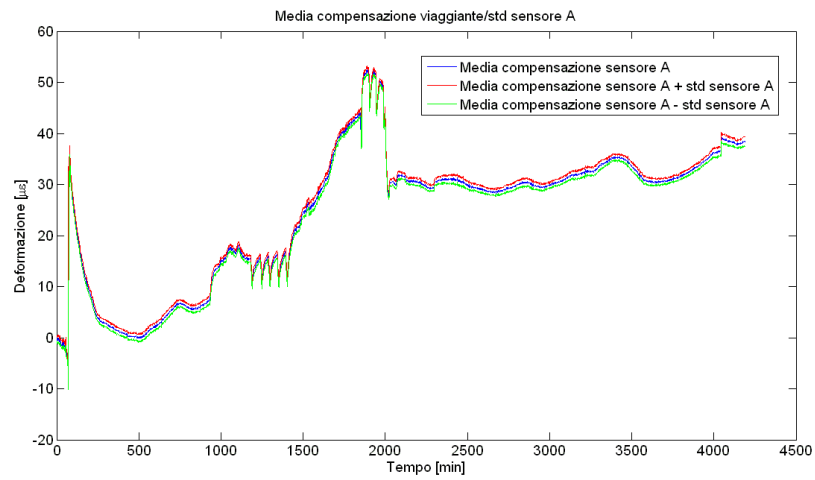
Così come nel caso precedente, anche il valore della differenza di sensibilità ΔK_{temp} mostra un andamento non lineare e decrescente all'aumentare della temperatura, soprattutto per i sensori A e C.

Dall'equazione (2.3) si deduce quindi che l'errore di compensazione termica non può essere linearmente crescente con la temperatura ma presenterà un andamento non lineare. Dalla Figura(2.24), si nota infatti come il sensore C presenti un errore di compensazione termica che cresce in modo non lineare all'aumentare della temperatura.

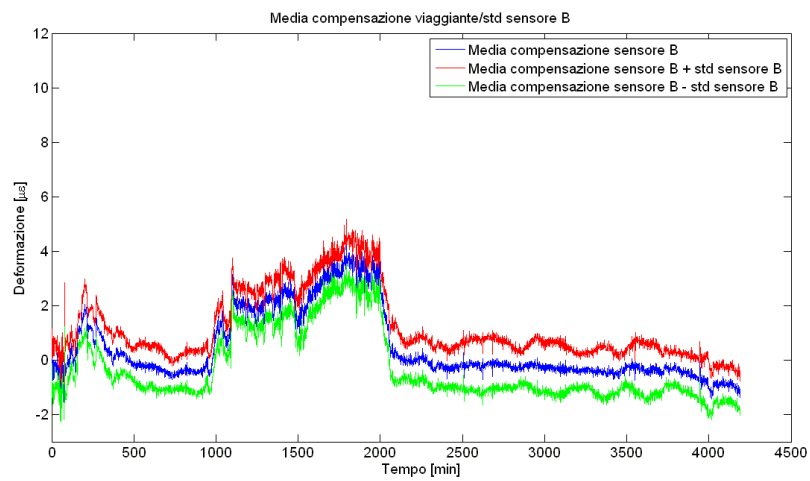
Rumore di fondo

Il passo successivo è la verifica del rumore di fondo per i diversi segnali singoli e compensati. A tal proposito si è diviso il segnale in finestre temporali di lunghezza limitata (pari ad 1 minuto) poiché, essendo le variazioni di temperatura molto lente (durante le fasi di riscaldamento del forno visualizzabili in Figura(2.21) la temperatura ha una variazione di $0.03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), si è potuta considerare la temperatura all'interno della finestra temporale come costante. Si sono poi ricavati i valori della media a cui è stato sommato e sottratto il valore della deviazione standard poiché quest'ultima offre un buon indice del livello di rumore contenuto nel segnale (Figura(2.27)).

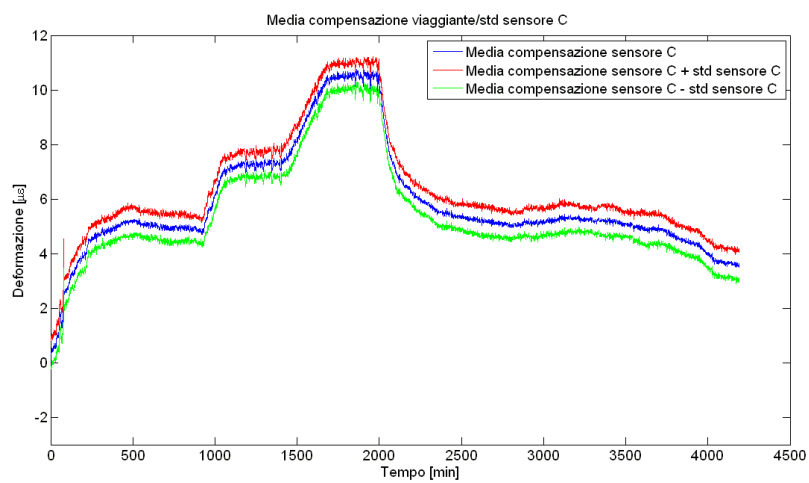
I valori delle deviazioni standard, come si nota dalla Figura(2.27), sono sostanzialmente costanti durante la prova per tutti i sensori: è stato inoltre numericamente verificato che essi non varino significativamente all'aumentare della temperatura. Non subendo significative variazioni, si mostra in Tabella(2.7) il valor medio delle deviazioni standard per i segnali compensati.



(a) Sensore A



(b) Sensore B



(c) Sensore C

Figura 2.27: Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i tre sensori compensati

Tabella 2.7: Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in forno

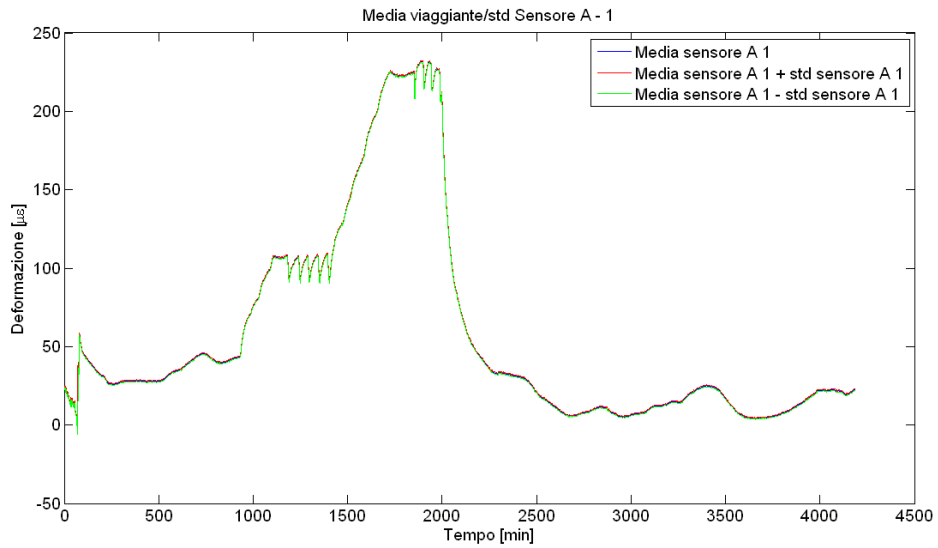
	Valore della deviazione standard [$\mu\varepsilon$]
Sensore A	0.7236
Sensore B	0.7505
Sensore C	0.4945

Da questi risultati si può quindi affermare che il sensore C, rappresentante la fascia alta in prezzo tra i sensori considerati, è caratterizzato da un rumore di fondo del 34% inferiore rispetto al sensore B.

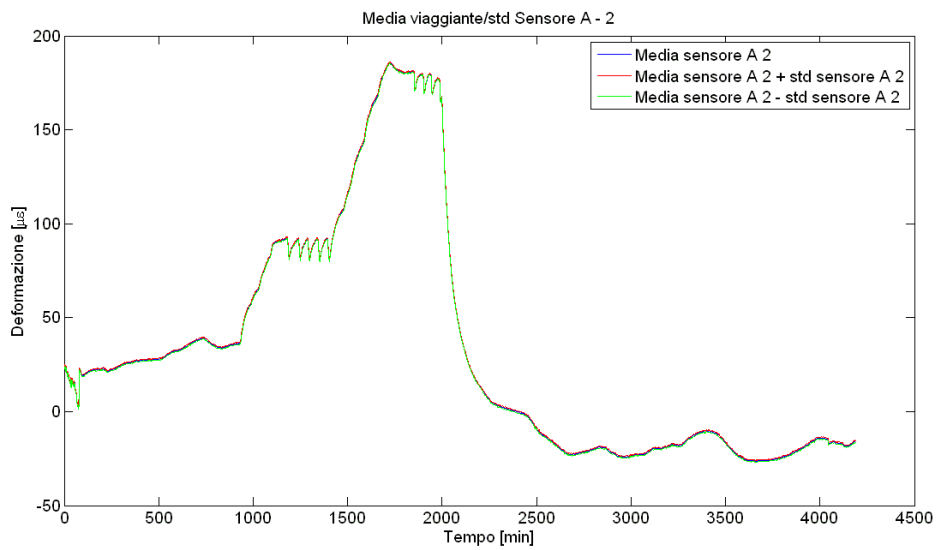
Come si evince dalla Figura(2.28), dalla Figura(2.29), e dalla Figura(2.30) anche per i singoli segnali la deviazione standard rimane costante durante l'intera durata della prova ed il loro valore medio è visualizzabile in Tabella(2.8).

Tabella 2.8: Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in forno

	Valore della deviazione standard [$\mu\varepsilon$]
Sensore A - 1	0.5452
Sensore A - 2	0.5290
Sensore B - 1	0.5921
Sensore B - 2	0.5126
Sensore C - 1	0.3971
Sensore C - 2	0.4133

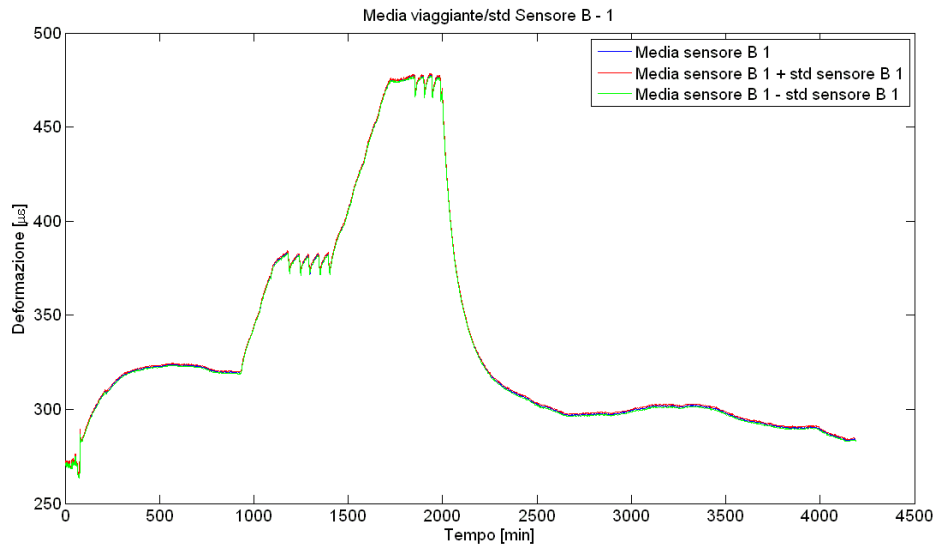


(a) Sensore A - 1

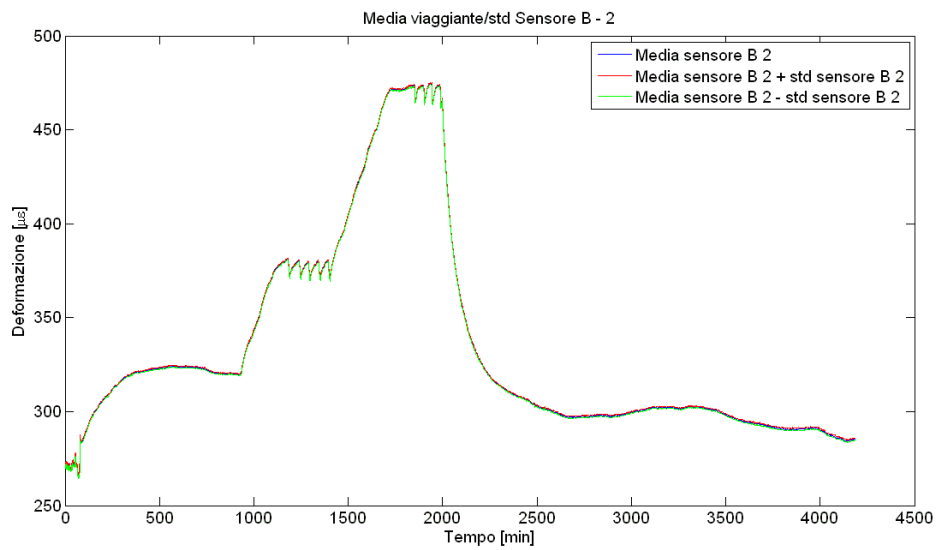


(b) Sensore A - 2

Figura 2.28: Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori A

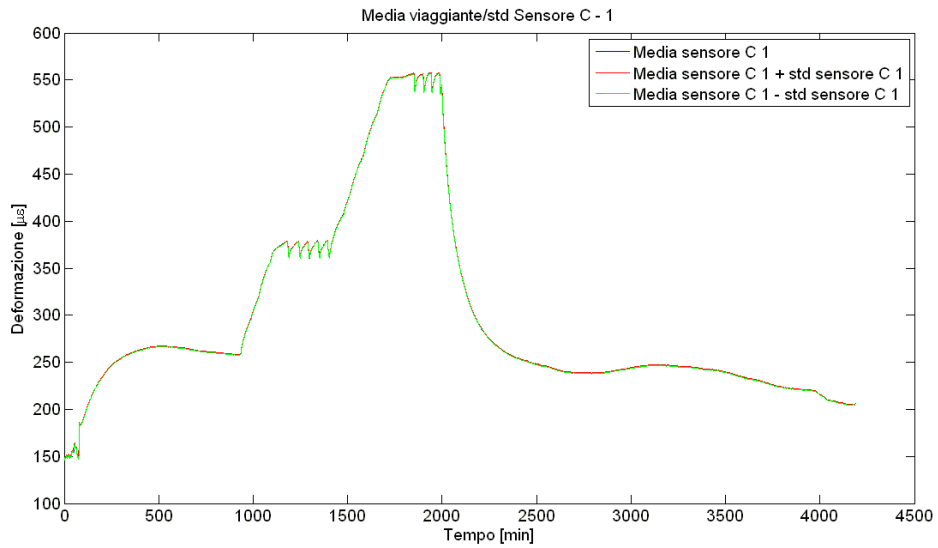


(a) Sensore B - 1

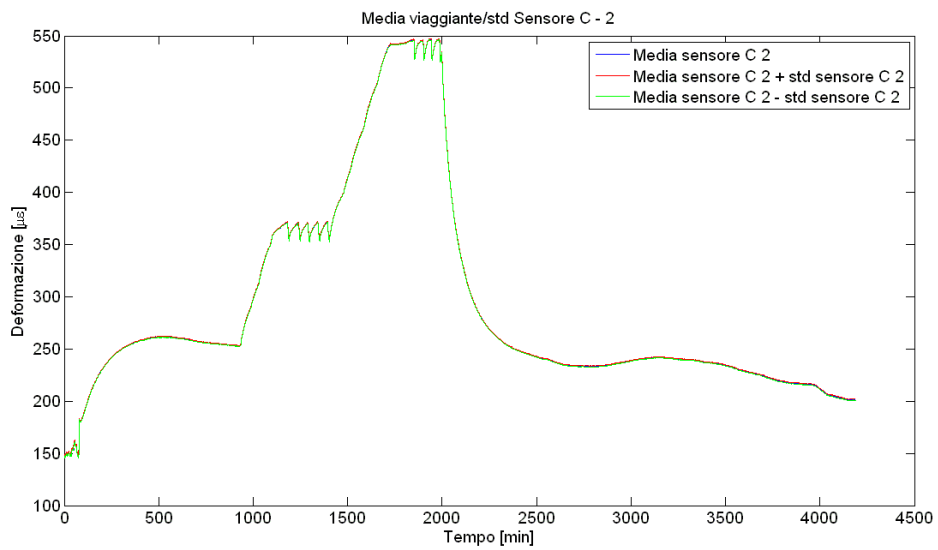


(b) Sensore B - 2

Figura 2.29: Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori B



(a) Sensore C - 1



(b) Sensore C - 2

Figura 2.30: Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i sensori C

Per verificare la potenza del rumore alle varie frequenze si è analizzato il segnale nelle finestre temporali in cui la temperatura rimaneva costante ($32,5^{\circ}\text{C}$ - 38°C - 47°C , vedi anche la Figura(2.21)) e successivamente si è passati al calcolo della PSD (Power Spectral Density).

Utilizzando questa funzione e non l'autospettro si è ottenuta un'informazione che non dipende dalla risoluzione in frequenza utilizzata[14].

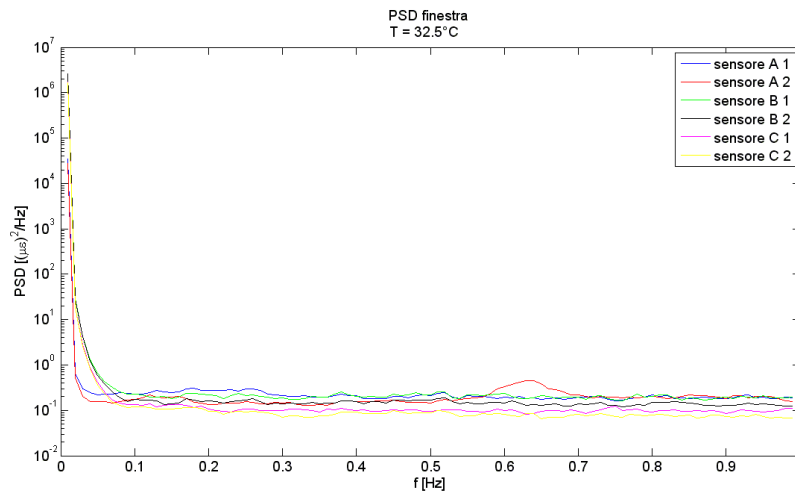
La PSD è stata ottenuta in questo caso mediando sotto finestre temporali di ampiezza pari a 100 secondi ed i grafici ottenuti sono quelli presentati in Figura(2.31).

Dalla Figura(2.31) si evince come l'andamento della PSD per i diversi sensori risulti tra loro simile ad ognuna delle tre temperature, indicando che tra 0 ed 1 Hz i sensori presentano rumori di fondo analoghi: anche in questo caso si distingue il sensore C che offre su tutto lo spettro i risultati lievemente migliori anche se, avendo utilizzato una frequenza di campionamento relativamente bassa (2 Hz), non è stato possibile investigare l'andamento del rumore a frequenze maggiori di 1 Hz.

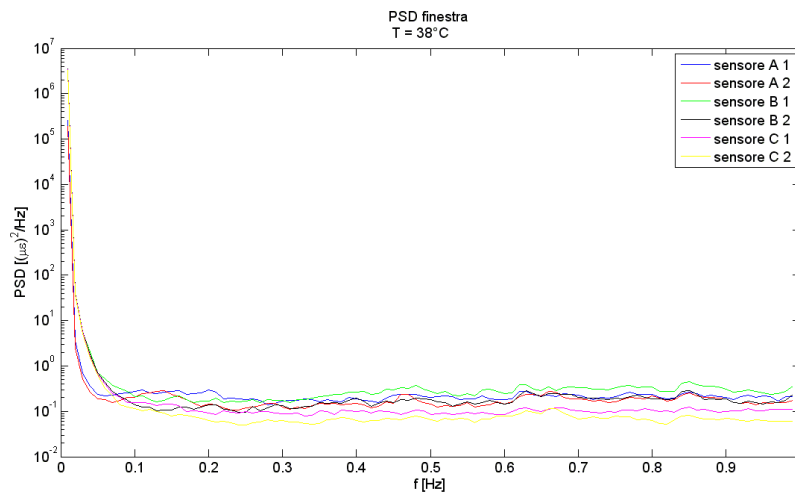
La presenza invece del picco iniziale è dovuta al ciclo di accensione e spegnimento del forno caratterizzato da una frequenza molto bassa.

Risulta utile osservare anche gli andamenti della PSD per i vari sensori in funzione delle tre temperature al fine di verificare la dipendenza del rumore dalla temperatura (Figura(2.32)): si evidenzia in maniera netta come in nessuno dei sensori analizzati il rumore di fondo sia funzione della temperatura mantenendosi ad un livello pressoché costante da 0.2 a 1 Hz.

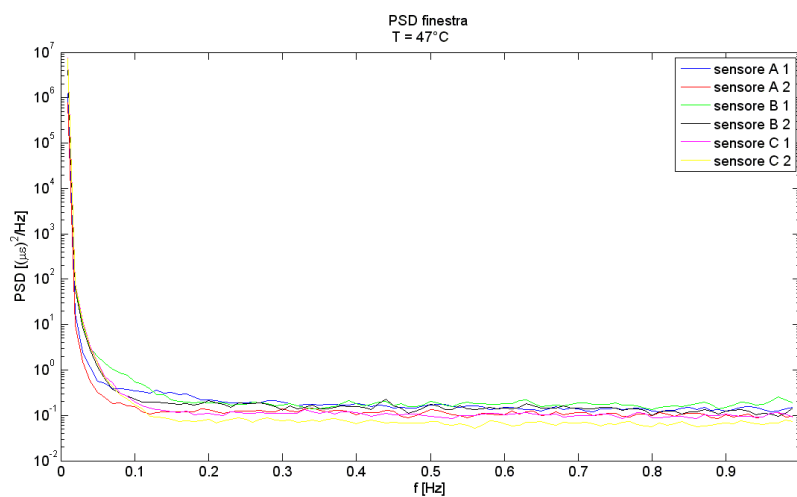
L'analisi effettuata commentando i grafici della PSD tra 0.2 ed 1 Hz è sicuramente limitata, ma è stata concepita per verificare se le curve presentassero o meno lo stesso andamento: è possibile affermare che nel range di frequenze analizzate, tutti i sensori presentano lo stesso andamento della PSD.



(a) Temperatura 32,5°C

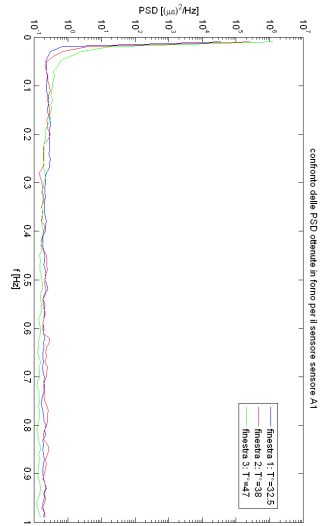


(b) Temperatura 38°C

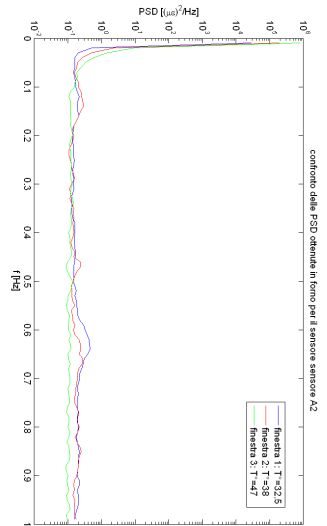


(c) Temperatura 47°C

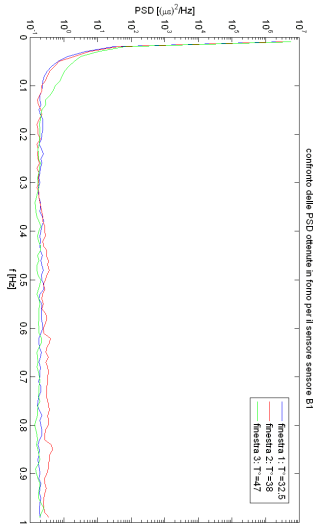
Figura 2.31: Confronto tra le PSD dei sensori su finestre temporali a temperatura costante



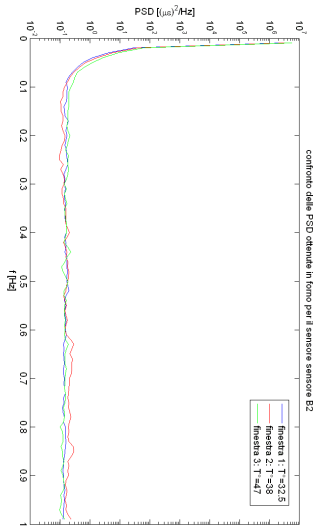
(a) Sensore A - 1



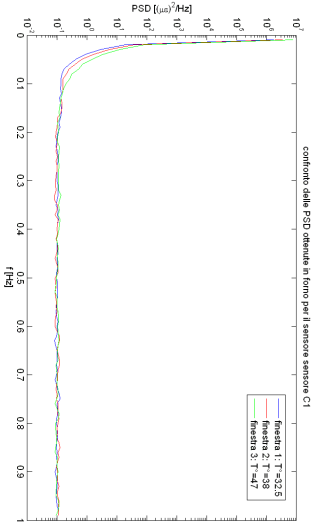
(b) Sensore A - 2



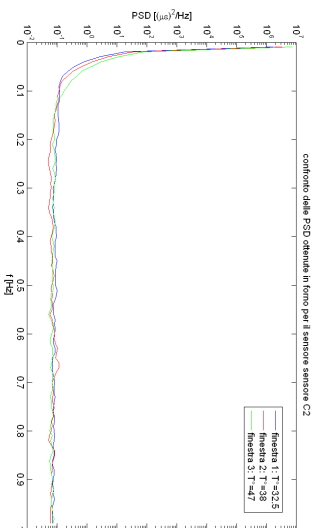
(c) Sensore B - 1



(d) Sensore B - 2



(e) Sensore C - 1



(f) Sensore C - 2

Figura 2.32: Confronto tra le PSD di uno stesso sensore a temperature differenti

2.3.2 Prove condotte in frigo

La prova successiva è stata condotta cercando di abbassare la temperatura ambiente: a tale scopo sono stati inseriti i sensori a fibra ottica in un frigorifero da laboratorio ad una temperatura di circa 15°C facendo attenzione, come per le prove condotte in forno, a non provocare alcuna deformazione.

La durata del test è stata calcolata in modo tale da permettere una quanto più possibile stabilizzazione della temperatura (sebbene siano inevitabili i cicli di accensione e spegnimento del frigorifero) ed è stata pari a circa 14 ore. L'andamento della temperatura (Figura(2.33)) è stato registrato attraverso l'utilizzo di una termocoppia.

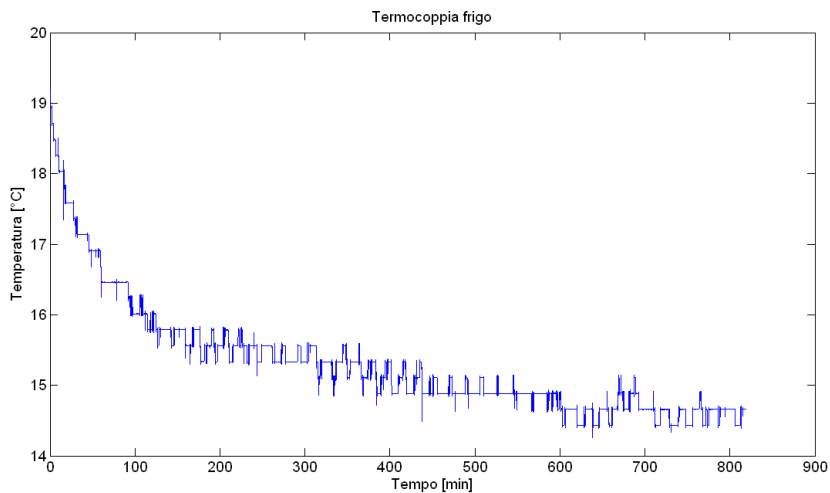


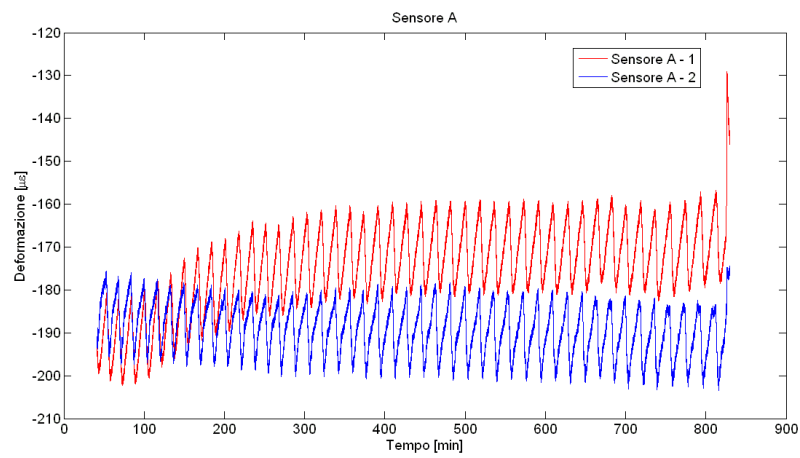
Figura 2.33: Andamento della temperatura durante le prove svolte in frigo

Come mostra la Figura(2.33) l'acquisizione del segnale della termocoppia è cominciata subito dopo la chiusura del frigo e con il passare del tempo la temperatura è continuata a scendere fino al raggiungimento di un valore di regime. Dall'analisi del segnale si possono vedere i cicli di accensione e spegnimento del frigo.

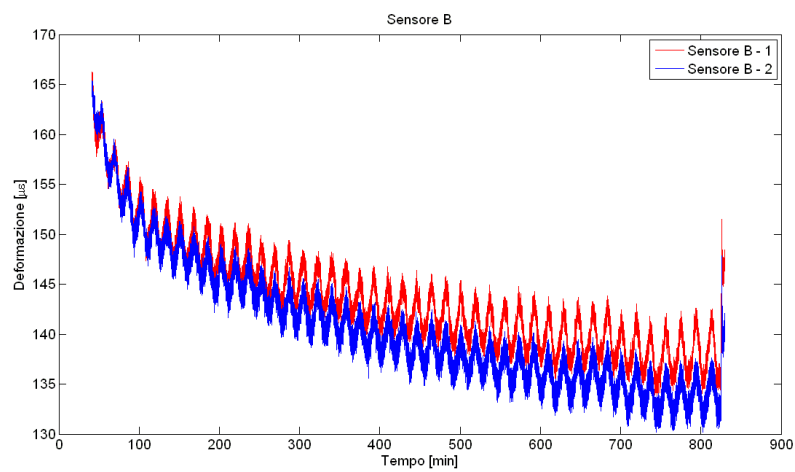
I segnali restituiti dai sensori sono mostrati in Figura(2.34).

Come nella prova precedente a temperature superiori, i sensori B e C hanno un comportamento molto simile tra di loro, mentre i sensori A presentano due andamenti fortemente diversi.

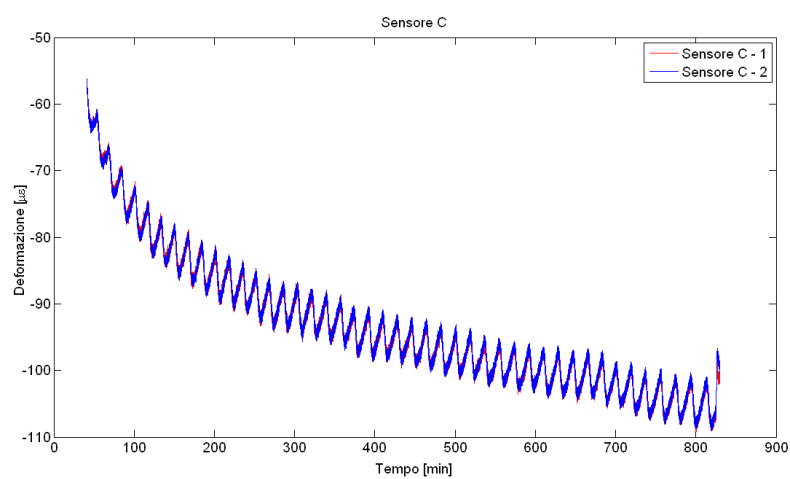
Tutte le curve restituite dai sensori hanno un andamento decrescente: questo avviene poichè la temperatura all'interno del frigo continua a diminuire, così come conferma la curva restituita dalla termocoppia. L'andamento frastagliato delle curve è invece causato dai cicli di accensione e spegnimento del frigo stesso. Questi aspetti sono riscontrabili per tutte le curve di Figura(2.34).



(a) Sensore A



(b) Sensore B



(c) Sensore C

Figura 2.34: Risultati ottenuti con la prova nel frigo per i tre diversi sensori

Analizziamo l'andamento dell'errore di compensazione termica sia in funzione del tempo che in funzione della temperatura attraverso la Figura(2.35) e la Figura(2.36).

