

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica



**MISURE DI DEFORMAZIONE E TEMPERATURA
MEDIANTE SENSORI A FIBRA OTTICA:
TECNICHE DI DISACCOPIAMENTO
DEL SEGNALE**

Relatore: Prof. Giuseppe SALA

Co-relatore: Ing. Paolo BETTINI

Tesi di Laurea di:

Enrico TESSADORI Matr. 750237

Anno Accademico 2010-2011

Sommario

Sfruttando le ridotte dimensioni e l'elevata sensibilità delle fibre ottiche sono stati inglobati dei sensori a reticolo di Bragg (FBG) all'interno di strutture in composito per la realizzazione di sistemi di monitoraggio strutturale (*Structural Health Monitoring - SHM*). Il lavoro di tesi si focalizza sullo sviluppo di tecniche di misura in grado di disaccoppiare il segnale fornito dai sensori FBG utilizzati nella strumentazione di una pala del rotore di coda di un elicottero. Attraverso una fase di studio tecnologico è stato possibile andare ad indagare i processi necessari per la corretta implementazione dei sistemi di misura e, mediante provini in materiale composito opportunamente strumentati, sono state condotte delle prove sperimentali per permetterne la validazione.

PAROLE CHIAVE: Sensori fibra ottica, Bragg, FBG, Misura simultanea di deformazioni e temperatura, SHM, Rotore, Tubo capillare

Abstract

By exploiting the reduced dimensions and the high sensitivity of optical fibres, some FBG sensors have been embedded in structures of composite material to create systems of *Structural Health Monitoring (SHM)*. This thesis is focused on the development of measuring techniques which allow to decouple the signal provided by the FBG sensors used in the instrumentation of a tail rotor blade on a helicopter. Through a phase of technological study, it was possible to enquire into the processes necessary for the correct implementation of measuring systems and, through specimen in composite material opportunely instrumented, some experimental tests have been carried out to permit their validation.

KEY WORDS: Fiber optic sensors, Bragg, FBG, Simultaneous measurement of strain and temperature, SHM, Rotor, Capillary tube

Indice

Elenco delle figure	v
Elenco delle tabelle	ix
Elenco dei simboli	xi
Introduzione	1
1 Sensori a Reticolo di Bragg	5
1.1 La fibra ottica	5
1.1.1 Teoria delle fibre ottiche	6
1.1.2 Impiego delle fibre ottiche	9
1.2 Reticolo di Bragg	10
1.2.1 Legame foto-termo-elastico	13
2 Studio dello stato dell'arte	17
2.1 Principi di funzionamento dei sistemi di misura	17
2.2 Sistemi di misura	19
2.2.1 Sistemi basati su sensori FBG iscritti in fibre di sezione differente	19
2.2.2 Sistema basato sulla variazione del coefficiente di dila- tazione termica del reticolo	22
2.2.3 Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante	23
2.2.4 Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante	24
2.2.5 Sistema basato sull'acquisizione di un segnale diretta- mente compensato in temperatura	26
2.2.6 Sistema basato su FBG sovrascritti	27
2.2.7 Sistema basato su sensori phase-shifted	28
2.2.8 Sistema basato sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo	29

2.3	Confronto tra le differenti tecniche di misura	30
3	Progettazione del sistema di misura	33
3.1	Requisiti di progetto e scelta delle tecniche da indagare	33
3.2	Principi di funzionamento	36
3.3	Scelta dei tubi capillari	42
4	Implementazione dei sistemi di misura adottati e realizzazione dei provini	45
4.1	Preparazione dei sensori	45
4.1.1	Preparazione dei tubi capillari	45
4.1.2	Isolamento del sensore	48
4.1.3	Realizzazione sensori	51
4.2	Realizzazione dei provini in composito e inglobamento dei sensori	54
4.2.1	Realizzazione dei pannelli	54
4.2.2	Inglobamento delle fibre ottiche	55
4.2.3	Chiusura del sacco da vuoto e polimerizzazione	57
4.3	Produzione dei provini per la validazione sperimentale	59
4.3.1	Provini realizzati	63
4.4	Monitoraggio ciclo di reticolazione	64
5	Attività sperimentale	71
5.1	Calibrazione dei sensori FBG	71
5.1.1	Calibrazione della risposta alla temperatura	72
5.1.2	Calibrazione della risposta alla deformazione	81
5.2	Validazione sperimentale	89
	Conclusioni e sviluppi futuri	97
	Bibliografia	99

Elenco delle figure

1.1	Struttura di una fibra ottica	5
1.2	Confronto tra fibre ottiche Monomodali e Multimodali	6
1.3	Legge di Snell	7
1.4	Riflessione totale interna	7
1.5	Cono di accettazione	8
1.6	Raggi di curvatura eccessivi	8
1.7	Finestre di trasmissione per le fibre ottiche	10
1.8	Reticolo di Bragg	10
1.9	Riflessione della luce nel reticolo di Bragg	11
1.10	Confronto tra le intensità delle risposte per reticoli di Bragg uniformi di lunghezza differente	12
1.11	Confronto tra geometria e spettro di riflessione di un reticolo uniforme e uno chirped	13
2.1	Variazione della sezione mediante giunzione splice di fibre differenti	20
2.2	Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre	21
2.3	Sensore FBG parzialmente vincolato ad un substrato di mate- riale differente	22
2.4	Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante	23
2.5	Sensore FBG di estremità posto in un capillare	25
2.6	Sensore FBG posto in una struttura con tubetto LPC	26
2.7	Sensori FBG sovrascritti	27
2.8	Sensori p-shifted	28
2.9	Sensore FBG inserito in un volume polimerico rastremato	29
3.1	Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in estremità di una fibra ottica e inglobato in un tubo capillare	35
3.2	Schematizzazione del posizionamento del sensore di estremità nel tubo capillare	37

3.3	Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in un tubo capillare ma su fibra ottica passante attraverso il capillare	38
3.4	Posizionamento fibra ottica su traiettoria parabolica	39
3.5	Modellazione agli elementi finiti	41
3.6	Deformazione fibra ottica	41
3.7	Studio numerico, qualitativo, dell'andamento delle variazioni percepite dal sensore FBG al variare della diametro del capillare in cui è inserito	43
3.8	Studio numerico, qualitativo, dell'andamento delle variazioni percepite dal sensore FBG al variare della lunghezza del capillare in cui è inserito	44
4.1	Sezioni dei capillari realizzati mediante pinza	46
4.2	Capillari sezionati mediante Dremel	47
4.3	Resina epossidica bicomponente DP760	48
4.4	Preparazione capillare per la verifica dell'isolamento	49
4.5	Sezioni dei capillari trattati con liquidi penetranti	49
4.6	Ingrandimento dei capillari mediante microscopio elettronico .	50
4.7	Sensore con FBG di estremità	51
4.8	Realizzazione del sensore con fibra passante nel capillare . . .	52
4.9	Verifica della traiettoria della fibra ottica posta all'interno del capillare metallico	53
4.10	Sbandamento laterale delle fibre del provino in composito . . .	55
4.11	Inglobamento fibre ottiche	56
4.12	Realizzazione sacco da vuoto	57
4.13	Compattazione del provino	58
4.14	Dimensione del provino per le prove a trazione	59
4.15	Inglobamento dei sensori FBG e della termocoppia	60
4.16	Tallonatura del provino	61
4.17	Profilo contornato	61
4.18	Provino estensimetrato	62
4.19	Variazione della lunghezza d'onda di Bragg durante il ciclo di cura (per la prima tecnica)	64
4.20	Confronto del ciclo di cura di due provini in materiale differente	66
4.21	Confronto tra la temperatura rilevata dal sensore FBG libero e la termocoppia durante il ciclo di cura	67
4.22	Variazione della lunghezza d'onda di Bragg durante il ciclo di cura (per la seconda tecnica)	68
4.23	Confronto tra la temperatura rilevata dal sensore FBG posto nel capillare e la termocoppia durante il ciclo di cura	69
5.1	Camera ambientale	72

5.2	Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	73
5.3	Temperatura rilevata provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	74
5.4	Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	75
5.5	Calibrazione temperatura sensore libero, provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	75
5.6	Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	76
5.7	Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	76
5.8	Calibrazione temperatura sensore isolato, provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	77
5.9	Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	77
5.10	Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	78
5.11	Calibrazione temperatura sensore isolato, provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	78
5.12	Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	79
5.13	Material Test System	81
5.14	Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	82
5.15	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	82
5.16	Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	83
5.17	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	83
5.18	Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	84
5.19	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG isolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	85
5.20	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	85
5.21	Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	86

5.22	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG isolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2) . . .	87
5.23	Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	87
5.24	Risposta dei sensori del provino $CE - C - 01$ (tecnica 1) alle sollecitazioni applicate	89
5.25	Deformazione misurata dai sensori del provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	90
5.26	Temperatura misurata dai sensori del provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)	90
5.27	Risposta dei sensori del provino $CE - G - 02$ (tecnica 1) alle sollecitazioni applicate	91
5.28	Deformazione misurata dai sensori del provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	91
5.29	Temperatura misurata dai sensori del provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)	92
5.30	Risposta dei sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) alle sollecitazioni applicate	93
5.31	Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	93
5.32	Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)	94
5.33	Risposta dei sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2) alle sollecitazioni applicate	94
5.34	Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	95
5.35	Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)	95
5.36	Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) per deformazioni superiori a $2500\mu\varepsilon$	96
5.37	Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) per deformazioni superiori a $2500\mu\varepsilon$	96

Elenco delle tabelle

2.1	Variazione della sezione mediante giunzione splice di fibre differenti	20
2.2	Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre . .	21
2.3	Sistema basato sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo	23
2.4	Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante	24
2.5	Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante	25
2.6	Sistema basato sull'acquisizione di un segnale direttamente compensato in temperatura	26
2.7	Sistema basato su FBG sovrascritti	27
2.8	Sistema basato su sensori phase-shifted	29
2.9	Sistema basato sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo	30
2.10	Indice della scala di valori	30
2.11	Confronto tra i diversi sistemi di misura	31
3.1	Elementi utilizzati nella modellazione ad elementi finiti	40
3.2	Materiali utilizzati nella modellazione ad elementi finiti	40
3.3	Modulo di Young e coefficiente di Poisson dei componenti della fibra ottica	40
3.4	Capillari a disposizione	42
4.1	Provini realizzati per la validazione della prima tecnica	63
4.2	Provini realizzati per la validazione della seconda tecnica	63
5.1	Coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura: tecnica capillare di estremità	80
5.2	Coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura: tecnica capillare passante	80
5.3	Coefficienti di proporzionalità rispetto alla deformazione, per il primo sistema di misura	88

5.4 Coefficienti di proporzionalità rispetto alla deformazione, per
il secondo sistema di misura 88

Elenco dei simboli

α_i	Coefficiente di espansione termica
Λ	Passo del reticolo di Bragg
λ_B	Lunghezza d'onda di Bragg
ν	Coefficiente di Poisson
θ_a	Angolo di accettazione
θ_{cr}	Angolo critico
ε_i	Deformazione
ζ	Coefficiente termo-ottico
A_i	Area
E_i	Modulo di Young
K_ε	Coefficiente di proporzionalità rispetto alla deformazione
K_T	Coefficiente di proporzionalità rispetto alla temperatura
l_i	Lunghezza
n_i	Indice di rifrazione
p_e	Costante foto-elastica
p_{ii}	Coefficiente di Pockel
S_i	Superficie
T	Temperatura

Introduzione

L'innovazione tecnologica all'interno del settore aeronautico è da sempre elemento di vantaggio competitivo.

Negli ultimi decenni gli operatori commerciali del settore evidenziano l'importanza assunta da alcune caratteristiche dei velivoli, tra cui il risparmio energetico, la compatibilità ambientale, l'affidabilità, la sicurezza ed il comfort del trasporto.

Inoltre, fattori prettamente economici, come la riduzione dei costi di produzione ed il contenimento dei costi operativi, hanno influenzato la ricerca tecnologica verso lo sviluppo di soluzioni in grado di ridurre l'aggravio. Questo ha comportato un incremento delle ricerche orientate all'adozione di architetture strutturali di nuova concezione, alla razionalizzazione dei metodi e delle procedure di ispezione, all'ottimizzazione dei processi produttivi, nonché all'impiego di materiali differenti. In particolare risultano strategiche le linee di ricerca che coinvolgono i materiali compositi e, più nello specifico, i materiali definiti intelligenti.

A causa delle peculiari caratteristiche e della bassa conoscenza del loro comportamento, rispetto ai materiali classicamente impiegati, fondamentale importanza è stata attribuita allo sviluppo ed alla messa a punto di sistemi multifunzionali in grado di rilevare la difettologia, gli stati di danneggiamento/degrado della struttura durante la sua vita operativa, minimizzare gli effetti di condizioni di carico inusuali, compensare condizioni locali gravose e ridurre i livelli di vibrazione.

A tal proposito l'innovazione tecnologica è sempre più indirizzata verso lo sviluppo di differenti sistemi che possano permettere il monitoraggio dello stato di salute delle strutture (*Structural Health Monitoring*).

Il danneggiamento strutturale può così essere individuato e identificato per mezzo di dispositivi integrati nella struttura stessa, aventi la possibilità di trasmettere queste informazioni ad un dispositivo esterno permettendo di valutare lo stato di degrado della struttura in tempo reale.

Se efficientemente implementate, queste metodologie possono garantire la sicurezza strutturale riducendo al minimo i tempi di fermo del velivolo per le operazioni di ispezione e manutenzione.

È in questo contesto che si inseriscono le attività di ricerca sulle strutture intelligenti (*Smart Structures*) che, inglobando al loro interno opportune tipologie di sensori e attuatori, sono in grado di monitorare l'ambiente fisico operativo, raccoglierne ed interpretarne le informazioni (attraverso un centro di elaborazione dati) per poi rispondere ai cambiamenti dello stesso in modo appropriato attraverso gli attuatori.

Le smart structures hanno l'obiettivo di aumentare l'efficienza strutturale esibendo proprietà funzionali senza aggravio di peso, di costo e di affidabilità, mantenendo inalterate le elevate prestazioni dei materiali compositi.

L'impiego di sensori e attuatori inglobati nelle strutture offre molteplici vantaggi rispetto ai sistemi di trasduzione e attuazione convenzionali. Essi, infatti, sono protetti dagli effetti ambientali dalla struttura stessa in cui sono posti, inoltre possono essere collocati più facilmente nei punti critici della struttura anche in zone non raggiungibili attraverso un accesso esterno.

L'analogia morfologica con le fibre di rinforzo dei compositi, l'immunità alle interferenze con i campi elettrici e magnetici nonché la possibilità di gestire contemporaneamente più segnali (multiplexing), rendono le fibre ottiche (FO) i candidati ideali ad essere impiegati come sensori negli smart materials.

Le smart structures presentano, però, alcuni aspetti critici che è necessario prendere in considerazione. In particolare, l'inglobamento di sensori e attuatori all'interno dei laminati in composito comporta problemi di compatibilità termo-elastica, con conseguente nascita di stati di sforzo concentrati e difettosità che si traduce nella perdita di affidabilità delle strutture le cui prestazioni risultano fortemente penalizzate dalla loro invasività.

Per questo motivo fondamentale importanza assume l'interfaccia fra i sensori/attuatori ed il materiale ospite dalla quale dipende la mutua capacità di trasferimento del carico. Un elevato grado di adesione tra i costituenti è condizione imprescindibile per avere misure accurate, ma anche per evitare l'insorgere di danneggiamenti in zone di forte discontinuità per il materiale ospite [5].

Per poterne prevedere un'applicazione diffusa nell'industria dell'aviazione, le smart structures devono ancora essere analizzate in dettaglio e validate sotto tanti aspetti, da quelli tecnologici legati ai processi produttivi fino a quelli più prettamente funzionali. Con questi obiettivi l'attività di tesi qui presentata si è focalizzata sullo sviluppo di sistemi di misura ottici inglobabili in laminati in composito.

In particolare, il lavoro prende spunto da un programma di collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale (DIA) del Politecnico di Milano e Agusta-Westland (AW) volto alla realizzazione di un sistema di monitoraggio basato su fibre ottiche da implementare sul rotore di coda dell'elicottero AW-149 in previsione di prove TDH (*Tie Down Helicopter*) già programmate.

La conoscenza dello stato di deformazione durante la vita operativa di una struttura complessa ed essenziale come la pala dell'elicottero può fungere da discriminante tra la perdita catastrofica dell'intero velivolo a causa di cedimenti strutturali o la decisione di sostituire la sola pala.

I sensori ottici scelti per la strumentazione della pala del rotore sono reticoli di Bragg (*Fiber Brag Grating - FBG*) in grado di risentire sia delle variazioni di temperatura che delle deformazioni applicate. È quindi necessario implementare tecniche di misura particolari atte ad effettuare il disaccoppiamento del segnale dei sensori, essendo la struttura sottoposta a temperature differenti durante la vita operativa.

Oggigiorno non esiste una tecnica di disaccoppiamento del segnale dei sensori FBG considerata universalmente superiore alle altre, ma a seconda del campo di applicazione e delle specifiche richieste è preferibile optare per l'una o per l'altra tecnica.

Il lavoro presentato in questa tesi prevede quindi la realizzazione di due sistemi di misura in grado di rilevare le deformazioni e le variazioni di temperatura agenti su sensori FBG inglobati in una struttura di materiale composito rispettando i requisiti di progetto forniti.

In una prima fase è stato necessario esaminare in dettaglio il principio di funzionamento dei sensori ottici utilizzati e delle tecniche di disaccoppiamento generalmente impiegate allo scopo di metterne in evidenza le caratteristiche e gli aspetti potenzialmente critici. A seguito della scelta delle tecniche di misura adatte alla strumentazione del sistema in esame è stata svolta un'analisi tecnologica per definire la procedura realizzativa delle diverse tecniche. Infine, utilizzando provini opportunamente strumentati, sono state svolte prove di validazione dei sistemi di misura.

L'esposizione del lavoro di tesi svolto è stata così suddiviso:

- CAPITOLO 1: Presentazione della fibra ottica e dei sensori a reticolo di Bragg, evidenziandone vantaggi, caratteristiche ottiche e geometriche e principi di funzionamento;
- CAPITOLO 2: Descrizione dei principali sistemi di misura basati sul reticolo di Bragg attualmente utilizzati, evidenziandone vantaggi e problematiche;
- CAPITOLO 3: Esposizione delle tecniche di misura indagate, descrivendone principi di funzionamento e caratteristiche geometriche;
- CAPITOLO 4: Studio tecnologico delle tecniche di misura adottate e monitoraggio del ciclo produttivo;

- CAPITOLO 5: Attività sperimentale effettuata e presentazione dei risultati relativi ai sistemi di misura realizzati.

Capitolo 1

Sensori a Reticolo di Bragg

1.1 La fibra ottica

Le fibre ottiche sono filamenti di materiale dielettrico (come il vetro o i polimeri), che permettono di trasmettere al loro interno un campo elettromagnetico con perdite di potenza estremamente limitate.

La trasmissione del segnale è possibile andando a modificare l'indice di rifrazione della parte più esterna della fibra (chiamata *cladding*), ottenendo così una superficie di discontinuità rispetto al nucleo centrale (*core*) all'interno della quale resta confinato il segnale, grazie al fenomeno della riflessione totale.

Ogni singola fibra ottica è infatti composta da strati concentrici, come è possibile osservare in fig.1.1.

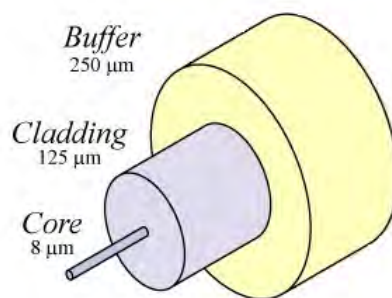


Figura 1.1: Struttura di una fibra ottica

Il core presenta dimensioni differenti a seconda che si tratti di fibre Monomodali, ossia che permettono la trasmissione di un solo raggio luminoso o modo di propagazione al proprio interno, o fibre Multimodali, nel caso sia

possibile la trasmissione di più modi di propagazione.

In particolare le fibre Monomodali hanno un diametro del core compreso tra gli 8 e i $10\mu m$, mentre per le fibre Multimodali il diametro del core risulta essere maggiore e compreso tra i 50 e i $62.5\mu m$.

Il cladding invece presenta un diametro di circa $125\mu m$ per le fibre standard. Le fibre ottiche Monomodali di ultima generazione, non ancora di largo impiego, possono presentare diametri del cladding minori, anche di 50, 60, $80\mu m$, a parità di diametro del core.

In fig.1.2 viene riportata una rappresentazione delle due differenti tipologie di fibre ottiche.

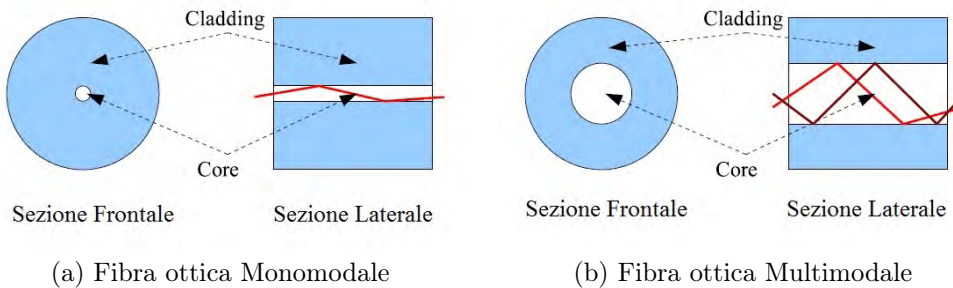


Figura 1.2: Confronto tra fibre ottiche Monomodali e Multimodali

Per offrire una migliore resistenza strutturale e protezione alla fibra, in fase di produzione viene rivestita con uno strato detto *buffer* o *coating*, di diametro variabile a seconda del materiale utilizzato.

1.1.1 Teoria delle fibre ottiche

Il fenomeno della propagazione della luce all'interno delle fibre ottiche, essendo i fenomeni di diffrazione trascurabili, può essere studiato nell'ipotesi di validità delle leggi che regolano l'ottica geometrica.

Le fibre ottiche trasmettono il segnale sfruttando il fenomeno della *riflessione totale interna* (TIR) in cui i raggi di luce passando attraverso un'interfaccia tra due mezzi trasparenti, caratterizzati da un'indice di rifrazione differente, subiscono il fenomeno della rifrazione e cambiano direzione secondo la *Legge di Snell*:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

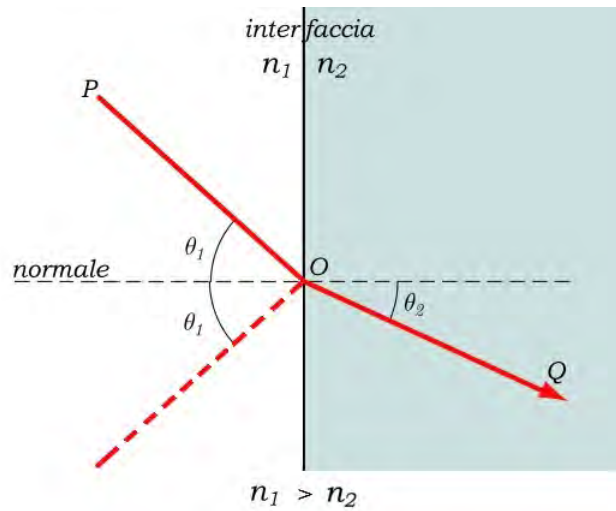


Figura 1.3: Legge di Snell

Quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione maggiore a uno minore, così come avviene nelle fibre ottiche, esiste un angolo limite $\theta_1 = \theta_{cr}$ in corrispondenza del quale $\theta_2 = 90^\circ$, ossia non vi è più la presenza del raggio rifratto. Per la determinazione dell'angolo limite vale la seguente relazione:

$$\sin\theta_{cr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.2)$$

In corrispondenza di un angolo di incidenza maggiore o uguale a θ_{cr} avviene la riflessione totale interna.

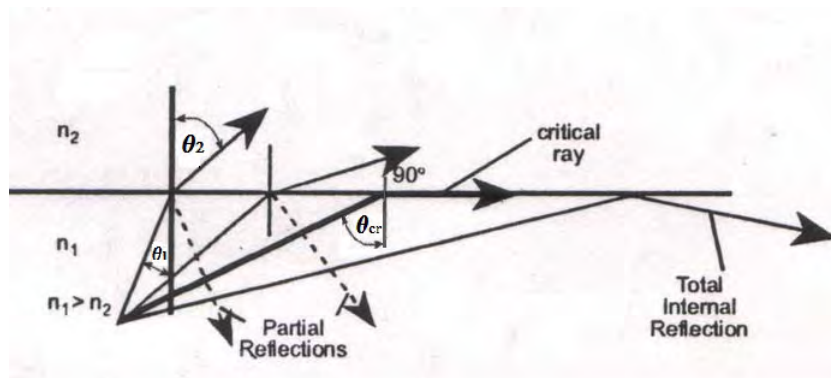


Figura 1.4: Riflessione totale interna

Risulta pertanto essenziale trasmettere la luce all'interno della fibra in modo che l'angolo di incidenza interno verifichi la suddetta condizione e il

segnale, rimanendo confinato nel nucleo (core), possa propagarsi per successive riflessioni fino a raggiungere il rivelatore. I raggi parzialmente rifratti, infatti, perdono potenza ad ogni riflessione e quindi scompaiono rapidamente. Considerando un raggio proveniente dall'esterno della fibra, il massimo angolo di incidenza che garantisce che la luce rifratta subisca il fenomeno della riflessione totale interna viene definito angolo di accettazione (θ_a). L'insieme di tutte le possibili traiettorie incidenti aventi angolo inferiore o uguale a quello di accettazione, costituisce il cono di accettazione mostrato in fig.1.5.

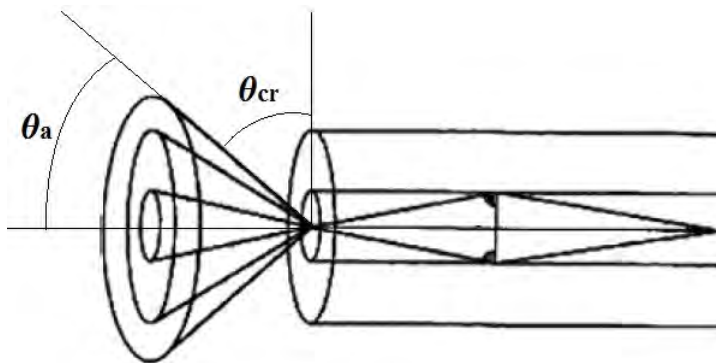


Figura 1.5: Cono di accettazione

Necessariamente durante l'utilizzo di fibre ottiche bisogna prestare attenzione ai raggi di curvatura, poiché raggi di curvatura ridotti possono generare angoli incidenti inferiori a quello critico, come mostrato in fig.1.6, provocando perdite di potenza.