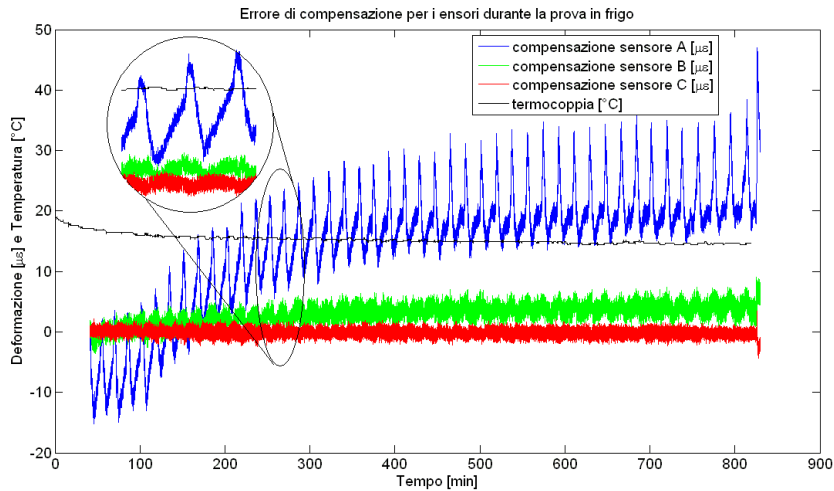


Figura 2.35: Errore di compensazione in funzione del tempo e grafico dell'andamento della temperatura durante la prova

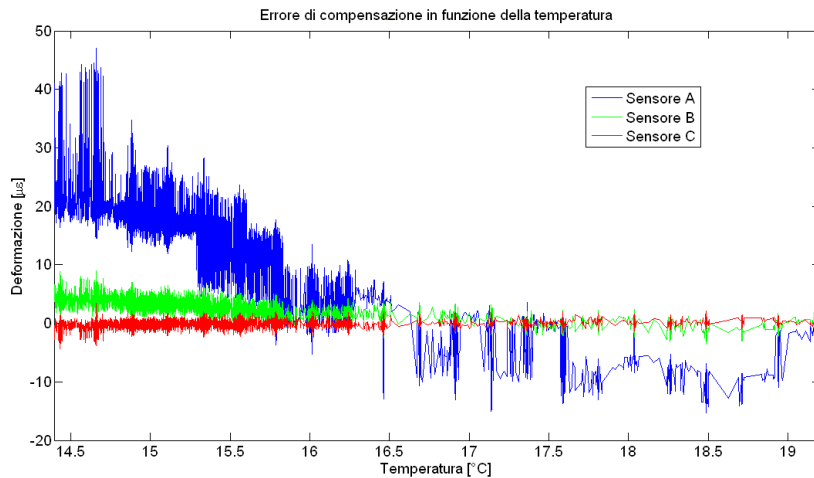


Figura 2.36: Errore di compensazione dei sensori in funzione della temperatura

La Figura(2.35) evidenzia ancora come il sensore C restituisca i risultati migliori mantenendo il valore di deformazione apparente circa costante su tutta la prova; anche il sensore B offre ottimi risultati, paragonabili a quelli del sensore C; il sensore A invece mostra sia evidenti problemi di deriva termica sia una forte dispersione rispetto al valor medio. L'ingrandimento mostra come i cicli di accensione e spegnimento del frigo influiscano in modo fortemente negativo sul sensore A (infatti l'errore di compensazione aumenta di circa $15 \mu\epsilon$), mentre gli altri due sensori non presentano questa problematica.

Osservando gli andamenti dell'errore di compensazione in funzione della temperatura di Figura(2.36) si possono ricavare le stesse conclusioni delle prove condotte

precedentemente in forno: i sensori C e B sono quelli che permettono una migliore compensazione termica, con la sola presenza di un leggero trend per entrambi; al contrario il sensore A fornisce, a parità di temperatura, diversi valori di deformazione apparente, dovuti alla scarsa qualità del sensore.

Rumore di fondo

Dopo aver diviso il segnale in finestre temporali di lunghezza pari ad un minuto ne abbiamo calcolato la media e la deviazione standard sia per i segnali compensati (Figura(2.37)) che per i singoli segnali (Figura(2.38)).

I risultati ottenuti (riassunti in Tabella(2.9) ed in Tabella(2.10)) evidenziano come le deviazioni standard si mantengano ancora una volta pressochè costanti per tutta la durata delle prove, dimostrando ancora l'indipendenza tra rumore di fondo e temperatura.

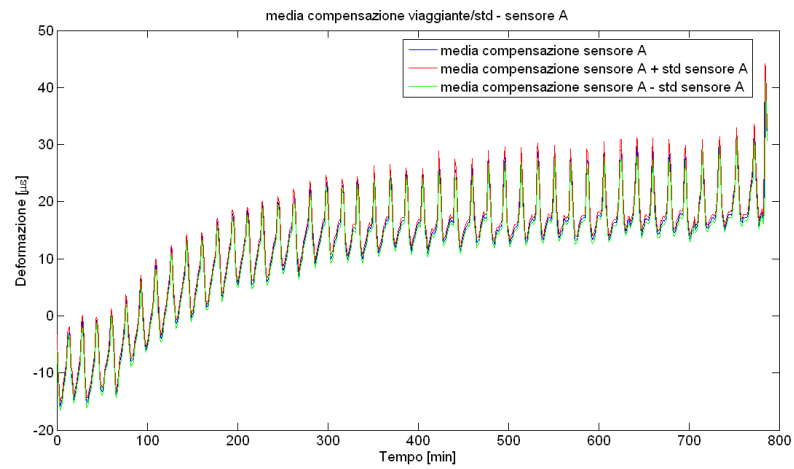
Tabella 2.9: Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in frigo

	Valore della deviazione standard [$\mu\varepsilon$]
Sensore A	0.8718
Sensore B	0.7833
Sensore C	0.5101

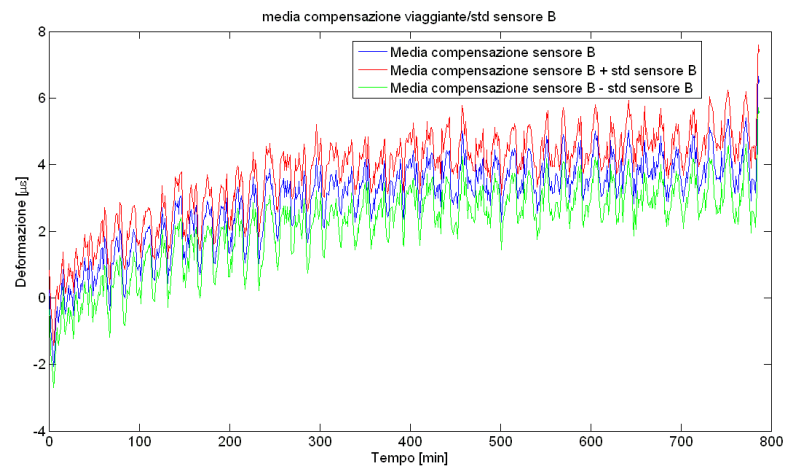
Tabella 2.10: Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in frigo

	Valore della deviazione standard [$\mu\varepsilon$]
Sensore A - 1	0.7819
Sensore A - 2	0.8216
Sensore B - 1	0.5945
Sensore B - 2	0.6765
Sensore C - 1	0.4507
Sensore C - 2	0.4376

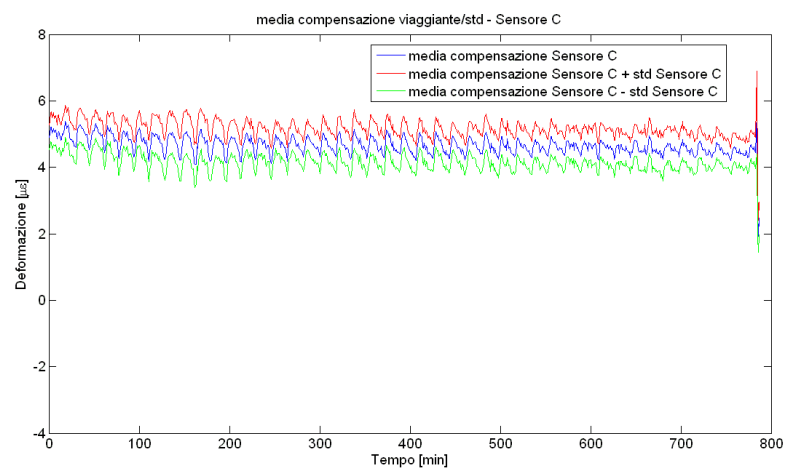
I valori medi sono confrontabili con quelli ottenuti nelle prove in forno: la temperatura, come già verificato precedentemente, non ha influenzato in modo significativo il rumore di fondo.



(a) Sensore A

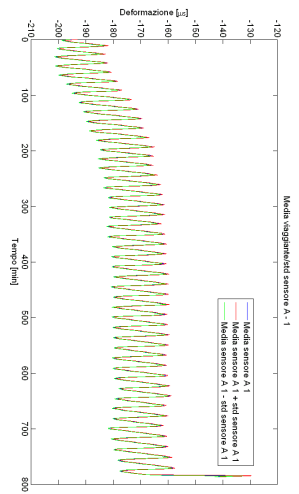


(b) Sensore B

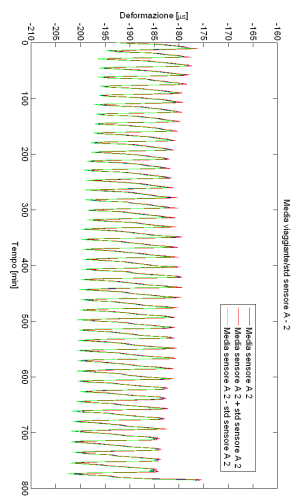


(c) Sensore C

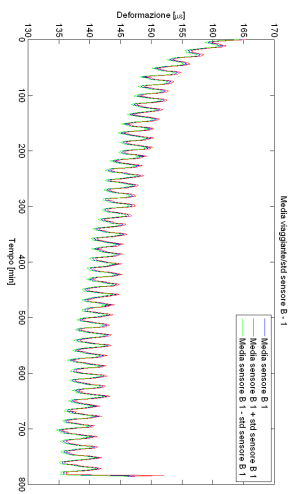
Figura 2.37: Media viaggiante ogni minuto e deviazione standard per i tre sensori



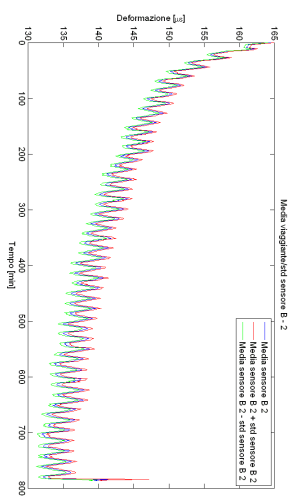
(a) Sensore A - 1



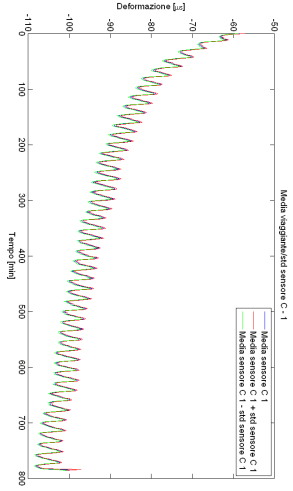
(b) Sensore A - 2



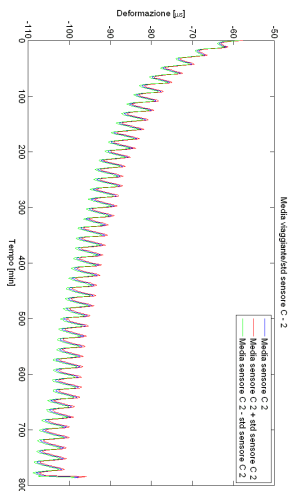
(c) Sensore B - 1



(d) Sensore B - 2



(e) Sensore C - 1



(f) Sensore C - 2

Figura 2.38: Media viaggiante \pm deviazione standard calcolata su finestre viaggianti di 1 minuto per le diverse coppia di sensori nelle prove in frigo

Successivamente abbiamo verificato il valore della potenza del rumore di fondo per la temperatura in questione (15°C) mediante il calcolo della PSD (Figura(2.39)).

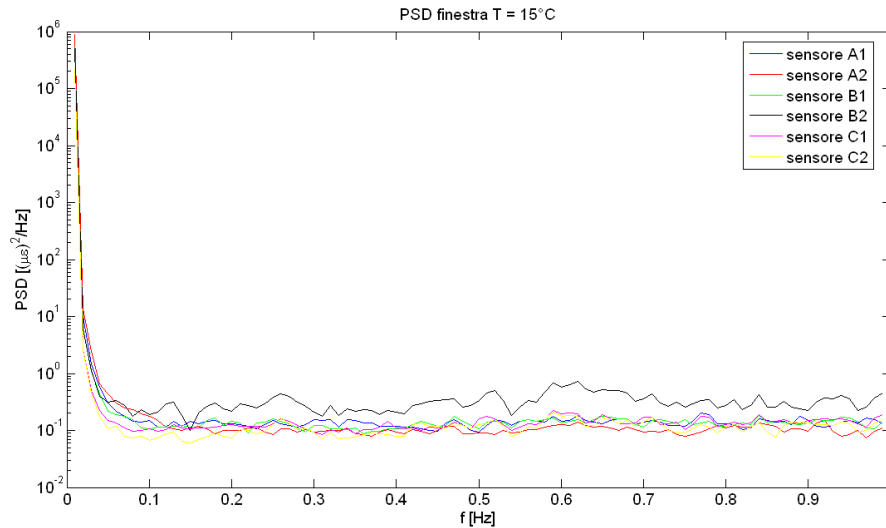


Figura 2.39: Confronto tra le PSD dei sensori su una finestra temporale a temperatura costante

Dalla Figura(2.39) si vede come il valore del rumore risulti simile al caso delle prove nel forno, rimanendo costante al variare della frequenza: solo il sensore B-2 mostra in questo caso un rumore di fondo superiore, dovuto ad un possibile lieve danneggiamento del sensore stesso avvenuto durante la preparazione della prova.

2.3.3 Prove condotte in freezer

Per testare la capacità dei sensori in nostro possesso di ottenere buone prestazioni anche in condizioni più estreme, abbiamo deciso di effettuare analoghi test ad una temperatura di -20°C . Tale temperatura è stata scelta tenendo in considerazione i limiti imposti dai data sheet dei sensori che consigliano di non scendere al di sotto dei -22°C .

Si riportano i grafici dell'errore di compensazione termica in funzione del tempo (Figura(2.40)): a causa di un errato funzionamento della termocoppia durante le prove, possiamo conoscere solamente il valore a regime della temperatura, ma non il suo andamento durante tutto il periodo del test. Per questo motivo possiamo visualizzare solamente l'errore di compensazione in funzione del tempo, ma non in funzione della temperatura.

Il grafico mostra come il sensore C continui ad avere un errore di compensazione molto contenuto (del valore di circa $5\mu\epsilon$) senza evidenziare significativi cambiamenti rispetto alle prove precedenti.

Il sensore A risulta essere il peggiore tra quelli analizzati poichè l'errore di compensazione non si mantiene costante durante la durata della prova presentando un'elevata sensibilità ai cicli di accensione e spegnimento del freezer.

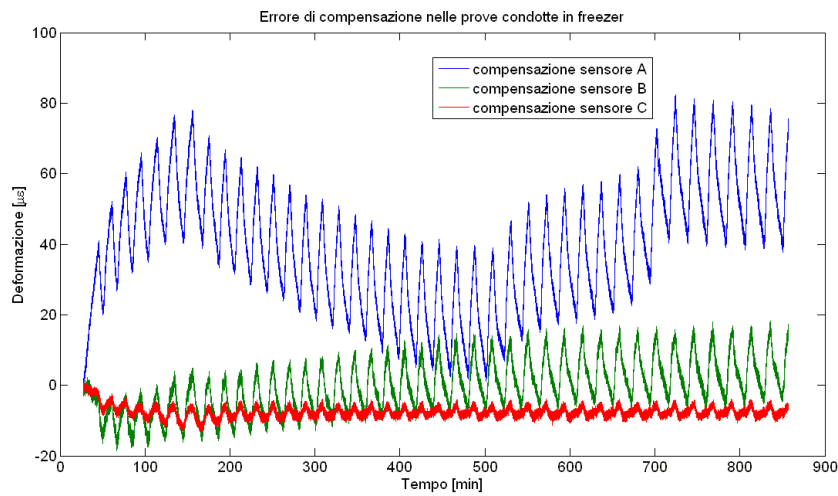


Figura 2.40: Errore di compensazione per i diversi sensori durante la prova in freezer

Il sensore B denota invece un peggioramento delle prestazioni, molto probabilmente dovuto ad un lieve danneggiamento del sensore stesso durante le operazioni di movimentazione: si nota in maniera evidente, come per il sensore A, la forte influenza dei gradienti di temperatura causati dai cicli del freezer.

Rumore di fondo

Come nei casi precedenti delle prove condotte in forno ed in frigo, il valore di deviazione standard non varia in maniera significativa durante la prova nè per i singoli sensori nè per i segnali compensati: si è deciso quindi di non inserire i grafici relativi, risultando più utile commentare i rispettivi valori medi (Tabella(2.11) e Tabella(2.12)).

Tabella 2.11: Valore medio della deviazione standard per i sensori compensati nelle prove in freezer

	Valore della deviazione standard [$\mu\epsilon$]
Sensore A	1.1751
Sensore B	0.9184
Sensore C	0.5373

Tabella 2.12: Valore medio della deviazione standard per i singoli sensori nelle prove in freezer

	Valore della deviazione standard [$\mu\epsilon$]
Sensore A - 1	0.9744
Sensore A - 2	0.6392
Sensore B - 1	0.8885
Sensore B - 2	0.7985
Sensore C - 1	0.516
Sensore C - 2	0.4959

Il sensore A presenta il rumore di fondo più elevato (addirittura doppio rispetto al sensore C), evidenziando un peggioramento se confrontato con le prove in forno ed in frigo.

Anche il sensore B denota un leggero aumento della deviazione standard, mentre il sensore C mantiene pressochè inalterati i suoi valori.

Di seguito presentiamo il grafico della PSD (Figura(2.41)).

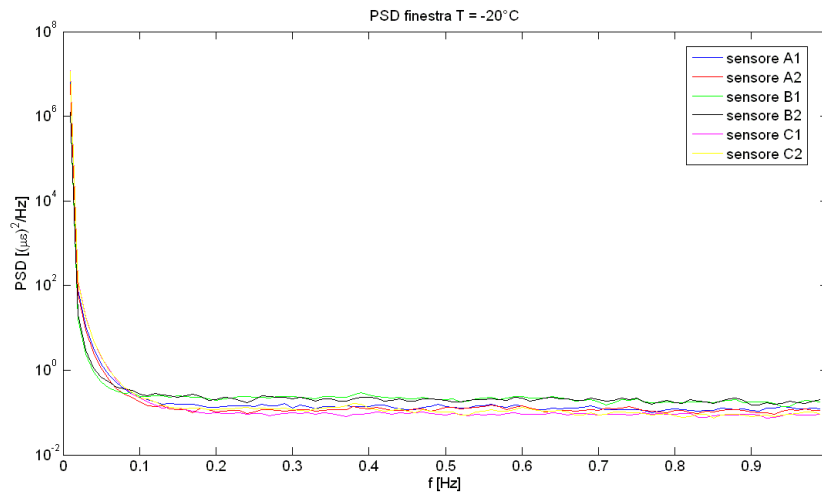


Figura 2.41: Confronto tra le PSD su una finestra temporale a temperatura costante

Il grafico della PSD ricalca quanto già evidenziato dai valori di deviazione standard: i sensori A e B presentano un andamento con valori maggiori rispetto al sensore C in tutto il range di frequenze preso in analisi.

2.4 Conclusioni prove statiche

Le prove effettuate sono state utili per verificare il comportamento dei sensori a fibra di Bragg al variare della temperatura.

In particolar modo nella prova in forno, nella quale la temperatura è stata fatta variare secondo un andamento pre-impostato, è stato possibile verificare la qualità della compensazione termica per tutti i sensori analizzati.

Si è potuto verificare quanto i sensori B e C siano superiori rispetto al sensore A, incapace di compensare le variazioni di temperatura. Da questo si conclude che il sensore A non potrà essere utilizzato per effettuare misure statiche.

Le prove in frigorifero ed in freezer invece, caratterizzate da un andamento della temperatura sostanzialmente costante dopo il transitorio iniziale, sono risultate utili per verificare il comportamento dei sensori a temperature basse e per osservare l'eventuale presenza di derive termiche nella misura. Anche in questo caso i sensori B e C si sono

distinti nettamente rispetto al sensore A che, nonostante l'andamento sostanzialmente piatto della temperatura, soffre ancora di errori evidenti di compensazione, in aggiunta a quelli causati dai cicli di accensione e spegnimento delle macchine utilizzate per le prove.

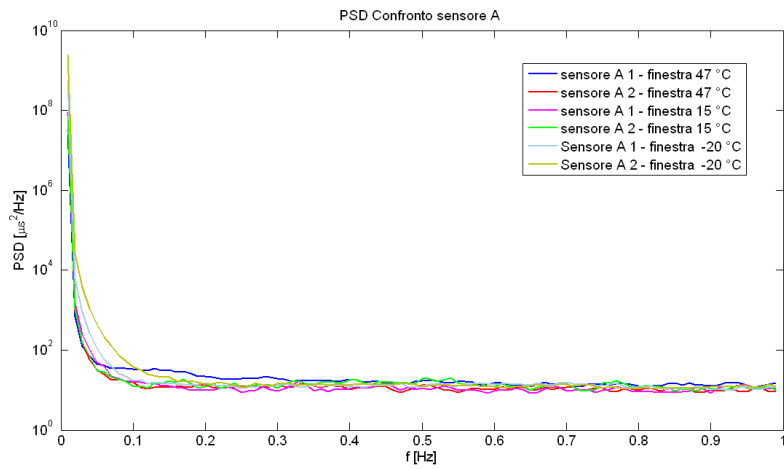
Per verificare se il valore della potenza del rumore varia da prova a prova, è possibile osservare la Figura(2.42) in cui si sovrappongono i grafici relativi alla PSD dei diversi sensori alle temperature analizzate in precedenza. Attraverso questo grafico si può così confrontare il comportamento di uno stesso tipo di sensore al variare della temperatura.

Si riporta la Tabella(2.13) contenente i valori medi di deviazione standard durante le prove in forno, in frigo ed in freezer al fine di evidenziare meglio le variazioni di rumore di fondo: solo nel caso dei sensori A e B si nota un aumento, seppur lieve, alle basse temperature.

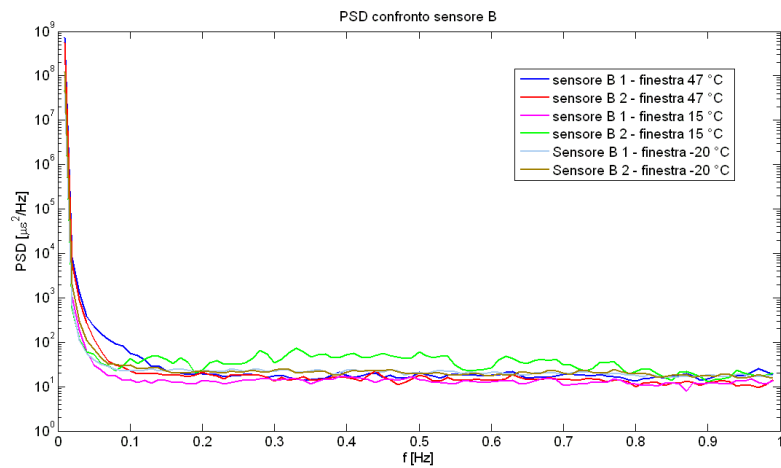
Tabella 2.13: Valore medio della deviazione standard per i segnali compensati e per i singoli sensori in tutte le prove svolte

Valore deviazione standard Sensore	Prova in forno [$\mu\epsilon$]	Prova in frigo [$\mu\epsilon$]	Prova in freezer [$\mu\epsilon$]
Sensore A compensato	0.7236	0.8718	1.1751
Sensore B compensato	0.7505	0.7833	0.9184
Sensore C compensato	0.4945	0.5101	0.5373
Sensore A - 1	0.5452	0.7819	0.9744
Sensore A - 2	0.5290	0.8216	0.6392
Sensore B - 1	0.5921	0.5945	0.8885
Sensore B - 2	0.5126	0.6765	0.7985
Sensore C - 1	0.3971	0.4507	0.516
Sensore C - 2	0.4133	0.4376	0.4959

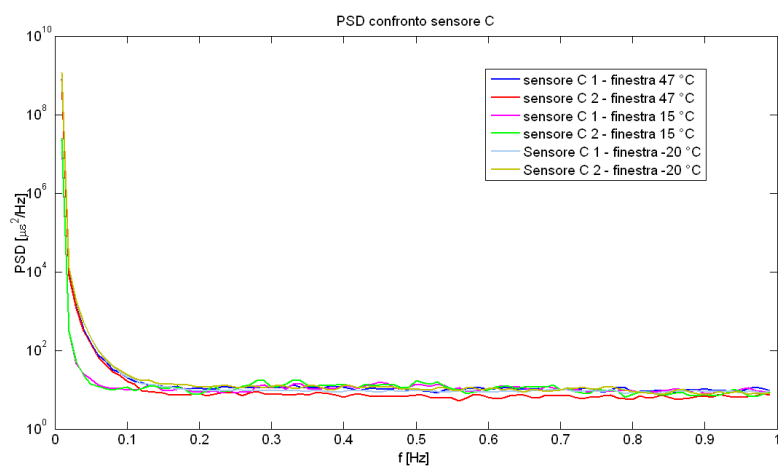
In conclusione è possibile affermare che la scelta del sensore da acquistare è fondamentale nel momento in cui si debbano effettuare prove di tipo statico, in cui quindi la capacità di compensare gli effetti termici risulta determinante. L'elevato prezzo del sensore C è quindi giustificato dalle migliori prestazioni ottenute in tutti i test effettuati.



(a) Sensore A



(b) Sensore B



(c) Sensore C

Figura 2.42: Confronto delle PSD per uno stesso sensore a temperature diverse

2.5 Prove dinamiche

L'obiettivo successivo è stato quello di testare il comportamento dinamico a trazione dei sensori a fibra ottica: a questo scopo sono stati progettati alcuni provini in acciaio di geometria semplice (parallelepipedo) da testare a trazione su cui sono stati incollati i sensori.

La prova risulta particolarmente utile per caratterizzare i sensori in quanto la bibliografia non riporta alcuna sperimentazione dettagliata a differenti frequenze: si vuole dunque indagare il comportamento delle fibre di Bragg a frequenze variabili da 0.02 Hz fino a 20 Hz passando per diversi step di ampiezza di deformazione, verificando che gli spettri mantengano un picco definito anche durante le applicazioni dinamiche. Risulta inoltre interessante definire numericamente il rumore di fondo presente per accertare la capacità a misurare deformazioni limitate. Si ricorda che, come già scritto precedentemente, è stata acquistata una coppia di sensori per ogni tipologia di fibra ottica in modo da poter effettuare una compensazione termica.

Per queste prove sono stati costruiti due provini per ogni coppia di fibre ottiche, applicando anche gli estensimetri elettrici per effettuare il confronto: il primo (provino 1) verrà utilizzato per le prove longitudinali mentre il secondo (provino 2) per le prove trasversali, che verranno di seguito descritte.

2.5.1 Collegamenti di fibre ottiche ed estensimetri

La geometria del provino è la seguente:

- Lunghezza = 250 mm;
- Larghezza = 43 mm;
- Spessore = 10 mm.

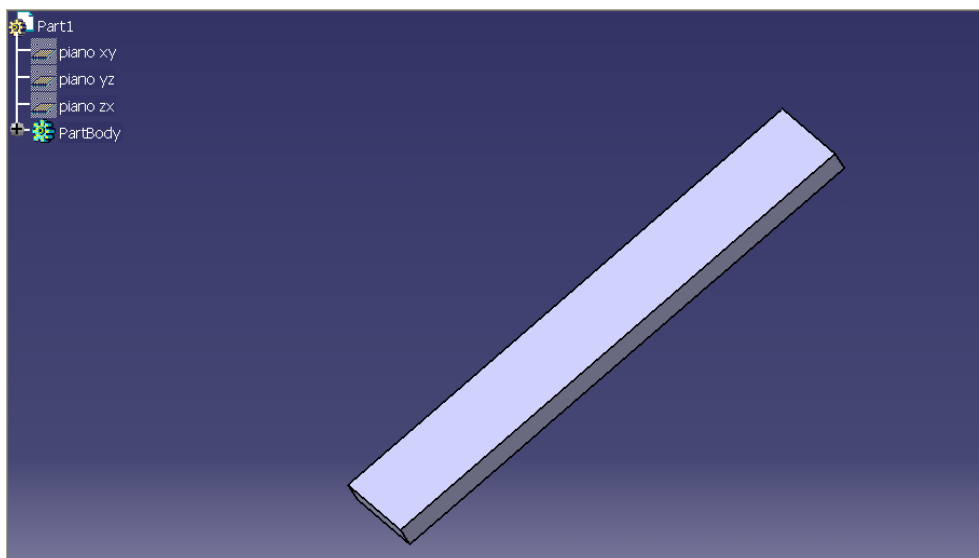


Figura 2.43: Disegno del provino in acciaio

Come precedentemente accennato le prove dinamiche si articoleranno in 2 parti distinte:

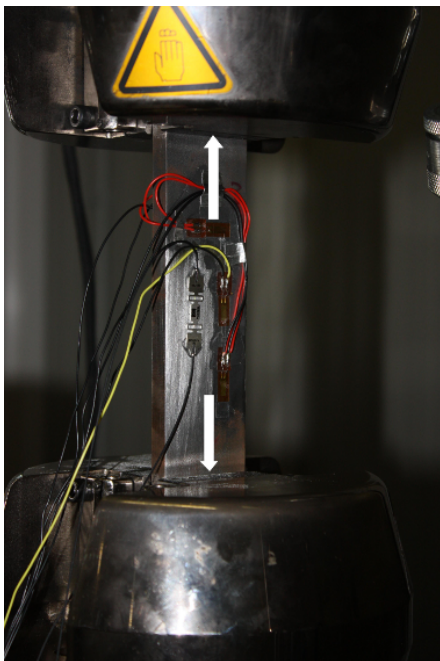
- *Prove longitudinali:*

Il provino 1 viene posto sulla macchina di prova come in Figura(2.44(a)): l'FBGS n°1 viene installato in posizione longitudinale rispetto alla direzione della forza (indicata dalla freccia in figura) mentre il secondo sensore, montato sul provino 2 (Figura(2.44(b))), viene posto accanto con la funzione di compensatore termico non essendo sottoposto ad alcun carico.

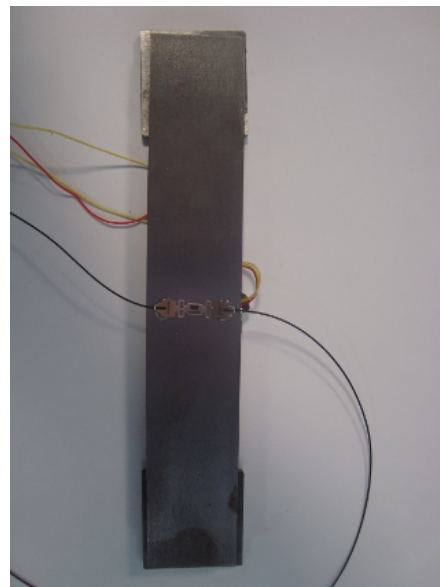
- *Prove trasversali:*

Durante le prove trasversali è il provino 2 ad essere montato sulla macchina di prova: il sensore è ora montato a 90° rispetto alla direzione del carico imposto. Il sensore n°1, utilizzato per le prove longitudinali e montato sul provino 1, ha in questo caso la funzione di compensatore termico.

In entrambi i casi i sensori sono stati posti sull'asse centrale del provino al fine di minimizzare eventuali effetti flessionali dovuti ad un non perfetto allineamento degli agganci della macchina di prova: quest'ultima è stata in ogni caso tarata appena prima di effettuare il test allineando accuratamente i punti di aggancio.



(a) Provino 1 - sottoposto a trazione



(b) Provino 2 - la sua funzione è quella di compensatore di temperatura

Figura 2.44: Disposizione dei due provini durante la prova a trazione

L'incollaggio delle fibre ottiche è stato effettuato seguendo dettagliatamente le istruzioni riportate sui data sheet dei sensori, in particolare è stato utilizzato:

- Sensore A → ciano acrilato;
- Sensore B e C → colla polimerica.

I sensori A e C erano già completi fin dall'inizio di una semplice basetta di supporto per facilitarne l'incollaggio (Figura(2.45) e Figura(2.47)): il sensore B invece risultava privo di essa e l'incollaggio è avvenuto quindi affogando il sensore nudo direttamente nel collante polimerico (Figura(2.46)).

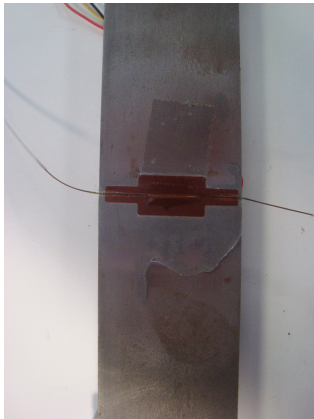


Figura 2.45: Incollaggio sensore A

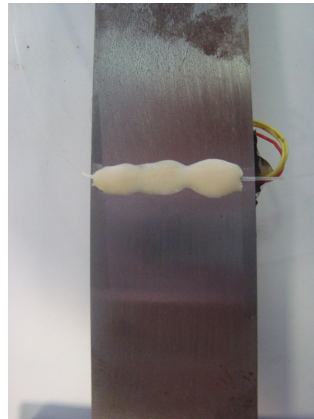


Figura 2.46: Incollaggio sensore B

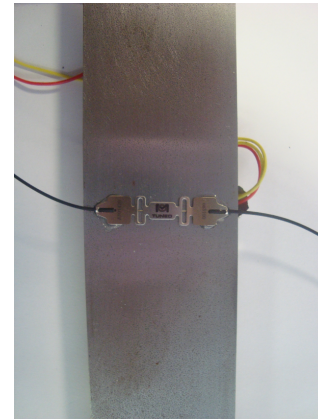


Figura 2.47: Incollaggio sensore C

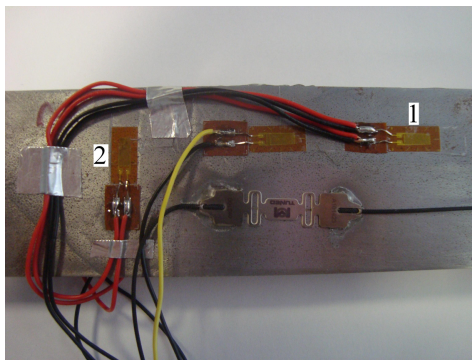
Oltre alle fibre ottiche sono stati incollati sui provini di metallo anche degli estensimetri elettrici in modo da poter effettuare un confronto diretto della misura di deformazione: anche in questo caso la loro disposizione dipende dal tipo di prova effettuata, longitudinale o trasversale.