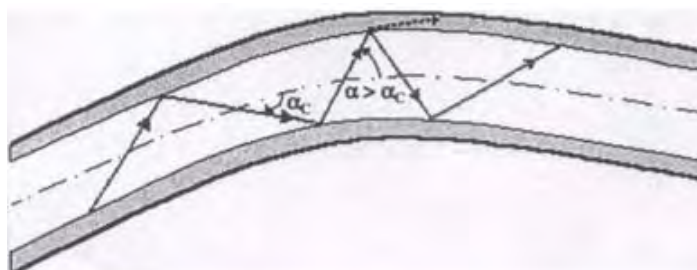


Figura 1.6: Raggi di curvatura eccessivi

1.1.2 Impiego delle fibre ottiche

Le fibre ottiche sono utilizzate principalmente nel campo delle telecomunicazioni, ma trovano sempre maggiore impiego anche in ambiti differenti. I vantaggi che le fibre ottiche presentano rispetto ad altri strumenti di trasmissione sono:

- elevata banda di trasmissione, data la lunghezza d'onda della luce è possibile tramettere un segnale che contiene molte informazioni;
- alta resistenza elettrica, quindi è possibile usare fibre vicino ad equipaggiamenti ad alto potenziale, o tra siti a potenziale diverso;
- immunità alle interferenze elettromagnetiche;
- leggerezza e compattezza;
- bassa attenuazione, che rende possibile la trasmissione su lunga distanza senza necessità di ripetitori;
- capacità di veicolare informazioni ad alta velocità;
- capacità di multiplexing delle informazioni sulla stessa fibra;
- bassa potenza contenuta nei segnali;
- ottima resistenza alle condizioni climatiche avverse.

La larghezza di banda del segnale accoppiato in fibra, ossia l'intervallo di frequenza in cui opera il segnale, può essere molto grande; va tuttavia considerato il fenomeno della dispersione e il coefficiente di attenuazione della fibra (in particolare il suo andamento in frequenza) affinché i raggi si propaghino senza perdere eccessiva potenza e non subiscano distorsioni. Risulta così possibile definire delle *finestre di trasmissione* che rappresentano gli intervalli di lunghezza d'onda, λ , entro i quali si hanno i minimi di attenuazione nel trasferimento del segnale.

Le tre principali finestre di trasmissione impiegate per le fibre ottiche sono di $850nm$, $1300nm$ e $1550nm$. La scelta di tali finestre è di facile comprensione visualizzando la fig.1.7, dove viene riportato l'andamento della perdita di segnale in funzione della lunghezza d'onda. Le tre finestre di trasmissione corrispondono ai tre minimi della funzione.

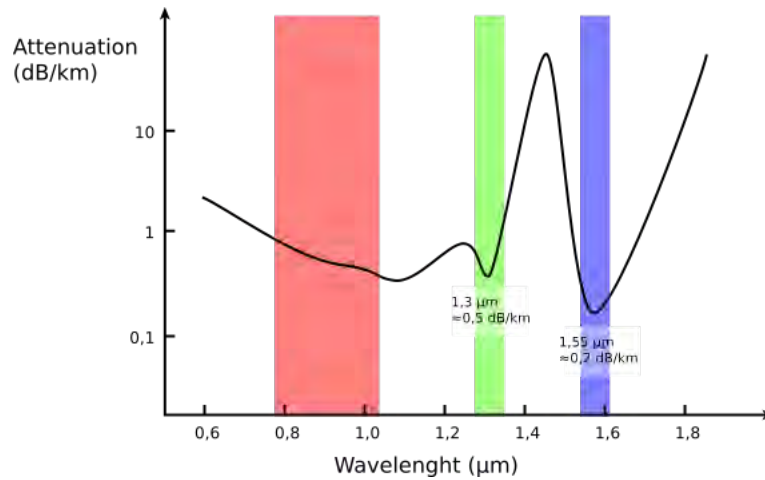


Figura 1.7: Finestre di trasmissione per le fibre ottiche

1.2 Reticolo di Bragg

I reticoli di Bragg, *Fiber Bragg Grating* (FBG), vengono realizzati mediante un'opportuna modulazione locale dell'indice di rifrazione del core di una fibra ottica fotosensibile, effettuata tramite una per mezzo di una sorgente energetica, come i raggi UV.

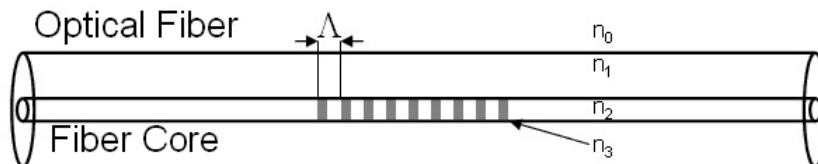


Figura 1.8: Reticolo di Bragg

Il tratto di fibra ottica modificato ha la funzione di filtro, permettendo quindi di selezionare delle particolari lunghezze d'onda. In particolare la luce viaggiando attraverso la fibra ottica viene in parte riflessa in corrispondenza di ogni piccola variazione dell'indice di rifrazione.

Per un piccolo range di lunghezze d'onda, i raggi luminosi riflessi agiscono costruttivamente percorrendo a ritroso la fibra ottica.

La riflessione massima avviene per la lunghezza d'onda chiamata *lunghezza d'onda di Bragg*, λ_B , ricavabile attraverso l'equazione fondamentale di Bragg, che la relaciona al periodo delle frange del reticolo, Λ , e all'indice di rifrazione effettivo, n_{eff} .

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.3)$$

Il contributo additivo dei raggi luminosi riflessi avviene quindi solo per quelle lunghezze d'onda legate al passo del reticolo e al particolare indice di rifrazione.

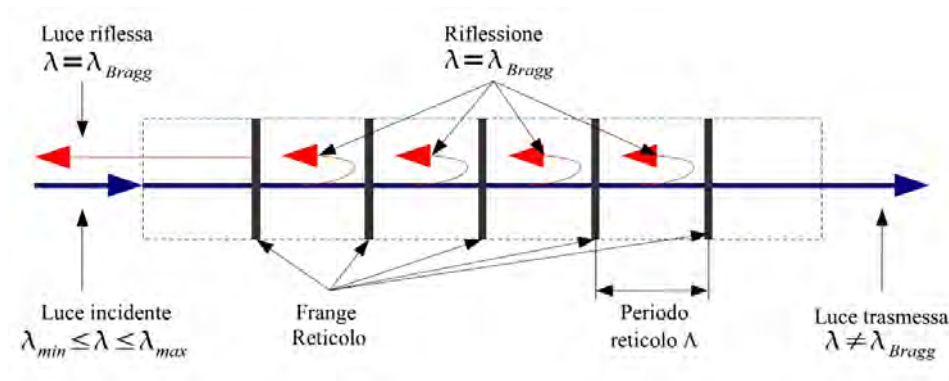


Figura 1.9: Riflessione della luce nel reticolo di Bragg

L'eq.(1.3) implica che la lunghezza d'onda di Bragg, subisca una variazione ad ogni alterazione delle proprietà fisiche o meccaniche del reticolo. L'applicazione di una deformazione provocherà ad esempio una variazione del passo del reticolo e dell'indice di rifrazione effettivo attraverso effetti ottici. In modo analogo il reticolo sarà soggetto a rispondere diversamente se soggetto a modifiche della temperatura. Per questo motivo i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come sensori per la misura di deformazione e temperatura attraverso la variazione della lunghezza d'onda di Bragg.

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

In fig.1.10 viene mostrata la variazione di intensità della risposta, al variare della lunghezza del reticolo (a parità di passo Λ).

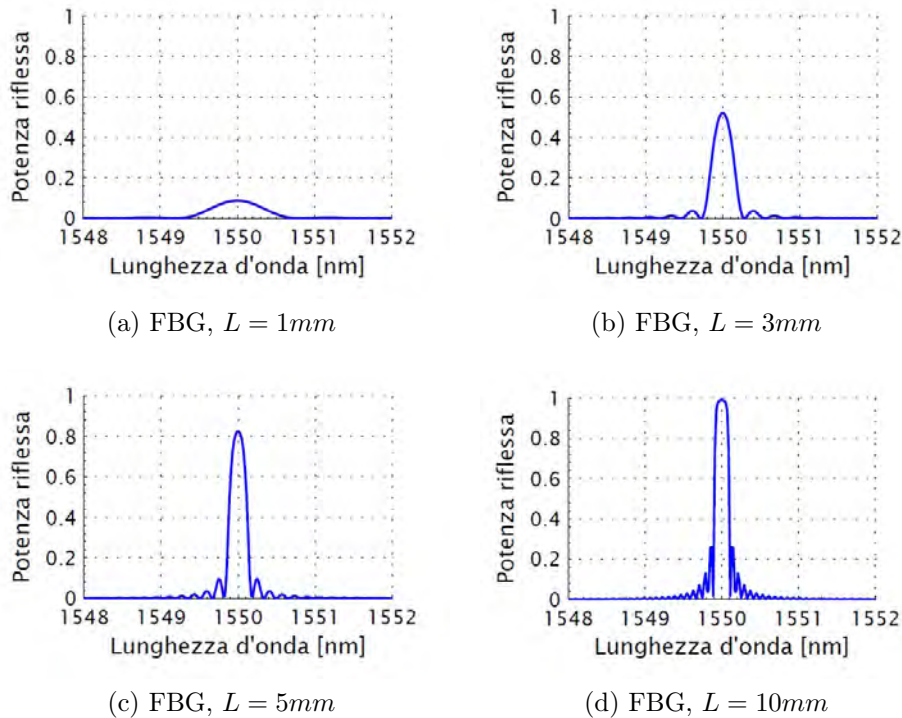


Figura 1.10: Confronto tra le intensità delle risposte per reticoli di Bragg uniformi di lunghezza differente

Un'altra variante che possono presentare i reticoli, oltre alla lunghezza, è la spaziatura tra le frange. In particolare esistono due differenti tipologie di reticolo:

- uniforme;
- non uniforme (chirped).

Il primo presenta una periodicità costante delle frange di interferenza, permettendo così la riflessione di una sola lunghezza d'onda luminosa, ottenendo uno spettro di riflessione stretto e centrato in corrispondenza della λ_B .

Contrariamente il reticolo chirped presenta una variazione monotona delle sue caratteristiche, ottenuta sia modificando la spaziatura delle singole frange, sia modificando l'indice di rifrazione del core. I reticoli chirped danno quindi luogo ad uno spettro di riflessione più ampio rispetto ai reticoli uniformi perché la riflessione della luce avviene a differenti lunghezze d'onda.

In fig.1.11 viene presentato un esempio delle differenti caratteristiche geometriche dei due reticoli e lo spettro di riflessione corrispondente.

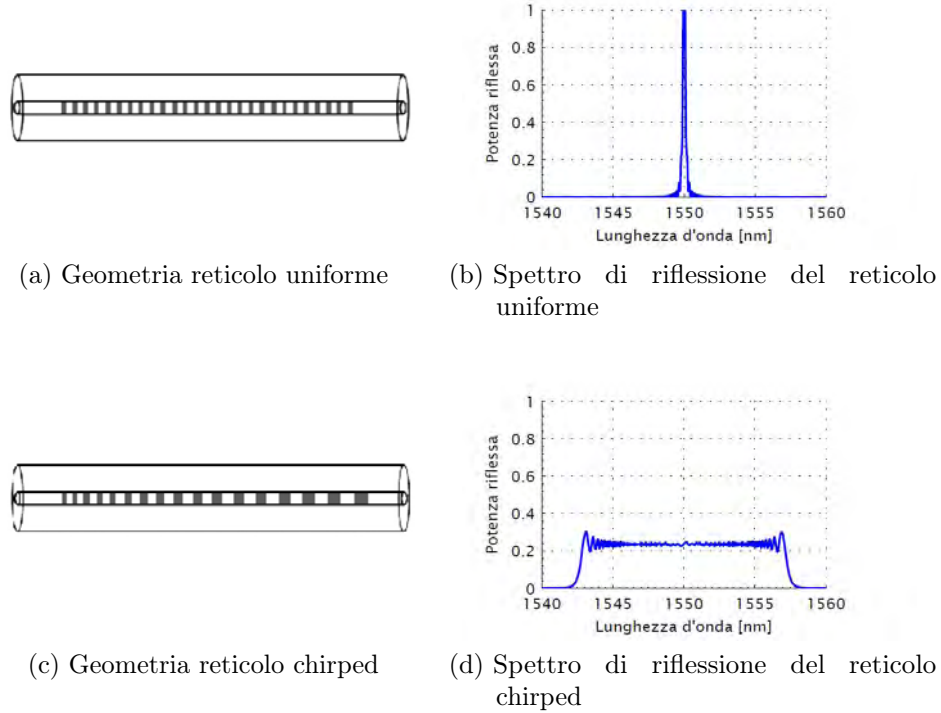


Figura 1.11: Confronto tra geometria e spettro di riflessione di un reticolo uniforme e uno chirped

1.2.1 Legame foto-termo-elastico

Nella sezione precedente è stato evidenziato come perturbazioni esterne possano provocare variazioni del periodo del reticolo di Bragg e dell'indice di rifrazione, andando conseguentemente a modificare la lunghezza d'onda di Bragg.

Differenziando l'eq.(1.3) risulta possibile scrivere la variazione di lunghezza d'onda di Bragg come segue [4]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = \varepsilon_1 + \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} \quad (1.4)$$

Dove $\Delta\Lambda$ e Δn_{eff} rappresentano rispettivamente la variazione del passo del reticolo di Bragg e la variazione dell'indice di rifrazione effettivo, mentre ε_1 è la deformazione lungo l'asse della fibra.

Per meglio comprendere la dipendenza della variazione di lunghezza d'onda

di Bragg a sollecitazioni meccaniche e termiche è possibile riscrivere l'eq.(1.4) come somma di tre contributi

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^\Lambda + \Delta\lambda_B^T + \Delta\lambda_B^\sigma \quad (1.5)$$

Il primo termine ($\Delta\lambda_B^\Lambda$) rappresenta la dipendenza alla variazione del passo del reticolo di Bragg

$$\Delta\lambda_B^\Lambda = \lambda_B \varepsilon_1 = \lambda_B (\varepsilon_1^\alpha + \varepsilon_1^\sigma) = \lambda_B (\alpha \Delta T + \varepsilon_1^\sigma) \quad (1.6)$$

Dove ε_1^α e ε_1^σ sono il contributo alla deformazione assiale dell'espansione termica e della deformazione dovuta a sforzi applicati. Il termine α rappresenta invece il coefficiente di espansione termica del core della fibra ottica.

I rimanenti due termini dell'eq.(1.5) rappresentano la variazione di lunghezza d'onda del reticolo di Bragg dovuta alla modifica dell'indice di rifrazione effettivo a causa di sollecitazioni meccaniche o termiche.

In particolare è possibile scrivere la variazione dell'indice di rifrazione come

$$\Delta n_{eff} = -\frac{n_{eff}^3}{2} \left[p_{12} \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) \varepsilon_2 - \left(\frac{2}{n_{eff}^3} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \right] \quad (1.7)$$

Dove p_{11} e p_{12} sono i coefficienti di Pockel del tensore opto-elastico e ε_2 la deformazione del sensore lungo la direzione radiale della fibra ottica. I termini $\Delta\lambda_B^T$ e $\Delta\lambda_B^\sigma$ saranno quindi

$$\Delta\lambda_B^T = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T, \quad (1.8)$$

$$\Delta\lambda_B^\sigma = -\lambda_B \frac{n^2}{2} [p_{12} \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) \varepsilon_2]. \quad (1.9)$$

Sostituendo le relazioni ricavate nell'eq.(1.5), si ottiene il legame *fototermo-elastico* completo

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ \varepsilon_1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} \varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12}) \varepsilon_2] \right\} + \lambda_B \left(\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right) \right) \Delta T. \quad (1.10)$$

È possibile semplificare l'eq.(1.10) andando a definire alcune costanti:

- costante foto-elastica

$$p_e = \frac{n^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \quad (1.11)$$

- coefficiente termo-ottico

$$\zeta = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (1.12)$$

Dove ν rappresenta il coefficiente di Poisson della fibra ottica.
 Il legame *foto-termo-elastico* può essere così riscritto

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_1 + \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T. \quad (1.13)$$

O più semplicemente

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon\varepsilon + K_T\Delta T. \quad (1.14)$$

Dove K_ε e K_T rappresentano le due costanti di proporzionalità.

Capitolo 2

Studio dello stato dell'arte

A partire dai primi anni '90 l'utilizzo di sensori ottici, basati sul reticolo di Bragg, è cresciuto notevolmente in virtù delle loro peculiari caratteristiche e della capacità di trasdurre sia variazioni di temperatura che di deformazione. La necessità di discriminare il contributo di tali grandezze alla variazione di lunghezza d'onda riflessa dal reticolo, ha parallelamente condotto allo sviluppo di molteplici tecniche di disaccoppiamento del segnale ottico.

Dopo un breve richiamo teorico sui principi di funzionamento, in questo capitolo, verranno esposte e confrontate le principali tecniche presenti in letteratura al fine di individuare quelle potenzialmente adatte ad essere applicate a sensori inglobati in laminati in composito.

In conseguenza ai requisiti di progetto in cui si colloca il presente lavoro di tesi, l'indagine è qui limitata alle tecniche basate sull'impiego di sensori a reticolo uniforme.

2.1 Principi di funzionamento dei sistemi di misura

Generalmente i sistemi di misura che disaccoppiano il segnale ottico si basano sull'impiego di due sensori FBG aventi differente risposta alle medesime perturbazioni.

Ricordando l'equazione fondamentale del legame foto-termo-elastico eq.(1.14), è possibile relazionare la variazione di lunghezza d'onda di Bragg con le deformazioni e le variazioni di temperatura applicate al reticolo. Utilizzando due sensori aventi differenti coefficienti di proporzionalità è possibile disaccoppiare i contributi delle due grandezze risolvendo il seguente sistema di due equazioni in due incognite:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

È evidente che in tal caso la risoluzione del sistema è possibile solamente se ai sensori è applicato lo stesso livello di sollecitazione.

Un'altra possibilità di impiego dei sensori FBG è rappresentata dall'impiego di soluzioni meccaniche tali da permettere di variare la deformazione percepita dal sensore lungo la sua lunghezza, comportando una modificazione della spaziatura del reticolo (ottenendo di fatto un sensore chirped). In questo caso la discriminazione tra deformazione e temperatura non verrà più effettuata andando ad analizzare unicamente lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg, ma sarà necessario analizzare la risposta spettrale del sistema.

2.2 Sistemi di misura

2.2.1 Sistemi basati su sensori FBG iscritti in fibre di sezione differente

I sistemi di misura qui presentati permettono di disaccoppiare le risposte alle sollecitazioni termiche e meccaniche utilizzando due sensori FBG posti su fibre ottiche aventi sezioni differenti.

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l_1 + l_2}. \quad (2.2)$$

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

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 + l_2}{l_1 \left(1 + \frac{A_1 l_2}{A_2 l_1}\right)} \varepsilon, \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{l_1 + l_2}{l_2 \left(1 + \frac{A_2 l_1}{A_1 l_2}\right)} \varepsilon \quad (2.4)$$

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

Sostituendo (2.3) e (2.4) nell'eq.(1.13) rappresentante il legame foto-termo-elastico, la variazione della lunghezza d'onda per i due sensori FBG può essere così riscritta:

$$\Delta \lambda_{B1} = k_\varepsilon \frac{l_1 + l_2}{l_1 \left(1 + \frac{A_1 l_2}{A_2 l_1}\right)} \varepsilon + K_{T1} \Delta T = k_{\varepsilon 1} \varepsilon + K_{T1} \Delta T, \quad (2.5)$$

$$\Delta \lambda_{B2} = k_\varepsilon \frac{l_1 + l_2}{l_2 \left(1 + \frac{A_2 l_1}{A_1 l_2}\right)} \varepsilon + K_{T2} \Delta T = k_{\varepsilon 2} \varepsilon + K_{T1} \Delta T. \quad (2.6)$$

Noti quindi i coefficienti di proporzionalità dei due sensori alla deformazione e alla temperatura, risulta possibile risolvere il sistema di due equazioni in due incognite eq.(2.1) e ottenere così i valori di deformazione e temperatura.

Variazione della sezione mediante giunzione *splice* di fibre differenti

Una prima configurazione basata sulla tecnica di misura presentata può essere ottenuta mediante giunzione *splice* di fibre ottiche aventi diametro differente con i reticoli inscritti in prossimità della giunzione stessa [6], come mostrato in fig.2.1.

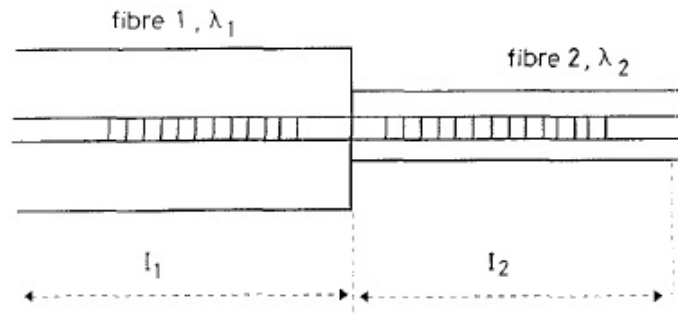


Figura 2.1: Variazione della sezione mediante giunzione *splice* di fibre differenti

Le sollecitazioni agenti sono quindi differenti in base al rapporto tra le aree delle fibre ottiche.

Questa tecnica non è adatta per realizzare un sistema di misura inglobato in strutture in composito in quanto la deformazione percepita dai sensori non sarebbe proporzionale al rapporto tra le aree delle fibre ottiche su cui sono scritti. Essendo inglobati e quindi vincolati alla struttura ospite la deformazione percepita sarebbe costante e uguale a quella della struttura stessa.

Inoltre, un sistema di misura di questo tipo presenta non poche difficoltà realizzative principalmente legate alla fase di giunzione delle fibre. L'operazione di fusione delle fibre già di per sé complessa essendo le stesse di diametro differente è difatti resa ancor più critica per la presenza ravvicinata dei due sensori.

Tabella 2.1: Variazione della sezione mediante giunzione *splice* di fibre differenti

Vantaggi	Svantaggi
Facilità di identificazione delle deformazioni e delle variazioni di temperatura	Inadeguatezza all'inglobamento.
	Difficoltà realizzative.

Variazione della sezione mediante giunzione *overlap* di fibre

Un'altra tecnica per ottenere sezioni differenti in corrispondenza dei sensori è quella di unire per sovrapposizione due fibre posizionando uno solo dei due reticoli nella zona di sovrapposizione [7]. La fig.2.2 esemplifica il caso in cui entrambi i reticoli sono iscritti nella medesima fibra ma, evidentemente, la tecnica funziona anche se il sensore FBG2 è posizionato sulla fibra inferiore.

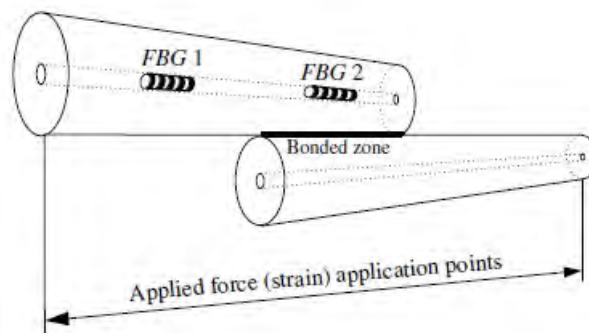


Figura 2.2: Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre

Una possibile problematica di questa tecnica potrebbe essere legata all'incertezza sulla dimensione della sezione maggiore la quale dipende dalla quantità di resina deposta in fase di incollaggio. È evidente infatti l'impossibilità di avere un controllo rigoroso essendo tale operazione eseguita manualmente.

Conseguentemente la determinazione dei coefficienti di proporzionalità dovrebbe essere più complessa.

Tabella 2.2: Variazione della sezione mediante giunzione overlap di fibre

Vantaggi	Svantaggi
Facilità di identificazione delle deformazioni e delle variazioni di temperatura.	Inadeguatezza all'inglobamento.
Utilizzo di fibre aventi le medesime caratteristiche.	Incerteza sui coefficienti di proporzionalità.

2.2.2 Sistema basato sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo

Questa tecnica è basata sull'ottenimento di risposte differenti dei sensori soggetti alla medesima sollecitazione termica. Ciò che è possibile vincolando uno dei due reticoli ad un substrato di materiale avente diverso coefficiente di dilatazione termica (CTE) [9].

Una variante di questa tecnica è quella riportata in fig.2.3 laddove è utilizzato un solo reticolo, parte del quale adeso al substrato.

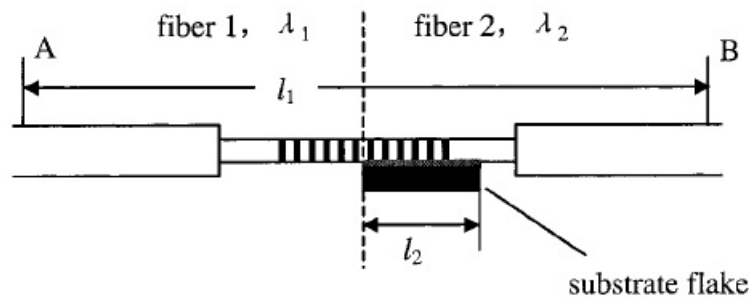


Figura 2.3: Sensore FBG parzialmente vincolato ad un substrato di materiale differente

È importante utilizzare per il substrato un materiale avente CTE di almeno un ordine di grandezza differente rispetto a quello della fibra ottica al fine di evitare un malcondizionamento del sistema.

La risposta alla variazione di temperatura e di deformazione del sensore è quindi differente per i due tratti di reticolo in quanto il coefficiente di espansione termica maggiore comporta una variazione del passo del reticolo, sollecitato termicamente, più ragguardevole. Si vengono quindi a formare due differenti lunghezze d'onda di Bragg, dipendenti dal differente passo delle frange.