- *Prove longitudinali:*

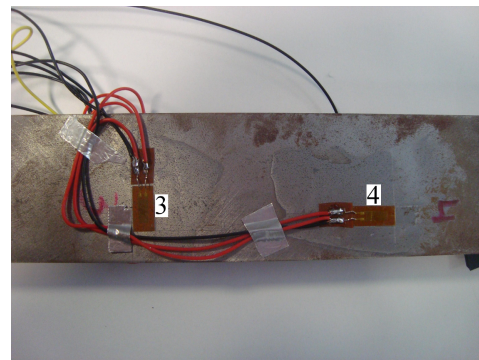
Si è deciso di installare sul provino 1 un ponte intero estensimetrico secondo lo schema in Figura(2.48): questa configurazione permette di compensare sia gli effetti termici sia l'eventuale componente flessionale dovuta agli agganci della macchina di prova, restituendo il valore della sola componente a trazione. Essendo il sensore a fibra ottica posto su di una sola faccia del provino, incapace quindi di compensare la componente flessionale, si è deciso di installarci accanto un estensimetro elettrico (Figura(2.49(a))) in modo da poter effettuare un confronto tra le deformazioni ottenute: il compensatore di temperatura per quest'ultimo estensimetro elettrico viene invece installato trasversalmente sul provino 2 (Figura(2.49(b))). .

- *Prove trasversali:*

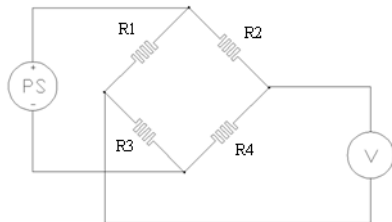
Sul provino 2 risultano quindi installati su di una faccia il sensore a fibra ottica mentre su quella opposta l'estensimetro elettrico (con il rispettivo compensatore sul provino 1): entrambi sono posti in direzione trasversale rispetto alla direzione del carico applicato. In questo modo è possibile un confronto della misura di strizione del provino tra l'FBGS e l'estensimetro elettrico, al fine di determinare se le fibre ottiche, così come gli estensimetri elettrici, possiedono una propria sensibilità trasversale (Capitolo(2.5.2)).



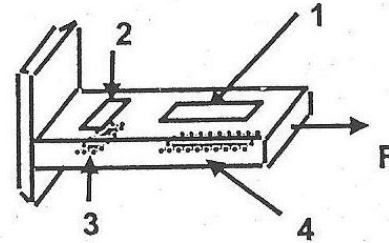
(a) Provino 1 - lato A



(b) Provino 1 - lato B



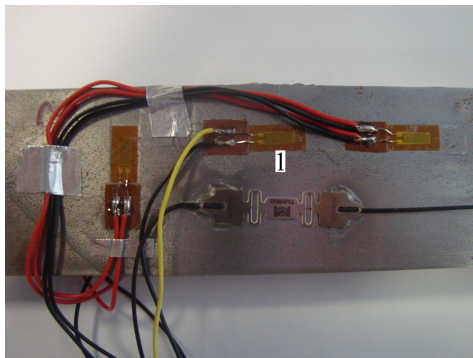
(c) Schema dei collegamenti elettrici del ponte intero estensimetrico



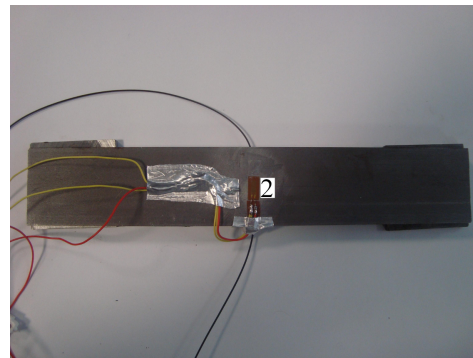
(d) Schema di prova a trazione e relativa disposizione degli estensimetri

Figura 2.48: Schema a ponte intero

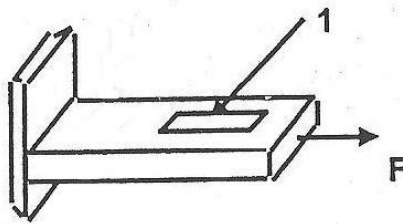
$$Z_{\text{ponteintero}} = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (2.4)$$



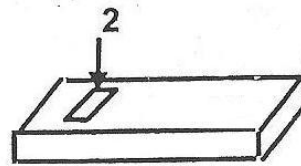
(a) Provino 1 - lato A



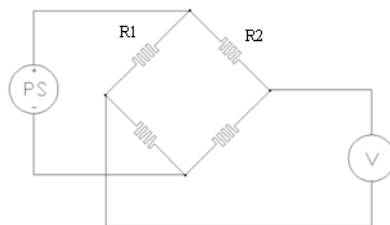
(b) Provino 2 - lato B



(c) Estensimetro usato per il confronto sulle misure longitudinali



(d) Estensimetro compensatore su provino non caricato



(e) Schema elettrico del mezzo ponte

Figura 2.49: Schema a mezzo ponte

$$Z_{mezzoponte} = \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \quad (2.5)$$

Durante la prova longitudinale il provino 1 viene sollecitato a trazione ed il rispettivo FBGS fornisce in uscita la seguente grandezza:

$$\frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} = K_L \cdot (\varepsilon_{Lt} + \varepsilon_{Lf}) + K_T \cdot (\varepsilon_{Tt} + \varepsilon_{Tf}) + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

dove:

- K_L e K_T : sensibilità longitudinale e trasversale della fibra ottica;
- K_{temp} : sensibilità alla temperatura;
- ε_{Lt} : deformazione longitudinale dovuta alla trazione pura;
- ε_{Lf} : deformazione longitudinale dovuta alla parte di flessione eventualmente presente;
- ε_{Tt} : deformazione trasversale dovuta alla trazione pura;
- ε_{Tf} : deformazione trasversale dovuta alla parte di flessione eventualmente presente.

Come vedremo dalle prove longitudinali (Capitolo(2.6.1)) il secondo termine dell'equazione è però molto piccolo essendo pari prodotto tra K_t e le deformazioni trasversali e può dunque essere tralasciato ottenendo quindi:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = K_L \cdot \varepsilon_{Ltot} + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

In questo caso il secondo provino viene posto vicino al primo ma lasciato scarico, permettendo la compensazione del contributo alla misura dovuto alle variazioni di temperatura, ottenendo:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_L \cdot \varepsilon_{Ltot} + \delta_{errorecompensazione} \quad (2.8)$$

in cui $\delta_{errorecompensazione}$ rappresenta l'errore dovuto ad una non perfetta compensazione termica: infatti l'effetto della temperatura viene eliminato completamente solo in via teorica.

Conoscendo ε_{Ltot} dagli estensimetri è quindi possibile ricavare sperimentalmente K_L , confrontando tale valore con quello riportato dai data sheet.

Durante la seconda prova viene posto invece a trazione il provino su cui è incollato il sensore trasversalmente, fornendo in uscita:

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_T \cdot (\varepsilon_{Lt} + \varepsilon_{Lf}) + K_L \cdot (\varepsilon_{Tt} + \varepsilon_{Tf}) + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = -K_T \cdot \frac{\varepsilon_{Ttot}}{\nu} + K_L \cdot \varepsilon_{Ttot} + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

in cui ν è il coefficiente di Poisson.

In questo secondo caso il provino n°1 serve da compensatore, ottenendo:

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} - \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = -\varepsilon_{Ttot} \cdot \left(\frac{K_T}{\nu} - K_L \right) + \delta_{errorecompensazione} \quad (2.11)$$

in cui $\delta_{errorecompensazione}$ può essere trascurato poichè il ΔT è limitato e causa deformazioni apparenti trascurabili: al contrario durante le prove descritte in precedenza nel Capitolo(2.3) si avevano variazioni di temperatura importanti ed in quel caso non si poteva ignorare tale effetto.

Conoscendo dalla prova precedente il valore di K_L ed ε_{Ttot} dall'estensimetro posto sul provino 2, è possibile ricavare il valore sperimentale di K_T . Come si è visto infatti nel Capitolo(1.8) una eventuale deformazione in direzione trasversale applicata alla fibra ottica può determinare uno shift della lunghezza d'onda riflessa dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione nel core.

2.5.2 Calcolo della sensibilità trasversale

Lo scopo di questa prova è capire se i sensori a fibra ottica possiedono, come nel caso degli estensimetri elettrici, una sensibilità trasversale da tenere in considerazione durante le misure.

L'architettura costruttiva degli estensimetri implica di per sé anche una sensibilità trasversale, per quanto ridotta rispetto a quella longitudinale: questa è infatti dovuta alla presenza dei raccordi nella serpentina (come mostra la Figura(2.50)) che, al fine di ridurre tale valore, vengono costruiti di sezione maggiore rispetto al resto.

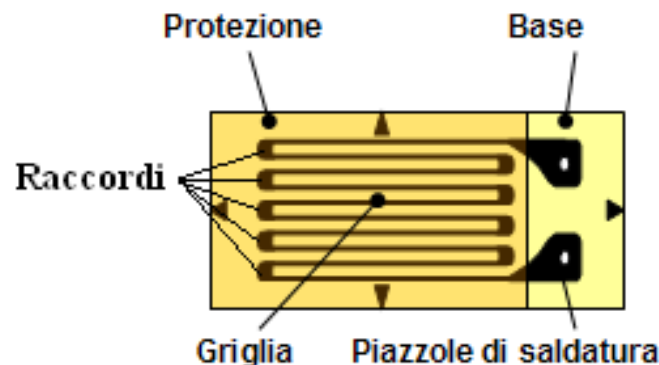


Figura 2.50: Grafici ottenuti dalla cella di carico, dal ponte e dal mezzo ponte estensimetrico

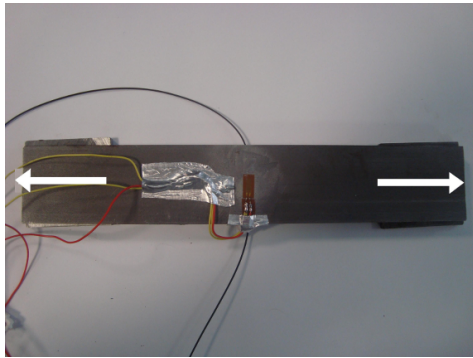
L'equazione caratteristica di una prova a trazione con estensimetro posto in direzione parallela a quella di applicazione del carico risulta essere:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_l \cdot \varepsilon_l + K_t \cdot \varepsilon_t + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

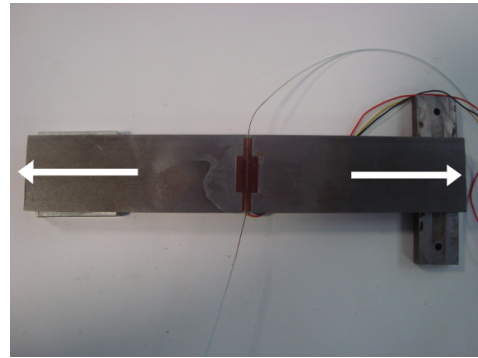
Si nota come il prodotto $K_t \cdot \varepsilon_t$ dia un contributo limitato in quanto entrambe le grandezze hanno valori piccoli ($K_T = 0.1\% \cdot K_L$).

Si vuole ora stimare il valore della sensibilità trasversale degli estensimetri a fibra ottica al fine di verificare se anche per questi vi è la necessità di tenere in considerazione questo valore.

La prova consiste nel trazionare il provino di Figura(2.51) con estensimetri (mezzo ponte) e sensori a fibra ottica posizionati in direzione trasversale (le frecce rappresentano la direzione del carico applicato).



(a) Estensimetro elettrico appartenente al mezzo ponte



(b) Estensimetro ottico

Figura 2.51: Configurazione di prova per determinare la sensibilità trasversale delle fibre ottiche

Gli estensimetri elettrici ed i sensori a fibra ottica sono posizionati sul medesimo provino sulle due facce opposte in maniera simmetrica: i rispettivi compensatori sono invece posti sui provini che verranno utilizzati per le prove longitudinali (vedi Capitolo(2.5.3)).

In questo caso la variazione di resistenza da parte dell'estensimetro elettrico è dato dalla seguente equazione:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_l \cdot \varepsilon_t + K_t \cdot \varepsilon_l + K_{temp} \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

Il valore di K_t in questo tipo di prova influenza la misura in maniera maggiore rispetto al caso precedente, essendo moltiplicato per la deformazione longitudinale anziché per quella trasversale: il data sheet degli estensimetri setta il valore numerico del K_t a 0.1% rispetto al K_l .

La prova è stata effettuata imponendo un andamento lineare della forza applicata da 0 a 40 kN, la frequenza di campionamento è stata settata a 2048 Hz per gli estensimetri elettrici (che risulta essere la frequenza minima per il sistema A/D utilizzato) e 1000 Hz per i sensori a fibra ottica (in questo caso risulta essere la frequenza massima a cui il nostro sistema di acquisizione a nostra disposizione poteva lavorare, come evidenziato anche nel data sheet della centralina stessa in Tabella(2.17)).

Di seguito si riportano i risultati per i diversi sensori a fibra ottica.

Sensore A

Per prima cosa è stata calcolata la deformazione misurata dal sensore a fibra ottica senza tenere in considerazione alcun valore di sensibilità trasversale.

L'andamento della forza applicata dalla macchina di prova, i valori di deformazione trasversale misurati dagli estensimetri e dai sensori a fibra ottica sono evidenziati nella Figura(2.52).

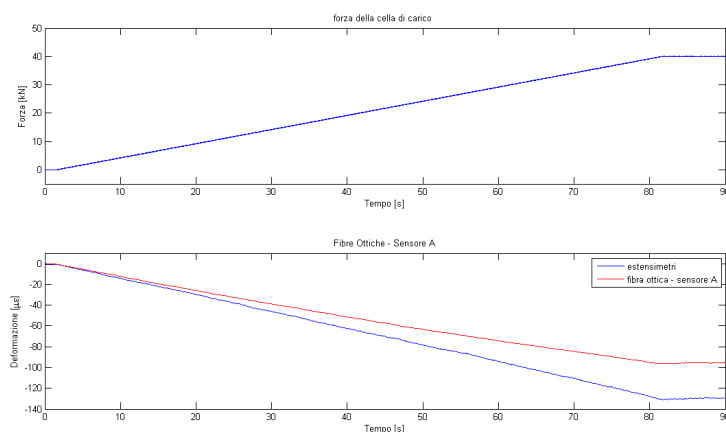


Figura 2.52: Deformazione misurata dai sensori di tipo A senza considerare la sensibilità trasversale

Tabella 2.14: Valori della deformazione trasversale misurati dagli estensimetri elettrici e dal sensore A privo del contributo della sensibilità trasversale

	Deformazione trasversale massima [$\mu\epsilon$]
Estensimetri elettrici - mezzo ponte	-130.4
Fibra ottica - sensore A	-96.3

Il valore massimo di contrazione del provino misurato dal mezzo ponte estensimetrico e dal sensore a fibra ottica risulta pari rispettivamente a $-130.4 \mu\epsilon$ e $-96.3 \mu\epsilon$. Al fine di depurare il segnale della deformazione trasversale dal rumore di fondo presente, si è scelto di utilizzare un filtro del tipo Butterworth passa-basso durante il post-processing: questo funziona eliminando dal segnale i contributi ad alta frequenza presenti, carat-

teristici del rumore di fondo.

La differenza tra i valori ottenuti mediante gli estensimetri e le fibre ottiche risulta significativa, pari a circa $34 \mu\epsilon$ alla fine della prova (errore del 26%). Utilizzando quindi l'equazione(2.11), conoscendo $\Delta\lambda_2/\lambda_2$, $\Delta\lambda_1/\lambda_1$ e ϵ_{Ttot} misurato dall'estensimetro elettrico, si è ottenuto il valore di K_t per i sensori a fibra ottica, pari a 0.00062.

Questo metodo impone di fatto che le deformazioni misurate da fibra ed estensimetro siano uguali: questa ipotesi è considerata accettabile alla luce dei risultati, che verranno si seguito mostrati (Capitolo(2.6.1)), ottenuti durante le prove longitudinali.

Come precedentemente scritto, se nel caso degli estensimetri elettrici la sensibilità trasversale è dovuta alla variazione di resistenza nei raccordi della serpentina, per le fibre ottiche essa è dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione in conseguenza al carico trasversale subito dal sensore (Capitolo(1.8)).

Sensore B

Per il sensore B non è possibile stimare il valore della sensibilità trasversale poichè il sensore posizionato in trasversale presenta un rumore troppo elevato. Molto probabilmente il sensore è stato danneggiato durante l'incollaggio poichè nelle prove precedenti non aveva mai denotato un tale comportamento.

Sensore C

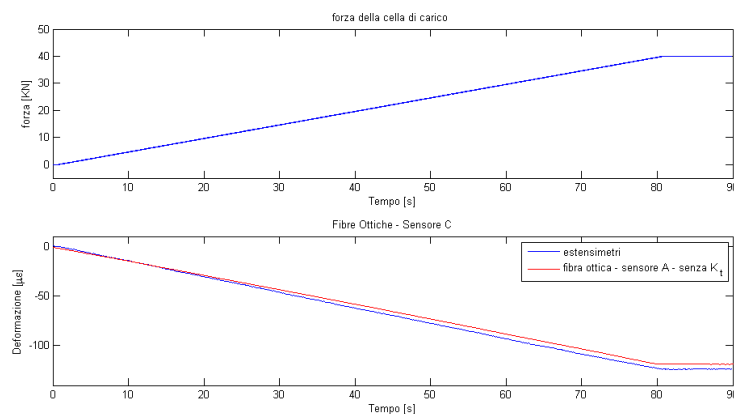


Figura 2.53: Deformazione misurata dai sensori di tipo C senza considerare la sensibilità trasversale

Si nota come i risultati di estensimetri e fibre ottiche siano praticamente uguali: il mancato utilizzo, nell'equazione caratteristica per il sensore a fibra ottica, del valore di sensibilità trasversale dimostra in questo caso come esso sia assolutamente trascurabile.

Tabella 2.15: Valori massimi registrati dagli estensimetri ottici di tipo C senza considerare la sensibilità trasversale

	Deformazione trasversale massima [$\mu\varepsilon$]
Estensimetri elettrici - mezzo ponte	-123.8
Fibra ottica - sensore C	-119

La differenza di conclusioni per il sensore A e per il sensore C è molto probabilmente dovuto al fatto che quest'ultimo è dotato di una basetta metallica a differenza del prima che ne è privo: la deformazione trasversale quindi tende ad influenzare in maniera nettamente maggiore il sensore A, mentre il supporto metallico limita questo contributo.

2.5.3 Definizione delle prove dinamiche

Volendo verificare il comportamento delle fibre ottiche a diverse frequenze ed ampiezze di deformazioni, si sono definiti i parametri della prova.

Si è scelto di monitorare tre differenti ampiezze e rispettive frequenze come mostra la Tabella(2.16).

Tabella 2.16: Elenco delle prove dinamiche che si vogliono effettuare

Deformazione [$\mu\varepsilon$]	Frequenza [Hz]
15	0.02
	5
	20
50	0.5
	5
	20
200	0.5
	5
	16

Essendo la prima una deformazione bassa, si è deciso in questo caso di utilizzare una frequenza pari a 0.02 Hz che permette di avere un numero elevato di punti campionati nel ciclo, pari a 50 secondi, potendo in questo modo analizzare con maggiore precisione l'andamento della sinusoide.

Nella terza prova a $200\mu\varepsilon$ l'ultima frequenza analizzata è 16 Hz in quanto la macchina di prova non riusciva a mantenere una frequenza maggiore date le elevate forze in gioco.

La macchina su cui è stato effettuato il test è stata dotata di una cella di carico estensimetrica tarata fino a 100 kN, offrendo buone prestazioni in termini del rapporto segnale/rumore per forze quantomeno superiori ad 1 kN.

La frequenza di acquisizione degli estensimetri è stata settata a 2048 Hz, mentre quella per le fibre a 1000 Hz a causa del limite imposto dalla centralina in dotazione,

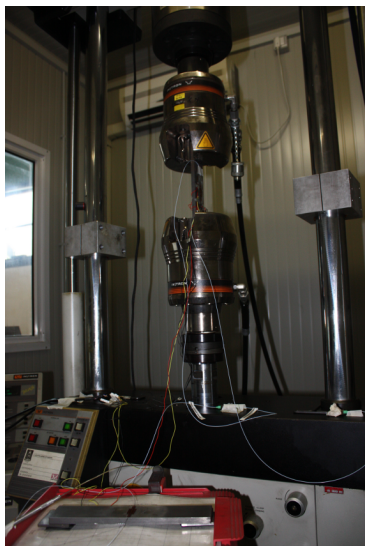
di cui riportiamo il data sheet in Tabella(2.17).

Tabella 2.17: Data sheet della centralina di acquisizione per le fibre ottiche nelle prove dinamiche

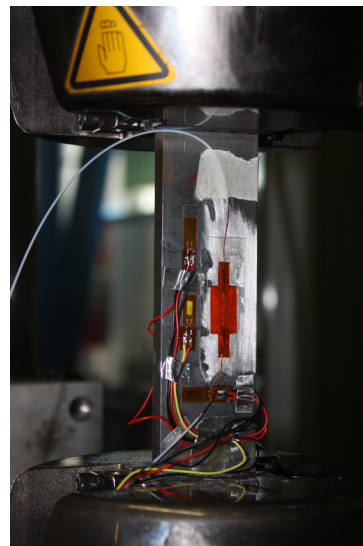
Proprietà ottiche	
Numero di canali ottici	4
Frequenza di campionamento	1000 Hz
Range di lunghezze d'onda	1510-1590 nm
Ripetibilità della lunghezza d'onda	1 pm, 00.5 pm con 1000 medie
Range dinamico	25 dB con guadagno selezionabile dall'utente
Numero massimo di FBGS per canale	80
Peak detection interna	Inclusa
Connettori ottici	FC/APC
Requisiti del FBG	0.25 ± 0.05 nm, FWHM (-3 dB)
Elaborazione dei dati	
Interfaccia	Ethernet
Software	Analisi dello spettro, peak detection, data logger, peak tracking
LabVIEW® Source Code	Ammissa per personalizzazione del software
Caratteristiche generali	
Dimensioni e peso	122 mm x 267 mm x 135 mm; 2.5 kg
Temperatura di utilizzo	0° fino a 50° C
Tensione d'ingresso	7-36 VDC (100 240 VAC, 47 63 Hz), convertitore AC/DC incluso

Il controllo della macchina è stato settato in forza: si è dovuto quindi definire, per via analitica data la semplicità geometrica del provino, le forze necessarie a provocare le deformazioni di nostro interesse. Le dimensioni del provino sono state studiate proprio per permettere di ottenere queste deformazioni in funzione del range di funzionamento della cella di carico.

La Figura(2.54) mostra il lay out complessivo della prova di trazione:



(a) Provino in macchina con a fianco il provino compensatore



(b) Ingrandimento del provino posto nella macchina di prova

Figura 2.54: Layout delle prove a trazione

Dalla Figura(2.54) si nota il ponte intero ed il mezzo ponte estensimetrico a fianco della fibra ottica, oltre alla presenza del provino compensatore, utile nelle prove a 0.02 Hz dal momento che la temperatura può influenzare una misura con un periodo così elevato.

2.6 Risultati per le prove con i sensori longitudinali

Si mostrano di seguito i risultati delle prove di trazione per i sensori incollati longitudinalmente.

2.6.1 Metodo di analisi utilizzato

Durante questo paragrafo verranno analizzate nel dettaglio i test effettuati sul provino in acciaio con una deformazione pari a $15\mu\varepsilon$, una frequenza $f = 5\text{Hz}$ ed una forza media pari a $F_{med} = 5\text{kN}$.

SENSORE A

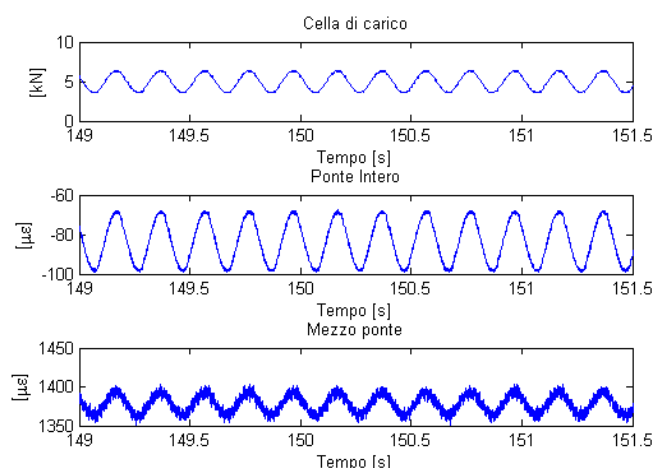


Figura 2.55: Grafici ottenuti dalla cella di carico, dal ponte e dal mezzo ponte estensimetrico

Osservando i grafici è possibile trarre alcune conclusioni qualitative.

Dalla Figura(2.55) in particolare si nota come il segnale del mezzo ponte presenti un rapporto segnale/rumore nettamente inferiore a quello del ponte intero e della cella, dovuto alla sua inferiore sensibilità.

Dalla Figura(2.56) si nota come il primo sensore funge da compensatore mentre il secondo ricopia l'andamento sinusoidale della deformazione imposta.

Il segnale della deformazione compensata risulta invece leggermente più sporco a causa del contributo del segnale del compensatore che, essendo minime le variazioni di temperatura durante le prove, è composto in gran parte da rumore di fondo.

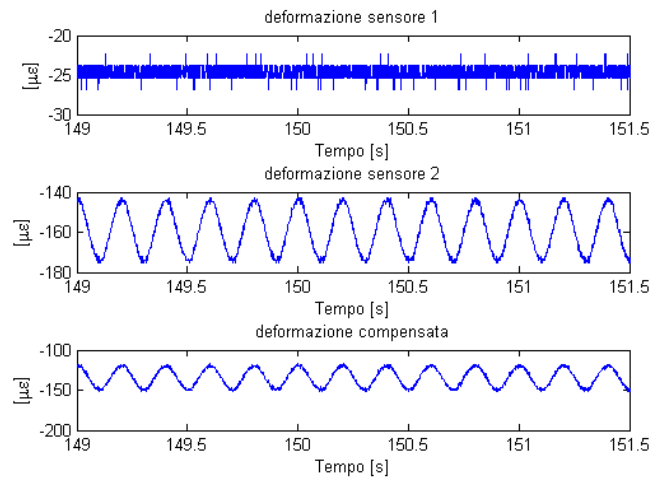


Figura 2.56: Grafici ottenuti dalla fibra compensatrice, da quella sottoposta a trazione e dal segnale compensato per il sensore A

Avendo eliminato la prima parte del segnale del transitorio della macchina di prova ed avendo sottratto ai segnali le rispettive medie, è stata effettuata una autocorrelazione per verificare che la frequenza del segnale fosse congruo con quello impostato dalla macchina.

Dopo aver definito quindi sperimentalmente l'effettiva frequenza e tempo di ciclo, si è deciso di dividere il segnale in 5 sotto finestre di uguale durata ed effettuare su ognuna di esse la trasformata di Fourier. Al fine di ricostruire in maniera ottimale la reale ampiezza del modulo della trasformata di Fourier, il segnale è stato finestrato Flatop[14]: questa finestra genera leakage, decurtando però dal segnale sempre la stessa quantità di energia.

Se si fosse utilizzata una finestra rettangolare si sarebbe generato leakage, commettendo un errore nella stima del massimo modulo della trasformata di Fourier: infatti la presenza di rumore può generare errori tali per cui risulta aleatorio riuscire ad ottenere finestre contenenti un numero perfettamente intero di periodi.

Per ognuna delle sotto finestre è stato calcolato il modulo della trasformata di Fourier relativa alla frequenza di interesse.

I risultati sulle sottofinestre considerate esposti in Tabella(2.18) sono la media dei massimi moduli ottenuti:

Tabella 2.18: Confronto dei risultati tra sensore A ed estensimetri

	Ampiezza media a 5 Hz
Segnale cella di carico	1.3707 [kN]
Segnale ponte intero	14.9298 [$\mu\varepsilon$]
Segnale mezzo ponte	14.8602 [$\mu\varepsilon$]
Segnale fibra	15.1636 [$\mu\varepsilon$]
Segnale fibra compensata	15.1615 [$\mu\varepsilon$]

È interessante quindi calcolare, oltre alla media sulle 5 sotto-finestre, anche la media e deviazione standard del rapporto tra le ampiezze misurate dalle fibre e quelle misurate dagli estensimetri. La Figura(2.57) mostra quindi il valor medio di tale rapporto (pari a a 1.0203), rappresentante la FDT (Funzione Di Trasferimento) tra fibre ed estensimetri: a questo valore è stato poi sommata e sottratta la deviazione standard.

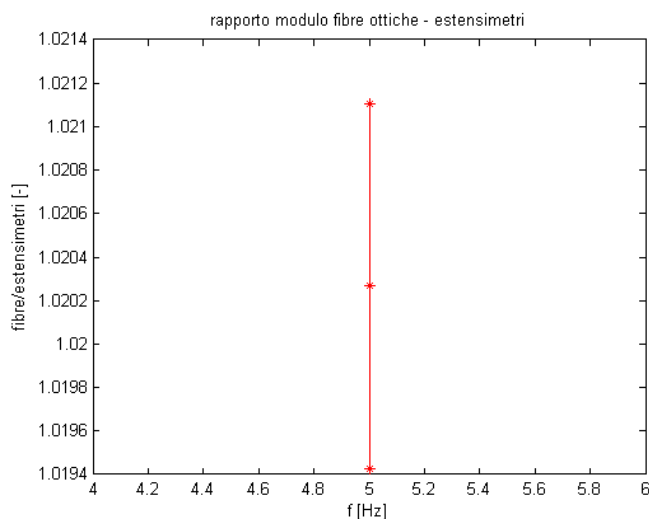


Figura 2.57: Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore A

Dalla Figura(2.57) si evidenzia come in questa prova il sensore FBG abbia un comportamento corretto e paragonabile ai sensori tradizionali di riferimento.

Di seguito (Figura(2.58)) si mostrano i grafici riferiti al modulo della trasformata di Fourier per una delle cinque finestre considerate, mentre in Figura(2.59) si effettua un ingrandimento per meglio osservare le componenti presenti.

Il valore massimo del modulo della FFT della cella di carico è pari a 1.35 poichè questo è il valore della forza che permetteva il raggiungimento di una deformazione pari a $15 \mu\epsilon$. Il valore della FFT del ponte intero e del mezzo ponte estensimetrico è invece pari a 15, che sono i $\mu\epsilon$ imposti come deformazione per questa prova. Nel modulo del mezzo ponte estensimetrico si nota una componente non solo a 5 Hz ma anche a 50 Hz dovuta al rumore del collegamento elettrico. Questo fenomeno evidenzia un altro vantaggio che i sensori a fibra ottica possiedono: infatti, non avendo collegamenti elettrici, non sono soggetti a questo tipo di disturbo.

Si inserisce il grafico relativo al modulo della trasformata di Fourier relativo al segnale delle fibre ottiche (Figura(2.60) e (Figura(2.61))). Il grafico in questo caso risulta meno affetto da armoniche al di fuori di quella fondamentale rispetto a quanto ottenuto dagli estensimetri. Il primo grafico della trasformata di Fourier dei sensori a fibra ottica non presenta il picco poichè si tratta del sensore usato come compensatore di temperatura e, di conseguenza, non risulta sottoposto ad alcuna deformazione. Gli altri due grafici, quelli cioè riferiti al segnale non compensato e quello compensato, presentano un picco a 5 Hz di ampiezza pari a $15 \mu\epsilon$.