La variazione del coefficiente di proporzionalità alla deformazione è invece dipendente dalle dimensioni del substrato a cui parte del reticolo è vincolata. Nota la matrice dei coefficienti di proporzionalità è così possibile determinare le sollecitazioni agenti risolvendo il sistema di due equazioni in due incognite eq.(2.1).

La tecnica non è adatta ad essere inglobata all'interno di strutture in composito in quanto le deformazioni meccaniche agenti sulle due porzioni del sensore sono le medesime essendo esso vincolato alla struttura. Inoltre, la marcata differenza tra il coefficiente di espansione termica dei materiali

utilizzati potrebbe provocare l'instaurarsi di indesiderati sforzi di natura termo-elastica all'interno della struttura.

Un altro aspetto problematico è legato alla sensibilità del sistema. In seguito a sollecitazioni di bassa intensità lo spettro delle due porzioni del reticolo potrebbe risultare parzialmente sovrapposto rendendo difficoltosa l'individuazione delle lunghezze d'onda.

Tabella 2.3: Sistema basato sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo

Vantaggi	Svantaggi
Impiego di un singolo sensore FBG.	Inadeguatezza all'inglobamento. Identificazione delle lunghezze d'onda di Bragg difficoltosa.

2.2.3 Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante

Un ulteriore tecnica è quella basata su due FBG inseriti in un tubo capillare [8], come mostrato in fig.2.4.

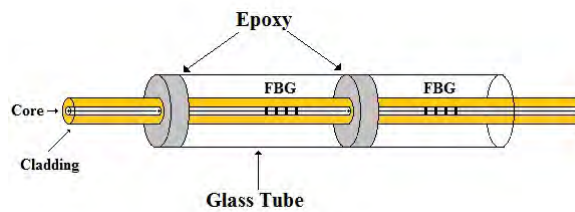


Figura 2.4: Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante

Uno dei due sensori è vincolato al capillare ad entrambi gli estremi mediante resina epossidica. In questo modo il capillare permette allo stato di sforzo agente sulla fibra di bypassare la zona del reticolo permettendone l'isolamento dalla deformazione.

Esso è quindi soggetto alla sola variazione di temperatura, nota la quale è possibile utilizzare il secondo sensore, assoggettato ad entrambe le sollecitazioni, per determinare la deformazione.

Questa zona del sistema può essere rappresentata da un modello in parallelo fra fibra e capillare secondo la teoria della micromeccanica attraverso il

quale è possibile esprimere il rapporto fra le rigidzze assiali:

$$\frac{A_{capillare} E_{capillare}}{A_{FO} E_{FO}}$$

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

Questa tecnica presenta principalmente due tipi di problematiche. In primo luogo non risulta adatta ad essere inglobata all'interno di strutture in composito. Il tubo capillare, infatti, essendo in tal caso vincolato alla struttura ospite si deforma congruentemente ad esso. I due FBG risultano pertanto deformati della stessa quantità invalidando il funzionamento del sistema.

La seconda problematica riscontrata è invece di tipo produttivo e riguarda la realizzazione del vincolo interno al capillare, che, se non correttamente eseguito, potrebbe provocare l'adesione del sensore al capillare stesso inficiando anche in questo caso il funzionamento del sistema.

Tabella 2.4: Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante

Vantaggi	Svantaggi
Facilità di identificazione delle deformazione e delle variazioni di temperatura.	Inadeguatezza all'inglobamento.
	Realizzazione difficoltosa.

2.2.4 Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante

Una variante della tecnica di cui sopra è basata sul posizionamento del capillare ad un estremo della fibra ottica includendo in esso un tratto di fibra dotato di FBG.

Occludendo le estremità del capillare con resina epossidica è possibile ottenere un perfetto isolamento del sensore alle deformazioni meccaniche [10]. A differenza della tecnica precedente le deformazioni subite dal capillare non possono essere trasferite al reticolo posizionato al suo interno.

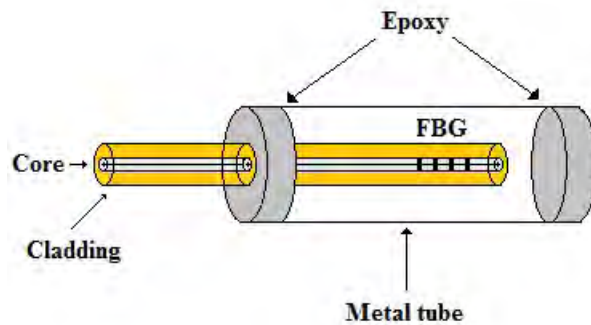


Figura 2.5: Sensore FBG di estremità posto in un capillare

Il coefficiente di proporzionalità rispetto alla deformazione del sensore realizzato è pertanto nullo ed è possibile quindi utilizzare il sensore per misurare la sola variazione di temperatura.

La determinazione della deformazione strutturale agente viene invece effettuata mediante un secondo sensore FBG vincolato alla struttura e quindi soggetto sia ai carichi termici che meccanici.

Depurando la risposta del sensore dal contributo delle sollecitazioni termiche è possibile ricavare la deformazione agente.

La tecnica qui presentata risulta adatta per la realizzazione di un sistema di misura inglobato in strutture in composito nel caso in cui il sensore posto nel capillare sia adeguatamente isolato, ma la presenza del capillare aumenta il grado di invasività nella struttura.

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

Tabella 2.5: Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante

Vantaggi	Svantaggi
Tecnica di misura adatta all'inglobamento.	Invasività.
Facilità di identificazione delle deformazioni e delle variazioni di temperatura.	Sistema non ridondante.

2.2.5 Sistema basato sull'acquisizione di un segnale direttamente compensato in temperatura

Questa tecnica di misura permette la determinazione della deformazione agente sul sensore effettuando una compensazione diretta della temperatura ovvero rendendo la risposta del reticolo invariante alla temperatura. Ciò che può essere ottenuto annullando il coefficiente di proporzionalità fra le due grandezze nell'eq.(2.7)

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T. \quad (2.7)$$

Il sistema di misura rappresentato in fig.2.6 è realizzato mediante un sensore FBG inglobato in un tubetto di materiale polimerico a liquido cristallino (LPC) e resina epossidica [11].

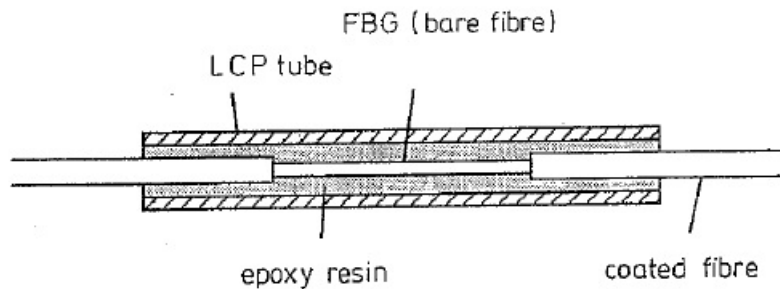


Figura 2.6: Sensore FBG posto in una struttura con tubetto LPC

Il CTE negativo del polimero cristallino consente, dimensionando opportunamente il tubetto, di ottenere un CTE complessivo del sistema (tubetto LPC, resina e fibra) uguale ed opposto al coefficiente termo-ottico.

Il sistema di misura è adatto ad essere inglobato in strutture di diverso tipo in quanto la compensazione diretta della temperatura è garantita dimensionando opportunamente i diversi componenti impiegati. Chiaramente la presenza del tubo polimerico aumenta notevolmente l'invasività del sistema.

Tabella 2.6: Sistema basato sull'acquisizione di un segnale direttamente compensato in temperatura

Vantaggi	Svantaggi
Tecnica di misura adatta all'inglobamento.	Invasività.
Deformazione strutturale facilmente identificabile	Variazione della temperatura non determinabile.

2.2.6 Sistema basato su FBG sovrascritti

Il sistema è basato sull'impiego di due reticoli di Bragg a diverse λ_B inscritti nella medesima posizione [12].

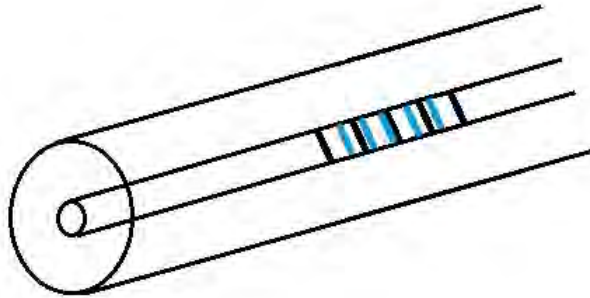


Figura 2.7: Sensori FBG sovrascritti

Per realizzare un sistema di misura robusto è opportuno che i due reticoli siano in grado di riflettere lunghezze d'onda posizionate in finestre differenti, ad esempio a 1300 e $1550nm$. In questo modo i coefficienti di proporzionalità alle sollecitazioni (K_ϵ e K_T), e conseguentemente la risposta dei sensori in termini di variazione di lunghezza d'onda, sono sufficientemente differenti affinché sia possibile risolvere il sistema eq.(2.1) senza che vi siano problemi di malcondizionamento della matrice dei coefficienti.

Ciò comporta l'utilizzo di sorgenti luminose in grado di emettere onde in entrambe le finestre.

Il sistema di misura può essere inglobato senza problemi e a differenza delle tecniche facenti uso di tubi capillari o polimerici essa ha un grado di invasività decisamente inferiore.

Inoltre, essendo i sensori collocati sono soggetti alle medesime sollecitazioni in tutte le condizione di carico.

Tabella 2.7: Sistema basato su FBG sovrascritti

Vantaggi	Svantaggi
Tecnica di misura adatta all'inglobamento. Bassa invasività. Colocazione dei sensori.	Necessità di differenti sorgenti luminose.

2.2.7 Sistema basato su sensori phase-shifted

La tecnica di misura qui presentata si basa sull'impiego di due sensori FBG aventi le medesime lunghezze d'onda di Bragg (λ_B) posti iscritti nella medesima fibra e separati da un tratto avente indice di rifrazione differente, come mostrato in fig.2.8.

La zona frapposta tra i sensori provoca una variazione di fase dello spettro del segnale riflesso dipendente dalle proprie caratteristiche ottiche e geometriche [13].

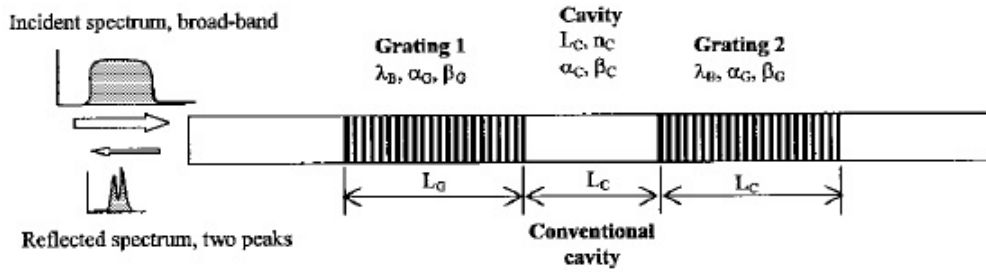


Figura 2.8: Sensori p-shifted

La differenza della fase dei due spettri, se correttamente realizzata, permette di modificare lo spettro di riflessione scomponendo il picco iniziale centrato su λ_B in due differenti picchi centrati a lunghezze d'onda diverse. Definito un coefficiente M dipendente dall'ampiezza dei due picchi, è possibile scrivere un nuovo sistema di due equazioni in due incognite per il disaccoppiamento dei segnali:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_{picco} \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

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

Tabella 2.8: Sistema basato su sensori phase-shifted

Vantaggi	Svantaggi
Tecnica di misura adatta all'inglobamento. Bassa invasività.	Determinazione delle sollecitazioni complessa.

2.2.8 Sistema basato sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo

Questo sistema consiste nell'inglobare un sensore FBG all'interno di un volume di polimero a sezione opportunamente rastremata [16], come mostrato in fig.2.9.

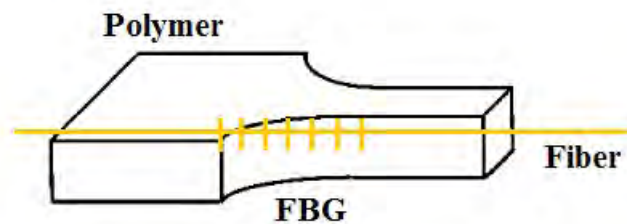


Figura 2.9: Sensore FBG inserito in un volume polimerico rastremato

Per effetto della sua rastremazione, una sollecitazione assiale applicata al volume provoca la chirpatura del sensore FBG. Diminuendo la sezione resistente la zona rastremata subisce infatti una deformazione via via crescente. Come risultato si ottiene un reticolo con risposta di tipo chirped. La misura dello sforzo e della variazione di temperatura viene realizzata osservando la variazione della larghezza dello spettro di risposta (conseguenza della chirpatura che si genera sul reticolo) e lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg. Noto lo sforzo è possibile ricavare a posteriori la deformazione della struttura.

Il sistema di misura non è adatto all'inglobamento, in quanto il polimero, se vincolato, subisce la medesima deformazione per tutta la sua lunghezza, mantenendo così il passo del reticolo uniforme.

Tabella 2.9: Sistema basato sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo

Vantaggi	Svantaggi
Impiego di un singolo sensore FBG. Protezione del sensore	Inadeguatezza all'inglobamento. Determinazione delle sollecitazioni complessa.

2.3 Confronto tra le differenti tecniche di misura

Come evidenziato nelle sezioni precedenti, ogni sistema di misura ha peculiarità tali da favorirne l'impiego in differenti situazioni. Per permettere l'individuazione delle tecniche più adatte allo studio delle problematiche affrontate in questo lavoro di tesi, è stato realizzato un confronto in tab.2.11 tra i differenti sistemi di misura presentati.

In particolare, come parametri di confronto sono stati scelti degli indici in grado di definire la facilità realizzativa e di utilizzo del sistema di misura, i costi che è necessario affrontare e la possibilità di inglobamento all'interno di strutture in composito evidenziandone il grado di invasività.

Il confronto è stato reso possibile definendo una scala di valori in grado di valutare, in prima approssimazione, il peso degli indici considerati. La scala di valori è stata così definita:

Tabella 2.10: Indice della scala di valori

Valore	Definizione
1	Basso
2	Medio
3	Alto

L'indice 3 applicato per la voce dei costi è associato ad un costo minore per la realizzazione del sistema di misura.

Tabella 2.11: Confronto tra i diversi sistemi di misura

Sistema di misura	Facilità realizzativa	Costi	Facilità di impiego	Possibilità di inglobamento	Non invasività	Totale
Variatione della sezione mediante giunzione splice di fibre differenti	2	2	3	NO		7
Variatione della sezione mediante giunzione overlap di fibre	2	2	2	NO		6
Sistema basato sulla variazione del coefficiente di dilatazione termica del reticolo	2	3	2	NO		7
Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare passante	2	2	2	NO		6
Sistema basato sull'isolamento meccanico del reticolo mediante tubo capillare non passante	3	2	3	SI	2	10
Sistema basato sull'acquisizione di un segnale direttamente compensato in temperatura	1	2	3	SI	1	7
Sistema basato su FBG sovrascritti	3	2	3	SI	3	11
Sistema basato su sensori phase-shifted	2	1	1	SI	3	7
Sistema basato sulla trasformazione uniforme/chirped del reticolo	1	2	3	NO		6

Capitolo 3

Progettazione del sistema di misura

In questo capitolo vengono descritti i requisiti di progetto a cui si è fatto riferimento per scegliere la tecnica di disaccoppiamento del segnale dei sensori FBG più adatta al caso di studio.

Vengono, inoltre, presentati i principi di funzionamento su cui tali tecniche si basano, evidenziando alcune scelte realizzative effettuate.

3.1 Requisiti di progetto e scelta delle tecniche da indagare

Il lavoro di tesi qui presentato prende spunto dal progetto congiunto DIA e AW volto alla realizzazione di un sistema di monitoraggio basato su fibre ottiche da implementare sul rotore di coda dell'elicottero AW-149 in previsione di prove TDH già programmate.

I requisiti molto stringenti sia nei tempi che nelle specifiche tecniche assunte nell'ambito del progetto, unitamente alle difficoltà intrinseche legate alla necessità di trasferire il segnale tra parti in mutuo movimento, hanno profondamente influenzato la scelta della tecnica di disaccoppiamento del segnale da impiegare. In particolare la scelta è ricaduta su tecniche che presentino le seguenti caratteristiche:

- realizzabilità del sistema nel breve periodo;
- disponibilità della strumentazione in commercio;
- possibilità installazione della strumentazione in radice pala.

Attualmente in campo elicotteristico sono già in uso dispositivi dedicati, denominati slip-ring, per la trasmissione dei segnali elettrici.

Pur esistendo anche versioni di questo dispositivo per la trasmissione di segnali ottici, l'applicabilità al caso in esame rappresenta allo stato attuale una difficoltà pressoché insormontabile nei tempi del presente progetto.

L'unica valida alternativa è quindi rappresentata dall'installazione dell'unità optoelettronica a bordo pala, così da trasformare il segnale ottico in elettrico e poter sfruttare lo slip-ring elettrico già montato sul velivolo.

Si comprende quindi come il requisito di installabilità della strumentazione optoelettronica sul rotore (e quindi delle ridotte dimensioni dello stesso nonché della sua robustezza alle sollecitazioni) sia un requisito fondamentale del sistema.

Per i medesimi motivi la tecnica di misura basata sull'impiego di una fibra ottica avente due sensori iscritti sullo stesso tratto non è stata presa in considerazione, in quanto i sensori FBG posti in finestre differenti richiederebbero l'impiego di sistemi di interrogazione più evoluti di dimensioni maggiori. Analogamente si è deciso di non utilizzare un sistema di misura basato sull'impiego di sensori phase-shifted.

Avendo la necessità di effettuare misure di temperatura non sono state quindi considerate le tecniche in grado di effettuare una compensazione termica diretta quali ad esempio la tecnica del tubo LPC precedentemente illustrata.

Si è quindi scelto di indagare la tecnica facente uso di due sensore a reticolo di Bragg uno dei quali posizionato sull'estremo di una fibra ottica e inserito all'interno di un tubo capillare metallico (che nel seguito indicheremo con il nome tecnica capillare d'estremità).

Pur essendo importante limitare l'invasività del sistema sul comportamento meccanico e sulla durabilità del componente strutturale, avendo come target l'effettuazione delle sole prove TDH, è stato possibile rilassare questa condizione.

Non di meno, l'inglobamento dei capillari nel composito potrebbe potenzialmente essere accettato a condizione di verificare l'adesione tra il capillare stesso e la matrice.

La configurazione tecnologica considerata è, come richiesto, di semplice implementazione, in quanto necessita di soli due sensori FBG posti nella stessa finestra, una sorgente ed un interrogatore opto-elettronico entrambi posizionati su una sola finestra spettrale.

La schematizzazione del sistema di misura adottato è rappresentata nella fig.3.1.

La limitazione presentata da questa tecnica di misura è rappresentata dalla necessità di porre il sensore FBG sull'estremo della fibra ottica, impedendo

così il seguito della fibra stessa oltre il capillare.

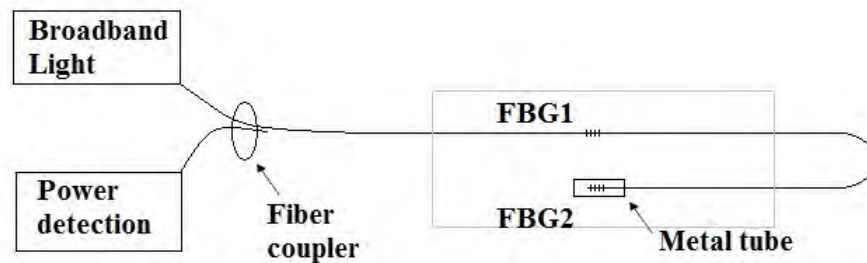


Figura 3.1: Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in estremità di una fibra ottica e inglobato in un tubo capillare

Seguendo i requisiti di progetto sopra citati, ma volendo superare le limitazioni presentate dalla configurazione tecnologica adottata, in una fase successiva del lavoro di tesi è stata sviluppata un'altra tecnica di misura basata anch'essa sull'uso di due reticoli di Bragg uno dei quali posto all'interno di tubo capillare passante (che nel seguito indicheremo con il nome tecnica capillare passante).

A differenza del primo sistema di misura indagato, la fibra ottica non è più interrotta potendo così trasmettere il segnale a valle del capillare stesso. Ciò consente una ridondanza del segnale.

3.2 Principi di funzionamento

Il principio di funzionamento della prima tecnica studiata è molto semplice e permette la discriminazione tra sollecitazioni termiche e meccaniche utilizzando due sensori FBG e un tubo capillare.

Seguendo la schematizzazione di fig.3.1, un sensore a reticolo di Bragg (FBG1) viene inglobato direttamente all'interno della struttura in composito. Esso è quindi soggetto alle deformazioni, sia di tipo meccanico che termico, proprie della struttura.

In particolare, andando ad analizzare i coefficienti di proporzionalità, che legano la variazione di lunghezza d'onda del reticolo di Bragg alle deformazioni e alle variazioni di temperatura a cui è soggetto, si ottengono le seguenti relazioni:

$$K_{\varepsilon 1} = \lambda_{B1}(1 - p_{e\ ris}), \quad (3.1)$$

$$K_{T1} = \lambda_{B1}(\zeta + \alpha_{ris}) \quad (3.2)$$

dove α_{ris} rappresenta il coefficiente di espansione termica ottenuto come combinazione dei coefficienti di espansione termica della fibra ottica (FO) e del materiale composito, ricavato secondo la legge della micromeccanica [19].

$$\alpha_{ris} = \frac{\alpha_{FO}S_{FO}E_{FO} + \alpha_{matrice}S_{matrice}E_{matrice} + \alpha_{fibra}S_{fibra}E_{fibra}}{S_{FO}E_{FO} + S_{matrice}E_{matrice} + S_{fibra}E_{fibra}} \quad (3.3)$$

all'interno della quale i termini α_i rappresentano i coefficienti di espansione termica, S_i le superfici ed E_i il modulo di Young dei diversi componenti.

Le stesse considerazioni possono essere effettuate sul coefficiente di Poisson presente nel termine $p_{e\ ris}$ dell'eq.(3.1), la cui incidenza risulta però essere molto minore rispetto a quella della variazione del coefficiente di espansione termica.

Il secondo sensore a reticolo di Bragg utilizzato (FBG2) è, come precedentemente affermato, disposto sull'estremità della fibra ottica.

L'isolamento del sensore FBG, rispetto alle sollecitazioni meccaniche, viene realizzato ponendo il sensore all'interno di un tubo capillare metallico e prestando attenzione affinché il tratto di fibra ottica interno al capillare sia libero da vincoli ad eccezione del vincolo di estremità, come mostrato in fig.3.2.

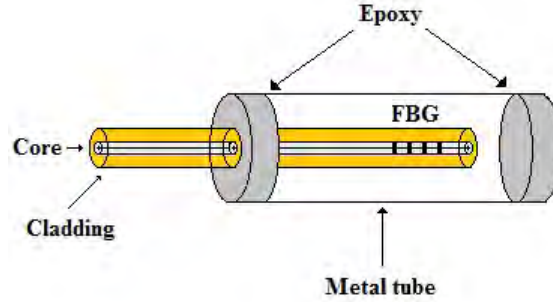


Figura 3.2: Schematizzazione del posizionamento del sensore di estremità nel tubo capillare

Il sensore è in questo modo soggetto alle sole sollecitazioni termiche tramite il coefficiente termo-ottico ed il coefficiente di dilatazione termica della fibra ottica.

Il coefficiente di proporzionalità della risposta del sensore alla deformazione è dunque nullo. Il tratto di fibra ottica interno al capillare è infatti meccanicamente isolato e le deformazioni subite dal capillare stesso non vengono trasmesse.

$$K_{\varepsilon 2} = 0, \quad (3.4)$$

$$K_{T2} = \lambda_{B2}(\zeta + \alpha_{FO}). \quad (3.5)$$

Conoscendo i coefficienti di proporzionalità alla risposta dei sensori a reticolo di Bragg utilizzati, risulta possibile riscrivere il sistema, di due equazioni in due incognite, nel modo seguente:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

Osservando il sistema (3.6) è possibile notare come la variazione di temperatura, rispetto ad una condizione di riferimento, possa essere immediatamente determinata andando ad invertire la seconda equazione del sistema.

La variazione di temperatura può essere così ricavata:

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T2}} \Delta\lambda_2. \quad (3.7)$$

Sostituendo l'eq.(3.7) nella prima equazione del sistema (3.6) è possibile determinare la deformazione applicata alla struttura:

$$\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon 1}} \left(\Delta\lambda_1 - \frac{K_{T1}}{K_{T2}} \Delta\lambda_2 \right). \quad (3.8)$$

La seconda tecnica indagata, di cui non si è trovata documentazione in letteratura, viene realizzata utilizzando, anche in questo caso, due sensori a reticolo di Bragg ed un tubo capillare metallico.

Come precedentemente introdotto, nella seconda tecnica indagata il sensore inserito all'interno del capillare metallico non è posizionato sull'estremità della fibra ottica. Conseguentemente esso risulta essere soggetto alle deformazioni della struttura.

Il sistema di misura è schematizzato in fig.3.3 all'interno della quale si può notare il passaggio della fibra ottica attraverso il capillare.

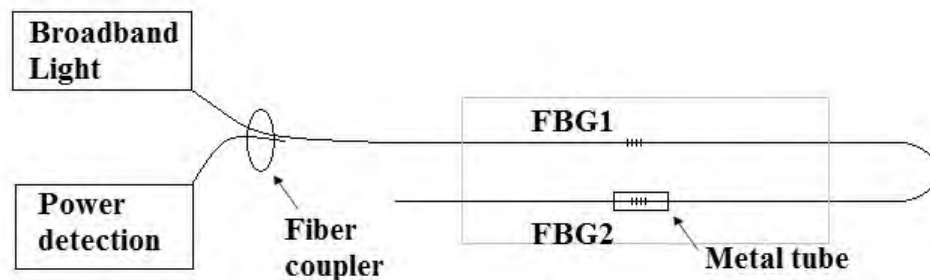


Figura 3.3: Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in un tubo capillare ma su fibra ottica passante attraverso il capillare

Il principio di funzionamento di questa configurazione tecnologica si basa nuovamente sull'inversione del sistema (2.1).

La risposta differenziata per i due sensori non viene realizzata scegliendo sensori disposti in finestre diverse, ma utilizzando due sensori posti nella finestra di $1550nm$ e andando a modificare meccanicamente i coefficienti di proporzionalità a deformazione e temperatura.

In particolare, il coefficiente di proporzionalità relativo alla temperatura risulta essere il più semplice da variare in quanto è sufficiente inglobare il

senso a reticolo di Bragg direttamente nel materiale composito.

A causa delle differenti caratteristiche meccaniche del materiale composito e della fibra ottica, infatti, si ottiene una variazione del coefficiente di espansione termica come evidenziato dall'eq.(3.3).

I coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura per i due sensori sono quindi differenti e possono essere così riscritti:

$$K_{T1} = \lambda_{B1}(\zeta + \alpha_{ris}), \quad (3.9)$$

$$K_{T2} = \lambda_{B2}(\zeta + \alpha_{FO}) \quad (3.10)$$

dove il pedice 1 è riferito al sensore a reticolo di Bragg inglobato direttamente nel materiale composito, mentre il pedice 2 si rifà al sensore a reticolo di Bragg inglobato nella struttura, ma protetto dal capillare metallico.

Evidentemente il comportamento del sensore FBG2 è tale solo nel caso in cui il reticolo sia efficacemente isolato. Se questo non fosse possibile, il coefficiente di espansione termica del sensore si modificherebbe secondo le leggi della micromeccanica.

A differenza della risposta alla variazione di temperatura, dove si agisce sul coefficiente di proporzionalità del sensore direttamente inglobato nel provino in composito, la risposta alla deformazione viene disaccoppiata per i due reticoli andando a modificare il coefficiente di proporzionalità rispetto alla deformazione (K_ϵ) del sensore posto nel tubo capillare.

La fibra ottica, vincolata in entrambi gli estremi del capillare, risente della deformazione del capillare stesso. Per poter modificare la deformazione percepita dal sensore rispetto a quella realmente agente sulla struttura è stato deciso di disporre il tratto di fibra interno al capillare lungo una traiettoria parabolica, come illustrato nella seguente immagine.



Figura 3.4: Posizionamento fibra ottica su traiettoria parabolica

Per verificare qualitativamente il funzionamento della tecnica è effettuata un'analisi numerica preliminare.

Imponendo degli spostamenti relativi, corrispondenti alle deformazioni trasmesse dal capillare, agli estremi del tratto di fibra collocato nel capillare, è stato effettuato un confronto tra le deformazioni agenti sul tratto centrale

della fibra ottica rispetto a quelle esercitate dal capillare.

L'analisi numerica effettuata è di tipo non lineare a causa degli spostamenti elevati della fibra ottica ed è stata realizzata utilizzando il programma agli elementi finiti *ABAQUS*.

Gli elementi utilizzati sono di tipo *SHELL* a quattro nodi, per la modellazione della resina epossidica necessaria a vincolare la fibra ottica al capillare; la fibra ottica è stata modellata mediante elementi di trave di tipo *BEAM*.

Tabella 3.1: Elementi utilizzati nella modellazione ad elementi finiti

Tipo di elemento	Materiale utilizzato
BEAM	Fibra ottica
SHELL	Resina epossidica

Tabella 3.2: Materiali utilizzati nella modellazione ad elementi finiti

Identificativo materiale	Modulo Young [GPa]	Coefficiente Poisson
Fibra ottica	52000	0.17
Resina epossidica	5000	0.3

I valori rappresentati in tab.3.2 sono riferiti alla resina epossidica utilizzata per la realizzazione dell'isolamento del sensore; per la fibra ottica i valori riportati sono il risultato della combinazione delle differenti caratteristiche meccaniche degli elementi che la compongono [18] secondo la teoria micromeccanica.

Tabella 3.3: Modulo di Young e coefficiente di Poisson dei componenti della fibra ottica

Elemento	Modulo di Young [GPa]	Coefficiente ν Poisson
Core	72	0.17
Cladding	65	0.149
Coating	0.001	0.17

Un esempio della modellazione numerica effettuata viene riportato in fig.3.5.



Figura 3.5: Modellazione agli elementi finiti

L'analisi numerica ha confermato la possibilità di variare il coefficiente di proporzionalità alla deformazione per il sensore disposto nel tubo capillare. In fig.3.6 viene riportato l'andamento della deformazione del tratto di fibra ottica posizionato centralmente nel capillare (corrispondente alla posizione del sensore a reticolo di Bragg), rispetto alla deformazione applicata al capillare stesso.

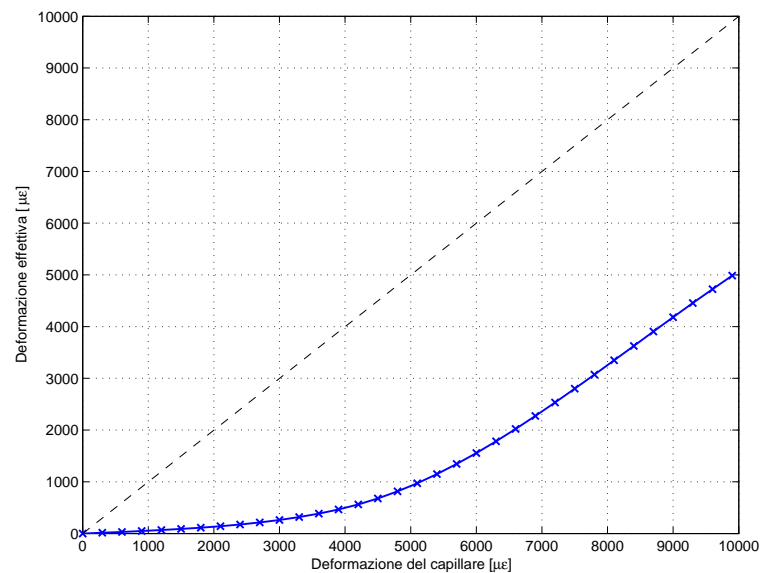


Figura 3.6: Deformazione fibra ottica

L'analisi realizzata ha mostrato la possibilità di ridurre la deformazione percepita dal sensore di circa un ordine di grandezza rispetto a quella realmente agente per deformazioni inferiori a $3000\mu\epsilon$.

È però necessario evidenziare come la risposta del sensore non sia lineare, ma suddivisibile in due tratti con andamento differente. Il primo, corrispondente alle deformazioni minori, avente andamento quadratico, mentre il secondo approssimabile a lineare.

La linearità presentata dalla risposta del sensore a elevate deformazioni è conseguente al raggiungimento di una traiettoria quasi rettilinea del tratto di

fibra posto nel capillare. Conseguentemente la deformazione percepita dal sensore cresce linearmente con quella esercitata dal capillare stesso.

Dal grafico di fig.3.6 si evince che il sistema può essere risolto in un limitato intervallo di deformazioni a causa della perdita di linearità della risposta del sensore.

È possibile ampliare il range di utilizzo della tecnica adottando soluzioni tecnologiche che consentano di aumentarne il dominio di linearità.

3.3 Scelta dei tubi capillari

I tubi capillari, necessari alla realizzazione dei sistemi di misura descritti, devono avere come caratteristica peculiare la bassa invasività. Per cui è opportuno utilizzare capillari aventi dimensioni assiali e trasversali le più piccole possibili.

Sulla base di questa considerazione sono stati selezionati i capillari in acciaio riportati in tab.3.4 ed è stata condotta un'analisi di trade-off considerando l'invasività contrapposta alle difficoltà realizzative.

Tabella 3.4: Capillari a disposizione

Diametro esterno [mm]	Diametro interno [mm]
0,40	0,15
0,45	0,18
0,55	0,25
0,60	0,30
1,50	0,50

Come risultato per la prima tecnica in esame è stato selezionato il tubo avente diametro interno di $0.18mm$ e diametro esterno di $0.45mm$.

Particolare attenzione è stata posta affinché:

- la dimensione del capillare garantisca il minor grado di invasività nella struttura;
- la fibra ottica non sia soggetta a fenomeni di strisciamento all'interno del capillare, che potrebbero esser fonte di vincoli fittizi durante la vita operativa della struttura.

Quest'ultima considerazione ha comportato l'esclusione del capillare avente il diametro interno di $0.15mm$. La fibra ottica, infatti, potrebbe essere tranquillamente posizionata al suo interno, avendo un diametro di $0.14mm$,

ma la presenza del sensore comporta un incremento del diametro a causa dei marcatori posti all'inizio ed alla fine dello stesso, i quali potrebbero quindi essere fonte di vincolo. Inoltre, le problematiche riscontrate durante il taglio dei capillari comportano una variazione della sezione degli stessi, rendendo difficoltoso il passaggio della fibra ottica.

La scelta dei capillari metallici, impiegati nella seconda tecnica indagata, si basa su considerazioni parzialmente differenti rispetto alla prima configurazione.

Come visto precedentemente, per ridurre l'invasività del capillare sarebbe opportuno scegliere il capillare di dimensioni inferiori.

Andando ad effettuare uno studio parametrico preliminare, attraverso il modello numerico realizzato, è stato possibile verificare che all'aumentare del diametro interno del capillare si ottiene un miglior disaccoppiamento tra la deformazione percepita dal sensore e dal capillare stesso.

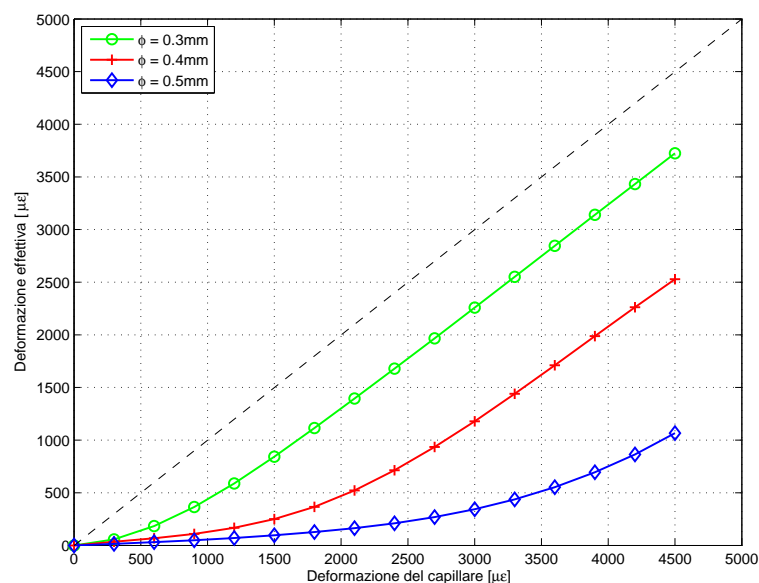


Figura 3.7: Studio numerico, qualitativo, dell'andamento delle variazioni percepite dal sensore FBG al variare della diametro del capillare in cui è inserito

Quest'ultima osservazione ha indirizzato la scelta sul capillare avente 0.5mm di diametro interno che, nonostante sia piuttosto invasivo, permette una miglior funzionamento del sistema di misura in seguito ad una maggior variazione del coefficiente di proporzionalità della risposta alla deformazione. La stessa tipologia di studio parametrico, svolta sulla dimensione assiale, ha

permesso di scegliere come misura ottimale per la realizzazione dei sensori la lunghezza di $9mm$.

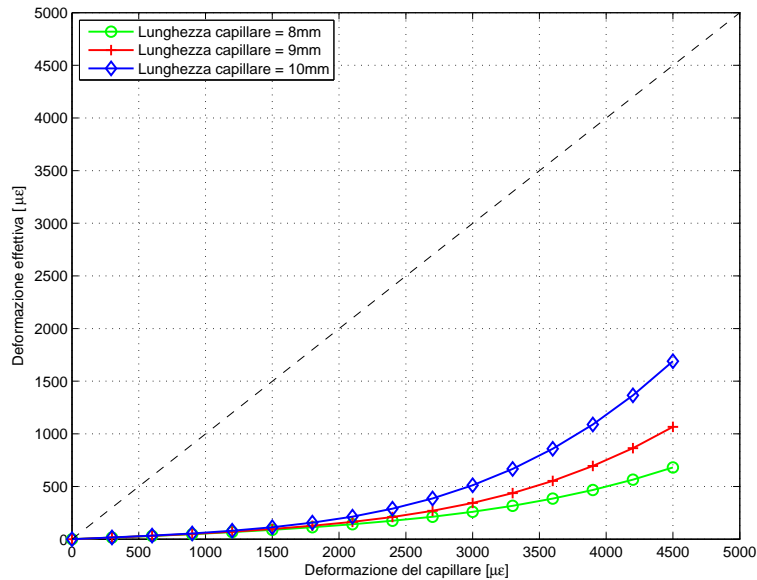


Figura 3.8: Studio numerico, qualitativo, dell'andamento delle variazioni percepite dal sensore FBG al variare della lunghezza del capillare in cui è inserito

La motivazione per cui si è deciso di utilizzare sensori aventi tale lunghezza, e non una inferiore in grado di fornire risultati migliori, risiede principalmente in considerazioni di carattere tecnologico.

La dimensione assiale dei sensori FBG a disposizione è infatti di $3mm$ e riducendo le dimensioni del capillare si rischierebbe di vincolarne parte inficiandone il funzionamento.

Capitolo 4

Implementazione dei sistemi di misura adottati e realizzazione dei provini

In questo capitolo viene descritta l'attività di ricerca tecnologica svolta durante il lavoro di tesi finalizzata all'implementazione dei sistemi di misura adottati.

Particolare attenzione è stata dedicata alla definizione di una tecnica di isolamento per i sensori interni ai capillari da cui dipende fortemente il corretto funzionamento del sistema di misura nel suo complesso.

4.1 Preparazione dei sensori

4.1.1 Preparazione dei tubi capillari

La prima operazione tecnologica è consistita nella preparazione dei capillari. Trascurando trattamenti superficiali alla superficie esterna degli stessi che potrebbe migliorare l'adesione della matrice del composito e che pertanto potranno essere oggetto degli sviluppi futuri, l'attività si è focalizzata principalmente alla messa a punto di una tecnica di taglio che consentisse di ottenere i capillari delle lunghezze desiderate evitando la formazione sulla superficie di taglio di irregolarità potenzialmente critiche per l'integrità della fibra passante.

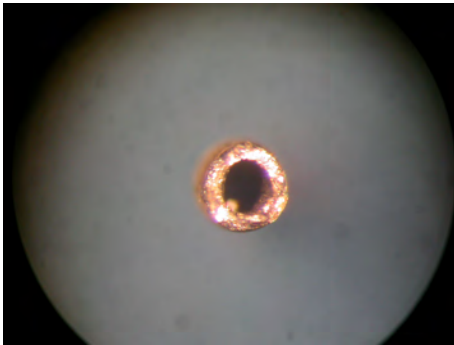
Il taglio dei capillari è risultato essere un'operazione assolutamente non banale a causa dell'elevata flessibilità e duttilità nonché dimensioni estremamente ridotte degli stessi.

In una fase preliminare di studio, la realizzazione dei capillari è stata effettuata per mezzo di una pinza e attraverso l'applicazione di cicli di flessione in grado

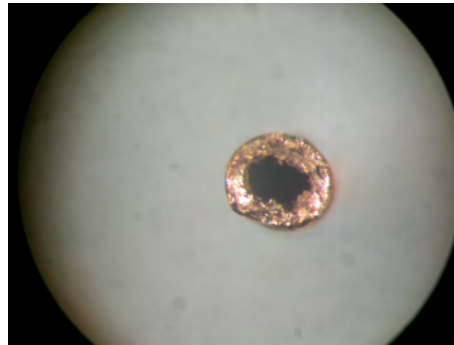
di consentire la separazione dal tubo iniziale.

Analisi al microscopio eseguite sulle superfici dei capillari hanno confermato l'assenza di accentuate irregolarità.

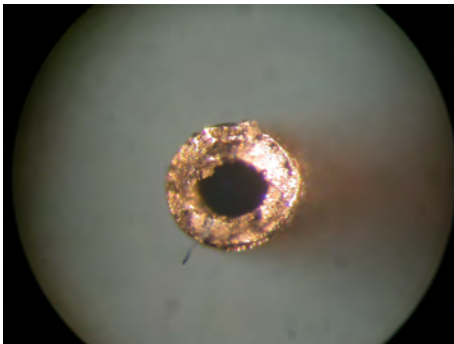
In fig.4.1 sono riportate alcune immagini delle sezioni ottenute in cui si può notare la presenza di bave di materiale seppur in quantità non eccessive.



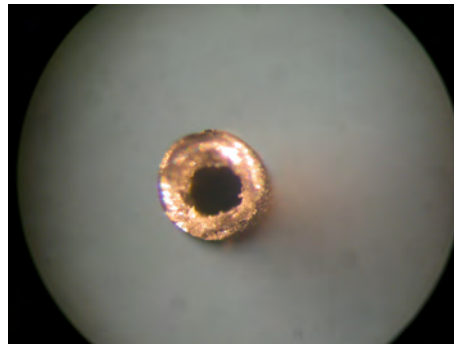
(a) Capillare diametro esterno da 0.40mm



(b) Capillare diametro esterno da 0.45mm



(c) Capillare diametro esterno da 0.55mm

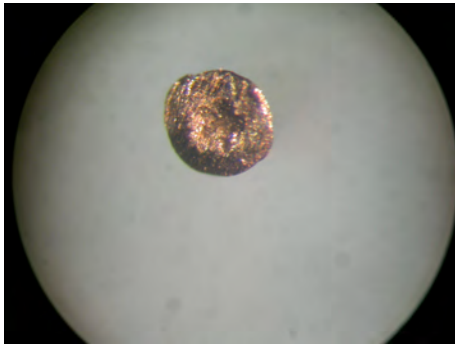


(d) Capillare diametro esterno da 0.60mm

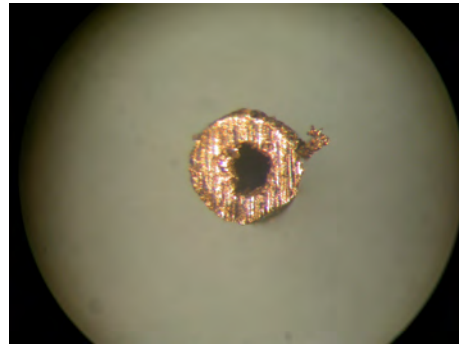
Figura 4.1: Sezioni dei capillari realizzati mediante pinza

Conseguentemente, sono state indagate anche tecniche differenti. In particolare, è stato testato l'utilizzo di un taglierino dotato di lama circolare (*Dremel*).

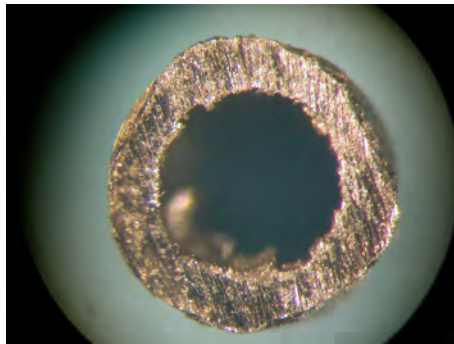
A fronte di un taglio più regolare (risulta meno deformabile la sezione che resta sostanzialmente circolare) si è registrata la chiusura parziale (ed in alcuni casi pressoché totale) della cavità come si evince dalle immagini in fig.4.2.



(a) Capillare diametro esterno da 0.40mm



(b) Capillare diametro esterno da 0.45mm



(c) Capillare diametro esterno da 1.50mm

Figura 4.2: Capillari sezionati mediante Dremel

Si evidenzia che questo fenomeno è assolutamente non accettabile per i capillari di dimensioni inferiori mentre è una tecnica valida per capillari con diametri superiori al millimetro.

4.1.2 Isolamento del sensore

Il funzionamento delle tecniche illustrate nel capitolo 3 è consequenziale al corretto isolamento dei sensori a reticolo di Bragg posti internamente ai tubi capillari.

L'inglobamento dei sensori all'interno di una struttura in composito potrebbe, infatti, comportare una penetrazione per capillarità della resina nei capillari stessi durante la fase di formatura del pezzo. Se questo dovesse accadere il sensore risulterebbe vincolato dalla matrice alla struttura rendendo impossibile il disaccoppiamento tra le deformazioni della stessa e quelle percepite dal reticolo.

La produzione dei provini è quindi subordinata alla messa a punto di una procedura tecnologica che garantisca il corretto isolamento dei sensori.

La scelta dell'adesivo da utilizzare per l'occlusione delle due estremità del capillare al passaggio della matrice del materiale composito è stata condotta considerando le seguenti specifiche:

- temperatura di transizione vetrosa (T_G) superiore alla temperatura di reticolazione dei preimpregnati selezionati (130°);
- caratteristiche di viscosità tali da evitare fenomeni di capillarità particolarmente evidenti all'interno del tubo (che essendo per sua natura un capillare tende a favorire il manifestarsi di tali fenomeni).

La scelta è pertanto ricaduta su una resina epossidica bicomponente (*Scotch-WeldTM DP760*) in grado di reticolare a temperatura ambiente e di resistere a elevate temperature (fino a $230^\circ C$). Inoltre, la viscosità di questo materiale è molto elevata, essendo la resina di tipo tissotropico, ossia non colante.



Figura 4.3: Resina epossidica bicomponente DP760

La verifica del corretto isolamento dei sensori è stata effettuata attraverso due differenti prove.

La prima di queste è stata realizzata ponendo una fibra ottica all'interno di un capillare avente diametro esterno di 0.45mm e lunghezza di 20mm . La fibra viene vincolata ad un estremo del capillare mediante la resina epossidica realizzando nel contempo anche l'occlusione del foro.

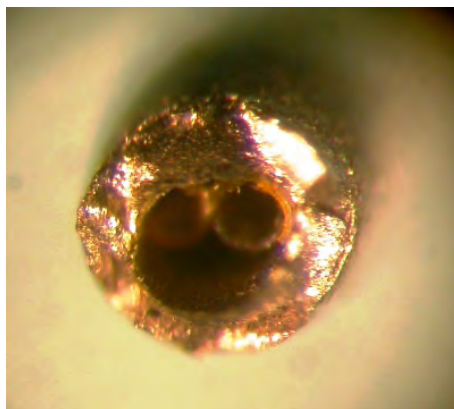


Figura 4.4: Preparazione capillare per la verifica dell'isolamento

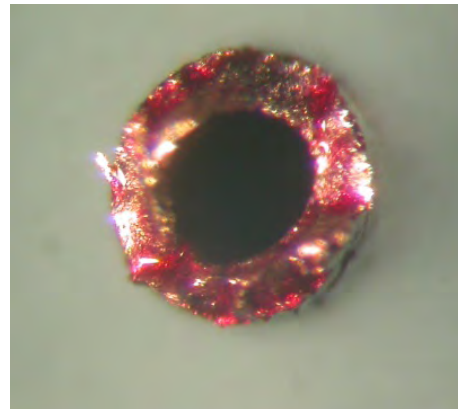
Utilizzando la tecnica di ispezione dei liquidi penetranti, che fanno dell'avanzamento per capillarità la loro caratteristica principale, è stato verificato il corretto isolamento del capillare.

Depositando del liquido penetrante sull'estremità isolata e realizzando un taglio nella parte centrale del capillare è stato possibile verificarne la presenza al suo interno.

La fig.4.5 rappresenta la sezione centrale di due capillari differenti; il primo (4.5a) correttamente isolato ed il secondo (4.5b) non isolato. È evidente la presenza di liquido penetrante (di colore rosso) sul capillare non isolato al contrario di quanto accade all'altro capillare a conferma del soddisfacente isolamento ottenuto.



(a) Capillare dotato di adesivo



(b) Capillare privo di adesivo

Figura 4.5: Sezioni dei capillari trattati con liquidi penetranti

Una seconda verifica della qualità dell'isolamento dei sensori è stata effettuata andando a realizzare un provino in fibra di vetro al cui interno sono stati posizionati dei capillari, isolati su entrambi gli estremi, con fibra ottica passante.

In seguito alla produzione del provino è stato effettuato un test di continuità delle fibre ottiche per verificare che le irregolarità superficiali dei capillari impiegati, realizzati per mezzo di una pinza, non ne compromettano il funzionamento.

La verifica della buona riuscita dell'isolamento è stata invece realizzata andando a tagliare il provino in corrispondenza delle sezioni centrali dei capillari, per poi procedere con una lappatura delle superfici da analizzare. Infine mediante un microscopio elettronico è stata osservata la presenza o l'assenza di resina all'interno dei capillari, andando a confrontare l'immagine di un capillare volontariamente non isolato con quelle dei capillari di cui si voleva verificare l'isolamento.

In fig.4.6 sono riportate le immagini ottenute al microscopio elettronico di due capillari differenti. Nell'immagine di sinistra è possibile notare la presenza di resina all'interno del capillare, mentre nell'immagine di destra è possibile notarne l'assenza.

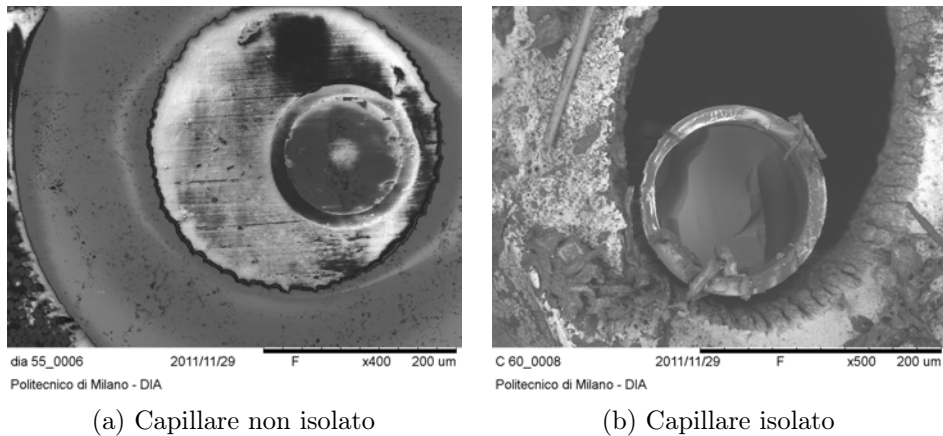


Figura 4.6: Ingrandimento dei capillari mediante microscopio elettronico

L'analisi a microscopio elettronico ha permesso quindi di avere una buona confidenza sul corretto isolamento garantito dalla tecnologia adottata.