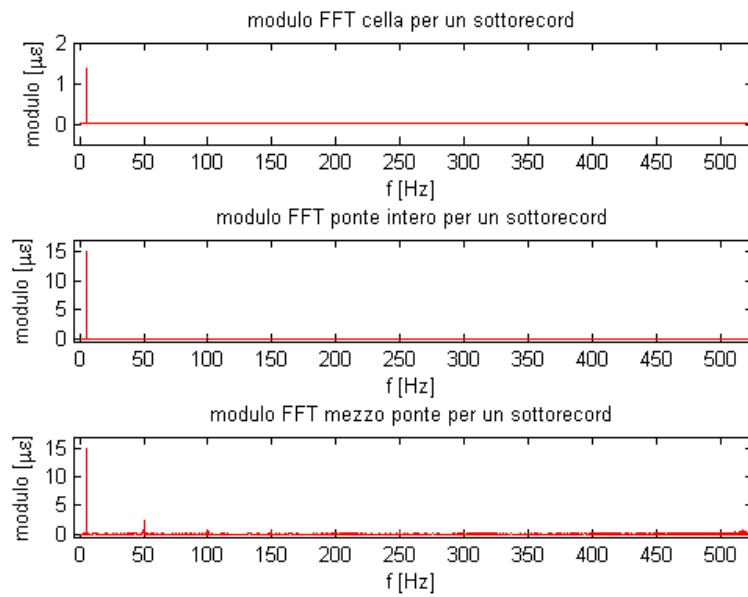


Figura 2.58: Modulo trasformata di fourier fino a 500 Hz per la cella di carico, il ponte ed il mezzo ponte estensimetrico

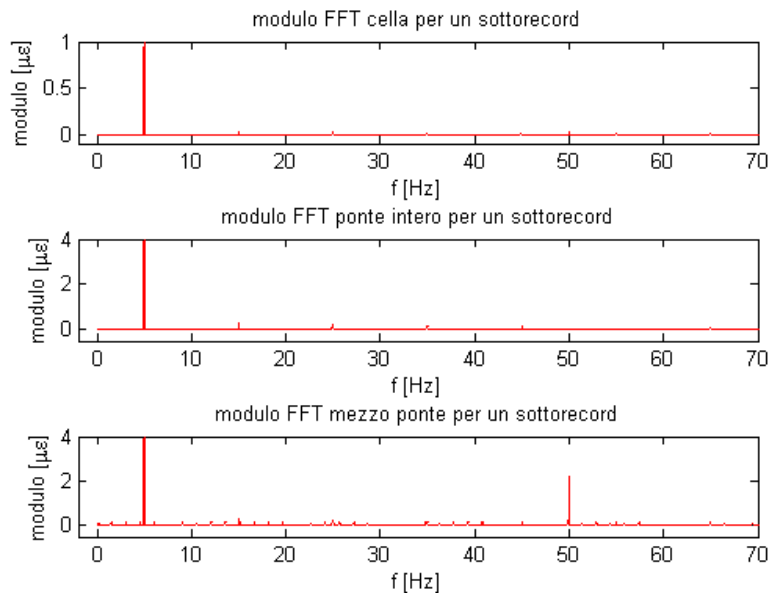


Figura 2.59: Ingrandimento fino a 70 Hz

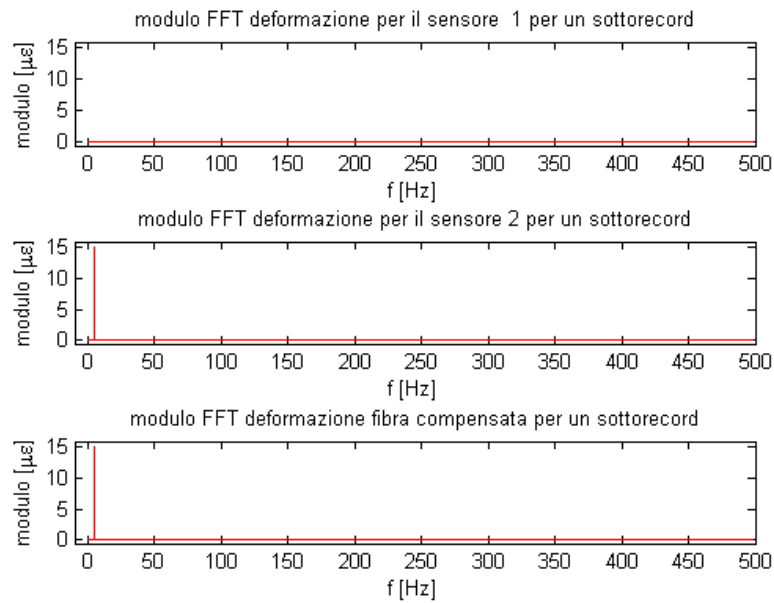


Figura 2.60: Modulo trasformata di fourier fino a 500 Hz per le fibre ottiche del sensore A

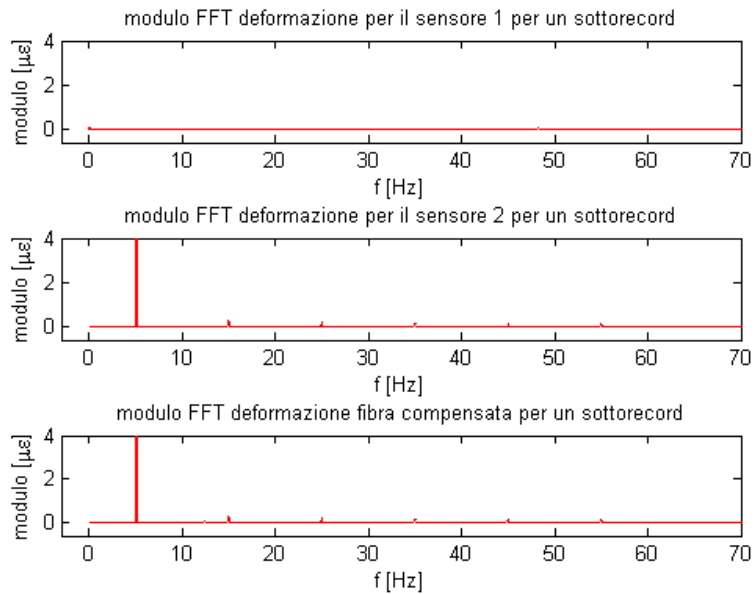


Figura 2.61: Ingrandimento fino a 70 Hz

SENSORE B

Per il sensore B si riportano solamente i grafici relativi all'andamento delle fibre ottiche (Figura(2.62)), poichè per tutte le prove il comportamento della cella di carico, del ponte intero e del mezzo ponte estensimetrico rimangono ovviamente paragonabili a quelli visti per il sensore A.

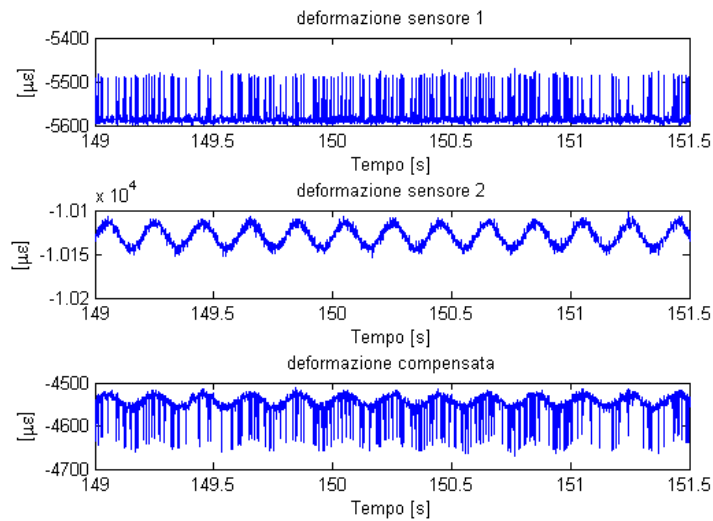


Figura 2.62: Grafici ottenuti dalla fibra compensatrice, da quella sottoposta a trazione e dal segnale compensato per il sensore B

Nel grafico relativo alle fibre ottiche si notano evidenti errori di lettura. Osservando i tre grafici si nota in modo evidente come il sensore 1 (compensatore) sia afflitto da un rumore di fondo molto elevato con presenza di picchi di ampiezza significativa, mentre il sensore 2 funziona in modo corretto. Il segnale compensato risulta quindi fortemente sporcato dal compensatore, tanto da impedire la successiva analisi: si è stati quindi costretti a calcolare le successive grandezze sul solo segnale del sensore 2 abbandonando di fatto il segnale compensato.

Il problema è stato molto probabilmente causato dal danneggiamento del sensore 1 durante l'incollaggio, dal momento che durante le prove termiche non erano stati riscontrati livelli di rumore paragonabili: si ricorda infatti che i sensori B sono stati affogati completamente nel collante non disponendo di alcuna piastrina di supporto in dotazione.

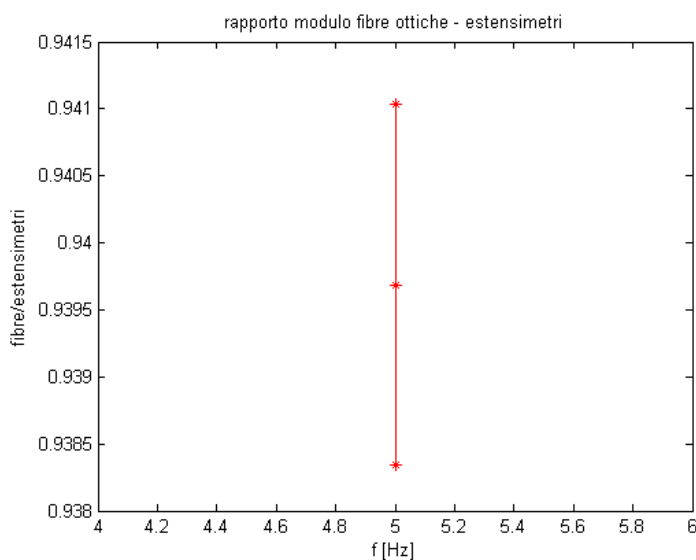
Utilizzando lo stesso procedimento di post processing precedente si riportano le grandezze ottenute in Tabella(2.19).

Tabella 2.19: Confronto dei risultati tra sensore B ed estensimetri

	Ampiezza media a 5 Hz
Segnale cella di carico	1.3669 [kN]
Segnale ponte intero	15.3294 [$\mu\epsilon$]
Segnale mezzo ponte	15.7652 [$\mu\epsilon$]
Segnale fibra	14.8207 [$\mu\epsilon$]
Segnale fibra compensata	14.7348 [$\mu\epsilon$]

Le frequenze anche in questo caso si mantengono aderenti al caso precedente, così come le ampiezze della deformazione, con la differenza che ora le fibre leggono un valore inferiore a quello degli estensimetri.

Di seguito in Figura(2.63) presentiamo il grafico della media del rapporto delle ampiezze e le rispettive deviazioni standard.

**Figura 2.63:** Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore B

Le considerazioni che si possono trarre sono identiche al caso precedente.

Si riportano ora i grafici relativi al modulo delle trasformate di Fourier per un sottorecord per le fibre ottiche (Figura(2.64)):

Anche in questo caso i grafici evidenziano come le fibre ottiche non presentano alcun contributo al di fuori della frequenza fondamentale, come invece accade negli estensimetri a 50 Hz (in riferimento alla Figura(2.59)).

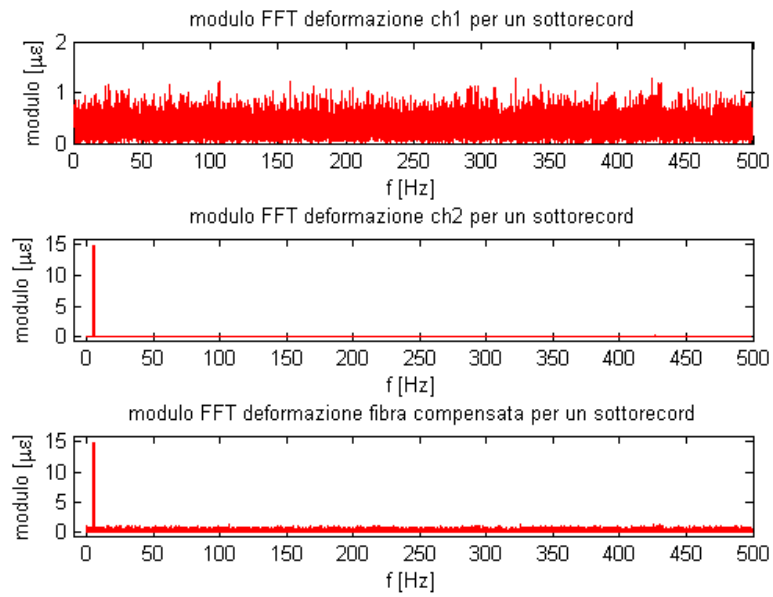


Figura 2.64: Modulo trasformata di fourier per le fibre del sensore B

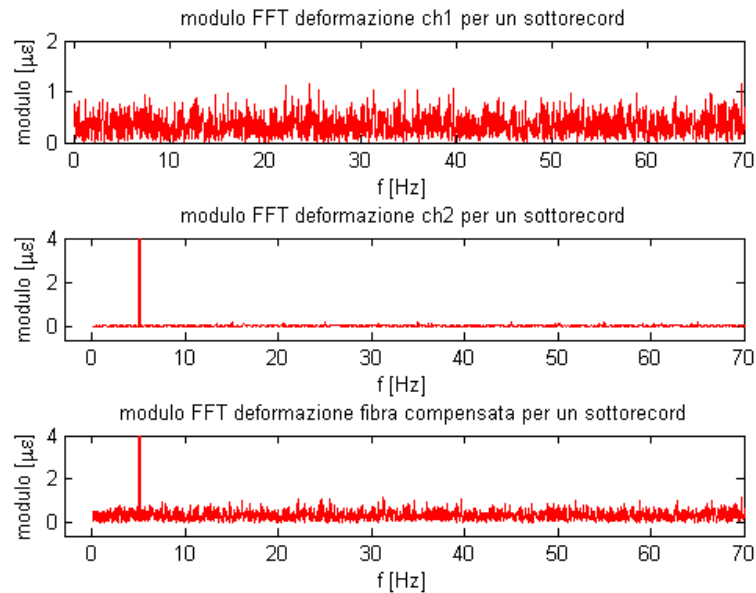


Figura 2.65: Ingrandimento fino a 70 Hz

SENSORE C

Anche per il sensore C si riportano i grafici relativi all'andamento delle fibre ottiche (Figura(2.66)):

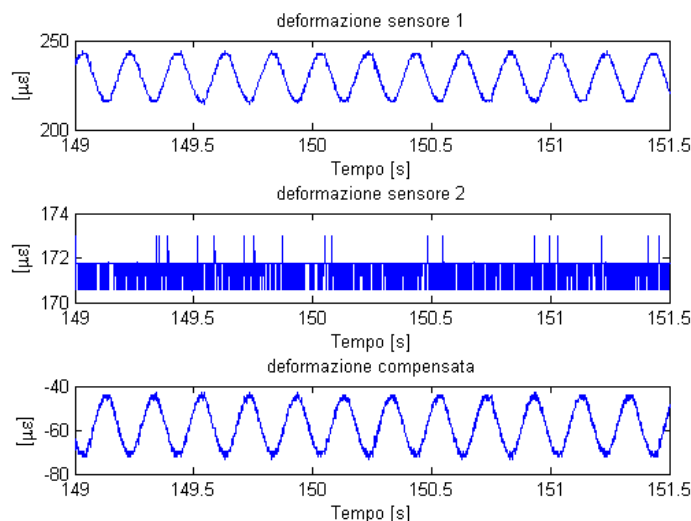


Figura 2.66: Grafici ottenuti dalla fibra sottoposta a trazione, da quella compensatrice e dal segnale compensato per il sensore C

In questo caso il sensore C si comporta in modo simile al sensore A in termini di rumore di fondo presente nel compensatore, paragonabile ai valori ottenuti durante le prove termiche, dimostrando come questi non abbiano subito alcun danneggiamento durante l'incollaggio avvenuto mediante ciano acrilato, a differenza del sensore B installato con collante polimerico.

Utilizzando lo stesso procedimento usato per gli altri sensori si riportano le grandezze ottenute in Tabella(2.20):

Tabella 2.20: Confronto dei risultati tra sensore C ed estensimetri

	Ampiezza media a 5 Hz
Segnale cella di carico	1.3698 [kN]
Segnale ponte intero	15.1037 [$\mu\epsilon$]
Segnale mezzo ponte	15.1863 [$\mu\epsilon$]
Segnale fibra	13.4170 [$\mu\epsilon$]
Segnale fibra compensata	13.4204 [$\mu\epsilon$]

Di seguito (Figura(2.67)) si riporta il grafico del rapporto tra le quantità misurate dalle fibre e dagli estensimetri:

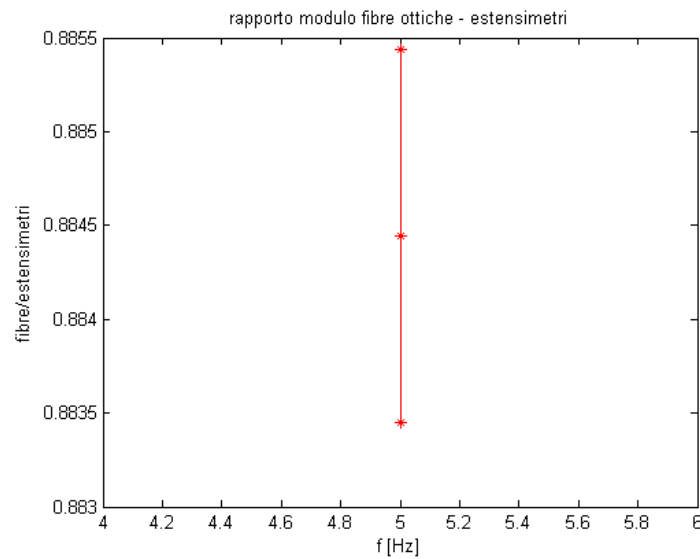


Figura 2.67: Rapporto dei valori misurati tra fibra ed estensimetri per il sensore C

Si nota in questa prova (Figura(2.67)) come il valore dell'ampiezza relativa al segnale delle fibre sia significativamente inferiore a quella ottenuta mediante gli estensimetri. Ciò è dovuto solo in una trascurabile parte al lieve disallineamento della fibra ottica rispetto alla posizione corretta: esiste infatti un angolo di circa 4° provocato da un errato posizionamento della stessa durante l'incollaggio.

Si è dunque calcolato il rapporto teorico tra la deformazione longitudinale e quella ricavata da un sensore ruotato di un certo angolo (Figura(2.68)):

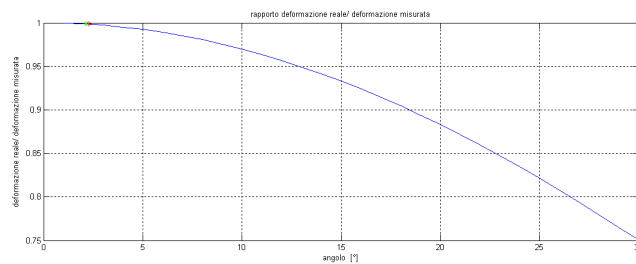


Figura 2.68: Rapporto deformazione reale/deformazione misurata riferita al solo sensore C

Ottenendo come coefficiente correttivo 0.99, possiamo concludere che tale disallineamento sia poco influente ai fini dell'analisi.

Si riportano i grafici relativi alle trasformate di Fourier per le fibre ottiche (Figura(2.69)), in cui le considerazioni sono le medesime dei casi precedenti.

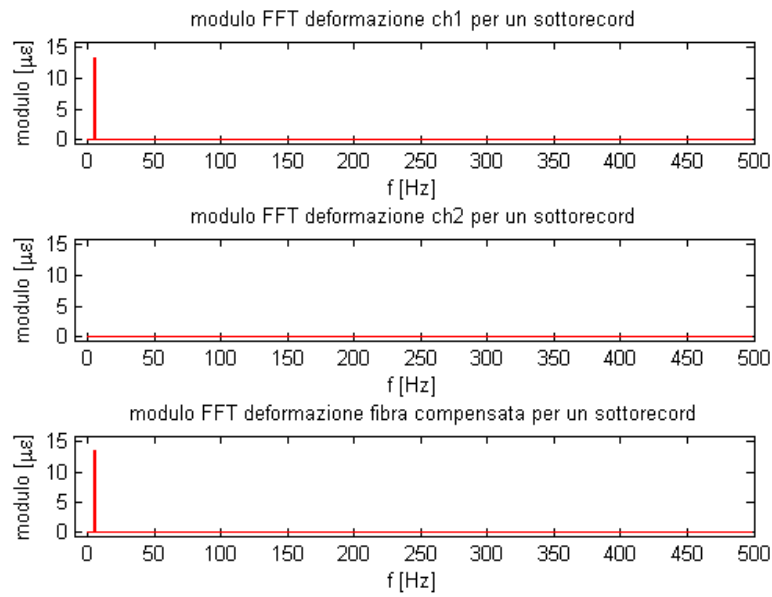


Figura 2.69: Modulo trasformata di fourier per le fibre del sensore C

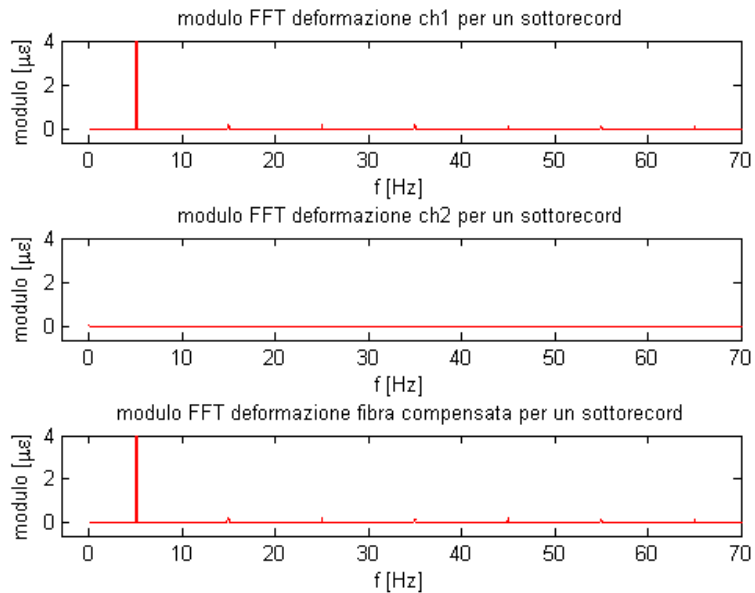


Figura 2.70: Ingrandimento fino a 70 Hz

2.6.2 Risultati

Rimangono ora da analizzare le prove di Tabella(2.21).

Tabella 2.21: Prove dinamiche ancora da analizzare

Deformazione [$\mu\epsilon$]	Frequenza [Hz]
15	0.02
	20
50	0.5
	5
	20
200	0.5
	5
	16

Nel corso delle prove, oltre a variare il valore di ampiezza della deformazione è stato anche variato il valor medio di quest'ultima, al fine di capire se questo potesse influenzare i risultati della prova: infatti, soprattutto per le prove a piccola deformazione, il valore limitato misurato dalla cella di carico, tarata fino a 100 kN per poter ospitare anche le prove a deformazione maggiore, che a sua volta comanda il controllo in forza della macchina, può comportare un peggioramento delle prestazioni intermini di rumore presente nella misura. I diversi valor medi sono dovuti quindi solo ad un problema tecnico della macchiandi prova.

Sono stati inoltre osservati gli spettri completi dei sensori a fibra ottica per vedere la loro forma, valutando di conseguenza il corretto o meno funzionamento della peak detection. Oltre a questo è utile notare come essi varino in funzione delle frequenze imposte. Dato l'andamento comune delle caratteristiche degli spettri si inseriscono i grafici relativi ad un solo sensore, in questo caso al sensore C (Figura(2.71), Figura(2.72) e Figura(2.73)):

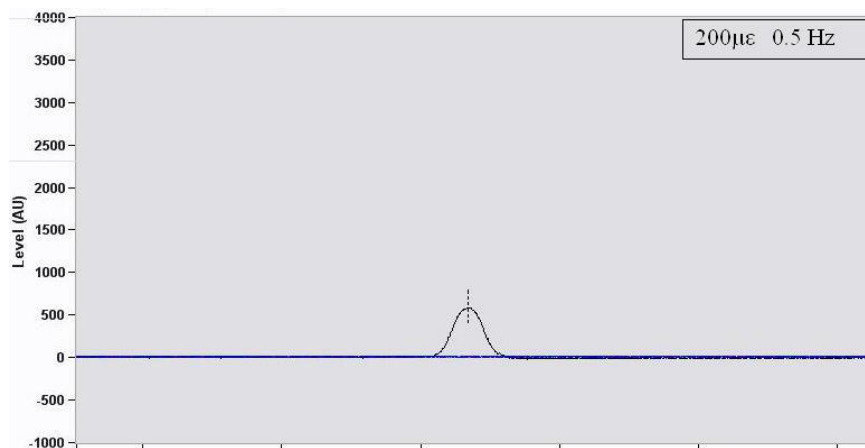


Figura 2.71: Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 0,5 Hz

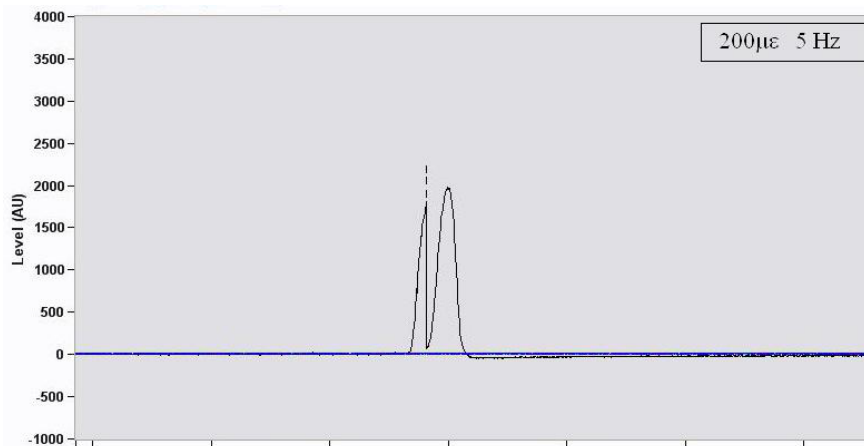


Figura 2.72: Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 5 Hz

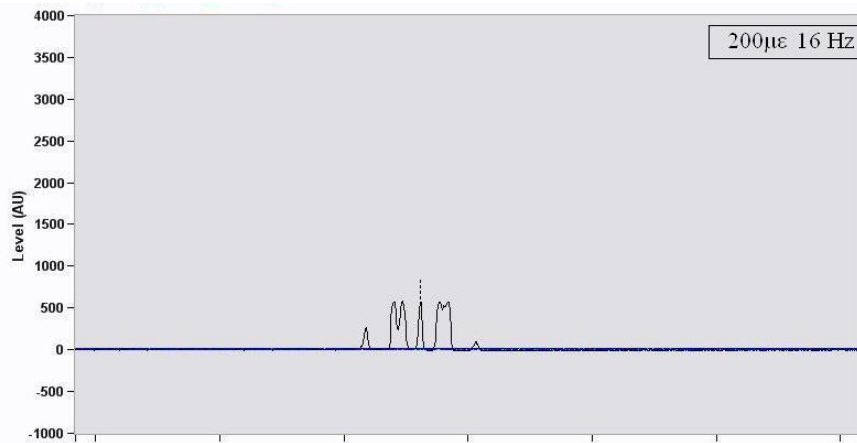


Figura 2.73: Picco del sensore C a $200\mu\epsilon$ a frequenza di 16 Hz

Si sono inseriti solo i grafici a $200\mu\epsilon$ in quanto quelli relativi alle altre due deformazioni ($15\mu\epsilon$ e $50\mu\epsilon$) evidenziano andamenti analoghi. Le variazioni dello spettro si notano invece in maniera netta al variare della frequenza della prova: a basse frequenze il picco risulta molto pulito e soprattutto unico, facilitando quindi il lavoro della peak detection implementata dalla centralina. Al crescere della frequenza si ha invece sdoppiamento del picco nel caso a 5 Hz ed addirittura il nascere di ulteriori picchi a 20 Hz.

Nonostante la presenza di numerose creste, l'algoritmo della centralina atto a definire istante per istante la posizione del picco fondamentale da monitorare non genera errori: la linea tratteggiata in Figura(2.71), Figura(2.72), e Figura(2.73) rappresenta la posizione del picco principale. La nascita quindi di lobi laterali anche di ampiezza consistente non ha determinato, nelle prove effettuate, problemi di individuazione del picco fondamentale da parte della centralina.

Non essendo presente in letteratura prove di tipo dinamico, questo aspetto non è mai stato evidenziato ed analizzato. Questo risulta essere uno degli aspetti che in futuro meriterà ulteriori ed approfondite analisi per verificare se la centralina continui a seguire il picco principale anche a frequenze maggiori (come accaduto durante le nostre

prove), oppure se esiste una frequenza limite oltre la quale si hanno problemi di identificazione del picco principale.

Gli andamenti e le caratteristiche principali dei grafici relativi alle deformazioni ed ai moduli delle trasformate di Fourier implicano considerazioni simili al caso precedente: si inseriranno perciò solo i valori ed i grafici ritenuti utili al fine di un confronto metrologico.

A causa delle limitazioni imposte sulla macchina di prova non è stato possibile salire ulteriormente con la frequenza.

SENSORE A

Per mettere in rilievo i risultati ottenuti, su tutte le figure si sono effettuati degli ingrandimenti dei valori medi e deviazioni standard delle funzioni di trasferimento tra fibre ottiche ed estensimetri.

Dalla Figura(2.74(a)), Figura(2.74(b)) e Figura(2.74(c)) è possibile osservare come al variare della frequenza, per una data ampiezza di deformazione, il valore del rapporto tra le ampiezze, calcolate mediante trasformata di Fourier, non subisce significative variazioni rimanendo nell'intorno dell'unità.

Solo nella prova a $200 \mu\epsilon$ è presente un aumento del valore del rapporto al crescere della frequenza, nelle altre prove invece non si nota un evidente trend: le differenze sono comunque molto ridotte tanto da poter rientrare nell'incertezza di misura.

Le deviazioni standard invece variano a seconda della prova: al diminuire della deformazione e della frequenza imposta, il valore di deviazione standard aumenta.

Si riportano a proposito in Tabella(2.22) i valori numerici delle medie e deviazioni standard dei grafici:

Tabella 2.22: Risultati ottenuti con i sensori A

Deformazione ($\mu\epsilon$)	Media rapporto					Deviazione standard del rapporto				
	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz
15 $F_{med} = 5$ KN	1.0076		1.0203		0.9625	0.0086		$8.3537 \cdot 10^{-4}$		0.0013
			1.0256		0.9699			0.0012		$9.1002 \cdot 10^{-4}$
50 $F_{med} = 15$ KN		1.0222	1.0356		0.9698		$4.3596 \cdot 10^{-4}$	$5.0872 \cdot 10^{-4}$		$4.0134 \cdot 10^{-4}$
200 $F_{med} = 28$ KN		1.0222	1.0364	1.0525			$4.9282 \cdot 10^{-5}$	$1.3229 \cdot 10^{-4}$	$1.3123 \cdot 10^{-4}$	

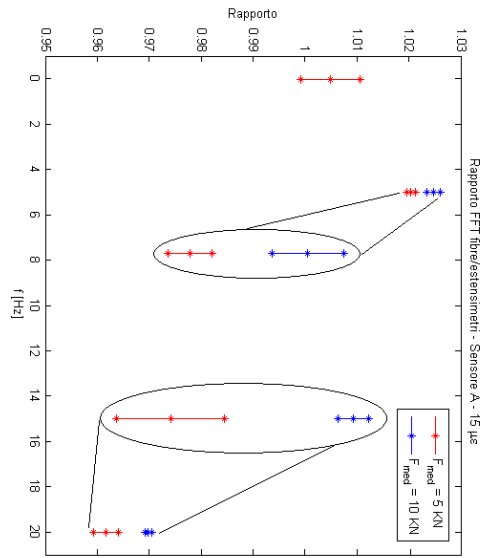
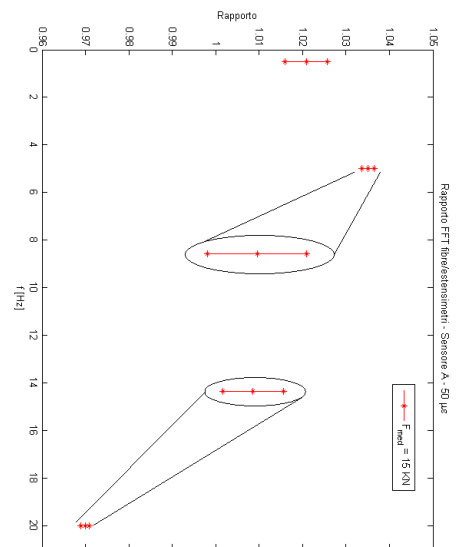
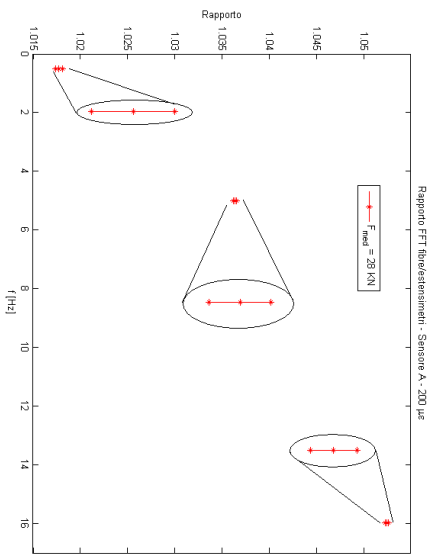
(a) 15 μm (b) 50 μm (c) 200 μm

Figura 2.74: Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore A a diverse frequenze

SENSORE B

In questa prova si ricorda, come detto precedentemente, che il sensore posizionato trasversalmente, atto quindi durante le prove longitudinali a funzionare come compensatore, ha evidenziato un malfunzionamento dovuto probabilmente all'incollaggio, in cui il sensore è affogato.

I risultati ottenuti non sono quindi compensati in temperatura e devono perciò essere interpretati alla luce di questo malfunzionamento.

Anche in questa prova nei primi due grafici non si nota un evidente trend del valor medio al crescere della frequenza: solo nella prova a 200 $\mu\varepsilon$ è presente una diminuzione di quest'ultimo.

Si riportano i valori numerici di medie e deviazioni standard in Tabella(2.23):

Tabella 2.23: Risultati ottenuti con i sensori B

Deformazione ($\mu\varepsilon$)	Media rapporto					Deviazione standard del rapporto				
	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz
15 $F_{med} = 5$ KN $F_{med} = 25$ KN	0.9905		0.9835		1.1189	0.0304		0.0017		0.0035
			0.9550		1.0782			0.0029		0.0040
50 $F_{med} = 15$ KN		0.9716	0.9619		1.0851		$8.1830 \cdot 10^{-4}$	$5.2901 \cdot 10^{-4}$		$3.6414e \cdot 10^{-4}$
200 $F_{med} = 28$ KN		1.0054	0.9480	0.9164			$8.7450 \cdot 10^{-4}$	$2.5969 \cdot 10^{-4}$	$2.5769e \cdot 10^{-4}$	

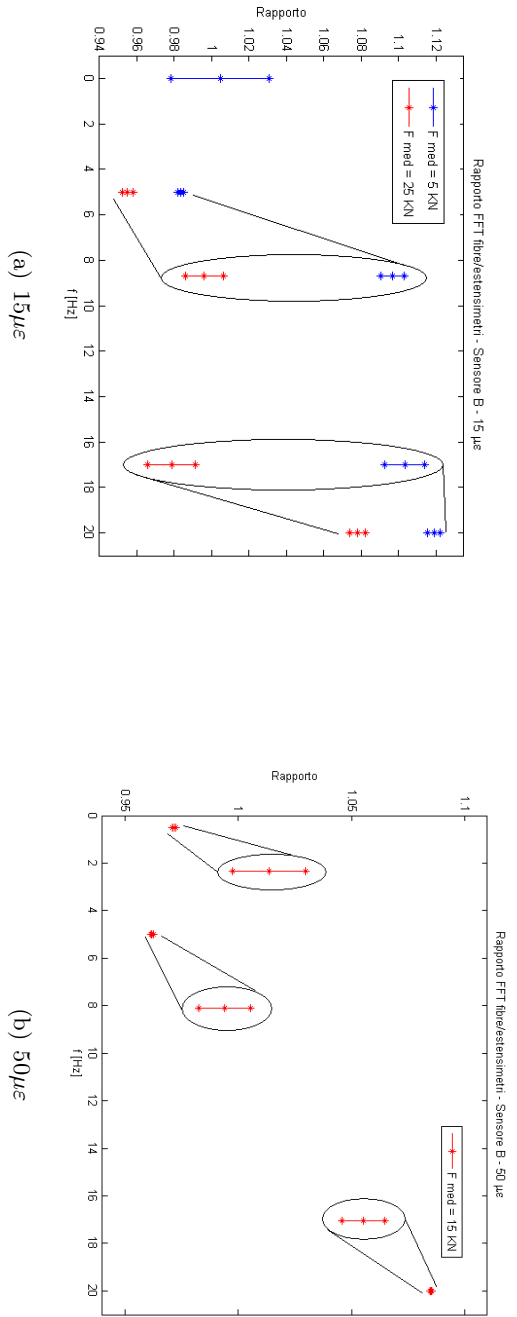


Figura 2.75: Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore B a diverse frequenze

SENSORE C

Si ricorda come per mettere in rilievo i risultati ottenuti, su tutte le figure si sono effettuati degli ingrandimenti dei valori medi e deviazioni standard delle funzioni di trasferimento tra fibre ottiche ed estensimetri.