4.1.3 Realizzazione sensori

Tecnica capillare d'estremità

La realizzazione del sensore di temperatura risulta essere in questo caso piuttosto semplice risolte le problematiche riguardanti l'isolamento poc' anzi descritte.

I passi da seguire sono principalmente quattro:

1. produzione del capillare della lunghezza desiderata, prestando attenzione che la dimensione assiale sia tale da permettere il posizionamento del sensore FBG nella zona interna, senza che esso sia vincolato all'ingresso del capillare, e che l'estremo della fibra non vada a posizionarsi contro la parte terminale del capillare, quindi assoggettandosi a deformazioni di compressione;
2. deposizione dell'adesivo su un estremo del capillare, provocandone l'occlusione;
3. posizionamento della fibra ottica con sensore di estremità nel capillare, prestando attenzione a lasciare dello spazio tra l'estremo della fibra e l'occlusione del capillare realizzata al passo 2;
4. deposizione dell'adesivo sull'altro estremo del capillare con conseguente occlusione del capillare e vincolo della fibra ottica.

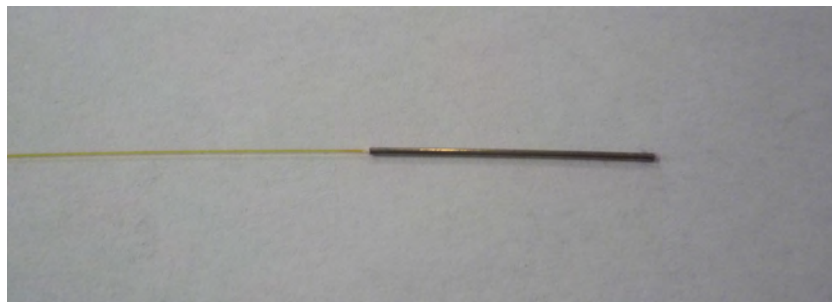


Figura 4.7: Sensore con FBG di estremità

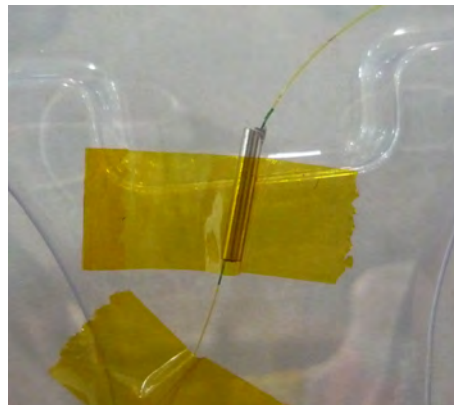
Tecnica capillare passante

Nel caso del secondo sistema di misura studiato le fasi di produzione sono le seguenti:

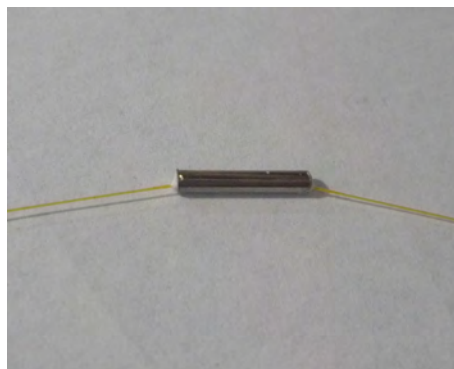
1. realizzazione del tubo capillare della lunghezza desiderata (fig.4.8a);
2. posizionamento della fibra ottica, dotata di sensore a reticolo di Bragg, all'interno del capillare, imponendo un angolo di ingresso rispetto all'asse del capillare di circa 30° (fig.4.8b);
3. deposizione dell'adesivo sull'estremo del capillare, isolandolo e vincolando la fibra ottica;
4. ripetizione dei passi 2 e 3 per il secondo estremo in seguito alla reticolazione dell'adesivo.



(a) Capillare utilizzato



(b) Angolo di ingresso della fibra ottica nel capillare



(c) Sensore completo

Figura 4.8: Realizzazione del sensore con fibra passante nel capillare

A causa della difficoltà realizzativa, in una fase preliminare sono stati realizzati dei capillari contenenti fibra ottica ma non dotata di sensore. In tal modo è stato possibile verificare l'effettiva disposizione della fibra ottica posta all'interno del capillare.

La verifica è stata realizzata andando ad asportare parte della parete cilindrica del tubo capillare lungo l'asse del capillare stesso, come mostrato in fig.4.9, per poi visualizzare tramite microscopio ottico la posizione della fibra ottica.

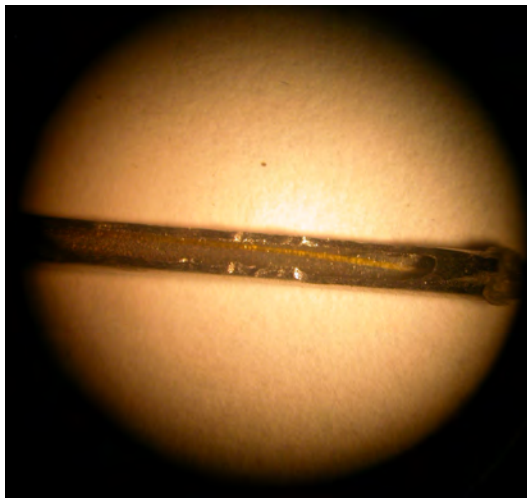


Figura 4.9: Verifica della traiettoria della fibra ottica posta all'interno del capillare metallico

4.2 Realizzazione dei provini in composito e inglobamento dei sensori

4.2.1 Realizzazione dei pannelli

Per quanto concerne la procedura di produzione dei provini in materiale composito si è adottata la tecnologia di formatura alla pressa a piani riscaldati seguendo una laminazione manuale di tipo *hand lay-up*.

Dopo aver tagliato le lamine secondo la sequenza di laminazione stabilita la tecnica prevede l'impaccamento manuale delle stesse avendo così la possibilità di introdurre facilmente i sensori a fibra ottica nella posizione voluta.

Nel caso in esame, si è assunta una sequenza di laminazione $[0]_n$ di lamine di preimpregnato unidirezionale (UD).

La produzione del provino è svolta all'interno della *clean room*, ambiente avente temperatura mantenuta a 18°, umidità al 50% e polverosità controllata. La precauzione di operare in questo tipo di ambiente viene generalmente seguita per evitare la contaminazione delle lamine nel corso delle fasi produttive.

La laminazione prevede l'applicazione di un film distaccante (*teflon*) sullo stampo per consentire il distacco del provino alla fine del ciclo.

La fase successiva per la produzione dei pannelli in materiale composito è la laminazione, nella quale le pelli di preimpregnato, precedentemente tagliate, vengono disposte una sull'altra rispettando la sequenza di laminazione prescelta che, nel caso in esame, consiste nel posizionamento delle lamine con la medesima orientazione.

Avendo utilizzato uno stampo piano privo di dighe di contenimento, lo sbandamento laterale delle fibre di rinforzo è stato limitato utilizzando della plastilina.

Per ridurre tali effetti il provino è stato estratto dalla parte centrale del laminato prodotto (che era ovviamente appositamente sovradimensionato).

In fig.4.10 si può osservare l'entità dello sbandamento laterale ottenuto nonostante gli accorgimenti adottati.

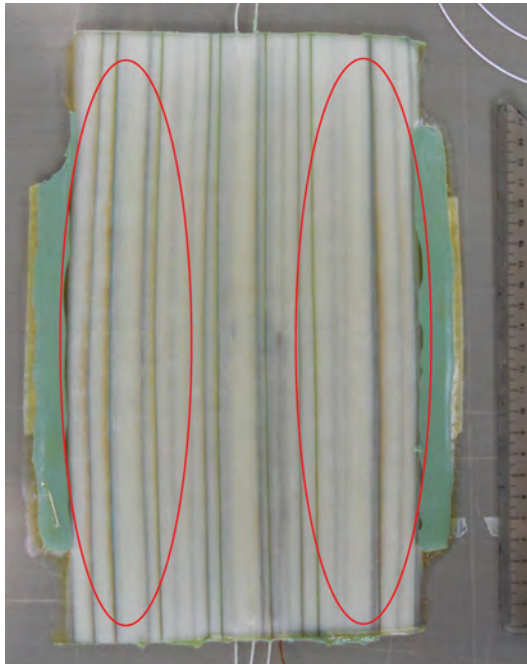


Figura 4.10: Sbandamento laterale delle fibre del provino in composito

4.2.2 Inglobamento delle fibre ottiche

L'inglobamento delle fibre ottiche all'interno del provino in composito comporta difficoltà aggiuntive nella produzione dei pannelli.

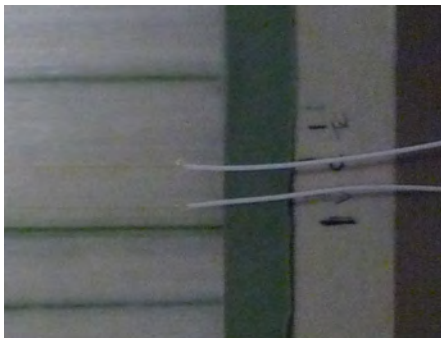
I problemi principali sono rappresentati dalla bassa resistenza delle fibre ottiche agli sforzi di taglio e dalla necessità di effettuare un corretto posizionamento delle fibre ottiche affinché sia ottenibile la misura della grandezza desiderata.

Il processo di inglobamento delle fibre ottiche è il seguente:

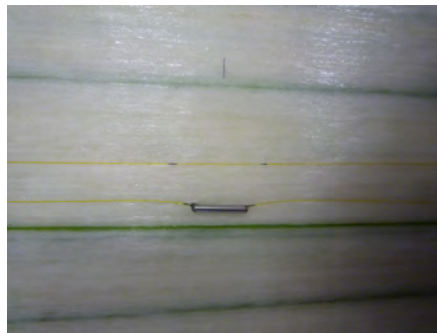
- la fibra, opportunamente pretensionata, viene fissata in corrispondenza della lamina in cui si è deciso di posizionare i sensori prestando attenzione a posizionare il sensore FBG nella sezione centrale del provino, in modo da limitare i possibili effetti di bordo ed avere una distribuzione uniforme del carico;
- gli estremi della fibra ottica all'uscita del provino vengono protetti inserendoli all'interno di tubetti in *Hytrel* posti per circa 10mm all'interno del laminato (fig.4.11a);
- l'estremo dei tubetti posto all'interno del laminato viene vincolato, tramite della resina epossidica bicomponente, alla fibra ottica occludendo

l'estremo del capillare ed eliminando la possibilità che la resina del laminato penetri per capillarità all'interno del tubetto modificando le caratteristiche meccaniche della fibra ottica;

- una nuova pelle del laminato viene deposta sopra la fibra ottica prestando attenzione affinché l'allineamento iniziale non venga modificato (fig. 4.11c);
- le fibre ottiche all'uscita del laminato vengono posizionate tra due strati di plastilina ed uno strato di teflon (fig.4.11d), in grado di impedire alla resina di fluire lungo di esse alterandone la rigidezza.



(a) Rivestimento con guaina in gomma protettiva



(b) Disposizione dei sensori FBG



(c) Posizionamento lamina in composito al disopra delle FO



(d) Protezione delle FO mediante plastilina e teflon

Figura 4.11: Inglobamento fibre ottiche

4.2.3 Chiusura del sacco da vuoto e polimerizzazione

Terminata la fase di laminazione si procede alla chiusura del sacco da vuoto previo posizionamento del materiale di consumo necessario.

Senza entrare nel dettaglio di tale operazione se ne elencano i passi principali:

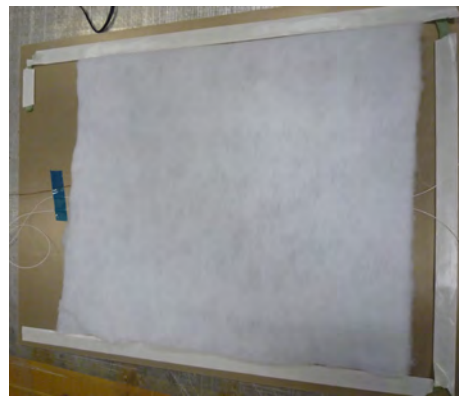
- stesura del film separatore microforato (a contatto con il laminato), la cui funzione è di facilitare il degassamento del pannello e favorire lo scorrimento della resina verso l'esterno;
- disposizione cuscino elastomerico, necessario per uniformare la pressione applicata dalla pressa;
- stesura di un materassino in poliestere, fibra di vetro o cotone (*bleeder*) atto ad assorbire la resina in eccesso e distribuire uniformemente il vuoto.

La chiusura del sacco avviene mediante opportuno nastro sigillante denominato comunemente plastilina.

Avendo l'accortezza di far uscire le fibre ottiche attraverso la plastilina si ha la possibilità di interrogare i sensori e quindi monitorare il ciclo di reticolazione.



(a) Posizionamento di teflon microforato e gomma



(b) Disposizione bleeder

Figura 4.12: Realizzazione sacco da vuoto

In seguito alla realizzazione del sacco da vuoto si procede realizzando il vuoto (-0.85bar) necessario all'eliminazione delle bolle d'aria dal laminato ed alla sua compattazione.

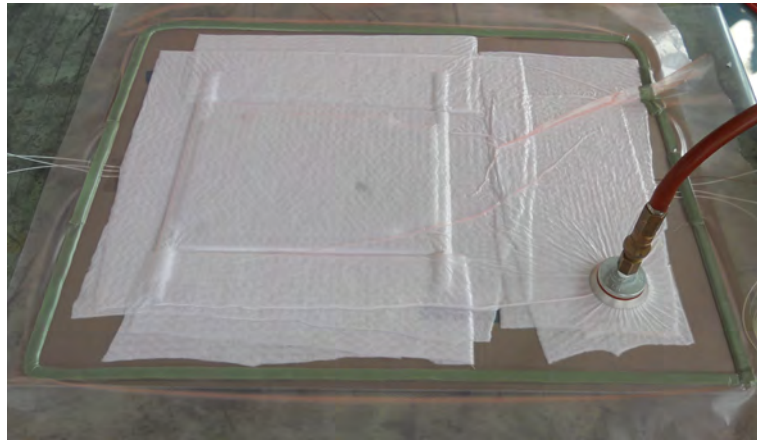


Figura 4.13: Compattazione del provino

La formatura del pannello viene realizzata eseguendo un ciclo di reticolazione controllato in pressione e temperatura. In particolare il ciclo per la formatura di tutti i pannelli realizzati consiste nell'applicazione di una pressione di $3bar$ alla temperatura di $130^{\circ}C$ per $1h$ e $30min$.

4.3 Produzione dei provini per la validazione sperimentale

I provini prodotti, per validare sperimentalmente i sistemi di misura studiati, sono stati realizzati utilizzando due differenti tipologie di materiali. Il lavoro di tesi, inserendosi nel progetto congiunto DIA-AW avente per obiettivo l'implementazione di un sistema di misura basato su FBG inglobati nella struttura della pala del rotore di coda del velivolo *AW-149*, è stato svolto utilizzando entrambe le tipologie di materiale composito presenti all'interno della pala stessa.

In particolare sono stati realizzati provini utilizzando i seguenti materiali:

- fibra di carbonio UD ad alta resistenza impregnato con sistema Epoxy 130°C;
- fibra di vetro UD S2 impregnato con sistema Epoxy 130°C.

L'utilizzo di materiali esclusivamente UD a questo livello di sviluppo delle tecniche permette inoltre di ridurre le possibili problematiche che comporterebbe l'utilizzo di tessuti, in quanto le microcurvature presenti potrebbero apportare un grado di incertezza maggiore nell'interazione con le fibre ottiche.

Le dimensioni dei provini sono subordinate alla tipologia di prova a cui li si vuole sottoporre. Avendo scelto di effettuare prove di trazione sono stati realizzati provini di dimensione standard per questa tipologia di prova. Dovendo disporre un minimo di due fibre ottiche ed una termocoppia all'interno dei provini è stato necessario rilassare il vincolo sulla larghezza degli stessi.

Si è quindi deciso di produrre provini aventi 280mm di lunghezza complessiva e tratto utile di 150mm (ai provini sono stati infatti applicati i talloni previsti da normativa). La larghezza dei provini è invece variabile a seconda del materiale impiegato.

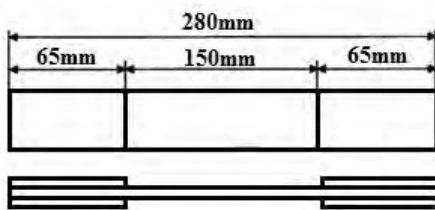


Figura 4.14: Dimensione del provino per le prove a trazione

La produzione dei provini è stata effettuata secondo la procedura descritta nella sezione 4.2, l'unica variante è rappresentata dall'inglobamento di una

termocoppia. Essa è posizionata nella medesima sezione longitudinale e nello stesso strato in cui sono stati inglobati i sensori FBG.

L'inglobamento della termocoppia ha consentito la misurazione della temperatura in seno al materiale e, soprattutto, in prossimità dei sensori FBG garantendo così una corretta calibrazione degli stessi.

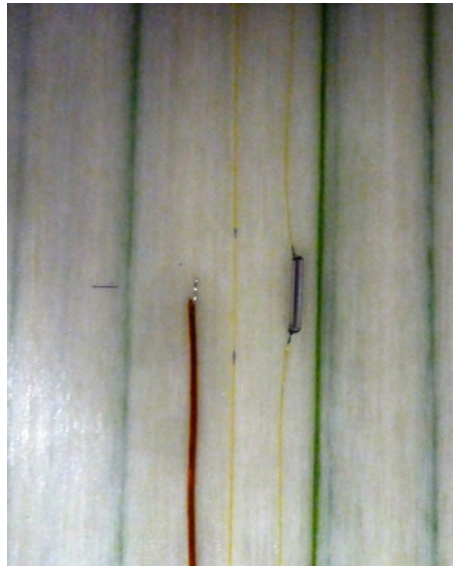


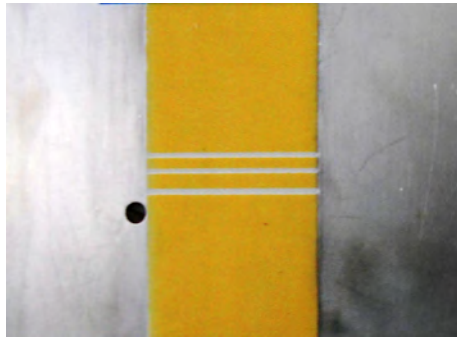
Figura 4.15: Inglobamento dei sensori FBG e della termocoppia

La presenza delle fibre ottiche comporta un'attenzione particolare anche nelle conclusive fasi di contornatura del provino e di applicazione dei talloni. Sui talloni vengono infatti effettuate scanalature in corrispondenza delle fibre ottiche per evitare alle stesse elevati livelli di pressione concentrata.

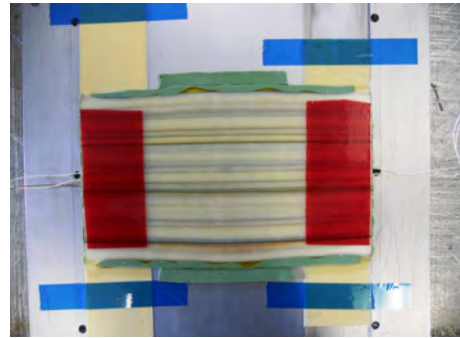
Mediante l'impiego dello stampo necessario alla formatura dei talloni e di un adesivo in grado di polimerizzare a caldo, è stato realizzato l'incollaggio dei talloni al provino. Dopo aver posizionato i talloni all'interno del proprio stampo, è stato depositato su di essi l'adesivo, prestando attenzione a lasciare circa 1mm tra la fine dei talloni e l'inizio dell'adesivo (fig.4.20b). Questa accortezza è necessaria affinché l'adesivo stesso non fluisca sulle fibre ottiche durante il ciclo di polimerizzazione.

Le fibre vengono inoltre protette dall'adesivo utilizzando il teflon impiegato anche nel processo di formatura del provino (fig.4.16c).

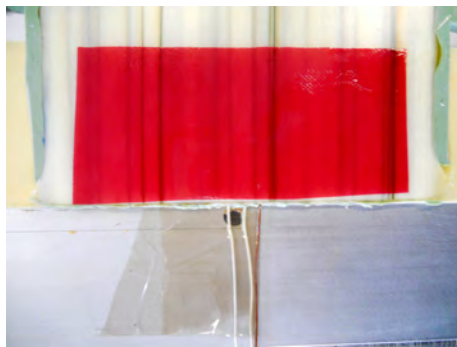
Infine, dopo aver depositato l'adesivo sulla parte superiore del provino e vincolato i talloni alla seconda metà dello stampo, si procede alla chiusura dello stesso e al posizionamento in pressa, dove viene effettuato il ciclo di polimerizzazione, che consiste nell'applicazione di 3bar di pressione ad una temperatura di 125°C per 1h .



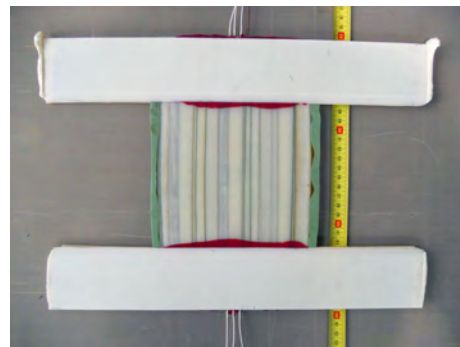
(a) Posizionamento talloni scanalati



(b) Deposizione adesivo su provino



(c) Protezione delle FO con teflon



(d) Provino tallonato e estratto dallo stampo

Figura 4.16: Tallonatura del provino

In seguito alla contornatura del pannello si è ottenuto il provino rappresentato in fig.4.17.

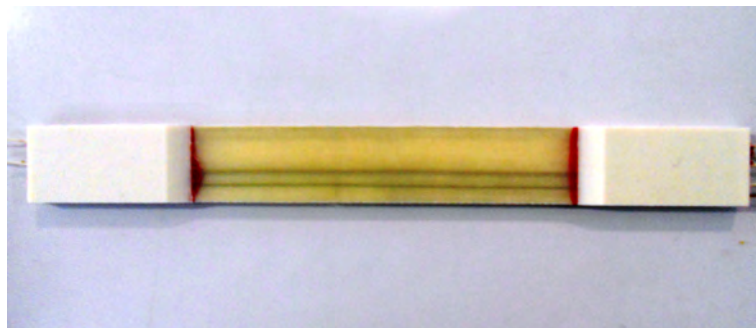


Figura 4.17: Profilo contornato

Il provino è stato in fine strumentato con due estensimetri resistivi in configurazione back-to-back per permettere un confronto tra le deformazioni rilevate tramite i sensori a reticolo di Bragg e quelle realmente agenti (fig.4.18).

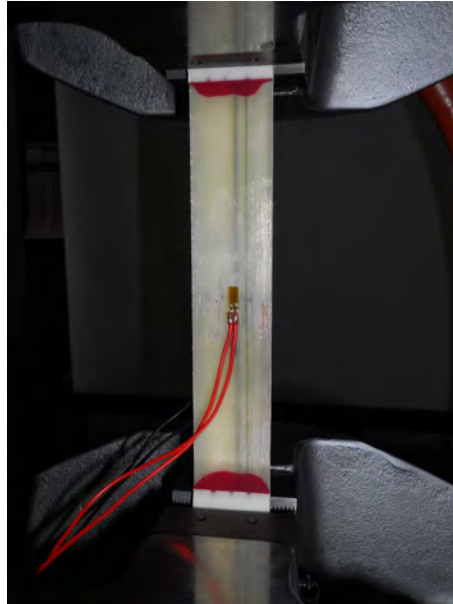


Figura 4.18: Provino estensimetrato

4.3.1 Provini realizzati

L'attività sperimentale di calibrazione e validazione della prima tecnica indagata è stata condotta su due provini, uno in fibra di carbonio e l'altro in fibra di vetro, le cui caratteristiche principali sono riportate in tab.4.1.

Tabella 4.1: Provini realizzati per la validazione della prima tecnica

ID provino	Materiale utilizzato	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	N° lamine
<i>CE - C - 01</i>	Carbonio	280	40	1	6
<i>CE - G - 02</i>	Vetro	280	29	3.25	16

I sensori a reticolo di Bragg utilizzati, aventi una lunghezza di $3mm$, sono stati posti in corrispondenza della sezione centrale del provino per ridurre gli effetti di bordo. Inoltre essendo prevista la possibilità di effettuare in futuro prove di flessione, è stato scelto di porre i sensori tra la quinta e la sesta lamina per il provino in carbonio e tra la dodicesima e la tredicesima per i provini in vetro (lontano dall'asse neutro).

La validazione sperimentale della seconda tecnica studiata ha seguito le stesse linee guida della prima; conseguentemente anche i provini realizzati, le cui caratteristiche sono riportate in tab.4.2, hanno le medesime peculiarità.

Tabella 4.2: Provini realizzati per la validazione della seconda tecnica

ID provino	Materiale utilizzato	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	N° lamine
<i>CP - G - 03</i>	Vetro	280	29.6	3.25	16
<i>CP - G - 04</i>	Vetro	280	29.3	3.25	16

L'identificazione dei provini è stata effettuata nel seguente modo:

- CE o CP indica la tecnica di riferimento (capillare d'estremità o passante);
- C o G indica il materiale utilizzato (carbon o glass);
- 0N indica il numero del provino.

4.4 Monitoraggio ciclo di reticolazione

L'impiego di Smart Materials permette il monitoraggio della struttura fin dalla fase di produzione.

Per poter analizzare il comportamento dei sensori FBG durante le differenti fasi del ciclo di reticolazione del provino è stato monitorato il segnale dei sensori posti al suo interno utilizzando un analizzatore di spettro (OSA).

Inoltre la possibilità di monitorare il ciclo produttivo permette di verificare il corretto isolamento dei sensori posto all'interno dei capillari.

In fig.4.19 viene riportato l'andamento della risposta dei sensori FBG, inglobati nel provino in carbonio, come variazione della lunghezza d'onda di Bragg dei due sensori rispetto alla condizione iniziale.

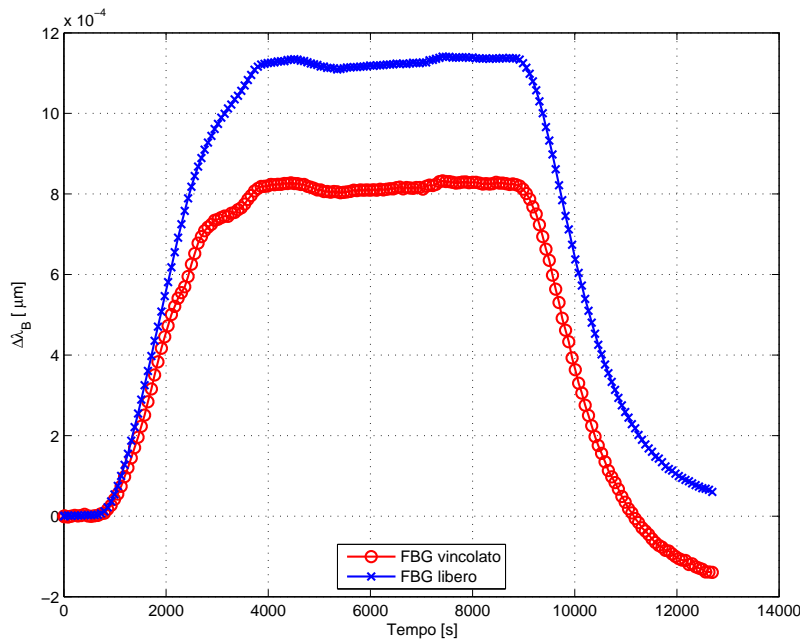


Figura 4.19: Variazione della lunghezza d'onda di Bragg durante il ciclo di cura (per la prima tecnica)

Con FBG libero si intende il sensore di estremità posto nel capillare (quindi lasco a causa del vincolo imposto su un solo estremo); per FBG vincolato si vuole indicare il sensore inglobato direttamente all'interno del provino (pertanto vincolato al materiale composito per tutta la sua interezza).

È possibile notare che a fine ciclo di reticolazione le variazioni di lunghezza d'onda dei sensori non sono sovrapposte. La discrepanza del valore finale della variazione di lunghezza d'onda è originata da due differenti contributi. In primo luogo la risposta dei due sensori alla temperatura è leggermente

differente, in quanto il coefficiente di proporzionalità per la variazione di temperatura dipende dal valore della lunghezza d'onda di Bragg del sensore, come è possibile osservare nell'eq.(1.13). Pertanto avendo utilizzato sensori aventi lunghezze di Bragg differenti, seppur posizionate nella finestra corrispondente a $1550nm$, le loro risposte alla variazione di temperatura non coincidono.

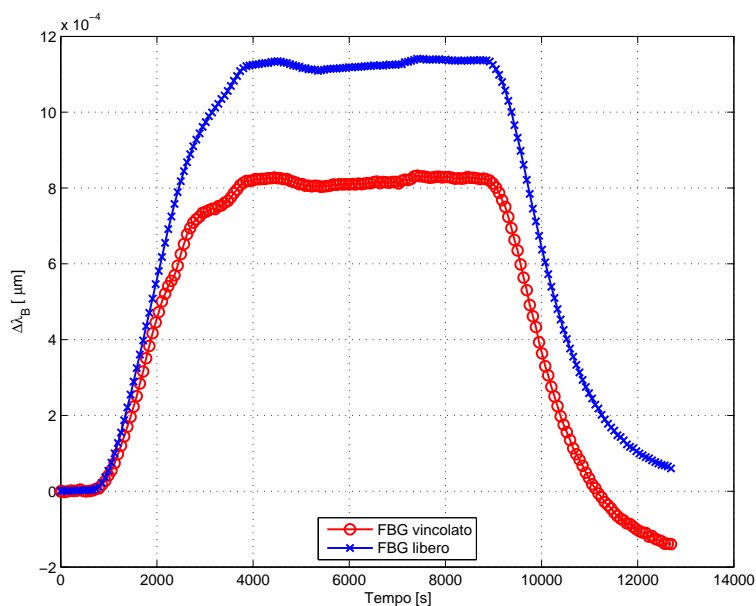
Conseguentemente, terminando il ciclo di reticolazione ad una temperatura diversa rispetto a quella iniziale, la variazione di lunghezza d'onda di Bragg per i due sensori sarà differente e diversa da zero.

La variazione di temperatura residua a fine ciclo non può completamente spiegare l'elevata discrepanza della risposta dei due sensori.

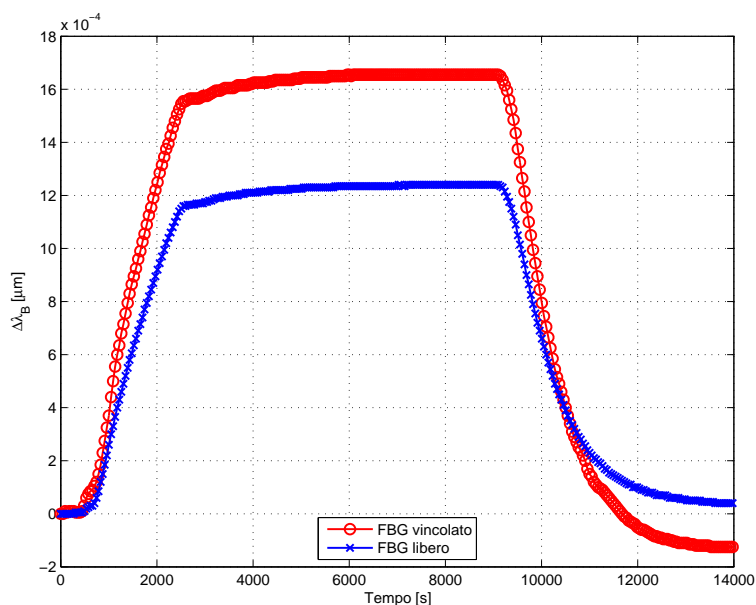
Il principale apporto alla variazione di lunghezza d'onda è infatti dato dal differente coefficiente di espansione termica della fibra ottica e del materiale composito in cui è inglobata.

Durante la fase di riscaldamento del provino il sensore FBG subisce un'espansione termica differente rispetto al materiale in cui è inglobato. In seguito alla reticolazione della matrice il sensore viene vincolato alla struttura e il suo comportamento non può essere scorrelato da essa. Per questo motivo a fine ciclo il sensore vincolato risente di una deformazione residua espressa in termini di variazione di lunghezza d'onda di Bragg.

Per meglio comprendere l'influenza del materiale utilizzato sulla risposta del sensore FBG vincolato, viene riportato in fig.4.20 un confronto tra l'andamento della risposta di due sensori inglobati l'uno nel vetro l'altro nel carbonio durante il ciclo di reticolazione.



(a) Provino in fibra di vetro



(b) Provino in fibra di vetro

Figura 4.20: Confronto del ciclo di cura di due provini in materiale differente

Monitorando il ciclo di reticolazione del provino è possibile verificare anche il corretto isolamento del sensore posto nel capillare. Se correttamente isolato esso, infatti, deve essere in grado di fornire una corretta misura della temperatura durante tutte le fasi del ciclo.

Il confronto, tra il valore di temperatura rilevato mediante il sensore libero e la temperatura reale, è stato realizzato utilizzando la termocoppia inglobata nel provino.

L'andamento della temperatura rilevata dal sensore a reticolo di Bragg viene riportato in fig.4.21.

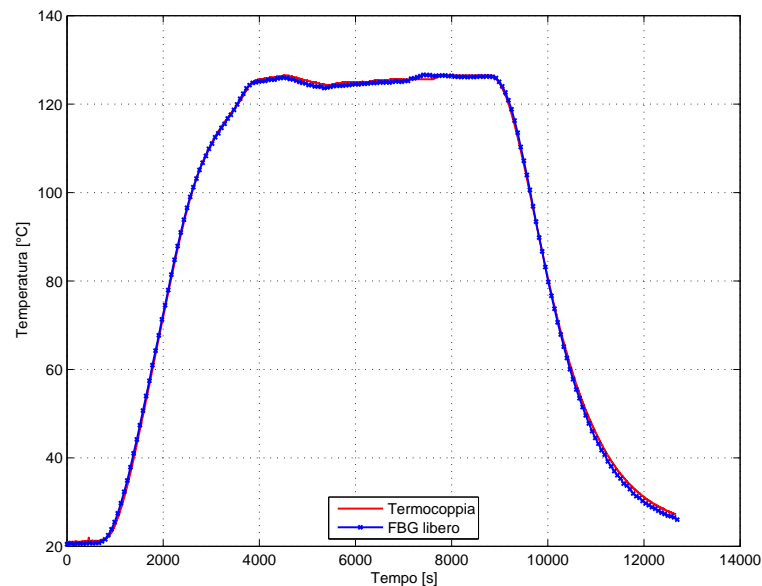


Figura 4.21: Confronto tra la temperatura rilevata dal sensore FBG libero e la termocoppia durante il ciclo di cura

La sovrapposizione delle due curve garantisce il corretto funzionamento del sensore FBG posto nel capillare.

Lo stesso tipo di monitoraggio è stato realizzato per i provini realizzati per la validazione del secondo sistema di misura indagato. Come è naturale aspettarsi, il sensore inglobato direttamente nel materiale composito presenta delle deformazioni residue a fine ciclo, come è possibile osservare in fig.4.22.

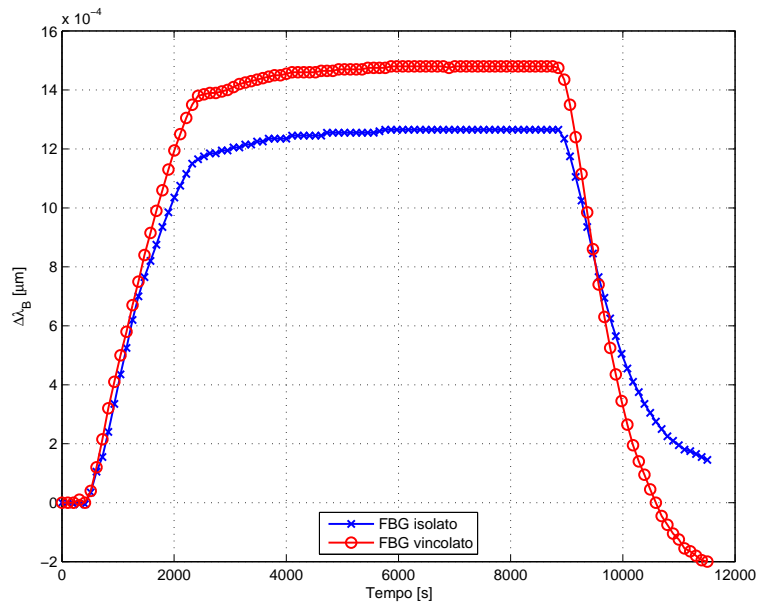


Figura 4.22: Variazione della lunghezza d'onda di Bragg durante il ciclo di cura (per la seconda tecnica)

Anche in questo caso con FBG vincolato si vuole indicare il sensore inglobato direttamente all'interno del provino (quindi vincolato alla struttura per tutta la sua interezza); con FBG isolato si intende il sensore posto nel capillare ma vincolato ad entrambi gli estremi.

Il sensore posto nel capillare, che ricordiamo essere posto su una traiettoria parabolica della fibra ottica, dovrebbe essere in grado di rilevare correttamente la temperatura durante tutto il ciclo di cura, non essendo soggetto a deformazioni meccaniche ed essendo ben isolato dalla matrice del materiale in cui è inglobato.

Il confronto tra il valore della temperatura rilevato mediante il sensore posto nel capillare e la temperatura acquisita mediante termocoppia viene riportato in fig.4.23.

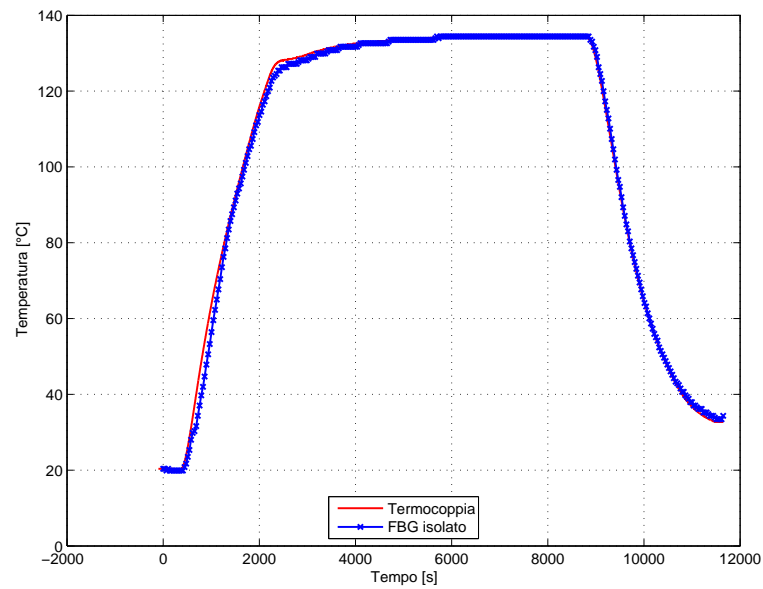


Figura 4.23: Confronto tra la temperatura rilevata dal sensore FBG posto nel capillare e la termocoppia durante il ciclo di cura

Essendo le due curve sovrapposte per l'intera durata del ciclo di reticolazione, allora è possibile affermare anche in questo caso che il sensore è correttamente isolato.

Capitolo 5

Attività sperimentale

La validazione delle tecniche di misura descritte nei capitoli precedenti è stata effettuata realizzando delle prove di trazione riducendo così il numero di variabili agenti sul sistema.

La distribuzione della deformazione attraverso lo spessore del provino soggetto a trazione è infatti costante, per cui le sollecitazioni agenti sui sensori FBG sono le medesime, anche a fronte di un possibile scostamento nello spessore dei reticoli.

Prima di eseguire i test di validazione è stato innanzitutto necessario procedere con la calibrazione dei sensori utilizzati per conoscere la proporzionalità della risposta alle sollecitazioni.

5.1 Calibrazione dei sensori FBG

La calibrazione dei sensori FBG, per entrambi i sistemi di misura, è stata effettuata attraverso due differenti tipologie di prova:

- applicazione di temperature note, per la determinazione dei coefficienti di proporzionalità della risposta rispetto alla variazione di temperatura;
- applicazione di deformazioni note, per la determinazione dei coefficienti di proporzionalità della risposta rispetto alla deformazione.

5.1.1 Calibrazione della risposta alla temperatura

La proporzionalità esistente tra la variazione di lunghezza d'onda e la temperatura applicata ai reticoli di Bragg è stata determinata posizionando i provini realizzati in una camera ambientale. Essa, infatti, permette di variare in modo controllato la temperatura dell'aria presente al suo interno.

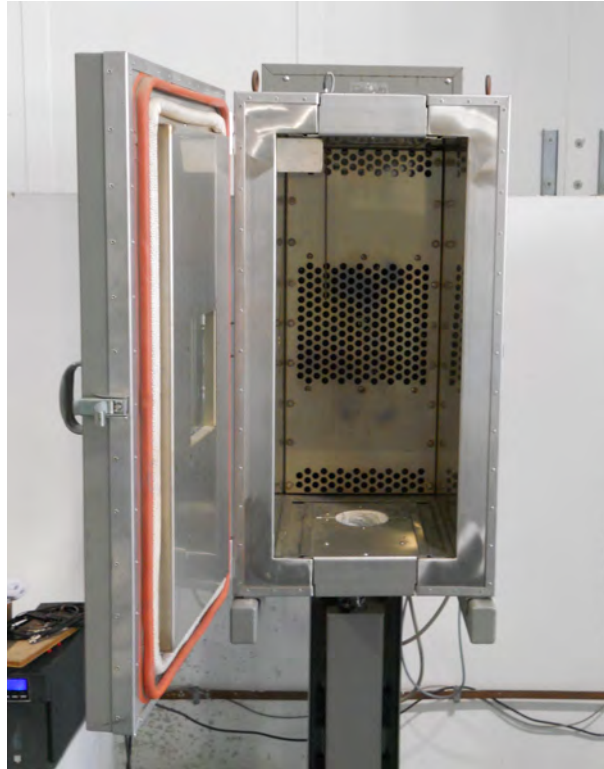


Figura 5.1: Camera ambientale

È pertanto possibile applicare dei carichi termici al provino attraverso scambi convettivi con l'aria che lo circonda. Analizzando la risposta dei sensori FBG posti al suo interno e confrontando il valore acquisito dalla termocoppia è possibile effettuare la loro calibrazione.

Durante questa prova è stata prestata particolare attenzione affinché il provino non fosse soggetto a flussi di calore concentrati in grado di produrre una distribuzione non uniforme della temperatura su di esso impedendo la corretta correlazione tra la variazione di lunghezza d'onda e la temperatura rilevata.

La risposta alla variazione di temperatura dei sensori FBG posti all'interno del provino in carbonio è riportata in fig.5.2.

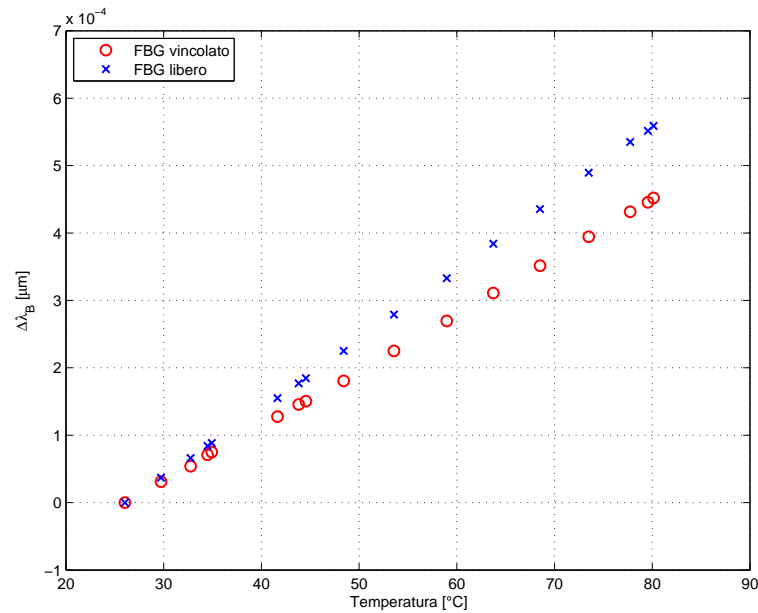
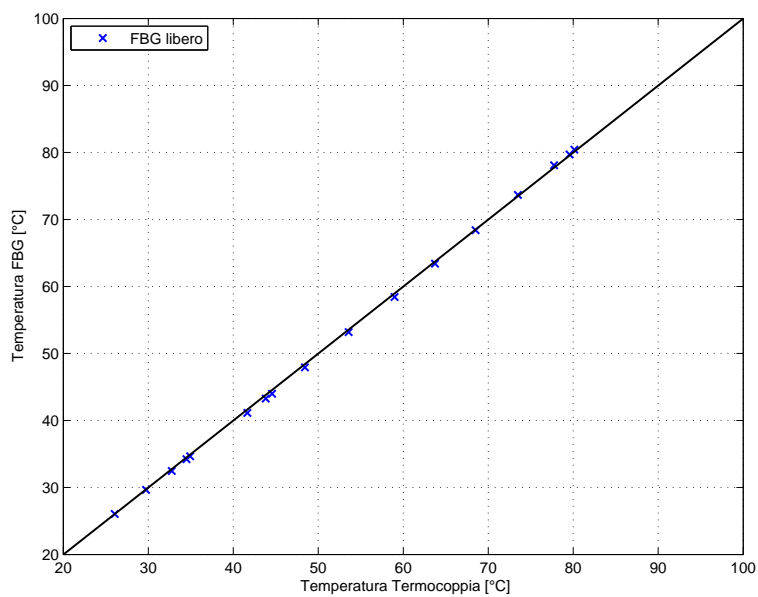


Figura 5.2: Risposta alla variazione di temperatura per il provino *CE-C-01* (tecnica 1)

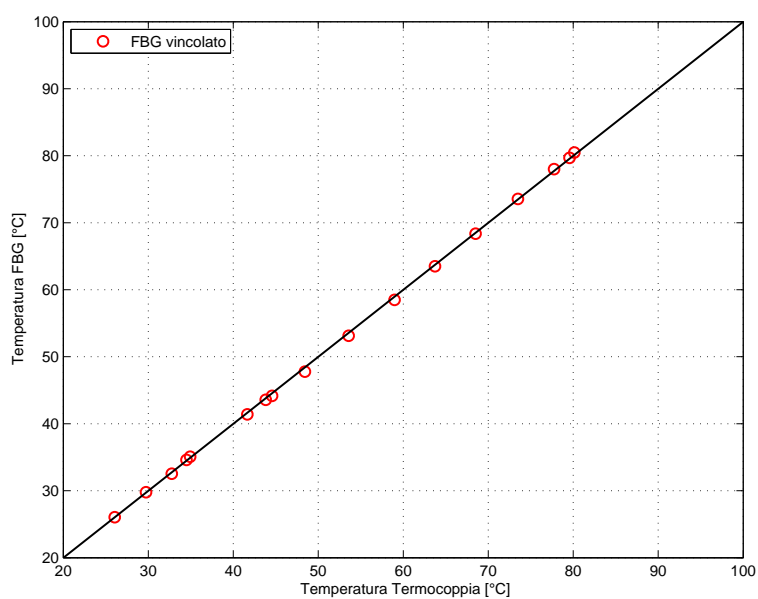
È possibile notare come la risposta dei sensori sia lineare e ben differenziata per l'intervallo di temperature considerato. Quest'ultimo aspetto conferma quanto detto nel capitolo 3, ossia che inglobando il sensore vincolato direttamente nel materiale composito il coefficiente di espansione termica va modificandosi secondo la teoria micromeccanica comportando una variazione della risposta del sensore in seguito a sollecitazioni termiche.

Interpolando linearmente i valori delle variazioni di lunghezza d'onda dei sensori e confrontandoli con la temperatura acquisita tramite termocoppia è possibile ricavare il coefficiente di proporzionalità rispetto alla temperatura (K_T) per i due reticoli.

In fig.5.3 viene rappresentato il confronto tra la temperatura acquisita tramite termocoppia e quella ricavata scalando la risposta dei sensori attraverso i relativi coefficienti di proporzionalità, i cui valori numerici sono riportati in tab.5.1.



(a) Sensore libero



(b) Sensore vincolato

Figura 5.3: Temperatura rilevata provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)

Essendo i valori di confronto posizionati lungo la bisettrice del piano cartesiano allora è possibile affermare che la temperatura è correttamente rilevata attraverso i reticoli di Bragg per tutto l'intervallo di misura considerato.

Analogamente sono state realizzate le prove di calibrazione per i restanti provini, necessari alla validazione di entrambe le tecniche di misura. Nelle pagine seguenti viene riportato il confronto grafico tra la temperatura acquisita tramite termocoppia e quella ricavata attraverso la variazione di lunghezza d'onda di Bragg, opportunamente scalata utilizzando i coefficienti di proporzionalità, per i differenti sensori.