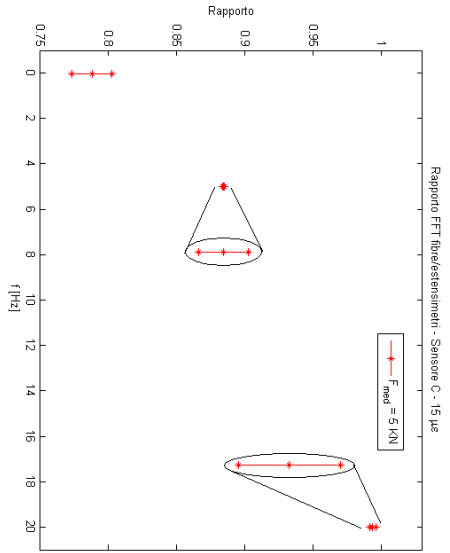
Tabella 2.24: Risultati ottenuti con i sensori C

Deformazione ($\mu\varepsilon$)	Media rapporto					Deviazione standard del rapporto				
	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz	0.02 Hz	0.5 Hz	5 Hz	16 Hz	20 Hz
15 $F_{med} = 5$ KN	0.7977		0.8844		0.9938	0.0059		0.0010		$9.0959 \cdot 10^{-4}$
50 $F_{med} = 15$ KN		0.8277	0.8756		0.9765		0.0018	$8.9867 \cdot 10^{-4}$		$5.6365 \cdot 10^{-4}$
$F_{med} = 25$ KN		0.8455	0.8739		0.9755		0.0017	$6.8967 \cdot 10^{-4}$		$2.8348 \cdot 10^{-4}$
200 $F_{med} = 28$ KN		0.7891	0.8579	0.8522			$2.7322 \cdot 10^{-4}$	0.0014	$1.7473 \cdot 10^{-4}$	

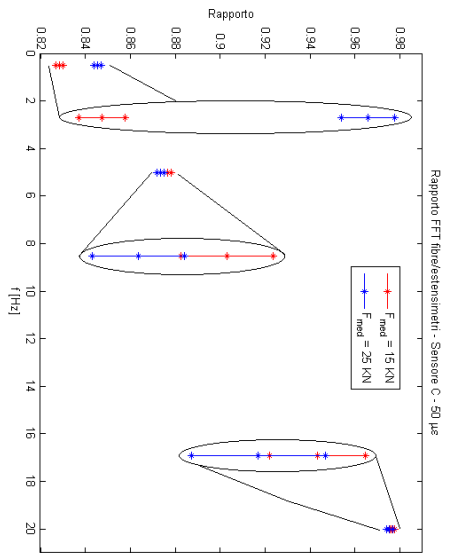
In questa prova sembra esserci, come mostrano la Figura(2.76(a)) e la Figura(2.76(b)), un aumento del valore del rapporto al crescere della frequenza: nell'ultimo grafico (Figura(2.76(c))) questo andamento non è però più dimostrato, evidenziando come non esiste un legame fisso tra le due grandezze.

Come già detto precedentemente, il valore basso del rapporto non può essere attribuito al leggero disallineamento del sensore rispetto alla direzione longitudinale.

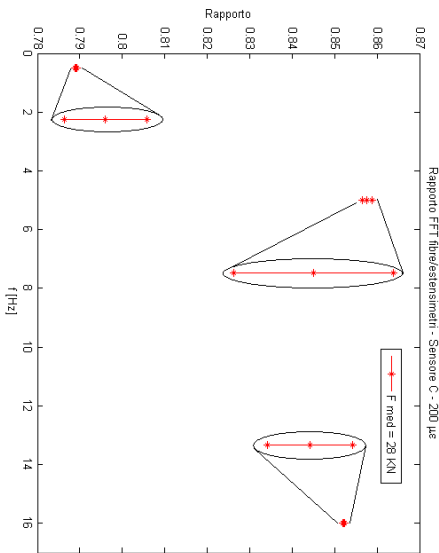
Inoltre il valore del rapporto cresce fino a raggiungere un valore unitario nei grafici a $15\mu\varepsilon$ e $50\mu\varepsilon$, dimostrando che il sensore ottiene risultati prossimi a quelli ottenuti dagli estensimetri solo alle alte frequenze, mentre alle basse restituisce valori inferiori. Ciò può essere dovuto al tipo di incollaggio adottato ed al fatto che il sensore C dispone di una piastrina di supporto in materiale metallico, dunque il collante deve trasferire sforzi relativamente elevati. Nelle prove a bassa frequenza, in cui quindi il collante è sottoposto al carico per un tempo superiore in ogni ciclo, può accadere che il sensore tenda a scivolare, fornendo di conseguenza misure inferiori rispetto al valore effettivo.



(a) 15µε



(b) 50µε



(c) 200µε

Figura 2.76: Rapporti deformazione fibre/estensimetri per il sensore C a diverse frequenze

2.6.3 Conclusioni delle prove dinamiche

I grafici appena osservati mostrano gli andamenti del rapporto tra l'ampiezza misurata dagli estensimetri e quella misurata dai sensori a fibra ottica a diverse ampiezze di deformazione e frequenza: per analizzare meglio eventuali effetti sistematici sono stati inseriti i precedenti risultati su di un singolo grafico per ogni tipologia di sensore (Figura(2.77)).

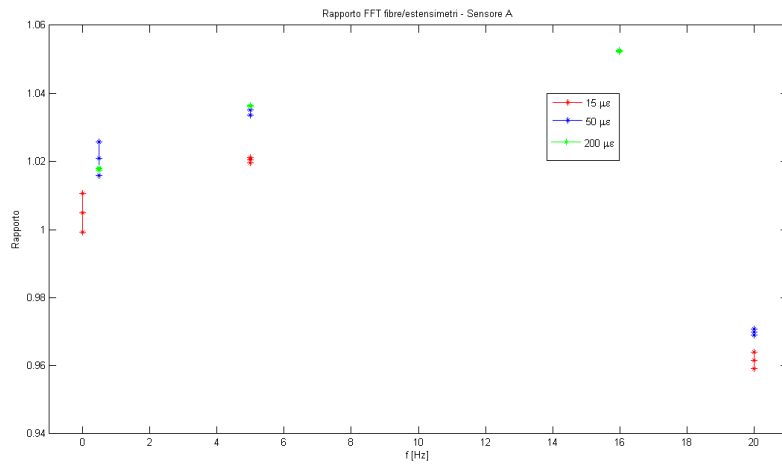
A bassa frequenza i valori dei rapporti rimangono, in ogni sensore, simili tra loro: non si nota infatti un evidente trend al variare della deformazione.

A 5 Hz la situazione è pressoché la medesima.

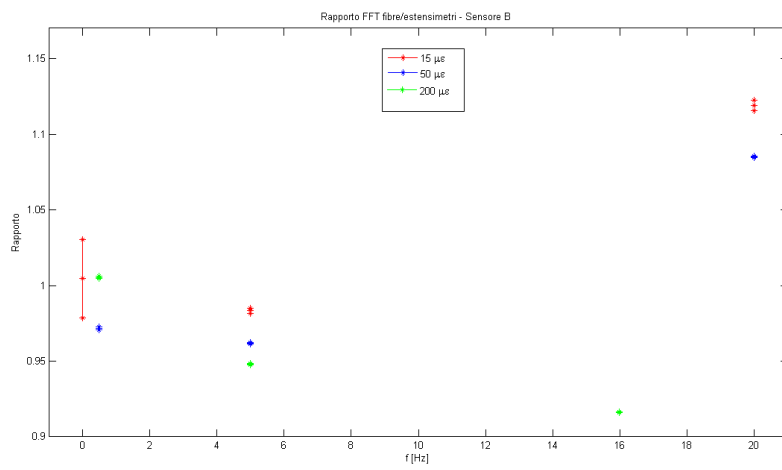
Alle frequenze maggiori si nota invece una sensibile differenza tra i risultati ottenuti a $200 \mu\epsilon$ e quelli ottenuti a $50 \mu\epsilon$ e $15 \mu\epsilon$, che rimangono simili tra loro. Essendo la colla un elemento intrinsecamente non lineare dipendente sia dalla frequenza che dal valore di deformazione[15], una possibile causa di questo effetto è l'incollaggio: se gli estensimetri godono di una installazione ormai normata e standardizzata, le fibre ottiche sono state applicate con due tipi differenti di colla (ciano acrilato per i sensori A e C, colla polimerica per il sensore B) e con quantitativi non definiti da alcun data sheet.

Si ricorda inoltre che i tre sensori a fibra ottica dispongono di supporti differenti: il sensore A è dotato di una sottile basetta in materiale plastico, il sensore B viene affogato nudo nel collante polimerico, il sensore C dispone di un supporto metallico. Queste variabili possono influenzare i risultati: per determinare l'effetto di ogni fattore bisognerebbe effettuare una prova con un elevato numero di provini affinché qualsiasi conclusione sia statisticamente rilevante.

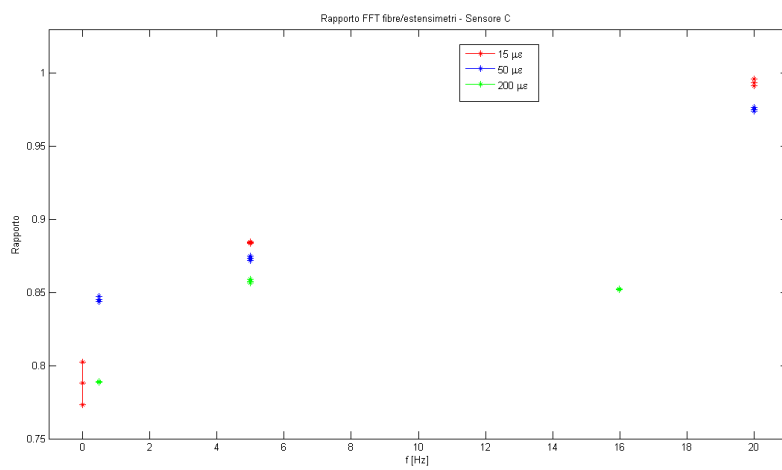
In questa sede non si è investigato la ripetibilità di risultati al variare di questi fattori in quanto necessiterebbe di una serie elevata di campioni, bensì si è svolto uno studio preliminare per caratterizzare i sensori a reticolo di Bragg confrontandoli con i risultati ottenuti dagli estensimetri elettrici ad ampiezze di deformazione e frequenze variabili, non essendoci ancora in bibliografia articoli che descrivano in maniera accurata e metodica il fenomeno.



(a) Sensore A



(b) Sensore B



(c) Sensore C

Figura 2.77: Confronto a diverse deformazioni e frequenze per ogni sensore analizzato

2.7 Confronto fibre-estensimetri in termini di rumore di fondo

Nelle prove precedenti è stato studiato il comportamento dinamico dei sensori a fibra ottica confrontando i risultati con gli estensimetri elettrici evidenziando media e deviazione standard del rapporto tra il modulo massimo delle trasformate di Fourier su 5 finestre temporali.

Nonostante sia già stata effettuata una analisi circa il livello di rumore di fondo che caratterizza i sensori a fibra ottica, risulta ora utile riprendere lo studio osservando le eventuali differenze dopo l'incollaggio ed il cambio di centralina (si ricorda che le prove termiche sono state effettuate con una centralina di acquisizione da 2 Hz mentre le prove dinamiche con una a 1000 Hz).

Si vuole ora determinare la deformazione minima misurabile dai tre diversi sensori a fibra ottica e confrontarlo con i valori ricavati dal ponte intero e dal mezzo ponte estensimetrico. A tale scopo verranno utilizzati i dati provenienti dalle prove di deformazione a $15\mu\varepsilon$ e a frequenza di 0,02 Hz: avendo a disposizione una frequenza di campionamento molto elevata, è possibile avere una grande quantità di punti campionati all'interno della sinusoide che presenta un periodo elevato, dando l'opportunità di ricostruire in modo molto dettagliato l'andamento del segnale.

Si procede calcolando media e deviazione standard su finestre di durata limitata pari a 0.1 secondi: in questo modo la variazione della sinusoide, caratterizzata da un periodo di 50 secondi, risulta nella zona a massima crescita pari a $0.13\mu\varepsilon$ senza quindi influenzare in maniera significativa il valore di deviazione standard.

Si è quindi tracciato il grafico della media ± 2 volte il valore di deviazione standard in modo da avere un intervallo di confidenza pari al 95%. A questo punto è possibile verificare la deformazione minima misurabile andando ad osservare quando gli intervalli di confidenza smettono di sovrapporsi[16].

Si riportano in Tabella(2.25) i risultati ottenuti attraverso quest'ultima analisi, mentre in Figura(2.78) sono riportati i grafici dai quali sono stati ricavati tali dati.

Tabella 2.25: Deformazione minima che ciascun sensore può leggere in maniera distinta

	Deformazione minima [$\mu\varepsilon$]
Sensore A	4.27
Sensore B	12.96
Sensore C	4.46
Mezzo ponte	10.53
Ponte intero	1.88

Come si evince dalla tabella i sensori A e C si comportano in modo analogo, permettendo due misure distinte con pochi $\mu\varepsilon$ di scarto; il sensore B si comporta meno bene, ma tale risultato è imputabile al danneggiamento subito a causa del tipo di incollaggio effettuato.

In generale tutti i sensori a fibra ottica si sono comportati meglio a livello di rumore di fondo rispetto al mezzo ponte estensimetrico, indice di un'ottima qualità del segnale in uscita.

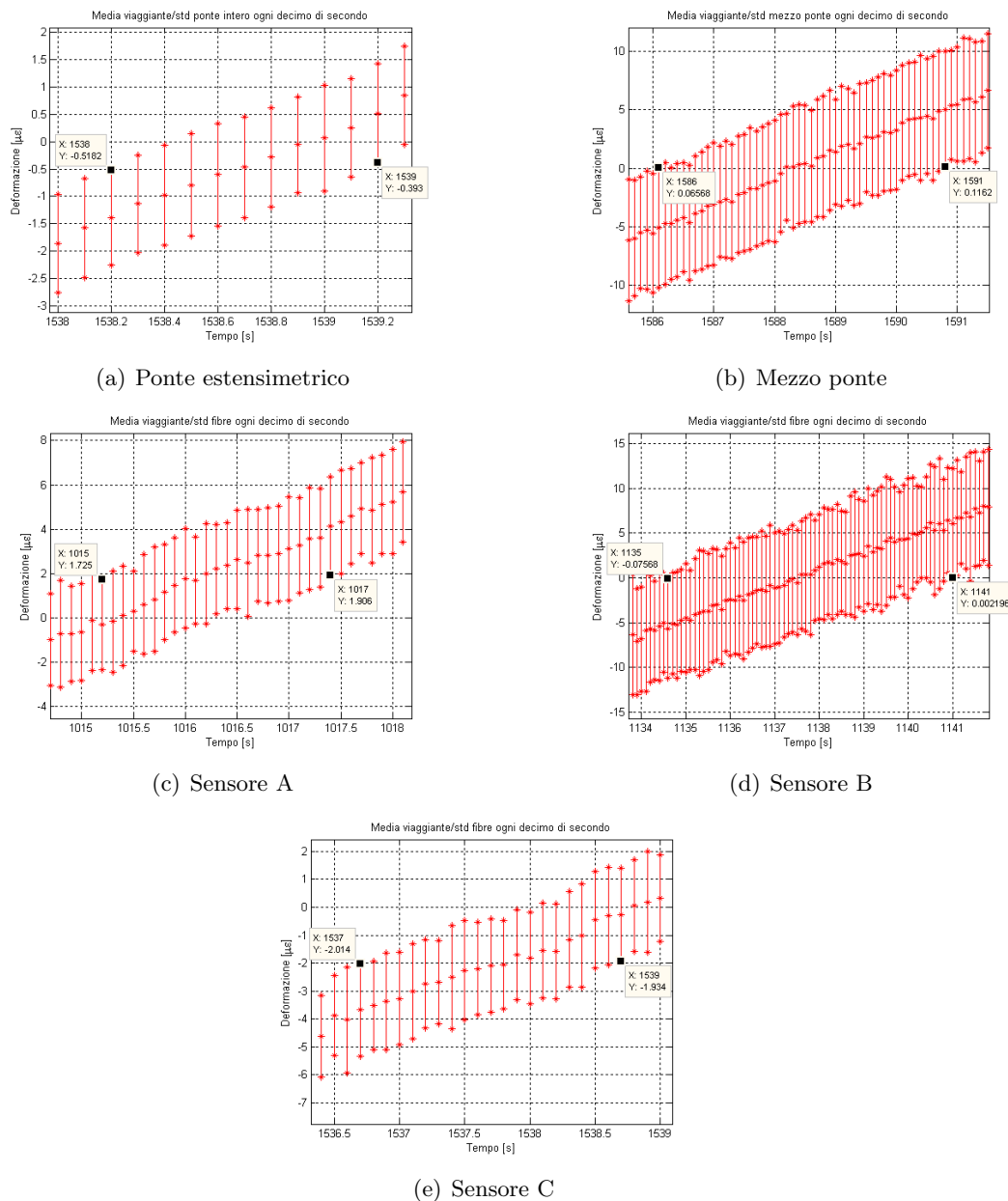


Figura 2.78: Risultati ottenuti mediando dieci volte ogni secondo i segnali del ponte, del mezzo ponte estensimetrico e dei sensori a fibra ottica

2.8 Abbattimento del rumore di fondo

Un successivo ed interessante passo è definire il rumore di fondo dei segnali provenienti dalle fibre ottiche, verificando quanto esso si riduce all'aumentare del numero di medie effettuate. A tale scopo si utilizzerà il segnale proveniente dal compensatore che, non

essendo sottoposto ad alcun carico, è composto dal solo rumore di fondo e dal contributo della temperatura.

Essendo, come già spiegato precedentemente, il compensatore del sensore B non funzionante, per questo sensore è stato necessario utilizzare in questo caso il segnale del secondo sensore durante la parte iniziale della prova in cui la macchina rimane ferma: la lunghezza temporale di questo record risulta quindi sensibilmente inferiore rispetto ai record disponibili per i sensori A e C, offrendo quindi una base più scarsa per il calcolo della deviazione standard.

Utilizzando campioni di lunghezza pari a circa 6 minuti nel caso dei sensori A e C, e di 12 secondi per il sensore B, si è deciso di verificare il valore di deviazione standard mediando il segnale 5, 20, 100 e 1000 volte. I risultati sono riportati in Figura(2.79) e riassunti in Tabella(2.26).

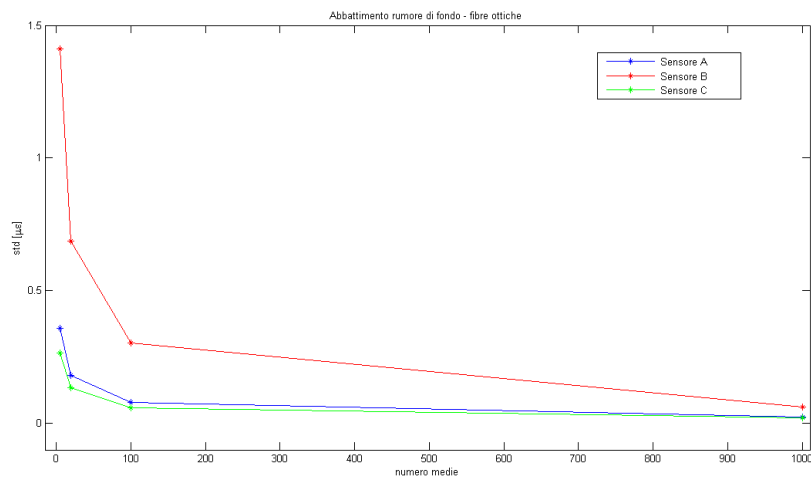


Figura 2.79: Abbattimento del rumore di fondo per le fibre ottiche

Tabella 2.26: Valore della deviazione standard al variare del numero di medie

	senza mediare [μV]	5 medie [μV]	20 medie [μV]	100 medie [μV]	1000 medie [μV]
Sensore A	1.07	0.3588	0.18	0.079	0.0238
Sensore B	3.24	1.411	0.6881	0.3015	0.0605
Sensore C	1.12	0.2656	0.1330	0.0595	0.0207

Ovviamente aumentando il numero di medie effettuate il rumore diminuisce: questi valori sono quindi utili per sapere quanto è necessario mediare il segnale al fine di abbassare il rumore di fondo al di sotto della soglia desiderata.

I sensori C si evidenziano ancora una volta come i migliori ottenendo valori di deviazione standard inferiori rispetto ai sensori concorrenti, così come è accaduto per le prove analizzate nel Capitolo(2.3). Nel caso del sensore B invece il valore di deviazione standard è sensibilmente superiore. Il sensore A invece offre risultati simili al sensore C, evidenziando come, nonostante le scarse capacità del sensore di compensare gli effetti termici, permetta di ottenere misure affette da un basso rumore di fondo, utile quindi nel caso di analisi dinamiche in cui la variazione di temperatura può essere tralasciata.

Risulta utile ora effettuare un confronto tra i valori di rumore di fondo ottenuti dai sensori a fibra ottica e quelli ottenuti dagli estensimetri elettrici: anche per questi ultimi è stata utilizzata una base temporale pari a 6 minuti, una frequenza di campionamento pari a 2048 Hz e per verificare la ripetibilità della misura sono stati acquisiti 4 record.

Di seguito in Figura(2.80) Figura(2.81) i valori ottenuti:

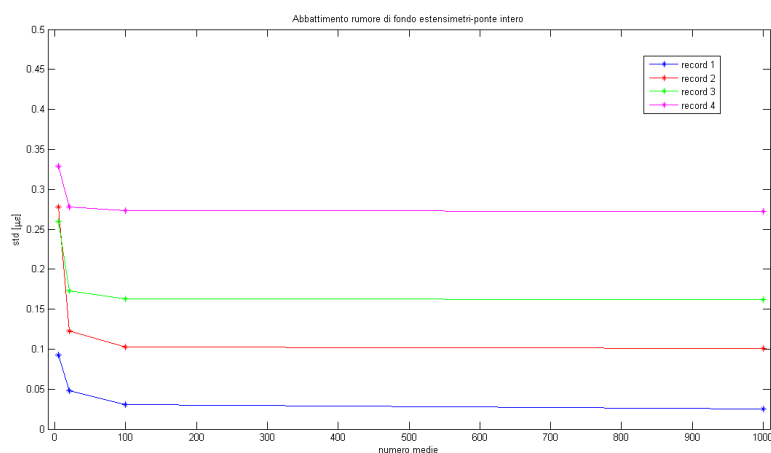


Figura 2.80: Abbattimento del rumore di fondo per il ponte estensimetrico intero

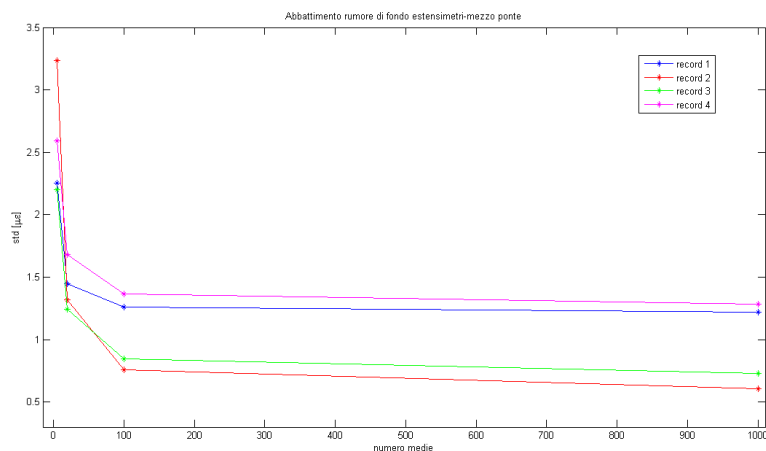


Figura 2.81: Abbattimento del rumore di fondo per il mezzo ponte estensimetrico

I valori di deviazione standard sono confrontabili a quelli ottenuti dai sensori a fibra ottica, con la differenza che le misure estensimetriche variano sensibilmente da prova a prova. Questo è dovuto alla sensibilità intrinseca degli estensimetri alle interferenze elettromagnetiche e quindi ad eventuali macchinari elettrici in funzione: le deviazioni standard delle fibre ottiche invece rimangono costanti durante le numerose prove effettuate essendo questi sensori immuni dai disturbi elettrici.

I valori di rumore dei sensori a fibra ottica risultano in ogni caso prossimi a quelli ottenuti dal ponte intero, garantendo la possibilità di effettuare misure di deformazioni

molto piccole, mentre il mezzo ponte evidenzia deviazioni standard nettamente superiori.

Tabella 2.27: Valore della deviazione standard al variare del numero di medie per il ponte ed il mezzo ponte estensimetrico

	senza mediere [$\mu\epsilon$]	5 medie [$\mu\epsilon$]	20 medie [$\mu\epsilon$]	100 medie [$\mu\epsilon$]	1000 medie [$\mu\epsilon$]
Ponte intero	0.53	0.24	0.15	0.14	0.14
Mezzo ponte	3.97	2.57	1.42	1.05	0.96

Avendo a disposizione un record sufficientemente lungo da poter effettuare anche solo 5 medie, il rumore di fondo viene abbattuto a livelli molto bassi: sia con gli estensimetri elettrici che con i sensori a fibra ottica A e C si è infatti ampiamente sotto l'1 $\mu\epsilon$ di deviazione standard, il che consente di misurare deformazioni molto ridotte.

2.9 Calcolo della PSD per le prove dinamiche

Avendo ora a disposizione la centralina di acquisizione con frequenza di campionamento pari a 1000 Hz, è possibile valutare la componente del rumore di fondo fino a 500 Hz mediante il calcolo della PSD (Power Spectral Density). Durante le prove termiche la bassa frequenza di campionamento aveva infatti limitato la valutazione della PSD solo fino ad 1 Hz.

In questo caso sono stati utilizzati i segnali provenienti dai compensatori non essendo sottoposti ad alcun carico e caratterizzati da una durata pari a circa 6 minuti: la PSD (Figura(2.82)) è stata ottenuta mediando sottofinestre temporali della durata di 10 secondi.

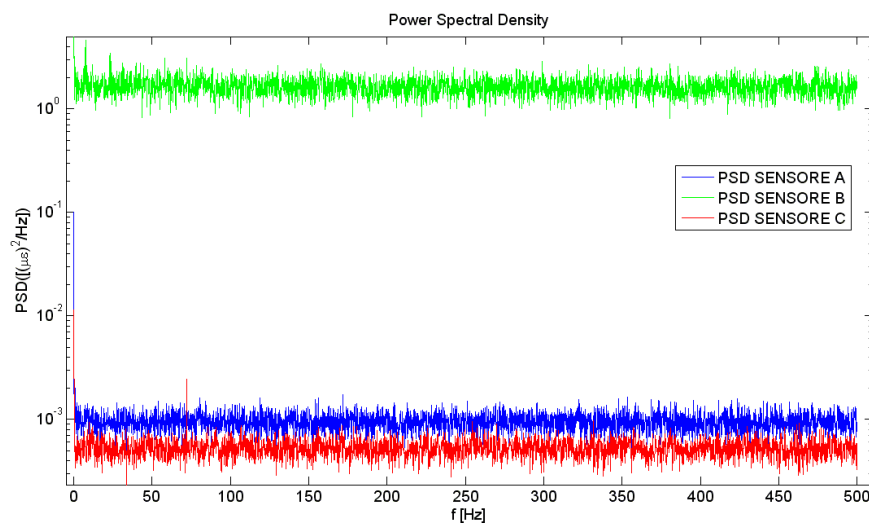


Figura 2.82: Calcolo della PSD fino a 500 Hz

Per prima cosa si nota come il sensore B presenti valori di rumore di fondo nettamente superiori rispetto al sensore A e C: come già detto precedentemente il compensatore denota infatti un malfunzionamento avvenuto in seguito all'incollaggio.

I sensori A e C presentano invece rumori di fondo paragonabili lungo tutto l'asse delle frequenze senza evidenziare particolari andamenti, nonostante il sensore C denoti costantemente valori inferiori. Il picco a bassa frequenza (circa tra 0 e 0.1 Hz), presente in tutti i sensori, è dovuto probabilmente ad una variazione ciclica della temperatura.

I risultati ottenuti ricalcano quindi quanto già evidenziato dal calcolo delle deviazioni standard, permettendo però di verificare un eventuale trend del rumore al variare della frequenza.

CAPITOLO 3

INTEGRAZIONE DEI SENSORI IN FIBRA OTTICA NEL MATERIALE COMPOSITO

Dopo aver effettuato un'accurata caratterizzazione metrologica di diverse tipologie di estensimetri a fibra ottica incollati sulla superficie di un provino in acciaio, abbiamo focalizzato la nostra ricerca sull'integrazione di tali sensori all'interno di provini in materiale composito; infatti le fibre ottiche, avendo un diametro paragonabile a quello dei filamenti di carbonio usati nei materiali compositi, sono perfettamente integrabili e il loro inserimento non influisce sulla resistenza meccanica del materiale che le ospita (così come spiegato già nel Capitolo(1.5.2)). Per questi motivi l'obiettivo che ci poniamo è la costruzione di un provino con al suo interno uno strumento che permette la misura dello stato di deformazione.

Sono stati utilizzati i sensori “nudi” (chiamati anche “capelli” per le loro esigue dimensioni) e non la versione “embeddable” poichè quest'ultima ha un case protettivo del diametro di circa 10 mm: è quindi adatta per essere inglobata in strutture civili (come ad esempio case o ponti), ma risulta inadeguata al nostro scopo, poichè comprometterebbe la resistenza e l'integrità strutturale dei nostri provini.

Non avendo trovato in bibliografia un metodo collaudato per la costruzione di tali provini e non avendo precedenti esperienze in tale ambito, la nostra attenzione è stata centrata sulla ricerca e sviluppo di un know-how tale che permetta una perfetta integrazione del sensore senza diminuire la resistenza del provino in materiale composito ed evitando di peggiorare la qualità di misura del sensore.

3.1 Definizione dei provini in fibra di carbonio

Nei capitoli precedenti è stato messo in rilievo come sia importante la compensazione termica nei sensori in fibra ottica per ottenere misure accurate e precise. Per questo motivo, i provini dovranno inglobare al loro interno due FBGS in modo tale da poter sottrarre il contributo della temperatura alle deformazioni misurate.

La definizione della geometria del provino di prova ha dovuto rispettare diversi parametri quali:

- deformazioni da misurare: come per gli FBGS incollati sulla superficie dei provini in acciaio, anche per quelli integrati nella struttura in materiale composito si

vogliono misurare deformazioni di modesta ($15 \mu\epsilon$) e media entità (50 e $200 \mu\epsilon$), che risultano essere le più difficili da rilevare per tutti i sensori;

- forze in gioco: le macchine di prova a nostra disposizione hanno in dotazione celle di carico da 100 kN. Per riuscire ad avere un segnale con un alto rapporto segnale/rumore si devono utilizzare forze in gioco in modo che $F_{min} \geq 2000[N]$;
- integrazione dei sensori a fibra ottica nel provino da testare: si vuole distorcere lo spettro riflesso il meno possibile in modo da non avere possibili problemi di peak detection (in riferimento al Capitolo(1.7)).

Si procede ora con la definizione della geometria e delle misure dei provini in cui inglobare i sensori a nostra disposizione.

3.1.1 Descrizione dei FBGS da integrazione

Gli estensimetri ottici che si utilizzeranno saranno fibre ottiche “nude”, cioè costituite solamente dal core e dal cladding: in questo modo il loro diametro sarà il minore possibile (circa $125 \mu m$) e la loro influenza sulla resistenza del provino in materiale composito sarà minima. D’altro canto le fibre ottiche così costituite sono molto fragili e andranno maneggiate con cautela.

Per renderci conto delle esigue dimensioni del diametro di queste fibre, riportiamo la Figura(3.1).



Figura 3.1: Fibra ottica “nuda”

Le marche di sensori precedentemente analizzate (sensori di tipo A, B e C) non presentavano in catalogo le fibre ottiche che servivano per la nostra ricerca; sebbene i sensori di tipo B fossero a tutti gli effetti dei sensori nudi, la lunghezza del tratto senza guaina protettiva era troppo limitata e quindi non si è potuto procedere con l’acquisto di tali sensori. Si è allora comprata una nuova tipologia di sensori (che chiameremo di tipo D e il cui data sheet è riportato in Tabella(3.1)).