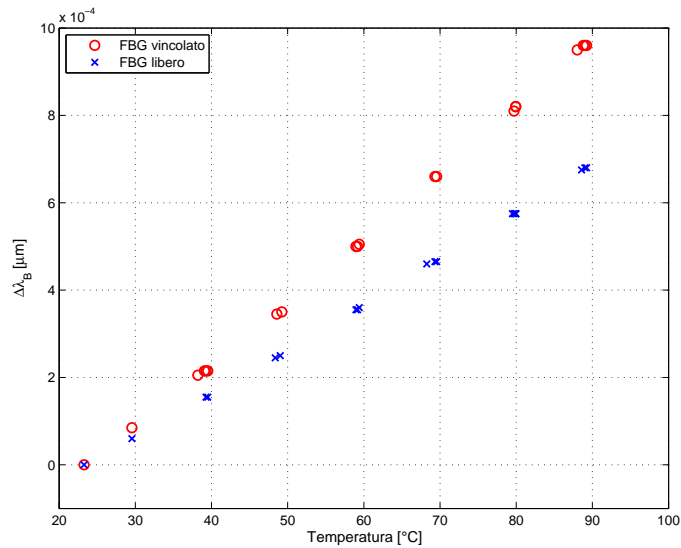


Figura 5.4: Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CE-G-02$ (tecnica 1)

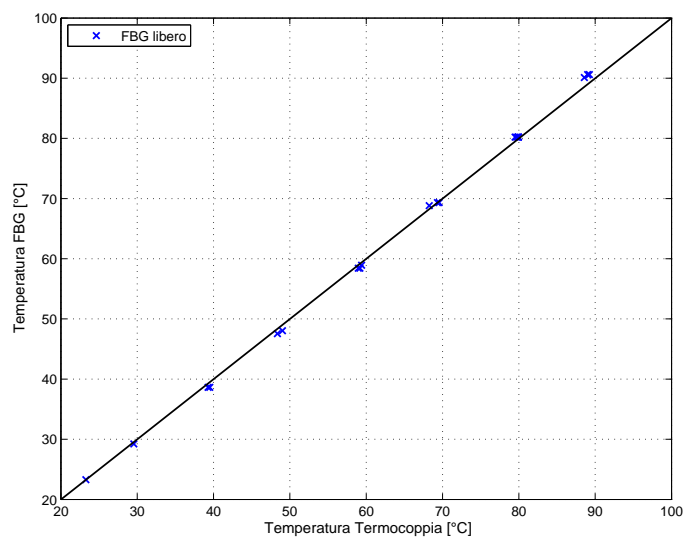


Figura 5.5: Calibrazione temperatura sensore libero, provino $CE-G-02$ (tecnica 1)

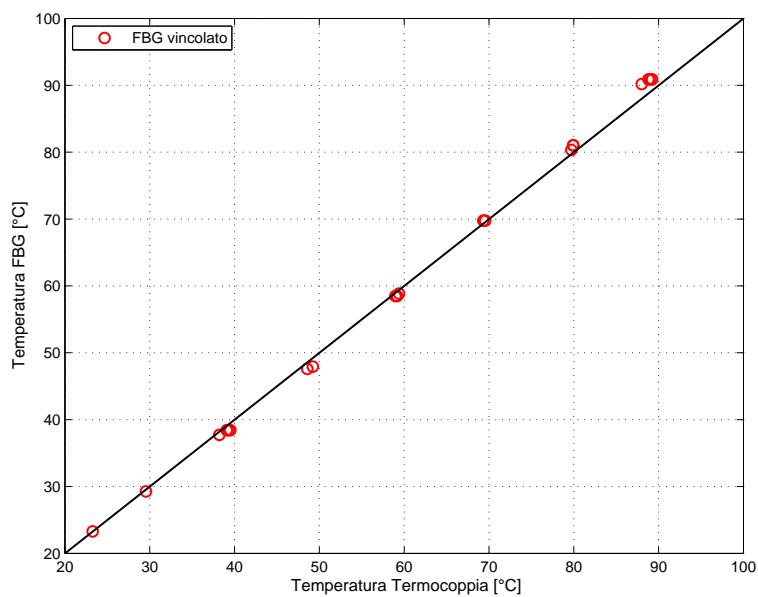


Figura 5.6: Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)

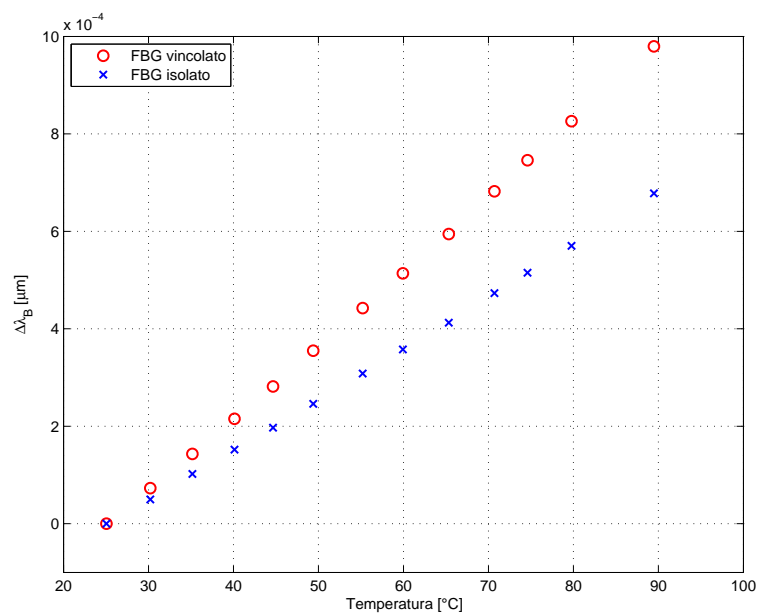


Figura 5.7: Risposta alla variazione di temperatura per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

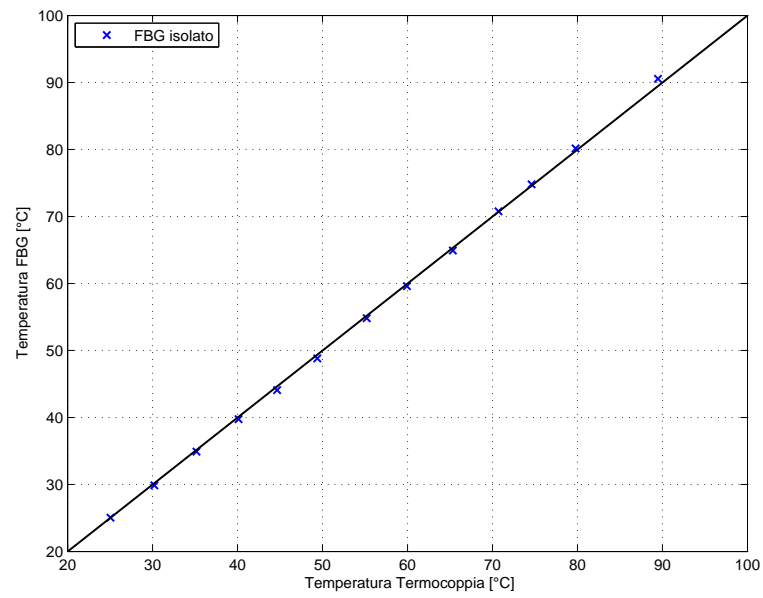


Figura 5.8: Calibrazione temperatura sensore isolato, provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

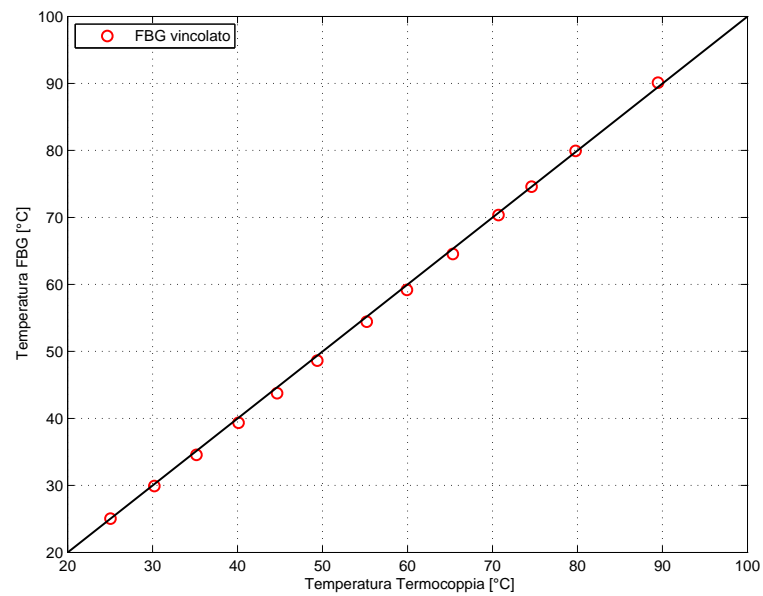


Figura 5.9: Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

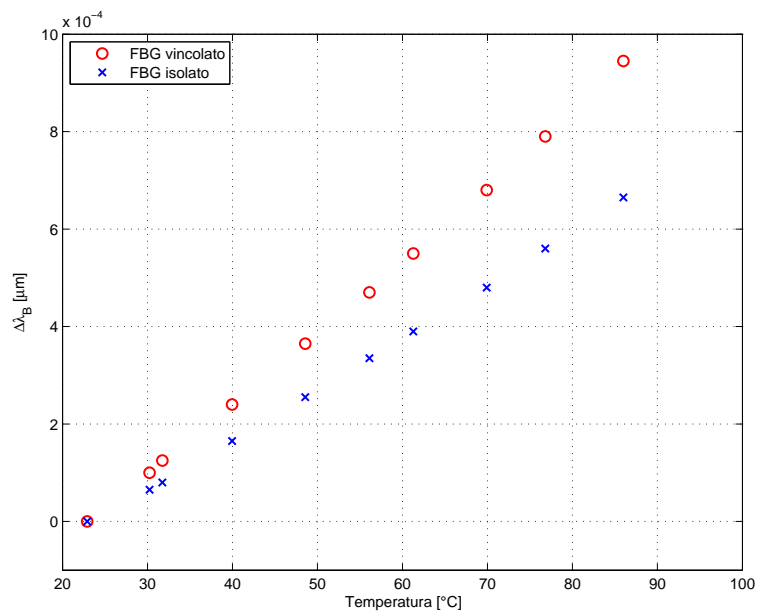


Figura 5.10: Risposta alla variazione di temperatura per il provino *CP-G-04* (tecnica 2)

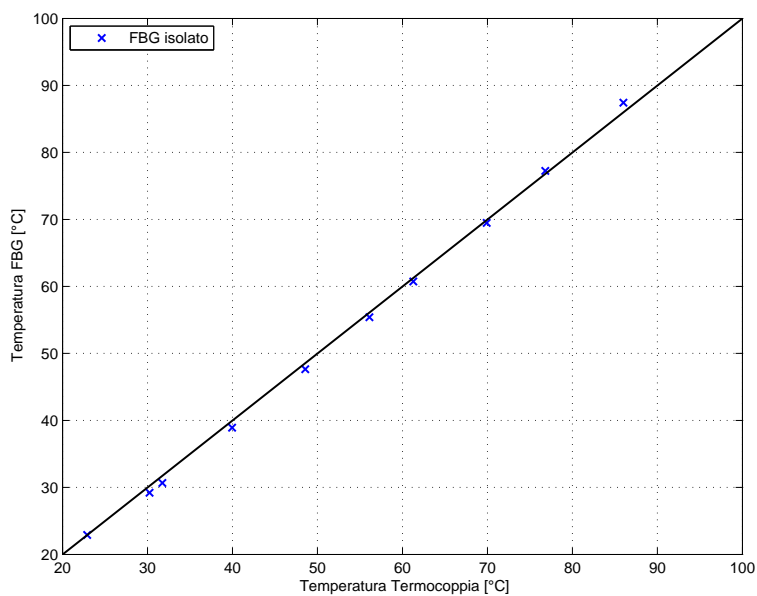


Figura 5.11: Calibrazione temperatura sensore isolato, provino *CP - G - 04* (tecnica 2)

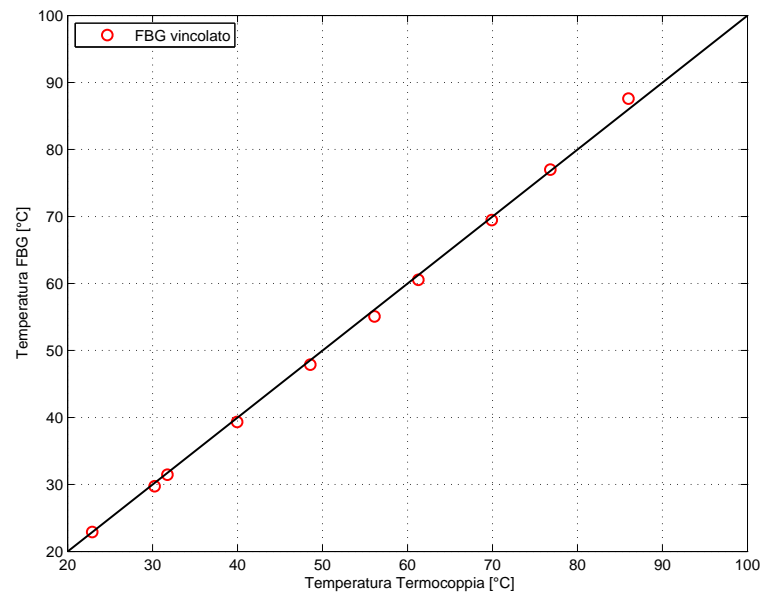


Figura 5.12: Calibrazione temperatura sensore vincolato, provino $CP-G-04$ (tecnica 2)

È possibile notare come in tutti i provini realizzati la risposta del sensore risulti sempre essere lineare e ben differenziata a seconda che essi siano inglobati nel materiale o isolati. Pertanto si può affermare che le tecniche di isolamento impiegate hanno prodotto i risultati desiderati. Inoltre i sensori presentano un buon riscontro della temperatura misurata con quella acquisita attraverso la termocoppia sia che siano posizionati in provini in carbonio sia che siano posti in provini in vetro.

In tab.5.1 e 5.2 sono riportati i valori dei coefficienti di proporzionalità ricavati per i diversi sensori.

Avendo utilizzato reticoli di Bragg aventi lunghezza d'onda posizionata nella finestra di $1550nm$, è possibile notare come la risposta alla temperatura sia la medesima in quanto il coefficiente di proporzionalità per i sensori isolati sia molto simile.

Viceversa i sensori inglobati nel materiale composito presentano un comportamento differente a causa delle diverse caratteristiche meccaniche della fibra di rinforzo utilizzata.

Pur avendo ottenuto una quantità di dati sperimentali non sufficiente ad una trattazione statistica si può osservare che nel caso dei sensori vincolati c'è una maggiore dispersione dei risultati.

Tabella 5.1: Coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura: tecnica capillare di estremità

ID provino	Sensore libero $K_T [\frac{\Delta pm}{\circ C}]$	Sensore vincolato $K_T [\frac{\Delta pm}{\circ C}]$
<i>CE - C - 01</i>	10.28	8.30
<i>CP - G - 02</i>	10.10	14.20

Tabella 5.2: Coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura: tecnica capillare passante

ID provino	Sensore isolato $K_T [\frac{\Delta pm}{\circ C}]$	Sensore vincolato $K_T [\frac{\Delta pm}{\circ C}]$
<i>CP - G - 03</i>	10.35	15.05
<i>CP - G - 04</i>	10.31	14.61

5.1.2 Calibrazione della risposta alla deformazione

Le prove di calibrazione necessarie a determinare i coefficienti di proporzionalità della risposta alla deformazione sono state effettuate mediante prove di trazione a temperatura costante eseguite su macchina di prova monoassiale MTS dotata di un sistema di lampade ad infrarossi per l'applicazione della temperatura desiderata in modo controllato.

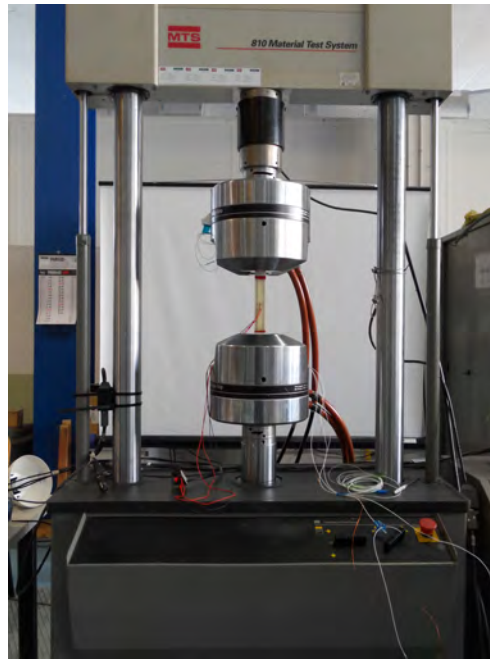


Figura 5.13: Material Test System

Confrontando la deformazione acquisita attraverso gli estensimetri (o l'estensometro nel caso del provino in carbonio) con la variazione della lunghezza d'onda dei sensori è stato possibile effettuare la calibrazione del sistema, ottenendo così il coefficiente di proporzionalità alla deformazione.

In particolare, le prove realizzate sono state effettuate variando la forza agente fino ad un valore massimo corrispondente ad una deformazione di $5000\mu\varepsilon$.

Per quanto affermato nel capitolo 3, i provini realizzati per la validazione del primo sistema di misura devono presentare risposta nulla per i sensori FBG posti all'interno dei tubi capillari metallici. A conferma di questa condizione viene riportato in fig.5.14 l'andamento delle variazioni di lunghezza d'onda di Bragg per i due reticoli posti nel provino in carbonio durante una prova di calibrazione in cui si evince che la risposta del sensore libero è nulla.

Questo risultato permette conferma il corretto isolamento del sensore rispetto alle deformazioni meccaniche agenti.

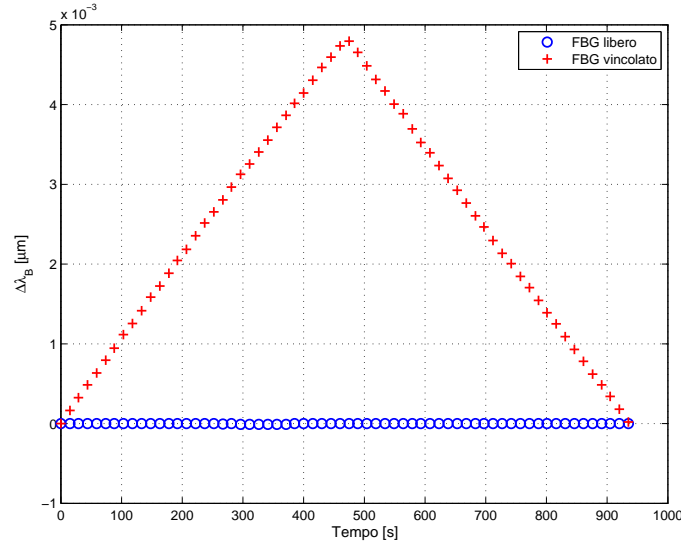


Figura 5.14: Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino *CE – C – 01* (tecnica 1)

La verifica della corretta determinazione del coefficiente di proporzionalità è stata realizzata attraverso un confronto tra il valore della deformazione ricavato utilizzando il sensore vincolato e quello acquisito mediante estensimetro. In fig.5.15 si può notare come vi sia un ottimo riscontro tra i valori del sensore ottico ed elettrico.

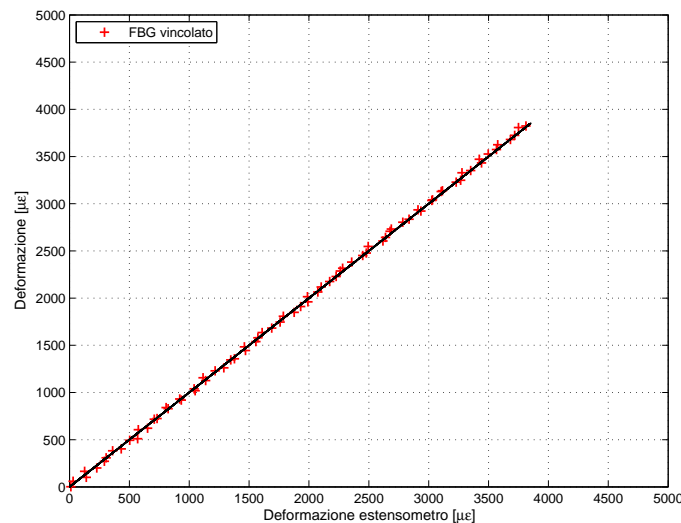


Figura 5.15: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino *CE – C – 01* (tecnica 1)

Il medesimo processo di calibrazione è stato eseguito per il secondo provino realizzato i cui risultati grafici sono riportati in fig.5.16 e in fig.5.17. Le osservazioni effettuate per i sensori del provino precedente sono valide anche in questo caso, garantendo un buon grado di ripetibilità alla procedura di realizzazione del sistema di misura.

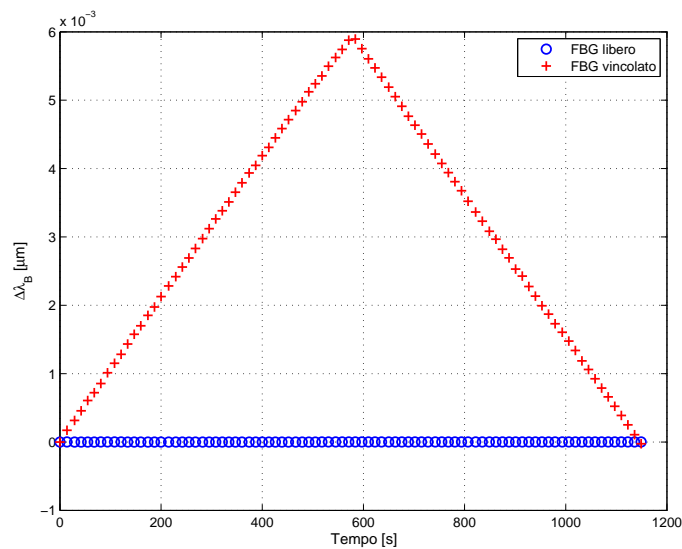


Figura 5.16: Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)

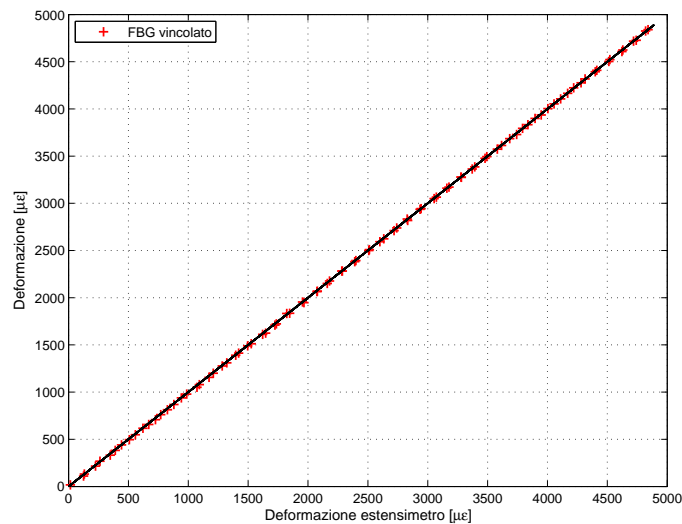


Figura 5.17: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)

Differentemente da quanto visto per i provini relativi alla tecnica del capillare d'estremità, nel caso della tecnica del capillare passante non si attende una risposta nulla per il capillare isolato, ma una variazione di lunghezza d'onda di Bragg sufficientemente differenziata rispetto al reticolo vincolato.

In fig.5.18 viene riportato l'andamento della variazione di lunghezza d'onda per i sensori inglobati nel terzo provino. Come previsto il sensore isolato risponde in modo differenziato rispetto al reticolo vincolato.

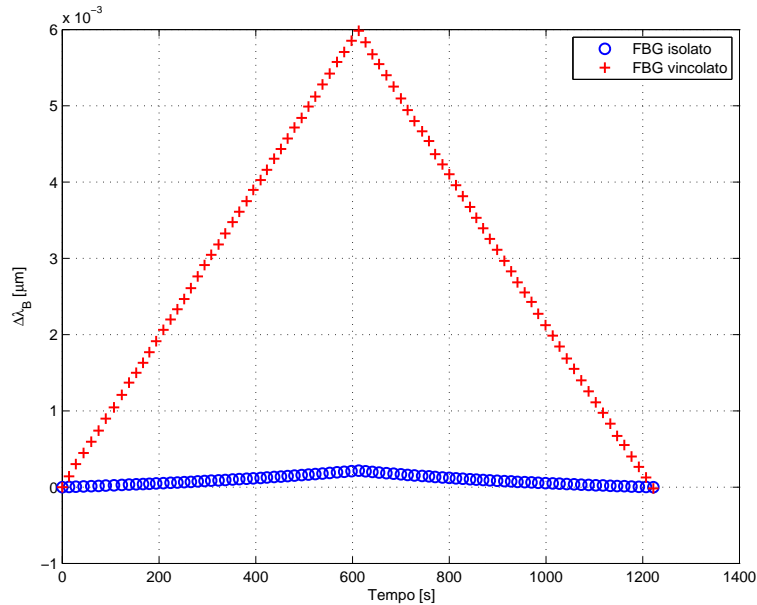


Figura 5.18: Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino *CP – G – 03* (tecnica 2)

In prima approssimazione può sembrare che entrambi i sensori presentino un comportamento lineare. In realtà la risposta del sensore isolato non è lineare, ma quadratica come è possibile osservare in fig.5.19 dove viene rappresentato l'andamento della deformazione rilevato attraverso la risposta del sensore isolato opportunamente scalata e l'estensimetro applicato sul provino.

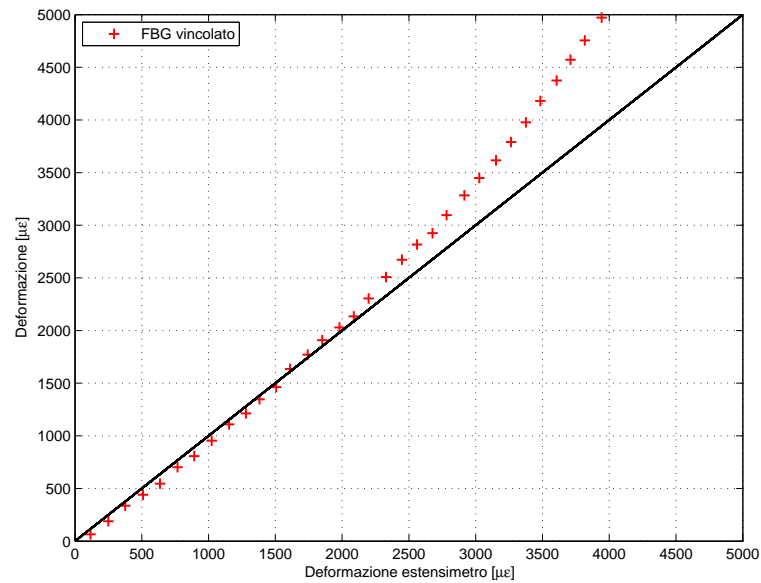


Figura 5.19: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG isolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

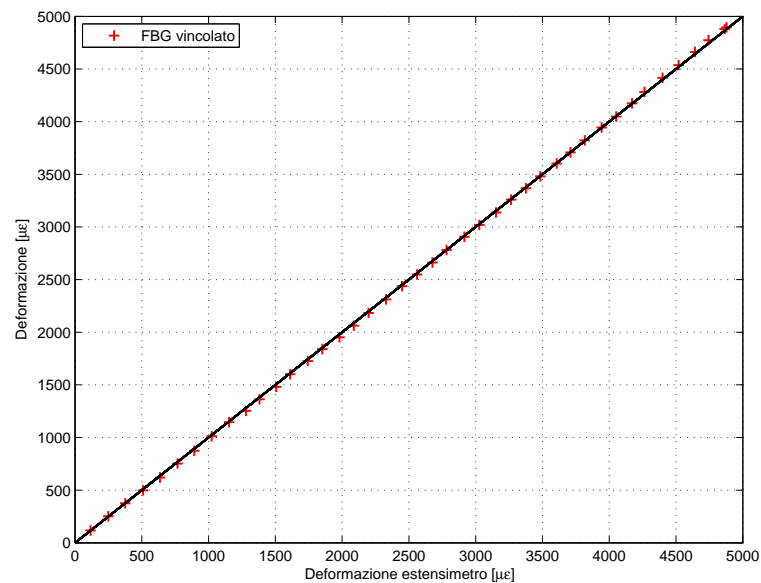


Figura 5.20: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

Pertanto approssimando la risposta del sensore come lineare è possibile rilevare correttamente le deformazioni agenti fino ad un valore di $2500\mu\epsilon$.

Il comportamento dei sensori inglobati nel quarto provino è analogo a quello appena descritto, ma la risposta del sensore posto nel capillare è approssimabile a lineare per un intervallo di deformazioni minore (fino a $2000\mu\varepsilon$). L'ampiezza ridotta dell'intervallo di applicabilità della tecnica può essere conseguente ad una maggiore penetrazione dell'adesivo impiegato per la sigillatura degli estremi del capillare o ad una errata disposizione della fibra all'interno del capillare stesso. I risultati grafici rappresentanti il comportamento dei due sensori inglobati nel quarto provino sono riportati nelle immagini seguenti.