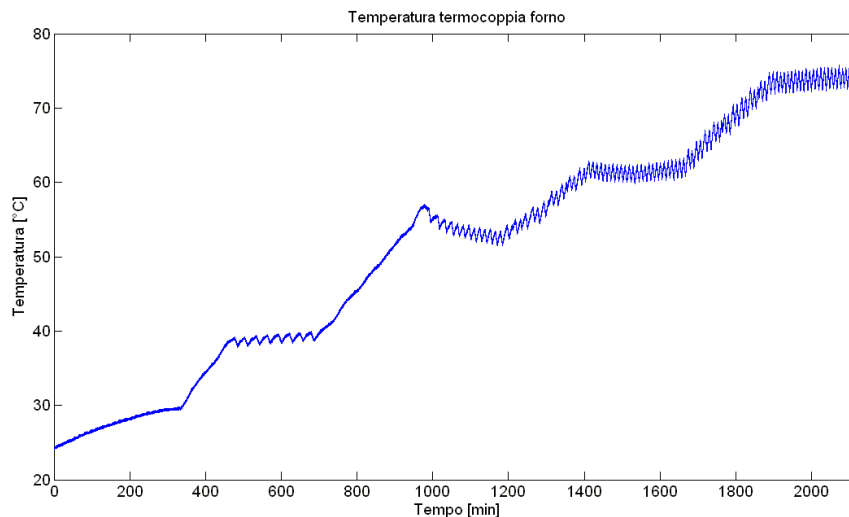
Il sensore, come suggerisce il data sheet (Tabella(3.1)), è di tipo ad alta riflessività come i precedenti sensori di tipo C, poiché la riflessività del picco è $\geq 70\%$.

Come abbiamo detto, tali sensori andranno integrati in provini in materiale composito: è quindi importante effettuare una caratterizzazione metrologica completa così come è stata fatta per i precedenti sensori. Si è deciso di effettuare solamente delle

Tabella 3.1: Data sheet sensore D

Sensore	
Lunghezza d'onda	1510 - 1590 [nm]
Lunghezza del sensore	5 [mm]
Riflessività del picco	≥ 70 %
Range di deformazione	± 9000 [$\mu\varepsilon$]
Sensibilità	1.2 [$pm/\mu\varepsilon$]
Risoluzione	0.4 [$\mu\varepsilon$]
Sensibilità alla temperatura	11 [$pm/^\circ C$]
Tipologia di fibra	Single mode $\phi = 125\mu m$
Range di temperatura	-270 fino a 85 [$^\circ C$]

prove in forno, la cui temperatura è stata fatta variare come mostra la Figura(3.2), poichè la compensazione termica risulta essere uno degli aspetti più critici in si vedono le differenze in termini di prestazione tra i sensori (come già precedentemente approfondito nel Capitolo(2.3)).

**Figura 3.2:** Andamento della temperatura registrato dalla termocoppia per la caratterizzazione dei sensori D

Come mostra la Figura(3.2) il forno è stato affetto da numerosi cicli di accensione e spegnimento così come era già avvenuto per le prove termiche descritte nel Capitolo(2.3). Sono stati impostati quattro step, ciascuno della durata di 4 ore, a temperatura costante: 40, 50, 65 e 75 $^\circ C$ mentre le rampe di aumento di temperatura hanno un andamento di 2 $^\circ C/h$.

Si riportano solo i grafici che riguardano l'errore di compensazione in funzione del tempo (Figura(3.3)) ed il valore della deviazione standard del segnale compensato e non, calcolata effettuando la media dei valori ottenuti in finestre temporali di lunghezza pari ad 1 minuto, che rappresenta il rumore di fondo del sensore in analisi (Tabella(3.2)).

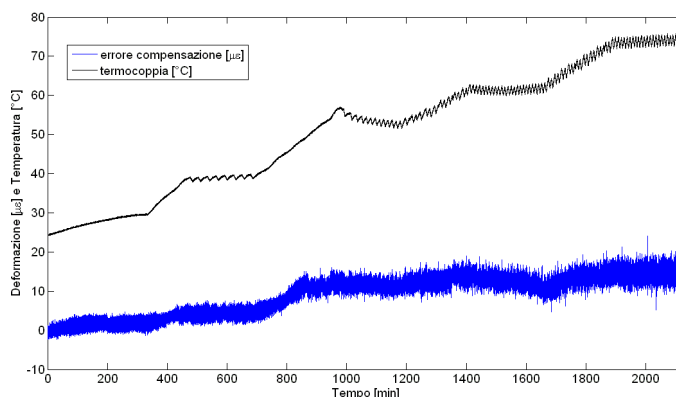


Figura 3.3: Errore di compensazione termica per il sensore D

Tabella 3.2: Valore della deviazione standard per i sensori D

	Valore della deviazione standard [$\mu m/m$]
Sensore D - compensato	0.91
Sensore D - non compensato	0.82

Analizzando la Figura(3.3) si nota come l'errore di compensazione abbia un leggero trend a salire (infatti cresce all'aumentare della temperatura), ma non supera mai i $17 \mu\epsilon$, mentre il valore della deviazione standard è molto contenuto. Facendo un confronto con le prove condotte in forno analizzate nel Capitolo(2.3), possiamo dire che le prestazioni fornite dal sensore D sono simili a quelle del sensore C (errore massimo di compensazione pari a $12 \mu\epsilon$), indice di un'ottima qualità del prodotto che andremo ad integrare nel materiale composito.

3.1.2 Scelta del materiale composito da utilizzare

Non avendo esperienze precedenti sull'integrazione di sensori in fibra ottica nei materiali compositi e non esistendo alcuna letteratura scientifica al riguardo, siamo interessati ad effettuare una caratterizzazione statica e dinamica completa dei sensori anche in questa configurazione, così come è stato fatto per gli estensimetri ottici da incollare sulla superficie dei provini.

Si è scelto di utilizzare la fibra di carbonio poichè si tratta del materiale composito più resistente utilizzato: unisce un elevato modulo elastico ($E=110000$ MPa) ad un basso peso. Inoltre uno dei nostri scopi è la realizzazione di una patch adesiva sensorizzata: incollando alcune pelli in fibra di carbonio su una struttura sottoposta ad un campo di deformazione, si vuole riuscire a misurare l'entità di queste ultime, sia su strutture in materiale composito (ad esempio barche, aeroplani o autoveicoli ad alte prestazioni) sia su strutture in materiale metallico. La fibra di carbonio permette di avere una notevole versatilità poichè può essere incollata ad entrambe le tipologie di strutture appena presentate. Volendo monitorare solamente il valore delle deformazioni imposte al provino dalla macchina di prova e volendo cercare di distorcere il meno possibile lo spettro riflesso dai FBGS (in modo da proteggere il più possibile il sensore stesso), si è scelto di utilizzare una fibra di carbonio unidirezionale. Come si è potuto apprendere

dalla bibliografia (con particolare riferimento al Capitolo(1.7)), stendendo il sensore a fibra ottica in modo collineare tra due strati di fibra di carbonio, lo spettro del FBGS non dovrebbe subire distorsioni rilevanti tali da determinare errori di rilevazione del picco.

Per una più facile stesura delle fibre ottiche, si è deciso di ricercare una fibra di carbonio unidirezionale pre-impregnata. Le caratteristiche del materiale composito che si è utilizzato sono riportate nella Tabella(3.3).

Tabella 3.3: Data sheet della fibra di carbonio utilizzata per la costruzione dei provini

Caratteristiche generali	
Peso del materiale preimpregnato	600 [g/m^2]
Percentuale di resina	35 %
Tipo di resina	Epossidica
Spessore della singola lamina (o “pelle”)	0.605 [mm]
Modulo elastico (2 strati a 0°)	≥ 110000 [MPa]
Coefficiente di Poisson ν	0.25
Temperatura polimerizzazione	tra 80 e 120 [°C]
Larghezza del nastro	1250 [mm]
Durata del prodotto a 20°C	2 mesi
Durata del prodotto a -18°C	12 mesi
Ciclo di curing consigliato	
Riscaldamento	0.5 - 0.8 [°C/min]
Temperatura	115 - 125 [°C]
Durata	90 [min]
Pressione	minimo -0.8 [bar]
Raffreddamento	1 [°C/min]

La fibra di carbonio scelta permette di far polimerizzare la resina contenuta al suo interno ad 80°C (tale procedimento prende il nome di ciclo di “curing”): tale temperatura consente di non danneggiare la fibra ottica da inglobare. Inoltre, il materiale ha un elevato peso per essere un composito (600 g/m^2) che permette di creare singole lamine dello spessore di 0.6 mm che dovrebbe assicurare un’adeguata protezione del sensore.

Non potendo superare gli 80°C per non rovinare i FBGS a nostra disposizione, non è possibile usare il ciclo di curing consigliato. Abbassando il valore della temperatura inevitabilmente cresce il tempo che la resina impegna per polimerizzare completamente: in particolar modo, diminuendo la temperatura del ciclo di curing di 10°C, il tempo raddoppia. Quindi la durata del ciclo di curing ad 80°C sarà pari a 24 ore.

Il forno che verrà utilizzato per creare i provini è lo stesso che è servito alla caratterizzazione termica dei sensori nel Capitolo(2.3): siamo così in grado di poter monitorare l’andamento dello spettro riflesso dal sensore per tutta la durata del ciclo, ma non siamo in grado di fornire la pressione richiesta (che ha come valore minimo -0.8 bar). Si dovranno allora utilizzare delle piastre in acciaio serrate da bulloni per garantire una pressione uniforme su tutta la superficie del provino.

3.1.3 Scelta delle tipologie di prove da effettuare

Si è deciso di progettare due tipologie diverse di provini che permettono di deformare longitudinalmente il sensore a fibra ottica che andremo a testare.

I provini da progettare sono:

- un provino a *flessione*;
- un provino a *trazione*.

Si sono scelte queste due configurazioni poichè la maggior parte delle strutture è sottoposta a questo tipo di sollecitazioni ed i nostri sensori devono quindi essere in grado di misurare correttamente le deformazioni in gioco.

Cercheremo ora di ottimizzare la geometria e la disposizione delle pelli di carbonio in modo da ottenere le deformazioni volute con le forze messe in gioco dalla macchina di prove dei nostri laboratori.

Sulla superficie di ciascun provino verranno incollati degli estensimetri elettrici in modo da poter effettuare un paragone con le deformazioni misurate dagli estensimetri in fibra ottica integrati nel provino stesso: il metodo di indagine sarà quello già ampiamente descritto nel Capitolo(2.6.1).

3.1.4 Provino per prove a flessione

Per la creazione di un provino a flessione che resistesse alle forze imposte dalla cella di carico a disposizione e che mantenesse valida l'ipotesi di trave snella (la lunghezza del provino deve essere almeno 4 volte la misura del lato più lungo della sezione) si è deciso di creare un provino di tipo *sandwich*.

Un classico esempio di *sandwich* è quello ottenuto incollando o saldando due strati sottili di materiale di elevata resistenza su un'anima centrale (Figura(3.4)).

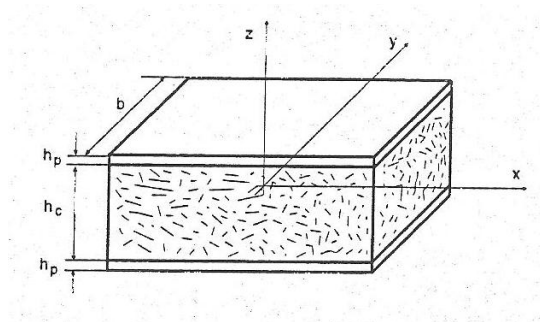


Figura 3.4: Esempio di struttura sandwich

in cui:

- h_c è l'altezza dell'anima, detta anche "core";
- h_p è l'altezza delle ali, cioè del materiale di rinforzo;
- b è la larghezza del provino.

La scelta del provino *sandwich* è stata fatta per aumentare la rigidità a flessione, permettendo così aumentare le forze in gioco e di avere un segnale pulito proveniente dalla cella di carico pur mantenendo le deformazioni $\varepsilon \leq 200 \mu\varepsilon$.

Generalmente i provini *sandwich* hanno il core costituito da materiale espanso di bassa resistenza (resistenza a compressione $\sigma_{compressione} = 0.8 \text{ MPa}$), il cui unico compito è quello aumentare la distanza delle ali dall'asse neutro aumentando così il modulo di inerzia a flessione. Nel nostro studio si è interessati ad una caratterizzazione metrologica dei sensori in fibra ottica integrati nel materiale composito, non è quindi di particolare importanza il materiale che costituisce il core del sandwich.

Infatti, come si è già precedentemente sottolineato, il nostro obiettivo è quello di creare una patch adesiva sensorizzata che possa essere incollata su qualsiasi tipo di struttura, sia essa in materiale metallico o polimerico, non per questioni strutturali, ma per permettere la lettura delle deformazioni a cui è sottoposta.

Per questo motivo e per aumentare ulteriormente le forze in gioco si è deciso di utilizzare un'anima di acciaio e non di materiale espanso. Si procederà alla creazione delle ali di rinforzo attraverso il processo di curing (vedi Capitolo(3.3)) e solo in un secondo momento verranno incollate con colla strutturale all'anima di acciaio: si è scelto questo metodo per limitare una possibile distorsione dello spettro dei FBGS integrati nel materiale composito (come già descritto negli esempi del Capitolo(1.7)).

In una delle estremità del provino verrà realizzato un vincolo di tipo incastro, mentre nell'altra estremità verrà applicata la forzante. Le prove saranno come quella visualizzata in Figura(3.5).

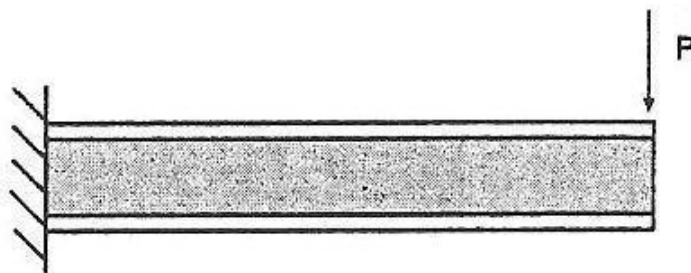


Figura 3.5: Provino sottoposto a flessione

Quindi oltre alla scelta delle dimensioni del provino, dovremo decidere a quale distanza d dalla forzante posizionare il sensore, poichè il momento flettente non risulta

costante, ma pari a $M = F \cdot d$.

A questo punto si è reso necessario utilizzare una codice agli elementi finiti come *Abaqus*[®] per ottimizzare tutti i parametri in gioco. Per modellare il nostro provino sono stati utilizzati elementi shell a quattro nodi con integrazione ridotta (S4R), in modo da alleggerire il calcolo computazionale.

Le dimensioni ricavate sono le seguenti:

- $l = 300mm$, lunghezza libera del provino;
- $l_{tot} = 400mm$ lunghezza totale del provino, di cui 100 mm verranno utilizzati per realizzarvi l'incastro;
- $b = 70mm$, larghezza del provino;
- $h_c = 20mm$, spessore del core;
- $n_{strati} = 4$, numero di strati di rinforzo per ciascuna delle ali;
- $h_c = 2.4mm$, spessore di ciascuna delle ali;
- $h_{tot} = 24.8mm$, spessore totale del provino.

Visualizziamo come risulterà la disposizione delle pelli di rinforzo del provino in Figura(3.6).

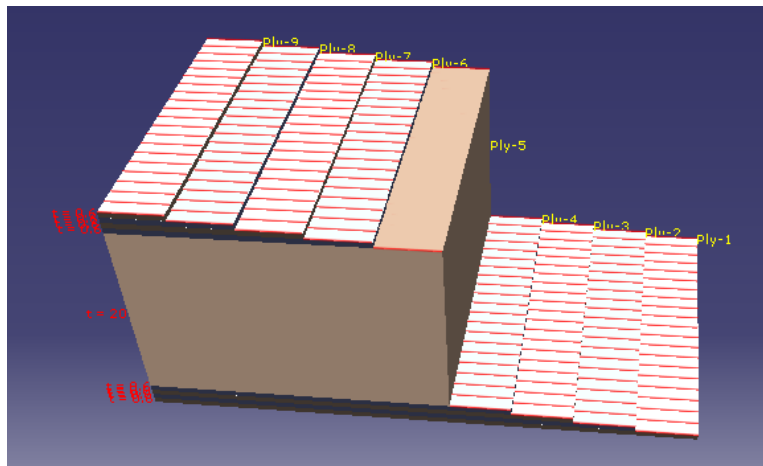


Figura 3.6: Disposizione delle pelli di rinforzo per il provino sottoposto a prove di flessione

Per proteggere il più possibile il sensore a fibra ottica, si è deciso di inglobare lo stesso tra gli strati (chiamati anche “ply”) centrali delle ali di rinforzo (quindi tra i ply-2 e ply-3 e tra i ply-7 e ply-8).

Per l'applicazione della forzante, si è deciso di usare una flangia di dimensioni 30×70 mm in modo da non rovinare superficialmente il materiale composito; il provino sarà vincolato e forzato come in Figura(3.7).

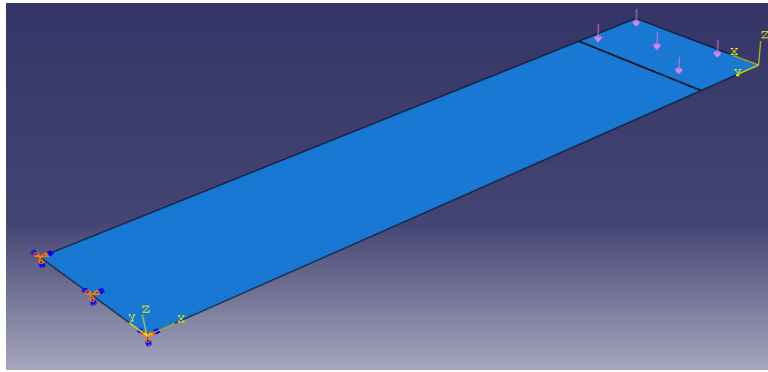


Figura 3.7: Provino sottoposto a flessione

La cella di carico permette un basso valore di rumore per forze maggiori di 2000 N, mentre non si vuole superare il valore di 8000 N in modo che l'acciaio non raggiunga mai il campo di deformazione plastico.

Una volta scelto il range di forze da utilizzare, si è ricercata la posizione ottimale del sensore all'interno delle ali di rinforzo, che non può essere posizionato nelle vicinanze dell'incastro, poichè le deformazioni sono troppo elevate, ma nemmeno nelle vicinanze della forzante, per evitare indesiderati effetti di bordo. Si è scelto allora di posizionare il sensore ad una distanza $d = 100 \text{ mm}$ dall'applicazione della forzante.

Sulla superficie dei provini verrà applicato un ponte estensimetrico intero per acquisire le deformazioni realmente in gioco: si è scelta la configurazione di Figura(3.9) in cui riveste un ruolo importante la distanza x degli estensimetri dall'applicazione della forzante, poichè dovrà essere pari a quella dei sensori a fibra ottica integrati nelle ali di rinforzo.

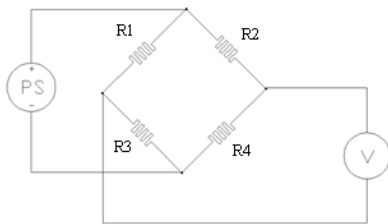


Figura 3.8: Schema dei collegamenti elettrici del ponte intero estensimetrico

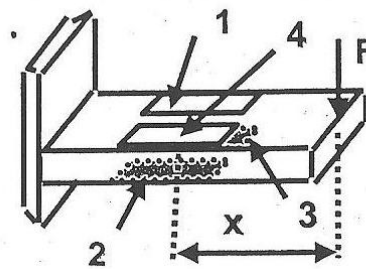


Figura 3.9: Schema di prova a flessione e relativa disposizione degli estensimetri

Si dovrà tenere conto del fatto che gli estensimetri saranno sottoposti ad una deformazione maggiore rispetto ai sensori in fibra ottica, poichè il valore delle deformazioni cresce linearmente all'aumentare della distanza dall'asse neutro. I valori di deformazione degli estensimetri elettrici andranno quindi divisi per un fattore correttivo, pari nel nostro caso a 1.1039, ottenuto dal rapporto delle distanze dall'asse neutro

di estensimetri e fibre.

Per verificare se la metodologia utilizzata permette di ottenere risultati ripetibili, si è deciso di costruire due provini identici tra di loro per i test a flessione: il confronto tra i risultati che otterremo ci permetterà di comprendere se i sensori a fibra ottica forniscono misure congruenti tra di loro.

3.1.5 Provino per prove a trazione

Si è scelto di mantenere una geometria semplice, a parallelepipedo, in modo da permettere una più semplice integrazione del sensore a fibra ottica all'interno del provino. La larghezza è stata scelta pari a 43 mm poiché questa è dimensione massima di afferraggio della macchina di prova. Lo spessore sarà invece ricavato dopo aver scelto il numero di strati di fibra di carbonio da utilizzare.

Si è ricercato un metodo per integrare due sensori all'interno del provino per garantire sia un'accurata misura delle deformazioni imposte, sia un'appropriata compensazione termica. Si è deciso allora di utilizzare un FBGS disposto longitudinalmente rispetto alla direzione della forza (che permetterà la lettura delle deformazioni in gioco) e di integrarne uno in direzione trasversale che verrà utilizzato per compensare gli eventuali effetti della temperatura. Tale metodo di compensazione è tipico degli estensimetri elettrici, ma non trova riferimenti bibliografici per quanto riguarda i sensori a fibra ottica: infatti generalmente si tende ad integrare un sensore nella direzione delle deformazioni più elevate (in questo caso quella longitudinale) mentre il sensore ottico usato come compensatore viene posto in una zona con la medesima temperatura, ma senza carichi applicati (Capitolo(1.3.3)).

Si dovrà scegliere una disposizione delle pelli di carbonio che permetta una buona resistenza agli sforzi longitudinali e che limiti il più possibile le deformazioni trasversali in modo tale che il FBGS posto trasversalmente legga solamente il valore della temperatura e non una deformazione.

Si è scelto allora di costruire un provino con il seguente schema di stratificazione delle pelli di rinforzo:

- 1 strato con fibre disposte longitudinalmente;
- 2 strati con fibre disposte trasversalmente;
- 4 strati con fibre disposte longitudinalmente;
- 2 strati con fibre disposte trasversalmente;
- 1 strato con fibre disposte longitudinalmente;

Lo spessore totale del provino sarà allora pari a $s_1 = 10 \cdot 0.6 = 6$ mm.

L'orientamento delle pelli di rinforzo è visualizzabile in Figura(3.10).

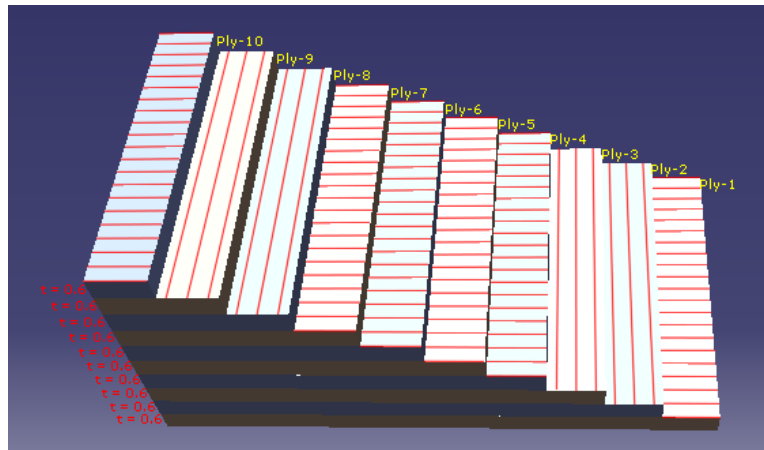


Figura 3.10: Stratifica del provino con 4 pelli di rinforzo trasversale

Senza le pelli di rinforzo trasversali, il sensore a fibra ottica usato come compensatore avrebbe avuto uno spettro distorto come mostra la Figura(1.25) del Capitolo(1.7): dato che nel nostro studio siamo interessati a distorcere il meno possibile la forma dello spettro per non avere desiderati doppi picchi, gli strati disposti a 90° risultano di notevole importanza per un'accurata misura delle deformazioni in gioco.

Si è scelto questo tipo di stratificazione in modo da garantire una buona resistenza alla trazione (garantita dagli strati disposti longitudinalmente al centro del provino) e in modo da avere limitate deformazioni trasversali (che sono contrastate dagli strati disposti a 90°). Infatti la fibra di carbonio da noi utilizzata presenta un coefficiente di Poisson $\nu=0.25$ e per cercare di diminuire tale valore si è calcolato il numero ottimale di pelli da disporre in direzione trasversale. Dopo aver implementato il modello del nostro provino nel programma per l'analisi agli elementi finiti *Abaqus*[®], si è ricavato un modulo di Poisson finale di 0.025: dalle successive misure sperimentali (descritte in modo dettagliato nel Capitolo(4)), si è ricavato un coefficiente $\nu=0.03$, validando così le nostre analisi preliminari.

La fibra ottica longitudinale verrà allora inglobata tra le pelli di rinforzo longitudinale più vicine all'asse neutro del provino (tra le ply-6 e ply-7 di Figura(3.10)), mentre il sensore ottico trasversale verrà posizionato tra le ply-9 ed il ply-10.

Per conoscere con precisione le deformazioni realmente in gioco, si è deciso di incollare sulla superficie del provino un ponte intero estensimetrico come quello già descritto precedentemente nella Figura(2.48(d)) del Capitolo(2.5.1). Gli strati longitudinali più esterni permetteranno agli estensimetri di leggere le deformazioni longitudinali in modo accurato senza così subire influenze dagli strati a 90° disposti inferiormente.

3.1.6 Costruzione del telaio per le prove flessionali

Per il provino sottoposto a flessione è stata utilizzata una macchina di prova con caratteristiche simili a quella utilizzata durante i test dinamici sui provini in acciaio, descritti nel precedente Capitolo(2.5): essendo queste macchine pensate per sollecitazioni a trazione e compressione, si è reso necessario progettare un telaio che permettesse di effettuare anche prove a flessione.

Volendo indagare frequenze fino a 30 Hz (limite oltre il quale la macchina di prova non riusciva a spingersi), è stato necessario progettare il telaio di supporto in maniera sufficientemente rigida da garantire frequenze proprie che non influenzino la misura.

A questo scopo è stata utilizzata una trave con momento d'inerzia a flessione elevato come quella visualizzabile in Figura(3.11).

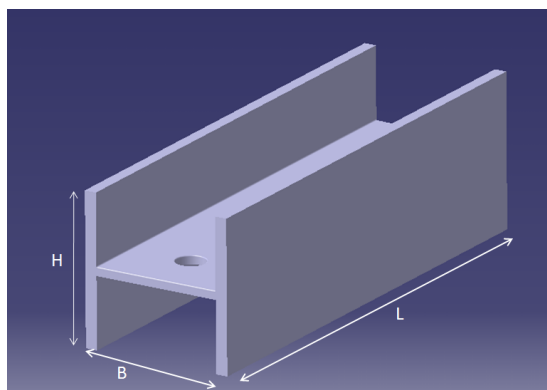


Figura 3.11: Barra utilizzata come telaio per le prove flessionali

Le dimensioni della trave sono:

- $l = 400$ mm, lunghezza;
- $b = 140$ mm, larghezza;
- $h = 140$ mm, altezza;
- $s = 11$ mm, spessore.

Nella parte superiore è stata saldata una piastra di spessore 20mm, come supporto del provino: sono state inoltre effettuate delle lavorazioni sulla trave per evitare possibili interferenze tra il provino ed il telaio stesso durante la prova.

Il layout definitivo del telaio è presentato in Figura(3.12).

La parte inferiore del telaio è ancorata alla macchina di prova mediante una barra filettata M 27, serrata con un dado, mentre la forza è trasmessa al provino tramite un punzone rigido. La freccia in Figura(3.12) mostra la posizione e la direzione della forza applicata sul provino (evidenziato in giallo).

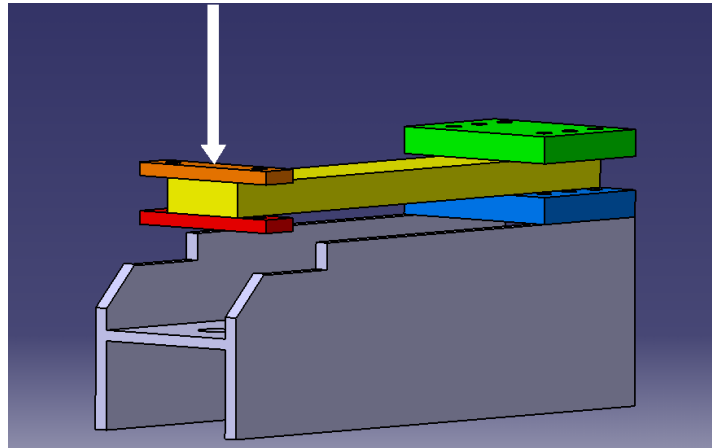


Figura 3.12: Assemblato totale per le prove flessionali

La zona dell'incastro del provino è stata costruita mediante due piastre di spessore 20 mm che lo serrano tramite 6 bulloni: nella zona di applicazione della forza invece si notano le due piastrine atte a proteggere la superficie di carbonio dalle elevate pressioni di contatto dovute al punzone.

Pur essendo una prova a flessione, la macchina che si utilizza è normalmente utilizzata per le prove a trazione, quindi l'asse della forzante risulta essere coincidente con quello dell'incastro: questo permette di avere il vantaggio di non trasmettere momento flettente all'aggancio inferiore e di conseguenza al pistone idraulico.

In Figura(3.13) ed in Figura(3.14) si mostrano il telaio ed il provino montati sulla macchina di prova.

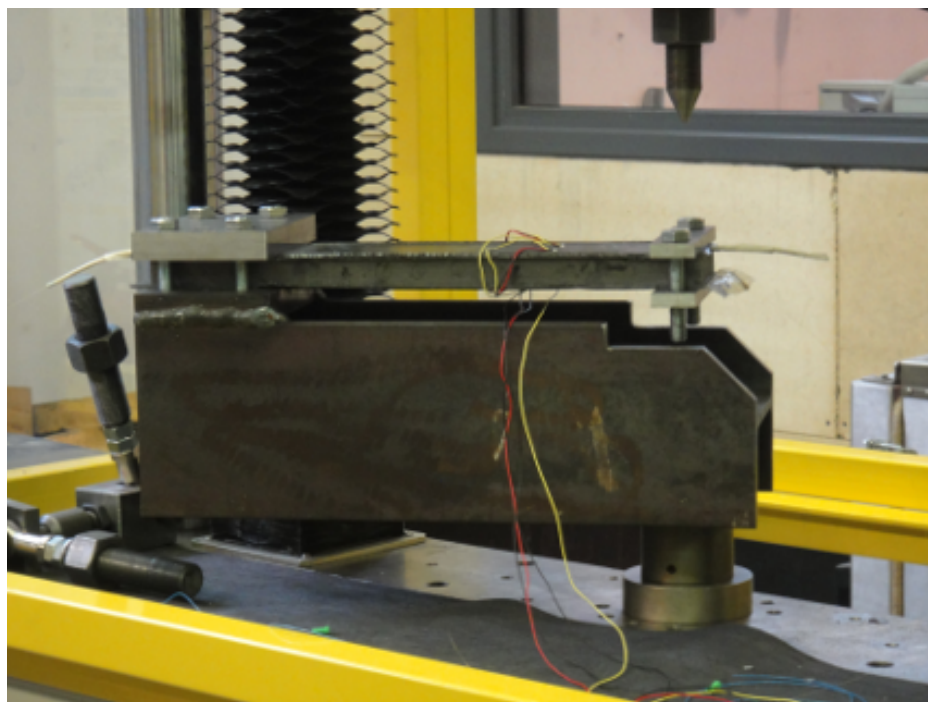


Figura 3.13: Telaio e provino a flessione nella configurazione finale

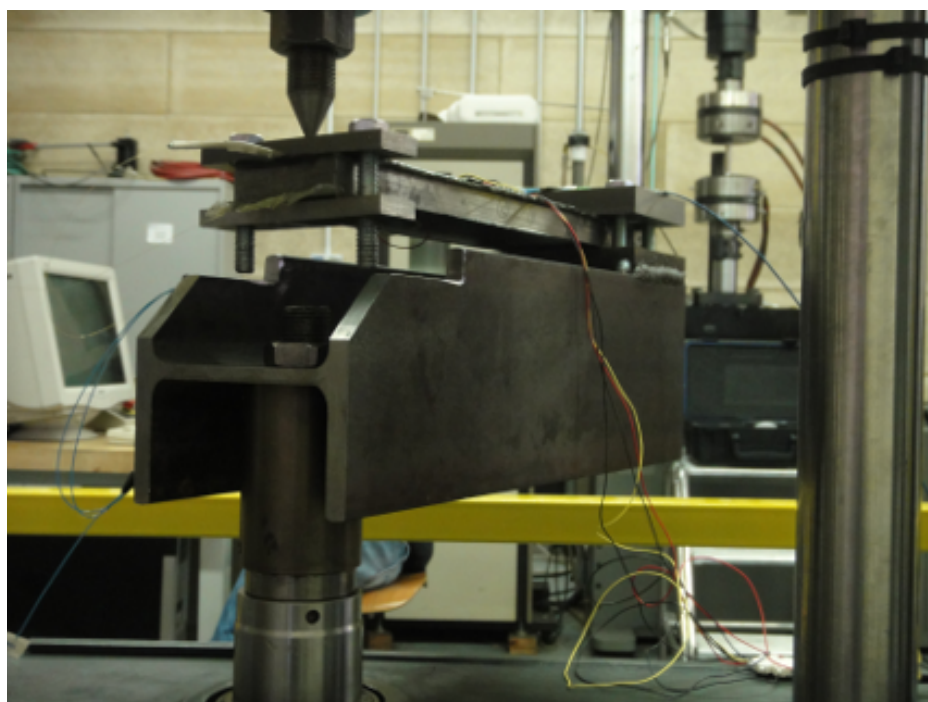


Figura 3.14: Particolare delle prove a flessione in cui si evidenzia l'aggancio del telaio alla macchina di prova

3.2 Integrazione dei sensori in fibra ottica nel materiale composito

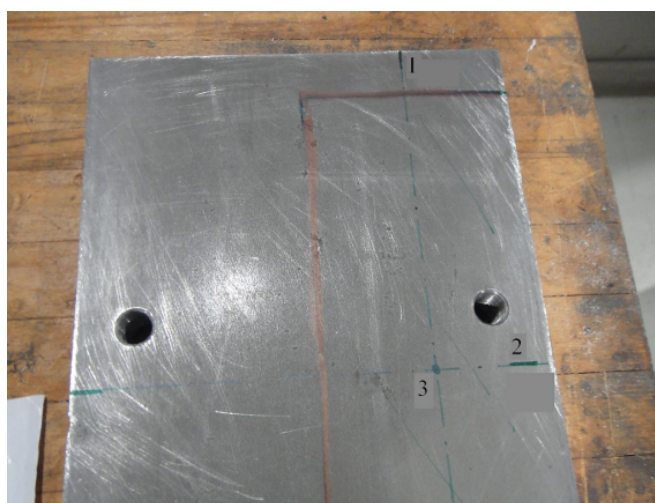
In bibliografia non è stato trovato alcun metodo collaudato per inglobare i FBGS all'interno di strutture in materiale composito, anche perchè si tratta di uno degli aspetti più delicati dell'utilizzo di questa tecnologia: a conferma di ciò, durante un incontro con i rappresentanti di uno dei più importanti costruttori di estensimetri al mondo, nonostante le nostre numerose ed insistenti domande al riguardo, ci è stato risposto che tutte le aziende stanno investendo molte risorse per sviluppare un metodo di facile utilizzo poichè di fatto si tratta di una problematica non ancora risolta in tutti i suoi punti di vista.

La nostra attenzione è stata quindi rivolta alla ricerca di un sistema per annegare i sensori in fibra in modo preciso e senza danneggiare il sensore stesso: la fibra ottica può infatti leggere deformazioni fino a $\pm 9000 \mu\epsilon$, ma non può sopportare sforzi di flessione elevati.

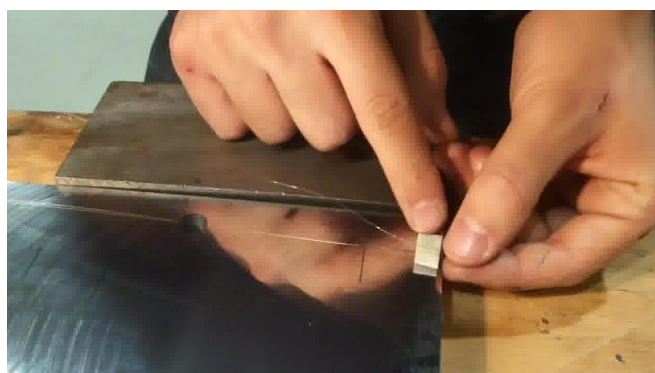
Il metodo che si descrive non è sicuramente adatto ad una produzione di tipo industriale, ma ha permesso una perfetta integrazione dei sensori a fibra ottica all'interno dei provini precedentemente progettati. Il nostro metodo non deve essere per forza di tipo industriale, poichè il nostro obiettivo è la ricerca di un know-how per far funzionare i FBGS all'interno del materiale composito, e la costruzione di una macchina che faccia tale operazione.

Si fa ora riferimento alla posa di un FBGS per la creazione del provino a flessione: si tratta del caso più complesso che si è affrontato poichè il sensore deve essere posizionato alla distanza di 100 mm dal punto di applicazione della forzante. Se così non fosse il sensore sarebbe sottoposto a deformazioni differenti rispetto a quelle misurate dagli estensimetri elettrici.

Il primo passaggio è stato quello di utilizzare un piano di appoggio (nel nostro caso una lastra d'acciaio) sufficientemente grande da contenere il provino da utilizzare e di tracciare dei riferimenti per posizionare in modo corretto lo strato di fibra di carbonio e il sensore in fibra ottica da integrare. Nella Figura(3.15(a)) si identifica in colore rosso la posizione che dovrà assumere lo strato di fibra di carbonio in cui integrare il sensore, con il numero 1 l'asse longitudinale del provino (che coinciderà con l'asse della fibra ottica da integrare) e con il numero 2 l'asse che identifica la posizione del sensore (posto a 100 mm dall'applicazione della forzante): il FBGS verrà quindi posizionato nel punto numero 3. A questo punto si è reso necessario l'utilizzo di filo di nylon con diametro pari a 0.3 mm per poter posizionare in modo corretto il sensore. Dopo aver teso il filo di nylon lungo l'asse numero 1 e dopo aver posizionato il sensore nel punto 3, si è reso solidale il sensore al filo attraverso un giunto adesivo. Il sensore non è stato teso, ma è stato lasciato leggermente allentato in modo che, in presenza di un tiro troppo elevato applicato al filo di nylon, si potesse staccare dal giunto in maniera automatica (in Figura(3.15(b)) si nota come il filo di nylon sia teso, mentre la fibra ottica rimanga più allentata).



(a) dei riferimenti



(b) Posizionamento del filo di nylon



(c) Integrazione del sensore nella resina del primo strato di materiale



(d) Risultato finale

Figura 3.15: Fasi dell'integrazione di un sensore in fibra ottica tra due strati di fibra di carbonio

A questo punto si è pronti per integrare con precisione il sensore all'interno del materiale composito. Per permettere una più facile adesione del sensore alla resina della fibra di carbonio, questa è stata tirata fuori dal freezer una decina di minuti prima del suo utilizzo: anche solo con la temperatura ambiente, la resina contenuta si scalda e aumenta il suo potere adesivo. Si procede allora in quest'ordine: si posiziona lo strato di fibra di carbonio in modo corretto, si tira il filo di nylon (che farà tendere in modo corretto anche la fibra ottica) e con una leggera pressione del dito si fa aderire il sensore al materiale composito (Figura(3.15(c))). Per consentire una migliore adesione, si aspetta qualche altro minuto in modo che la fibra ottica possa aderire perfettamente alla resina lungo tutta la sua lunghezza. Ora si può togliere il filo di nylon e porre uno strato di fibra di carbonio sopra il sensore (Figura(3.15(d))).

Con questi semplici passaggi si è potuto integrare il sensore in modo collineare alle fibre di rinforzo e ad una determinata distanza dall'estremo libero del provino.

3.3 Ciclo di curing

Il data sheet fornito per la fibra di carbonio (Tabella(3.3)) consiglia di effettuare un ciclo di curing alla temperatura di 120 °C per circa 90 minuti con una pressione minima di 1 bar. Il sensore in fibra ottica acquistato permette però di raggiungere una temperatura massima di 85°C. Per non compromettere l'integrità del sensore, si è deciso di effettuare un ciclo di curing ad una temperatura di 80°C: diminuzioni di 10°C comportano raddoppi del tempo necessario, per questo motivo la durata finale del ciclo di curing è stata di 24 ore, come è possibile visualizzare in Figura(3.16)

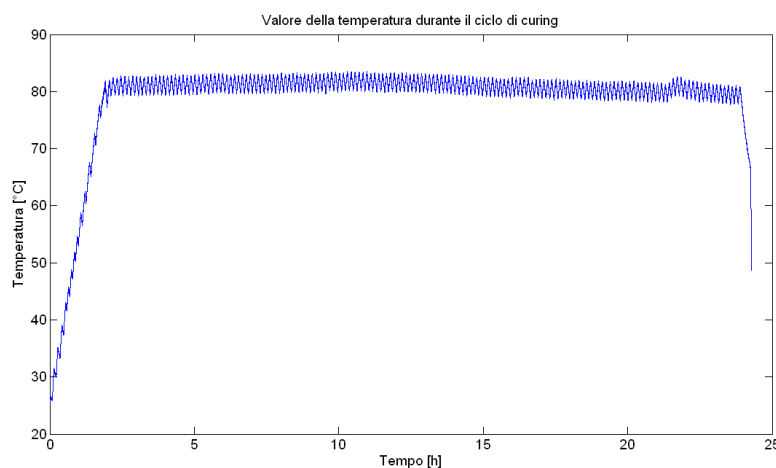


Figura 3.16: Temperatura registrata dalla termocoppia durante il ciclo di curing

Il data sheet inoltre indica l'utilizzo di una pressione minima di 1 bar. Non avendo a disposizione un'autoclave per fornire contemporaneamente la temperatura e la pressione desiderata, si è deciso di utilizzare due piastre di acciaio dello spessore di 20 mm ciascuna per applicare la pressione desiderata: si è potuto così considerare le piastre

come corpi rigidi.

Per garantire la costanza della pressione durante tutto il ciclo di curing sono state interposte delle molle ad alta rigidità tra la testa del bullone e la superficie della piastra di acciaio. Si è agito in tale modo perchè durante il procedimento, le pelli di fibra di carbonio si uniscono tra di loro e parte della resina contenuta al loro interno cola al di fuori (si ricorda che stiamo utilizzando un materiale pre-impregnato con una percentuale di resina pari al 35%): questo comporta una diminuzione dello spessore tra l'inizio e la fine del ciclo di curing. Senza l'utilizzo delle molle, il tiro esercitato da ciascun bullone diminuirebbe fino a scomparire e la pressione esercitata sul provino sarebbe garantita solo dal peso della piastra superiore.

Per garantire la perfetta riuscita del ciclo di curing si è deciso di adottare una pressione iniziale di 3 bar. Una volta nota la superficie del provino ed il numero di bulloni, si è calcolato il tiro che ciascun bullone deve garantire; il passo successivo è stato quello di calcolare il momento di serraggio necessario ad ogni bullone e di applicarlo attraverso una chiave dinamometrica. Di seguito si presenta la Tabella(3.4) in cui si mostrano i valori ricavati.

$$M_s^{tot} = M_s^1 + M_s^2 \quad (3.1)$$

M_s^{tot} = momento di serraggio totale;

M_s^1 = momento di serraggio per l'attrito tra dado e superficie della piastra a contatto;

M_s^2 = momento di serraggio per l'attrito tra i filetti della vite con la madrevite;

$$M_s^1 = V_0 \cdot f \cdot \frac{D_m}{2} \quad (3.2)$$

V_0 = tiro agente sul bullone;

f = coefficiente di attrito tra metalli a secco;

$D_m = 1.5 \cdot d_{vite}$ = diametro su cui si distribuiscono le forze tangenziali;

$$M_s^2 = \tan(\alpha + \varphi^*) \cdot \frac{d_{vite}}{2} \cdot V_0 \quad (3.3)$$

α = angolo di elica;

$\varphi^* = \arctan(f^*) = \arctan\left(\frac{f}{\cos\vartheta}\right)$ in cui ϑ è l'angolo di inclinazione del filetto;

Tabella 3.4: Dati necessari al calcolo del valore del momento di serraggio dei bulloni

	Numero di bulloni	Superficie provino [mm]	Tiro su ciascun bullone [N]	M_s^{tot} [N·m]
Provino a trazione	4	10750	800	4.9526
Provino a flessione	6	28000	1400	8.6671

La Figura(3.17) mostra come risulta un provino prima dell'inizio del ciclo di curing. Il fogli gialli che si intravedono sono stati posti tra il provino e le lastre di acciaio per impedire alla resina contenuta nella fibra di carbonio di colare sulla lastra, garantendo così un facile distacco.

**Figura 3.17:** Esempio di un provino prima del ciclo di curing

Dopo un primo ciclo di curing, si è reso necessario proteggere con delle guaine in gomma la fibra ottica nuda uscente dal provino, poichè la resina contenuta nel materiale composito, colando sulla fibra stessa, l'aveva resa estremamente fragile. Non appena si è tentato di estrarre il provino dalle piastre usate per il ciclo di curing, la fibra ottica nuda si è spezzata rimanendo incollata ai fogli distaccanti, come mostra la Figura(3.18).

**Figura 3.18:** Particolare di come la resina contenuta nel materiale composito abbia fatto aderire la fibra ottica ai fogli distaccanti

Con l'utilizzo delle guaine il problema viene risolto, poichè la resina contenuta nel materiale pre-impregnato cola sulla plastica protettiva ed è possibile estrarre il provino senza rompere le fibre ottiche. Il risultato ottenuto è visualizzabile in Figura(3.19).

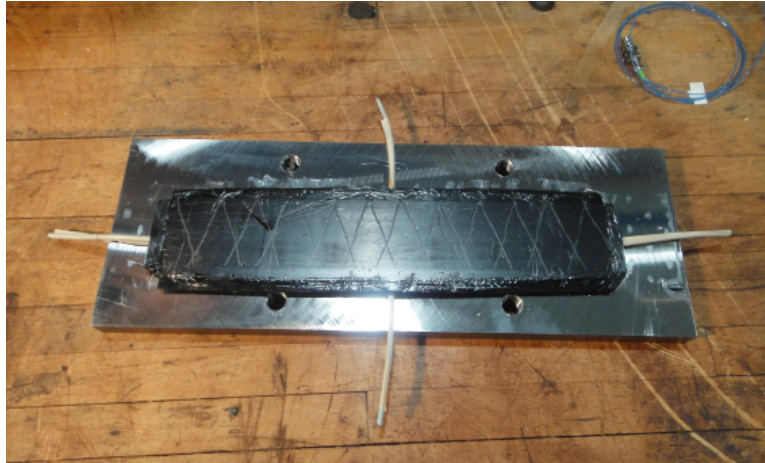


Figura 3.19: Provino per le prove di trazione nella sua configurazione finale

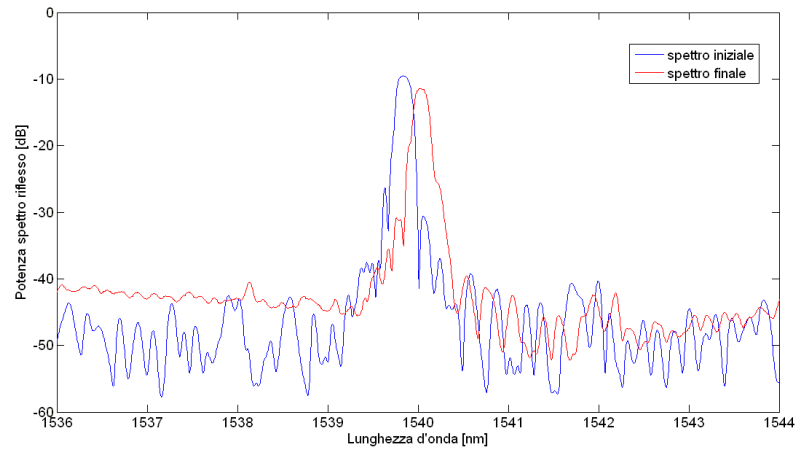
Va comunque ricordato che le fibre ottiche che escono dal provino hanno un diametro esiguo ($\phi = 125\mu m$) e la movimentazione deve essere fatta con molta cura. Infatti dopo il processo di curing, pur usando la massima cautela nello spostare da un luogo ad un altro i provini, alcune fibre ottiche sono state danneggiate. Se la fibra ottica si danneggia da entrambi i lati, essa necessita di una nuova intestazione, che ha lo svantaggio di essere molto costosa; se invece si rompe solamente da un lato, può essere ancora utilizzata poichè questo tipo di sensori presenta un connettore per ogni estremità e non necessita di un cavo di ritorno (lo spettro che non viene riflesso viene semplicemente perduto).

3.4 Monitoraggio degli spettri riflessi dei FBGS inglobati nel materiale composito

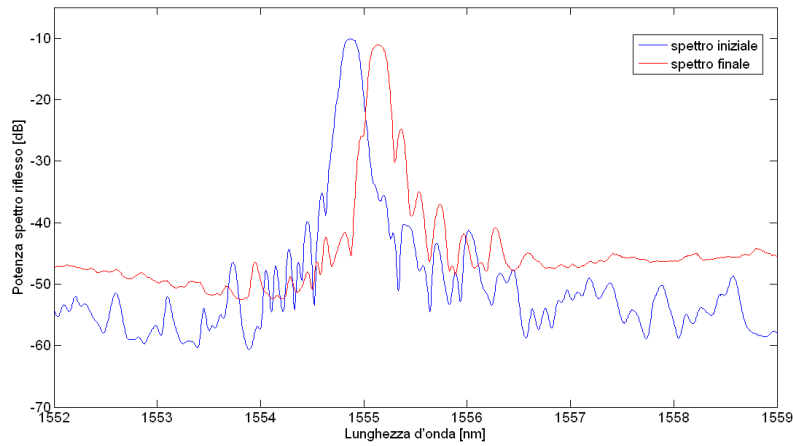
Un aspetto molto interessante è il monitoraggio dello spettro completo e del picco principale di ogni sensore durante il ciclo di curing: infatti, avendo usato come materiale composito la fibra di carbonio unidirezionale, non si dovrebbero avere nè distorsioni dello spettro nè tantomeno la creazione di indesiderati doppi picchi durante la costruzione dei provini (Capitolo(1.7)).

3.4.1 Analisi degli spettri dei FBGS integrati in materiale composito durante il processo di curing

La prima verifica che si deve effettuare è il confronto tra lo spettro riflesso dei FBGS prima dell'integrazione nel materiale composito con quello restituito dal sensore una volta terminato il ciclo di curing. I risultati sono visualizzabili in Figura(3.20) e Figura(3.21). Si sono realizzati due provini per le prove a flessione, ma si presentano solo i grafici realtivi ad uno di essi poichè i risultati sono i medesimi.



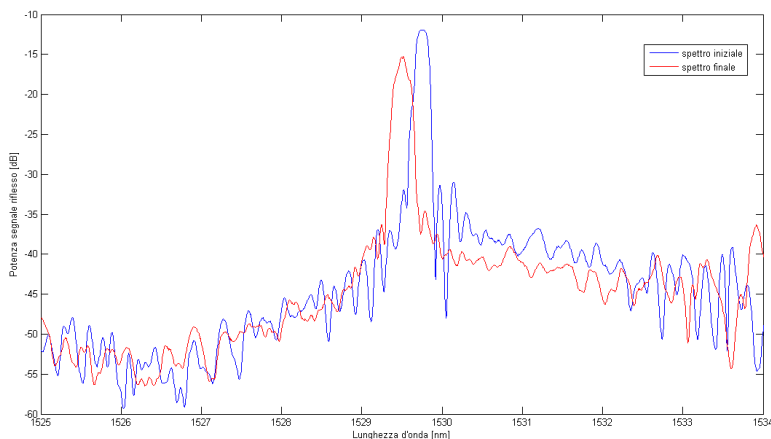
(a) Spettro del primo sensore



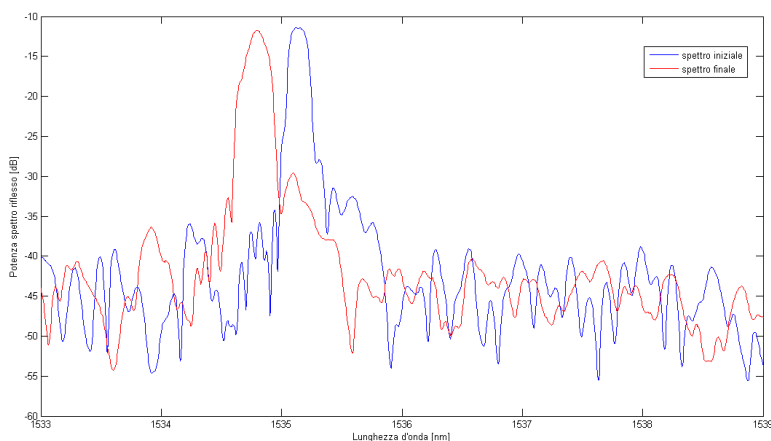
(b) Spettro del secondo sensore

Figura 3.20: Confronto tra gli spettri dei sensori dei provini per le prove a flessione

La Figura(3.20) mostra come le lunghezze d'onda degli spettri finali siano maggiori rispetto a quelle degli spettri iniziali. Questo fenomeno può essere spiegato nel seguente modo: il coefficiente di dilatazione termica della fibra ottica $\alpha_{fibra} = 9 \mu\epsilon/^\circ C$ risulta essere maggiore rispetto a quello longitudinale della fibra di carbonio $\alpha_{long-carbonio} = 0.02 \mu\epsilon/^\circ C$. Alla temperatura di regime del ciclo di curing la fibra ottica risulta dunque essersi allungata maggiormente rispetto alle fibre di rinforzo. Durante la fase di raffreddamento, la fibra ottica tende ad accorciarsi nuovamente per tornare alla propria lunghezza iniziale, ma la resina contenuta nel materiale composito blocca l'ultima parte della sua contrazione, poichè solidifica prima di tornare alla temperatura ambiente ($T_{amb} = 20^\circ C$) impedendo così alla fibra ottica di tornare ad avere la propria lunghezza iniziale. La fibra ottica risulterà così leggermente trazionata causando un aumento della lunghezza d'onda finale.



(a) Spettro del primo sensore



(b) Spettro del secondo sensore

Figura 3.21: Confronto tra gli spettri dei sensori del provino per le prove a trazione

Al contrario, la Figura(3.21) mostra come gli spettri finali del provino a trazione abbiamo una lunghezza d'onda finale inferiore rispetto a quella ottenuta prima del processo di curing. In questo caso è necessario tenere conto delle diverse caratteristiche della fibra di carbonio nelle due direzioni principali (quella longitudinale e quella trasversale) per spiegare questo fenomeno.

In direzione longitudinale la fibra di carbonio presenta un modulo elastico $E_{long} = 110000$ MPa ed un coefficiente di dilatazione termica $\alpha_{long} = 0.02\mu\epsilon/^\circ C$, mentre in direzione trasversale avremo $E_{trasv} = 8000$ MPa e $\alpha_{trasv} = 22\mu\epsilon/^\circ C$.

Prendiamo come esempio il sensore posto tra gli strati di rinforzo a 0° : esso, come visto prima, a fine riscaldamento tenderà ad avere una lunghezza maggiore delle fibre di rinforzo, mentre a temperatura ambiente dovrebbe risultare leggermente trazionato. Le fibre di carbonio disposte a 90° , dato che $\alpha_{trasv-carb} > \alpha_{vetro} \gg \alpha_{long-carb}$, causano però durante il raffreddamento una contrazione ancora maggiore. Quindi, sebbene tra i moduli elastici vi sia un ordine di grandezza di differenza, tra le dilatazioni termiche

ve ne sono ben tre e questo aspetto tende a comprimere il FBGS integrato longitudinalmente: ciò potrebbe spiegare perchè la lunghezza d'onda finale del picco principale risulti essere minore di quella iniziale.

Lo stesso effetto si ha sul sensore integrato trasversalmente, la cui lunghezza d'onda risulta essere inferiore rispetto a quella iniziale a causa della contrazione termica trasversale degli strati di carbonio disposti a 0° .

Nel provino a trazione che si è progettato, si hanno 6 strati longitudinali e 4 trasversali: risulta evidente come il sensore posto trasversalmente debba risentire di un $\Delta\lambda$ maggiore rispetto a quello del sensore annegato longitudinalmente. Analizzando i grafici di Figura(3.21) questa considerazione trova riscontro poichè $\Delta\lambda_{trasv} = 0.36$ nm, mentre $\Delta\lambda_{long} = 0.25$ nm.

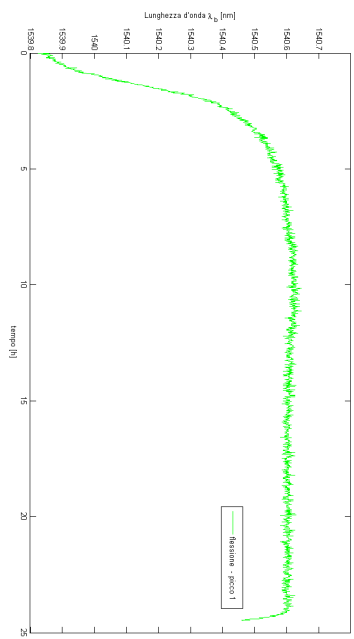
Per tutti quanti i sensori si nota una leggera diminuzione della potenza dello spettro riflesso (quantificabile in pochi dB) e come la forma dello spettro rimanga sostanzialmente invariata.

Il passo successivo è verificare l'andamento dei picchi principali durante il ciclo di curing, visualizzabili in Figura(3.22(a) e Figura(3.22(b))) (relativo ad uno dei due provini a flessione, poichè l'altro si comporta in modo analogo) ed in Figura(3.22(c) e Figura(3.22(d))) (relativo al provino a trazione).

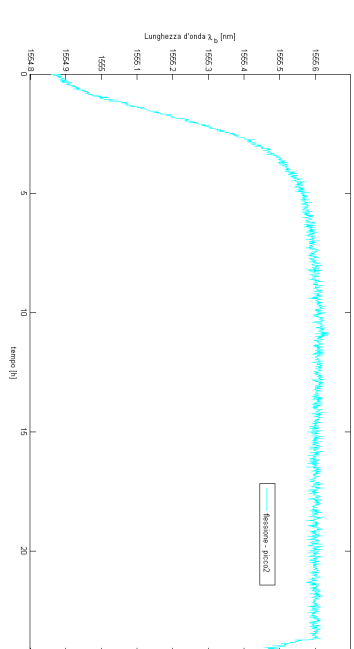
In questo caso non è stato possibile utilizzare l'algoritmo di peak detection implementato dalla centralina stessa in quanto si è deciso di salvare gli spettri completi dei sensori.

Si è dunque implementato un algoritmo che definisse la posizione del picco a partire dallo spettro completo: interpolando localmente con una curva del quarto ordine nell'intorno del picco è possibile determinarne la rispettiva lunghezza d'onda attenuando eventuali disturbi di rumore di fondo.

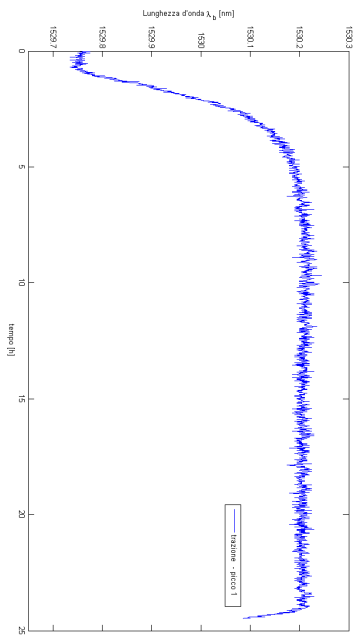
I grafici contenuti in Figura(3.22) mostrano andamenti identici tra di loro, ma ancora più interessante risulta essere il confronto con il diagramma della termocoppia riportato in Figura(3.16). Tutti i profili risultano essere infatti molto simili: la temperatura aumenta linearmente per le prime 2 ore con un andamento di $2^\circ\text{C}/\text{min}$, mentre le lunghezze d'onda dei sensori aumentano con andamento anch'esso lineare, ma per le prime 5 ore. Tale differenza può essere facilmente spiegata: i sensori sono annegati all'interno del provino ed è inevitabile che vi sia un'inerzia termica.



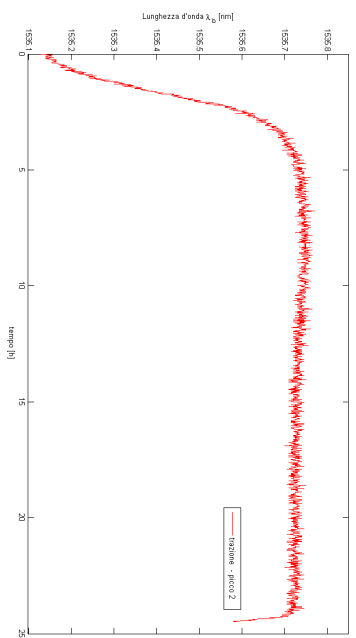
(a) Variazione di lunghezza d'onda del picco del primo sensore



(b) Variazione di lunghezza d'onda del picco del secondo sensore



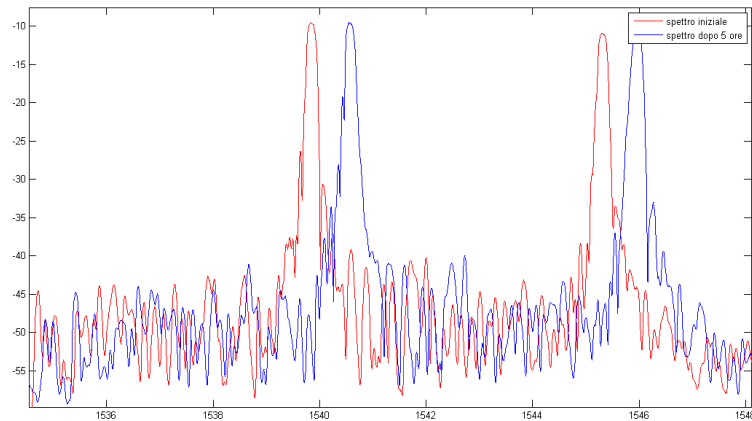
(c) Variazione di lunghezza d'onda del picco del primo sensore (posto longitudinalmente)



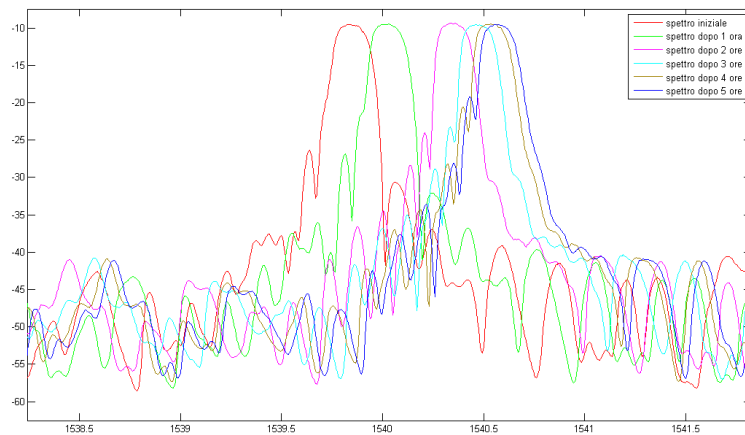
(d) Variazione di lunghezza d'onda del picco del secondo sensore (collocato trasversalmente)

Figura 3.22: Andamento dei picchi del provino a flessione e di quello a trazione durante il ciclo di curing

Una volta verificato l'andamento del picco durante tutto il processo di curing, si vuole verificare se lo spettro riflesso dai sensori presenti dei picchi secondari durante il processo di curing. Si è deciso quindi di verificare tale aspetto nelle prime ore del processo di curing, cioè durante la fase di riscaldamento, come mostrano la Figura(3.23), riferita al provino a flessione, e la Figura(3.24) in riferimento al provino a trazione. Come per i casi precedenti, si riporta l'andamento di un solo provino a flessione poiché si comportano in modo analogo.



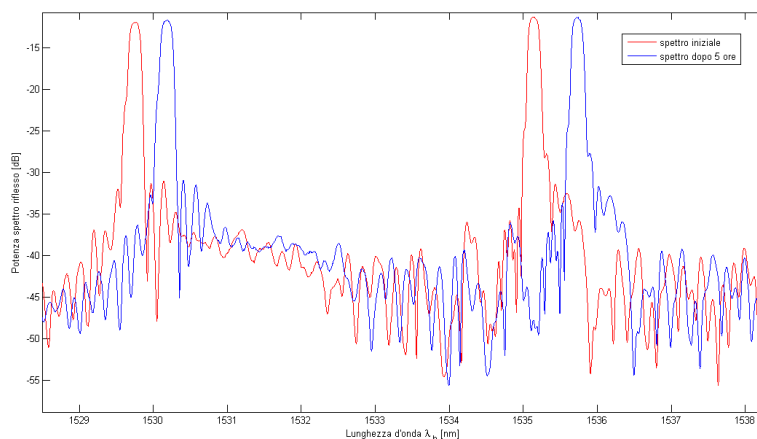
(a) Spettri inizio e fine riscaldamento



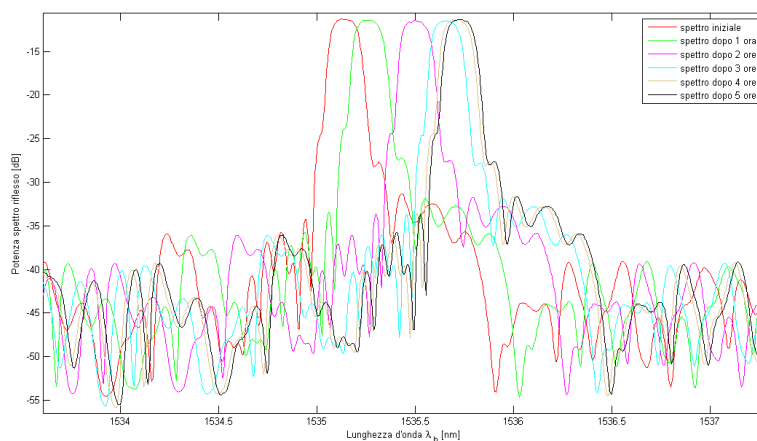
(b) Spostamento degli spettri durante la fase di riscaldamento

Figura 3.23: Andamento degli spettri durante il riscaldamento per il provino a flessione

Come si evince dalla Figura(3.23) e dalla Figura(3.24) gli spettri, anche al raggiungimento della temperatura di 80°C , mantengono la propria forma originale. Gli spettri, così come ci si attendeva, all'aumentare della temperatura si spostano verso lunghezze d'onda maggiore, mentre la potenza riflessa si mantiene pressochè costante.



(a) Spettri inizio e fine riscaldamento



(b) Spostamento degli spettri durante la fase di riscaldamento

Figura 3.24: Andamento degli spettri durante il riscaldamento per il provino a trazione

Si può quindi affermare che con la disposizione di pelli scelta e con i sensori a fibra ottica disposti collinearmente alle fibre di rinforzo, non si hanno evidenti distorsioni degli spettri riflessi.

3.5 Conclusioni sull'integrazione dei FBGS in materiale composito

Il metodo utilizzato per l'integrazione dei FBGS nel materiale composito ha permesso la sopravvivenza dei sensori, permettendo così l'analisi degli spettri riflessi durante il procedimento di realizzazione dei provini.

Si sono così potute ottenere informazioni sullo stato di deformazione residuo all'interno dei provini attraverso l'analisi degli spettri iniziali e finali (Figura(3.20) e

Figura(3.21)) e sulla reale temperatura nelle zone in prossimità dei sensori durante l'intero ciclo di curing per mezzo dell'analisi dell'andamento dei picchi principali (Figura(3.22)).

La giusta scelta del materiale in cui integrare i sensori (che ricordiamo essere fibra di carbonio unidirezionale), del ciclo di curing (che con una temperatura massima di $T = 80$ °C non ha danneggiato i FBGS) e della procedura di integrazione dei sensori stessi hanno permesso di non distorcere lo spettro (Figura(3.23) e Figura(3.23)), così come ci si era prefissati di fare.

Si può concludere affermando che gli studi e le scelte portate avanti in questo capitolo si sono rivelate, per il momento, tutte adeguate ed i risultati ottenuti rispecchiano le aspettative.

Nel successivo capitolo si dovrà verificare se le fibre ottiche garantiscono o meno una lettura delle deformazioni imposte dalle macchine di prova, comparando i risultati con quelli ottenuti precedentemente nel Capitolo(2.5).

CAPITOLO 4

RISULTATI PER I SENSORI INTEGRATI

4.1 Introduzione

Dopo aver descritto nel capitolo precedente le metodologie di costruzione del provino in fibra di carbonio, si vuole ora testare il funzionamento dei sensori FBGS dopo l'installazione al suo interno, valutando eventuali differenze rispetto a quanto ottenuto sui provini in acciaio.

Verrà perciò investigato il comportamento dei sensori a fibra ottica a vari step di deformazione e frequenza, ricalcando quanto già effettuato precedentemente: verrà inoltre calcolato il valore del rumore di fondo dei sensori integrati per confrontarlo con quanto ottenuto durante la caratterizzazione dei sensori nudi (Capitolo(3.1.1)).

Prove di tipo statico, di verifica del valore del rumore di fondo e di tipo dinamico a differenti frequenze ed ampiezze di deformazione su sensori “nudi” a reticolo di Bragg annegati in materiali compositi non trovano, come già precedentemente accennato, alcun riscontro in letteratura scientifica.

4.2 Descrizione preliminare della prova

Riprendendo quanto scritto nel precedente capitolo sono stati costruiti due differenti tipologie di provini: il primo progettato per prove a flessione (Capitolo(3.1.4)) ed il secondo per prove a trazione (Capitolo(3.1.5)), caratterizzati da differenti metodi di compensazione termica e di stratificazione delle fibre di carbonio.

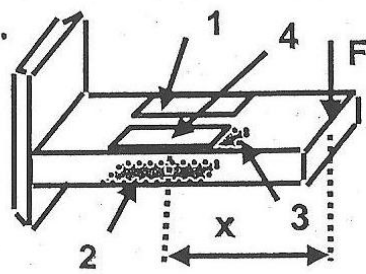
Al fine di effettuare un confronto, sono stati applicati su entrambi i provini degli estensimetri elettrici in corrispondenza del sensore a reticolo di Bragg annegato nel materiale composito. Essendo il materiale composito formato da fibre di carbonio unidirezionale, non ci sono stati problemi nel scegliere particolari estensimetri in quanto la superficie risulta omogenea in direzione longitudinale, evitando i problemi che sarebbero nati nel caso si fosse scelto un tessuto.

Soprattutto nel provino a flessione è stato necessario riservare molta attenzione nel posizionamento in direzione longitudinale sia dei sensori a fibra ottica che di quelli estensimetrici, essendo la deformazione non costante lungo la direzione assiale.

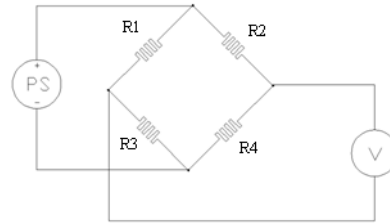
Di seguito si descrive dettagliatamente lo schema fondamentale di installazione degli estensimetri elettrici e delle fibre ottiche per le due tipologie di provini.

4.2.1 Provino a flessione

Nel provino a flessione, di lunghezza totale pari a 400 mm, è stato annegato il sensore a fibra ottica a distanza di 100 mm dal punto di applicazione della forza: gli estensimetri sono stati quindi incollati nella medesima posizione utilizzando una configurazione a ponte intero al fine di ottenere un aumento della sensibilità. Nella Figura(4.1(a)) viene mostrata la configurazione adottata: la distanza x riportata identifica la posizione sia degli estensimetri elettrici (posti sulla superficie del provino) che dei sensori a fibra ottica (integrati nelle ali di rinforzo), mentre la freccia mostra la posizione e direzione del carico applicato. Nella Figura(4.2(b)) viene riportato lo schema elettrico a ponte intero adottato.



(a) Schema di prova a flessione e relativa disposizione degli estensimetri



(b) Schema dei collegamenti elettrici del ponte intero estensimetrico

Figura 4.1: Schema di prova a flessione e relativa disposizione degli estensimetri

Adottando tale schema, l'equazione (4.1) mostra la variazione di tensione in funzione della deformazione:

$$\Delta V = \frac{E \cdot G}{4} \cdot 4 \cdot (K_l - K_t \cdot \nu) \cdot \varepsilon_l \quad (4.1)$$

in cui:

E = tensione di alimentazione;

G = amplificazione elettrica;

K_l = sensibilità longitudinale;

$K_t = 0.1\% \cdot K_l$ = sensibilità trasversale;

ν = modulo di poisson;

ε_l = deformazione longitudinale.

Sono stati integrati due sensori a fibra ottica: uno nell'ala di rinforzo superiore, che andrà a lavorare a trazione, ed uno in quella inferiore, che sarà sottoposta a compres-

sione.

Le variazioni di lunghezza d'onda in funzione della deformazione sono riportate nelle equazioni (4.2) e (4.3):

$$\Delta\lambda_1 = K_l \cdot \varepsilon_{l1} + \cancel{K_t \cdot \varepsilon_{t1}} + K^\circ \cdot \Delta T = K_l \cdot \varepsilon_{l1} + K^\circ \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_l \cdot \varepsilon_{l2} + \cancel{K_t \cdot \varepsilon_{t2}} + K^\circ \cdot \Delta T = K_l \cdot \varepsilon_{l2} + K^\circ \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

dove:

ε_{l1} = deformazione longitudinale di trazione (positiva);

ε_{l2} = deformazione longitudinale di compressione (negativa);

$\varepsilon_{t2} \approx -\varepsilon_{t1}$ = deformazione trasversale;

$K_t \cdot \varepsilon_{t1}$ = contributo trascurabile;

$K_t \cdot \varepsilon_{t2}$ = contributo trascurabile;

K° = sensibilità alla temperatura.

Sottraendo i due segnali si ottiene l'equazione (4.4):

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = K_l \cdot (\varepsilon_{l1} - \varepsilon_{l2}) = K_l \cdot 2 \cdot \varepsilon_l \quad (4.4)$$

da cui si può facilmente ricavare l'espressione (4.5):

$$\varepsilon_l = (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2)/(2 \cdot K_l) \quad (4.5)$$

dove:

$$\varepsilon_l = (\varepsilon_{l1} - \varepsilon_{l2}) = (\varepsilon_{l1} + |\varepsilon_{l2}|)$$

Dall'equazione (4.5) si nota che la ε_l ottenuta risulta essere la media tra i valori assoluti delle deformazioni dell'ala superiore ed inferiore.

Sottraendo i segnali provenienti dai due sensori a fibra ottica si è quindi depurata la misura da eventuali contributi dovuti alla temperatura ed ottenuto un valore di deformazione medio tra le due superfici di carbonio. Sommando invece i contributi dei due segnali è possibile isolare il contributo che la temperatura avrebbe avuto durante

la prova se non si fosse adottato uno schema che prevedesse la compensazione termica.

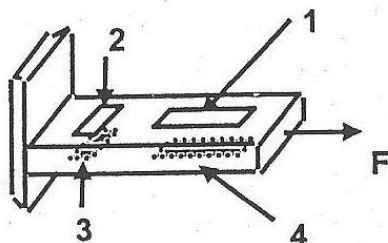
A causa della maggiore distanza dall'asse neutro, le deformazioni misurate dagli estensimetri elettrici saranno maggiori rispetto a quelle dei sensori in fibra ottica: si introdurrà quindi un fattore correttivo pari a 1.1039 per annullare questo effetto (come già spiegato nel Capitolo(3.1.4)).

4.2.2 Provino a trazione

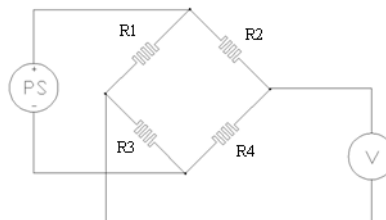
Nel provino a trazione è stato inserito un sensore a fibra ottica in posizione longitudinale posto tra gli strati di carbonio centrali ed un sensore posizionato trasversalmente con funzione di compensatore termico.

Come nel caso a flessione sono stati incollati anche degli estensimetri per effettuare il confronto della misura: si è adottato anche in questo caso uno schema a ponte intero che permette di compensare gli effetti della temperatura e di una eventuale minima flessione dovuta ad un non perfetto allineamento della macchina di prova.

La Figura(4.2(a)) mostra il posizionamento degli estensimetri elettrici mentre la Figura(4.2(b)) lo schema elettrico:



(a) Schema dei collegamenti elettrici del ponte intero estensimetrico



(b) Schema di prova a trazione e relativa disposizione degli estensimetri

Figura 4.2: Schema elettrico e disposizione degli estensimetri elettrici per le prove a trazione sul provino in materiale composito

Il mezzo ponte restituisce in uscita:

$$\Delta V = \frac{E \cdot G}{4} \cdot 2 \cdot (1 + \nu) \cdot (K_l - K_t) \cdot \varepsilon_l \quad (4.6)$$

in cui i simboli utilizzati hanno lo stesso significato delle prove a flessione.

Le fibre ottiche annegate all'interno, facendo riferimento col pedice 1 a quella posizionata longitudinalmente e col pedice 2 a quella trasversale, restituiscono le seguenti

grandezze:

$$\Delta\lambda_1 = K_l \cdot \varepsilon_l + \cancel{K_t \cdot \varepsilon_t} + K^\circ \cdot \Delta T = K_l \cdot \varepsilon_l + K^\circ \cdot \Delta T \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_2 &= K_l \cdot \varepsilon_t + K_t \cdot \varepsilon_l + K^\circ \cdot \Delta T = -K_l \cdot \nu \cdot \varepsilon_l + K_t \cdot \varepsilon_l + K^\circ \cdot \Delta T = \\ &= \varepsilon_l \cdot (K_t - K_l \cdot \nu) + K^\circ \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (4.8)$$

Sottraendo i due segnali si ottiene:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = \varepsilon_l \cdot (K_l - K_t + K_l \cdot \nu) = \varepsilon_l \cdot (-K_t + K_l \cdot (1 + \nu)) + \delta_{errorecompensazione} \quad (4.9)$$

in cui $\delta_{errorecompensazione}$ è dovuta ad una non perfetta compensazione termica, che è comunque possibile trascurare dal momento che le variazioni di temperatura risultano essere limitate.

Dall'equazione (4.9) si ottiene la deformazione longitudinale:

$$\varepsilon_l = (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) / (-K_t + K_l \cdot (1 + \nu)) \quad (4.10)$$

4.3 Prove dinamiche

Analogamente a quanto effettuato nelle prove dinamiche sui provini in acciaio descritte nel Capitolo(2.5), anche in questo caso sono stati acquisiti i risultati a differenti ampiezze di deformazioni e frequenze.

Le prove sono state organizzate come mostra la Tabella(4.1).

Le differenze di frequenze adottate per le due prove sono dovute al tipo di macchina utilizzata: per le prove a trazione è stata scelta la stessa utilizzata per i provini in acciaio mentre per le prove a flessione è stato necessario spostarsi su di una macchina differente.

Le frequenze proprie della macchina di prova nonché le differenti corse del pistone idraulico tra i due diversi tipi di prove hanno obbligato ad utilizzare le frequenze elencate: nel caso a flessione a $50 \mu\varepsilon$ ci si è riusciti a spingere fino a 30 Hz, cosa che non è stato possibile fare nelle prove rimanenti.

Tabella 4.1: Elenco delle prove fatte sui provini in fibra di carbonio con FBGS integrati

Prova a flessione		Prova a trazione	
Deformazione [$\mu\varepsilon$]	Frequenza [Hz]	Deformazione [$\mu\varepsilon$]	Frequenza [Hz]
• 15	1. 0.02	• 15	1. 0.02
	2. 0.5		2. 0.5
	3. 5		3. 5
	4. 20		4. 20
• 50	1. 0.5	• 50	1. 0.5
	2. 5		2. 5
	3. 15		3. 20
	4. 30		
• 200	1. 0.5	• 200	1. 0.5
	2. 5		2. 5
	3. 15		3. 20

4.3.1 Risultati delle prove a flessione

I risultati sono stati ottenuti con la medesima procedura adottata per le prove su acciaio, dunque per una descrizione approfondita si fa riferimento al Capitolo(2.6.1): ogni storia temporale di durata di circa 7 minuti è stata divisa in 5 sotto finestre a cui è stata applicata la trasformata di Fourier, sia per il segnale derivante dagli estensimetri che dalle fibre ottiche. Si è quindi ottenuto il rapporto tra i moduli massimi di fibre ottiche ed estensimetri sulle 5 sotto-finestre calcolando successivamente media e deviazione standard.

Nonostante il contributo degli effetti termici risulti importante solo per le prove a bassa frequenza, si è deciso di utilizzare il valore di deformazione compensato (ottenuto mediante l'equazione (4.5)) al fine di avere risultati comparabili avendo utilizzato lo stesso sistema di misura per la totalità delle prove effettuate.

Si mostrano in Figura(4.3) i grafici relativi a tali rapporti, evidenziandone media e deviazione standard.

I risultati ottenuti dai sensori in fibra ottica ricalcano fedelmente quelli ottenuti dagli estensimetri in quanto i rapporti si mantengono prossimi all'unità: l'installazione dei sensori a reticolo di Bragg all'interno di un materiale composito in fibra di carbonio unidirezionale non ha quindi causato alcun danneggiamento.

Comparando questi risultati con quelli ottenuti sull'acciaio si nota un miglioramento della lettura: in nessun caso ora le fibre ottiche misurano ampiezze sensibilmente

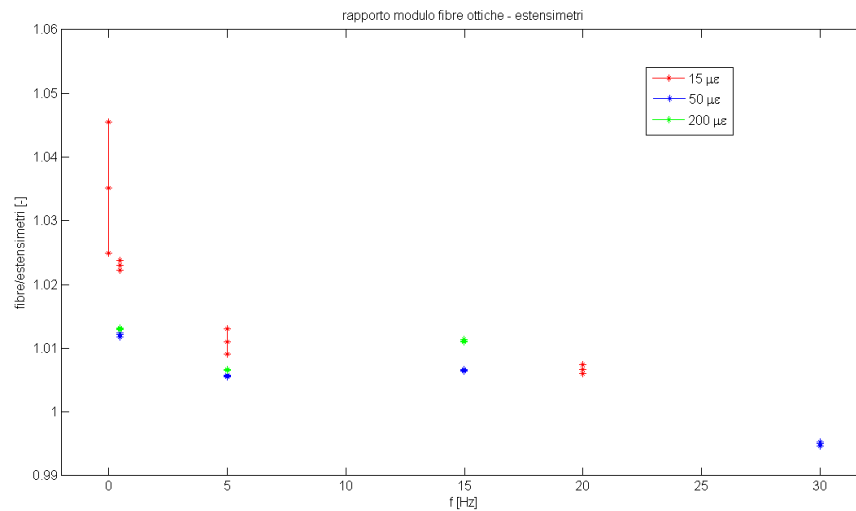


Figura 4.3: Valori dei rapporti tra fibre ottiche ed estensimetri, ottenuti mediante il calcolo dei moduli delle trasformate di Fourier

differenti rispetto a quelle ottenute dagli estensimetri, che rappresentano un sistema di misura affidabile e lungamente testato. Questo può essere dovuto al fatto che ora non vi è la presenza nè di differenti tipi di basette nè di collante che, come precedentemente scritto[15], può restituire risultati dipendenti dalla frequenza e dall'ampiezza.

Solo la prova a 0.02 Hz - 15 $\mu\epsilon$ mostra un valore di deviazione standard superiore, peraltro piccolo: in questo caso, essendo una prova con periodo della sinusoide molto elevato, questo valore può essere influenzato anche da un errore della macchina di prova che non riesce a mantenere in modo preciso l'ampiezza desiderata: inoltre la limitata ampiezza genera un basso rapporto segnale/rumore che influenza negativamente la misura.

Le differenze tra i valor medi dei rapporti sono talmente piccoli che risulta difficile commentare un eventuale trend della misura al variare dell'ampiezza e della frequenza: errori di deformazione del 1 – 2% sul provino testato possono essere valutati come normale incertezza di misura, tenendo conto anche di possibili errori nel posizionamento manuale relativo tra fibre ottiche ed estensimetri.

Un aspetto importante della prova sono gli ottimi risultati anche a deformazioni elevate: a 200 $\mu\epsilon$ infatti, la freccia misurata era pari a 5 mm, incurvando in maniera evidente il provino: nonostante questo la potenza del segnale riflesso non si è abbassata tanto da causare errori di identificazione del picco da parte della centralina di acquisizione.

Si riportano ora (Tabella(4.2)) i valori medi di deviazione standard ottenuti durante i test misurati sui sensori a fibra ottica a macchina di prova ferma: questo rappresenta un buon indice del rumore di fondo presente nella misura. Al fine di un confronto, si riporta anche il minor valore di deviazione standard ottenuto durante le prove termiche del sensore D (Capitolo(3.2)).

Tabella 4.2: Valore delle deviazioni standard per le prove a flessione

Tipo di provino	Segnale	Deviazione standard [$\mu\epsilon$]
Sensore integrato	Compensato	0.51
	Canale 1	0.71
	Canale 2	0.9
Sensore nudo	Compensato	0.91
	Canale 1	0.82
	Canale 2	0.85

Ciò che si nota è una relativa stazionarietà del valore di rumore di fondo del sensore prima e dopo l'inserimento nel provino: ciò dimostra che l'utilizzo di fibre di carbonio unidirezionali ed il curing effettuato ad una temperatura relativamente bassa siano state scelte positive. Il sensore non ha quindi subito danneggiamenti, evitando in questo modo un peggioramento delle proprie qualità metrologiche.

Il metodo di compensazione utilizzato nel provino a flessione (in riferimento all'equazione (4.5)) produce, come si nota dalla Tabella(4.2), un abbassamento del livello di rumore di fondo: essendo infatti i due sensori posti sulle due facce del provino e subendo deformazioni uguali in modulo ma opposte di segno, la deformazione ottenuta risulta una media tra i segnali, contribuendo a mediare e quindi ad abbattere anche il rumore di fondo presente.

Ciò risulterà una differenza sostanziale rispetto a quanto ottenuto dal provino a trazione che utilizza un diverso metodo di compensazione termica (equazione 4.10).

4.3.2 Risultati delle prove a trazione

Essendo identica al caso precedente la metodologia utilizzata per l'analisi dei dati, si inserisce subito il grafico relativo ai rapporti tra i moduli massimi delle trasformate di Fourier per fibre ottiche ed estensimetri (Figura(4.4)).

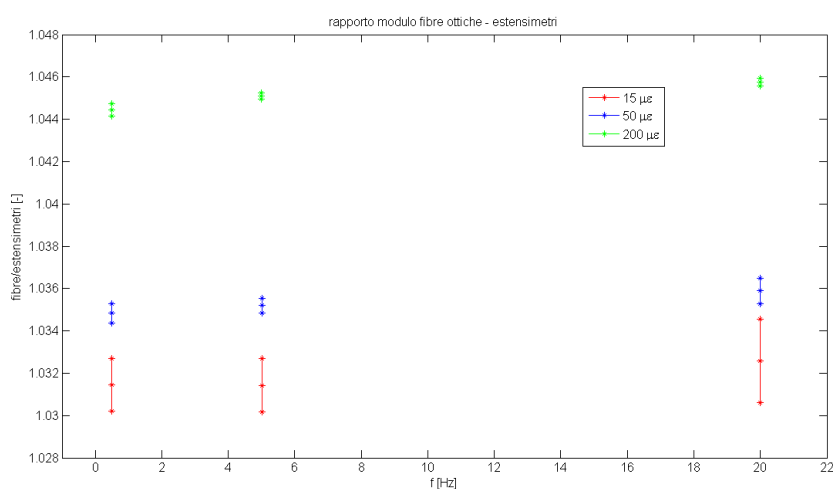


Figura 4.4: Valore dei rapporti delle deformazioni misurate dagli sensori ottica integrati nel materiale composito con quelle misurate dagli estensimetri elettrici posti in superficie per la prova a trazione

I risultati ottenuti sono anche in questo caso prossimi all'unità, garantendo differenze di misura massime, rispetto agli estensimetri elettrici, del 4.6%.

Ciò che però risulta evidente dal grafico è un aumento del valore del rapporto al crescere della deformazione imposta: nonostante la differenza sia comunque minima, le fibre ottiche tendono a misurare una deformazione via via maggiore.

Questo fenomeno merita un'attenta analisi: non essendo presente nelle prove a flessione, si elimina l'ipotesi che la causa sia il sensore stesso, mentre risulta plausibile che la differente tipologia di costruzione dei provini abbia influenzato la misura.

Si elencano alcune ipotesi avanzate durante l'analisi:

- *Disallineamento degli agganci della macchina di prova:* ciò provocherebbe un momento flettente sul provino, imponendo una deformata ad S. Utilizzando come nel nostro caso una configurazione estensimetrica a ponte intero, la quota parte flessionale viene eliminata, ottenendo una misura della deformazione dovuta alla sola componente a trazione. Anche la fibra ottica longitudinale, se fosse perfettamente posta sull'asse neutro, non risentirebbe dell'effetto di una eventuale flessione: nel caso in cui però questa presentasse un non perfetto posizionamento, potrebbe generare lievi errori di misura;
- *Effetto della temperatura:* nonostante sia nel caso degli estensimetri elettrici che per i sensori a fibra ottica sia stata utilizzata una configurazione che permettesse una compensazione degli effetti termici, è possibile che gradienti di temperatura tra l'interno del provino e l'esterno possano provocare errori nella misura;
- *Altre possibili cause:* incollaggio difettoso di un estensimetro, effetti locali dovuti al materiale e alla stratificazione scelta, possibili delaminazioni degli strati di carbonio.

Avendo avuto a disposizione solo un provino, risulta impossibile affermare che questo trend sia caratteristico di questa particolare tipologia costruttiva: al fine di verificare se sia un effetto sistematico, bisognerebbe effettuare una analisi statistica su più provini. C'è comunque da tenere in considerazione che la differenza di misure ottenute tra estensimetri elettrici e fibre ottiche risulta molto limitato: passando da una deformazione di $15 \mu\epsilon$ a $200 \mu\epsilon$, la differenza sulle medie è dell' 1.5%. È inoltre da considerare che utilizzando un'incertezza sulla misura pari a ± 2 volte la deviazione standard (che comporta un intervallo di confidenza del 95 %), le misure a 15 e a $50 \mu\epsilon$ sono compatibili tra di loro[16].

Si mostrano ora (Tabella(4.3)) i valori di deviazione standard dei segnali a macchina di prova ferma.

Il sensore longitudinale ha un valore di rumore di fondo in linea con quanto visto nel provino a flessione: solo il sensore posto in posizione trasversale denota un aumento di tale indice, mantenendosi in ogni caso a valori bassi.

Tabella 4.3: Valore delle deviazioni standard per le prove a flessione

Tipo di provino	Segnale	Deviazione standard [$\mu\epsilon$]
Sensore integrato	Compensato	1.18
	Canale 1 (longitudinale)	0.73
	Canale 2 (Trasversale)	1.37
Sensore nudo	Compensato	0.82
	Canale 1	0.91
	Canale 2	0.93

Il valore di rumore del segnale compensato, come precedentemente anticipato, non risulta inferiore a quello di entrambi i singoli sensori: la legge di compensazione infatti in questo caso non permette un abbattimento della soglia di rumore come accade invece utilizzando il metodo di compensazione dei provini a flessione.

4.4 Conclusioni delle prove con sensori a fibra ottica integrati

I sensori a fibra ottica inseriti all'interno del materiale composito hanno fornito risultati comparabili a quelli ottenuti dagli estensimetri elettrici in termini di ampiezza di deformazione misurata: non si è inoltre osservata alcuna influenza della frequenza sui risultati finali, mentre solo nel caso del provino a trazione è stato osservato un aumento del rapporto tra i moduli delle trasformate di Fourier delle fibre e degli estensimetri al crescere della deformazione imposta.

Il valore del rumore di fondo risulta essere contenuto, il che denota come il materiale composito non abbia danneggiato il sensore stesso, ma anzi lo protegge dall'ambiente esterno garantendo così una maggiore durata dei sensori stessi.

Per tutte le prove sono stati utilizzati due sensori, permettendo così la compensazione termica, anche se questa risulta importante solamente alle frequenze più basse.

Nelle prove a trazione, in particolare modo, è stata utilizzata una configurazione di compensazione termica che non ha precedenti nella bibliografia scientifica e ha fornito, a meno di un leggero trend, ottimi risultati poichè il segnale presentava un basso rumore di fondo, le misure erano accurate e l'effetto della temperatura è stato decurtato.

Possiamo quindi concludere affermando che l'integrazione dei FBGS nelle modalità descritte ha portato alla creazione di provini con al loro interno un sistema di misura che permette di conoscere in modo accurato le deformazioni a cui è sottoposto il provino stesso. Infatti, così come per le classiche configurazioni a ponte e a mezzo ponte estensimetrico, siamo stati in grado di ottenere, sia per il provino a flessione che per quello a trazione, bassi rumori di fondo, misure accurate (il rapporto tra i moduli delle fibre e degli estensimetri si attesta intorno all'unità) e prive del contributo di un'eventuale gradiente di temperatura.

CONCLUSIONI

Lo scopo della ricerca effettuata è stato quello di comprendere al meglio pregi e difetti dei sensori a reticolo di Bragg.

Non avendo trovato in bibliografia test comparativi tra le prestazioni degli estensimetri elettrici e quelli ottici se non in campo statico, non si conoscevano le reali performance di questi sensori, fondamentali in quei casi in cui si richiede un elevato livello di accuratezza.

I risultati ottenuti mostrano come tale metodo possa, in un futuro prossimo, essere impegnato al posto dei classici estensimetri elettrici poichè è possibile ottenere misure di deformazione accurate.

In campo statico è stato dimostrato come solamente i sensori di media ed alta fascia possano essere utilizzati per questo tipo di prove, poichè affetti da un limitato errore di compensazione termica e da un basso rumore di fondo. I sensori di fascia bassa, oltre ad avere problemi di identificazione del picco principale (che possono comunque essere superati attraverso un fine aggiustamento dei parametri dell'algoritmo di peak detection), hanno denotato un errore di compensazione termica elevato, che non permette di ottenere misure affidabili.

In campo dinamico si sono ricavate prestazioni di alto livello da tutti quanti i sensori: infatti i risultati ottenuti mostrano come i sensori a fibra ottica siano paragonabili agli estensimetri elettrici, sia per le prove a diverse ampiezze e frequenza, sia in termini di rumore di fondo.

Un aspetto su cui i vari costruttori di estensimetri a fibra ottica dovranno trovare un accordo riguarda il tipo di incollaggio da adottare per rendere solidali i sensori alla superficie della struttura da analizzare. Infatti, per il nostro studio si sono acquistati tre diverse marche di sensori e ci si è ritrovati davanti a tre diverse tipologie di incollaggi: un sensore è stato annegato in una colla polimerica, mentre gli altri due sensori presentavano due basette diverse tra di loro (una era in materiale plastico, l'altra in metallo) per le quali è stata usato del ciano acrilato. In questo caso sarebbe necessaria una standardizzazione che permetta di avere una sola tipologia di incollaggio uguale per tutti, così come succede già per gli estensimetri elettrici.

La successiva integrazione dei sensori a fibra ottica "nuda" all'interno di un provino in materiale composito (fibre di carbonio unidirezionale), ha eliminato il problema della

tipologia di incollaggio da utilizzare e ci ha fornito utili indicazioni circa le metodologie costruttive da seguire durante il processo di costruzione del provino da testare: il risultato finale rappresenta un traguardo importante in quanto si è realizzato un materiale sensibile alle deformazioni con differenze, rispetto a quanto ottenuto dagli estensimetri elettrici, ridotte. Si può concludere dicendo che le prestazioni di tali sensori non hanno subito un peggioramento a causa dell'integrazione in una struttura in materiale composito se non a livello di potenza del segnale riflesso.

Una volta superati i limiti di movimentazione (le fibre ottiche nude sono molto delicate anche con le guaine protettive) e di integrazione all'interno del materiale composito (quello scelto da noi è manuale e presenta inevitabilmente delle incertezze sul posizionamento), si potranno facilmente realizzare provini con al loro interno questo genere di sensori ottenendo così numerose informazioni non ottenibili in altro modo. Infatti si potranno conoscere le deformazioni a cui la struttura è stata sottoposta (cioè si potrà conoscere il vero stato di fatica) e si potrà controllare il ciclo di curing attraverso l'analisi dell'andamento dei picchi principali, che ricalcano l'andamento della temperatura.

Alla luce di questi risultati, le frontiere della sperimentazione possono aprirsi verso numerose aree: l'integrazione infatti di questi sensori in materiali compositi può infatti essere utile in applicazioni in cui il limitato peso e l'elevata rigidità siano gli obiettivi principali come nel caso di dinamometri in galleria del vento o per la costruzione di patch adesive da applicare a strutture delle quali si vogliono conoscere le deformazioni in gioco.

Ulteriori studi dovranno essere affrontati per poter acquisire nuove conoscenze e per approfondire gli aspetti iniziali durante questo lavoro.

In particolar modo si possono citare alcuni degli aspetti più importanti che andranno approfonditi negli studi successivi:

- *comportamento a deformazioni elevate*: bisognerà verificare se anche a deformazioni di notevole entità (i sensori a fibra ottica possono misurare fino a $\pm 9000 \mu\epsilon$) le caratteristiche analizzate si mantengono costanti oppure hanno dei decadimenti;
- *comportamento a frequenze elevate*: le macchine di prova a nostra disposizione hanno permesso di spingere la nostra analisi fino a 30 Hz. Risulta interessante verificare le prestazioni a frequenze più elevate, ad esempio sopra i 100 Hz;
- *materiale composito da utilizzare*: essendo il nostro un studio preliminare, si è scelto di utilizzare una fibra di carbonio unidirezionale per non distorcere lo spettro del FBGS. Ma il tipo di fibra scelto è poco usato a livello commerciale, in cui generalmente viene usato un materiale intrecciato, tipo tessuto. L'integrazione dei sensori in fibra ottica all'interno di questo materiale comporta la distorsione dello spettro con la possibile nascita di picchi secondari durante il ciclo di curing. L'analisi di entrambi i picchi e della larghezza dello spettro riflesso può portare alla

conoscenza dello stato di sforzo residuo dopo del ciclo di curing oltre a permettere di conoscere le deformazioni imposte alla struttura;

- *analisi statistica*: sebbene i risultati ottenuti in tutte le configurazioni si possano considerare di ottimo livello, è necessario effettuare una'analisi statistica più approfondita, testando più provini con le stesse caratteristiche geometriche e di materiale, per poter così verificare la costanza delle prestazioni dei sensori analizzati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] http://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html
- [2] Raymond M. Measures, “Smart composite structures with embedded sensors” *Composites Engineering*, vol. 2, n. 5-7, pp. 597–618, 1992. University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Ontario, Canada, 1992.
- [3] Manfred Kreuzer, “Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors” HMB, Darmstadt, Germany.
- [4] Raymond M. Measures, “Fiber optic sensing for composite smart structures” *Composites Engineering*, vol. 3, n. 7-8, pp. 715–750, 1993. University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Ontario, Canada, 1993.
- [5] Thomas Kleckers, Bernd Günther “Optical versus electrical strain gages: A comparison” HBM Measurements, Germany.
- [6] J.A. Guemes, J.M. Menendez “Response of Bragg gratin fiber-optic sensors when embedded in composite laminates” *Composites Science and Technology*, pp. 959–966, 2002. Universite Politecnica de Madrid, Madrid, Spain, 2001.
- [7] K.S.C. Kuang, R. Kenny, M.P. Whelan, W.J. Cantwell, P.R. Chalker “Embedded fibre Bragg gratin sensors in advanced composite materials” *Composites Science and Technology*, pp. 1379–1387, 2001. Materials science and Engineering, Department of Engineering, University of Liverpool, Liverpool, UK. Photonic Technologies and Diagnostics Sectors, ISIS, European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy. 2001.
- [8] Eaton N.C., Drew R.C., Geiger H. “Finite element stress and strain analysis in composites with embedded optical fiber sensor” *Smart Materials and Structures*, vol. 4, pp. 113–117, 1995.
- [9] Okabe Y., Yashiro S., Kosaka T., Takeda N. “Detection of tranverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors” *Smart Materials and Structures*, vol. 9, pp. 832–838, 2000.
- [10] Bertholds A., Dandiliker R. “Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibers” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, pp. 17-20, 1988.
- [11] K.S.C. Kuang, R. Kenny, M.P. Whelan, W.J. Cantwell, P.R. Chalker “Residual strain measurement and impact response of optical fibre Bragg grating sensors

- in fibre metal laminates” *Smart Materials and Structures*. Materials science and Engineering, Departement of Engineering, University of Liverpool, Liverpool, UK. Photonic Technologies and Diagnostics Sectors, ISIS, European Commission Joint Research Centre, Ispira, Italy. 2002.
- [12] Nobuhira Tanaka, Yoji Okabe and Nobuto Takeda “Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates” *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp. 940–946, 2003. Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, c/o Takeda Laboratory, Komaba Open Laboratories (KOL), The University of Tokyo, Japan, 2003.
- [13] Gianni Caligiana, Francesco Cesari “I materiali compositi”, Pitagora editrice Bologna, 2002.
- [14] JS Bendat, AG Piersol, “Random Data: Analysis and Measurement Procedures”, Wiley-Blackwell; 3rd Edition edition, 2000.
- [15] Norma ISO5348, “Mechanical vibration and shock: Mechanical mounting of accelerometers”, 1998.
- [16] ISO/IEC Guide 98-3:2008, “Uncertainty of measurement Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement”, GUM:1995.