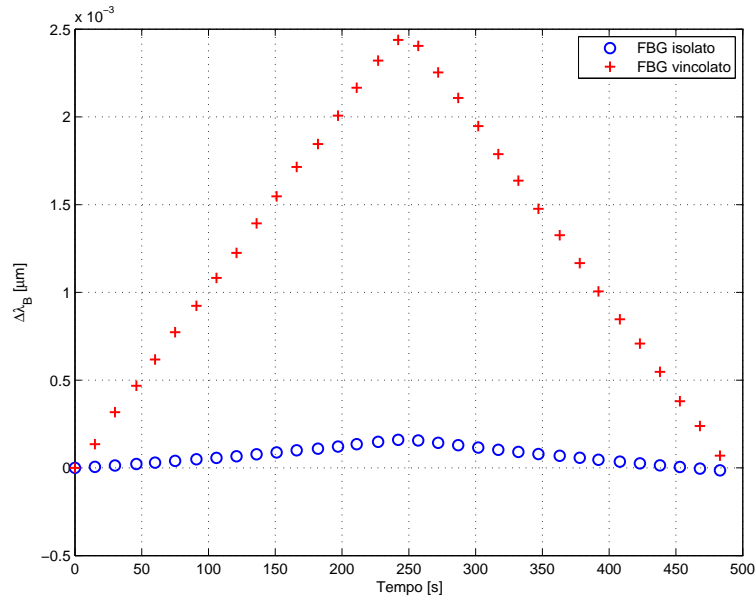


Figura 5.21: Variazione della lunghezza d'onda durante una prova di trazione a temperatura costante per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)

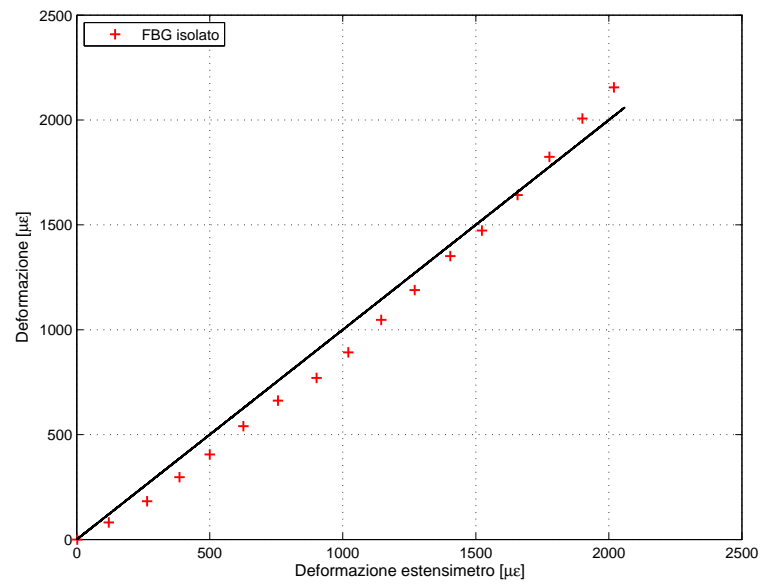


Figura 5.22: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG isolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)

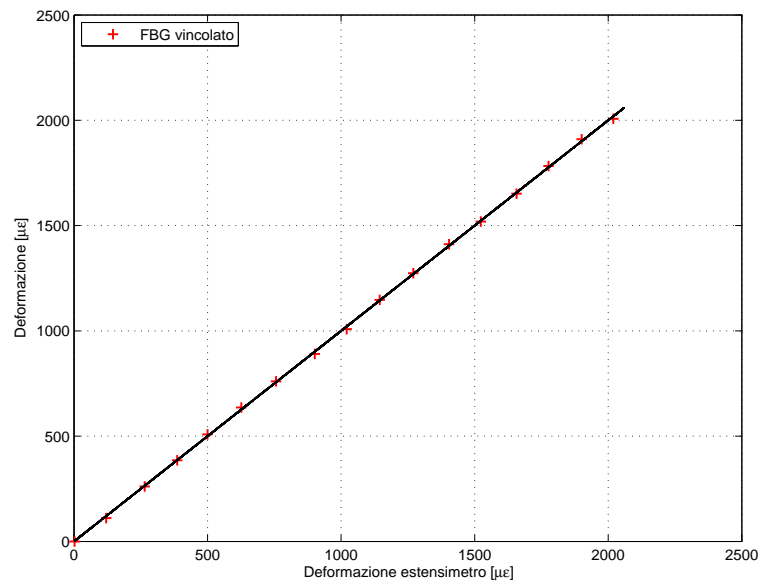


Figura 5.23: Confronto tra la deformazione rilevata dal sensore FBG vincolato e dall'estensimetro per il provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)

In tab.5.3 e tab.5.4 sono rappresentati i coefficienti di proporzionalità alla deformazione per i sensori utilizzati.

I coefficienti di proporzionalità dei sensori isolati, nel caso della tecnica del capillare passante, sono differenziati rispetto a quelli dei sensori vincolati per più di un ordine di grandezza confermando quanto dedotto attraverso l'analisi numerica inizialmente realizzata.

Tabella 5.3: Coefficienti di proporzionalità rispetto alla deformazione, per il primo sistema di misura

ID provino	Sensore libero $K_\varepsilon \left[\frac{\Delta pm}{\mu\varepsilon} \right]$	Sensore vincolato $K_\varepsilon \left[\frac{\Delta pm}{\mu\varepsilon} \right]$
<i>CE - C - 01</i>	0	1.270
<i>CE - G - 02</i>	0	1.252

Tabella 5.4: Coefficienti di proporzionalità rispetto alla deformazione, per il secondo sistema di misura

ID provino	Sensore isolato $K_\varepsilon \left[\frac{\Delta pm}{\mu\varepsilon} \right]$	Sensore vincolato $K_\varepsilon \left[\frac{\Delta pm}{\mu\varepsilon} \right]$
<i>CP - G - 03</i>	0.030	1.170
<i>CP - G - 04</i>	0.074	1.215

5.2 Validazione sperimentale

In seguito alla calibrazione dei sensori è stato possibile effettuare le prove necessarie alla validazione sperimentale dei sistemi di misura studiati. La campagna di prove effettuate prevede l'applicazione di deformazioni e temperatura variabili per la verifica del corretto disaccoppiamento del segnale. In particolare, l'applicazione delle sollecitazioni termiche è stata effettuata attraverso lampade infrarosse ad intensità luminosa variabile.

Nelle pagine seguenti sono riportati grafici rappresentanti:

- l'andamento delle variazioni di lunghezza d'onda nel tempo per i due sensori di ogni provino;
- il confronto tra la deformazione percepita dal sistema di sensori FBG e quella acquisita tramite gli estensimetri posizionati sul provino;
- il confronto tra la temperatura rilevata dal sistema di sensori FBG e quella acquisita mediante termocoppia.

Tecnica capillare d'estremità

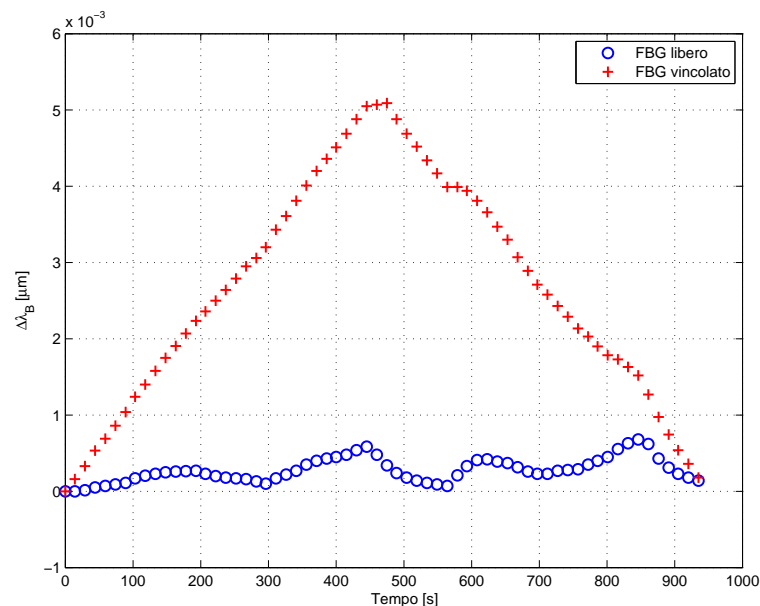


Figura 5.24: Risposta dei sensori del provino *CE – C – 01* (tecnica 1) alle sollecitazioni applicate

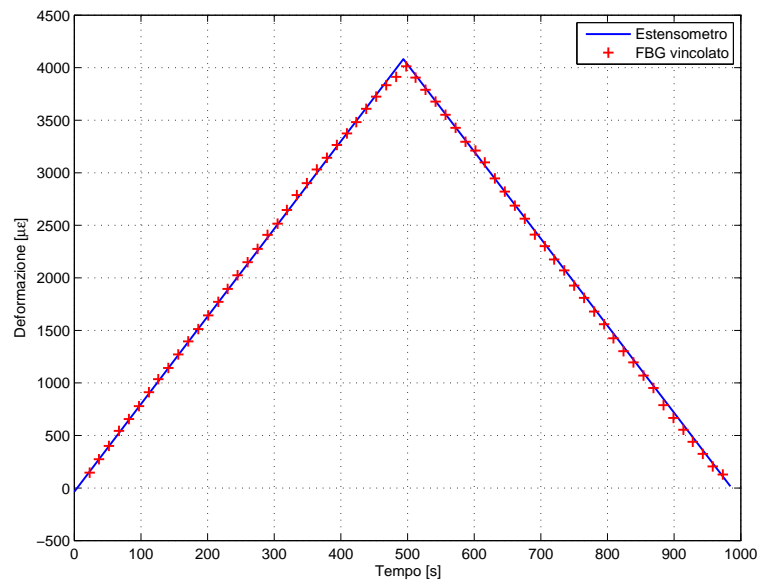


Figura 5.25: Deformazione misurata dai sensori del provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)

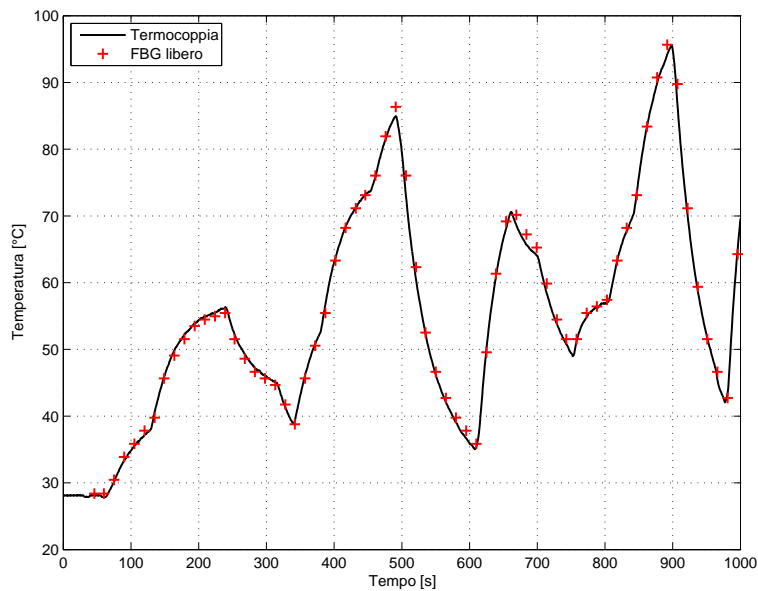


Figura 5.26: Temperatura misurata dai sensori del provino $CE - C - 01$ (tecnica 1)

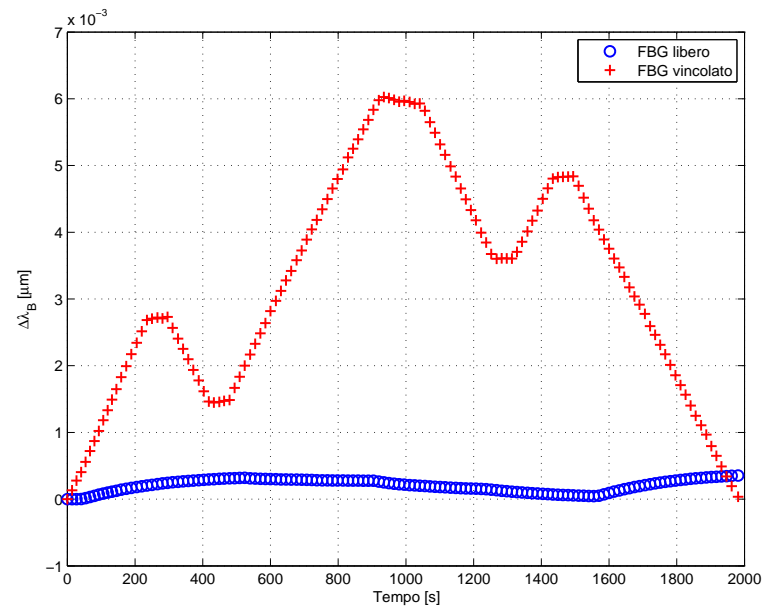


Figura 5.27: Risposta dei sensori del provino *CE – G – 02* (tecnica 1) alle sollecitazioni applicate

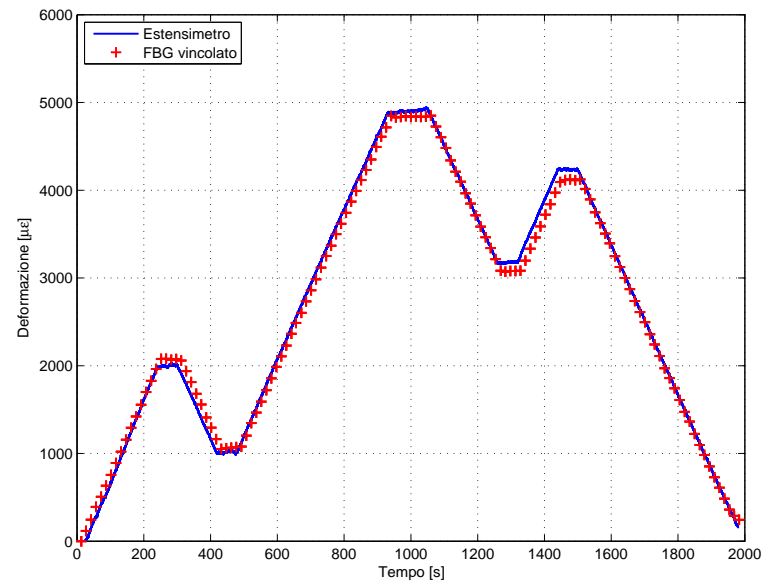


Figura 5.28: Deformazione misurata dai sensori del provino *CE – G – 02* (tecnica 1)

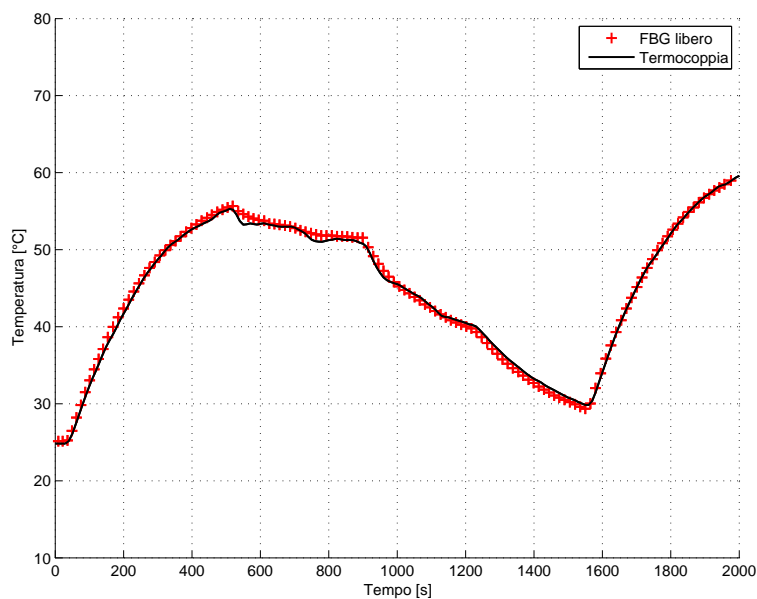
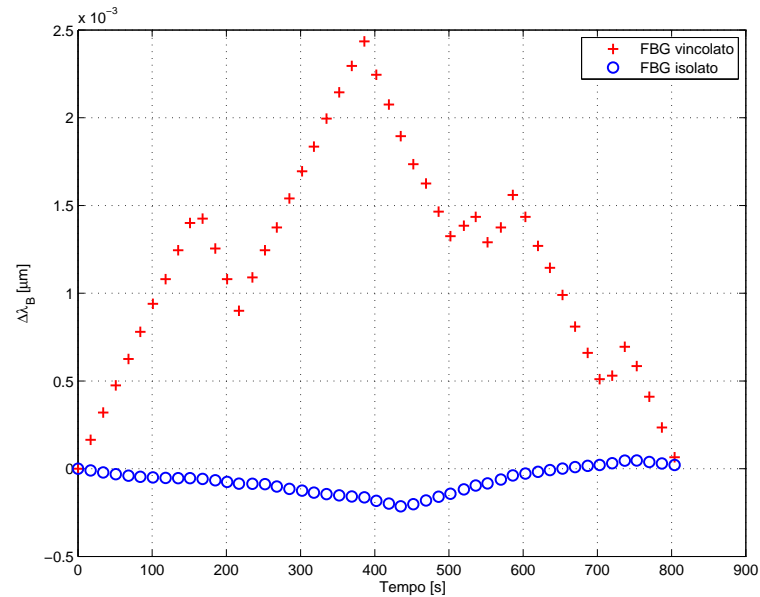
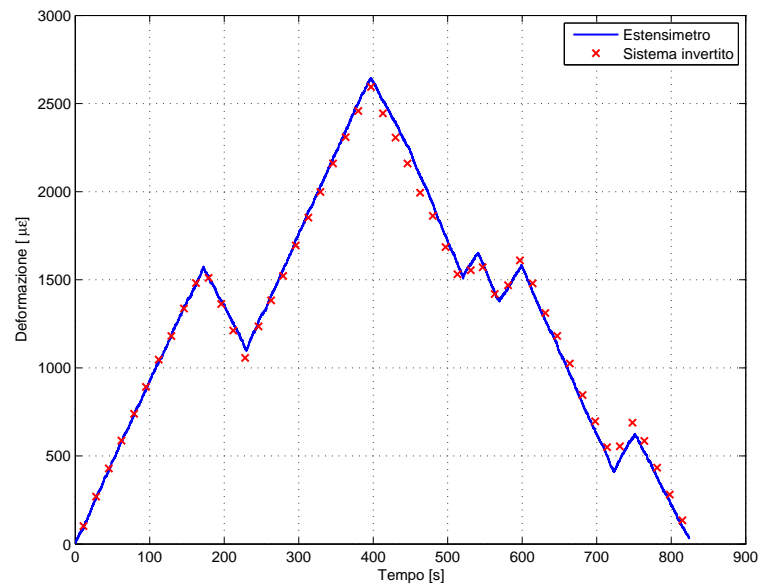


Figura 5.29: Temperatura misurata dai sensori del provino $CE - G - 02$ (tecnica 1)

Le prove di validazione, realizzate per la tecnica del capillare d'estremità, hanno mostrato un ottimo riscontro tra i valori rilevati dai sensori FBG inglobati nei provini e quanto acquisito attraverso la termocoppia e gli estensimetri applicati.

Alla luce di queste prove è possibile affermare che tale tecnica permette di effettuare un corretto disaccoppiamento del segnale.

Tecnica capillare passante

Figura 5.30: Risposta dei sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) alle sollecitazioni applicateFigura 5.31: Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

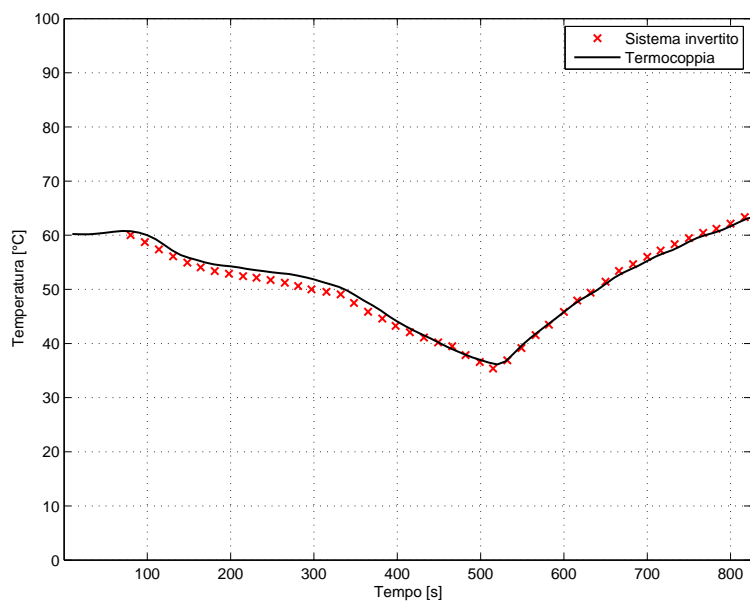


Figura 5.32: Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2)

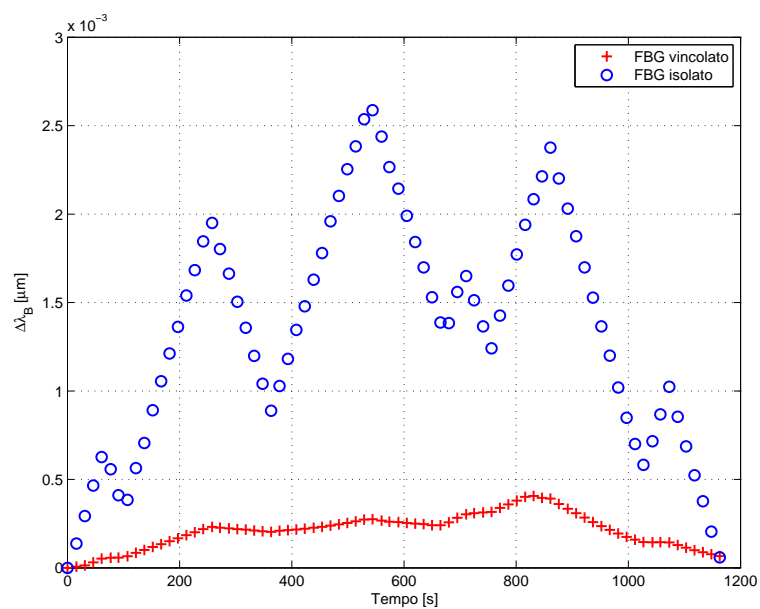


Figura 5.33: Risposta dei sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2) alle sollecitazioni applicate

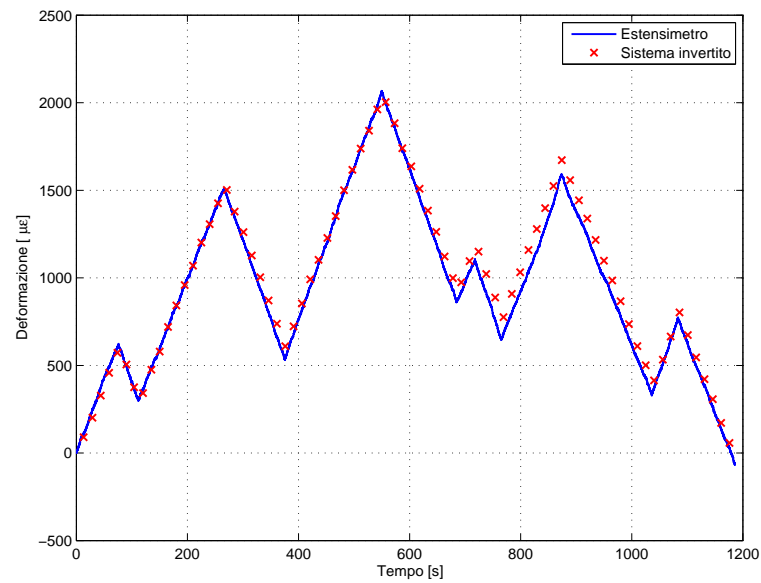


Figura 5.34: Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)

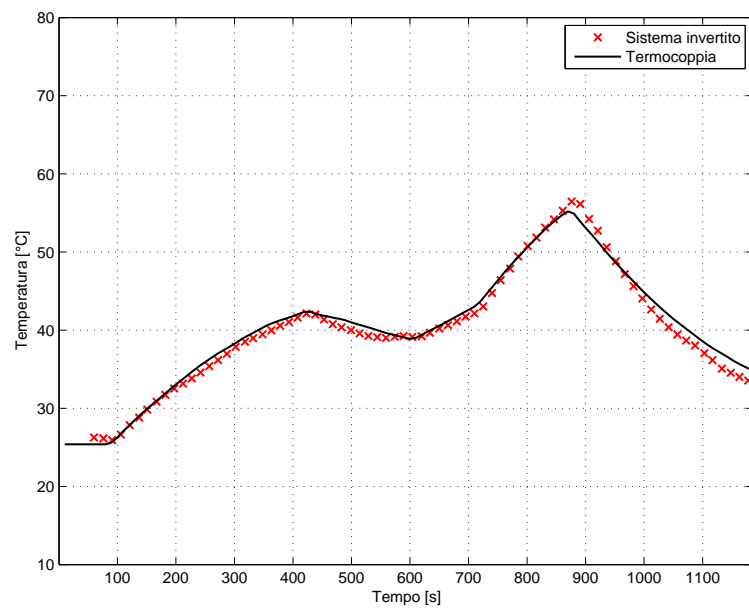


Figura 5.35: Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 04$ (tecnica 2)

Le prove di validazione, realizzate per la tecnica del capillare passante, hanno mostrato un buon riscontro tra quanto acquisito mediante termocoppia

ed estensimetri ed i valori rilevati dai sensori FBG inglobati solo per valori di deformazione inferiori ai $2500\mu\varepsilon$.

Nel caso in cui la tecnica fosse utilizzata per valori superiori il disaccoppiamento del segnale risulterebbe essere errato. In particolare potrebbero essere ancora considerate accettabili le misure di deformazione (fig.5.37), mentre le misure di temperatura risultano affette da errori considerevoli (fig.5.36).

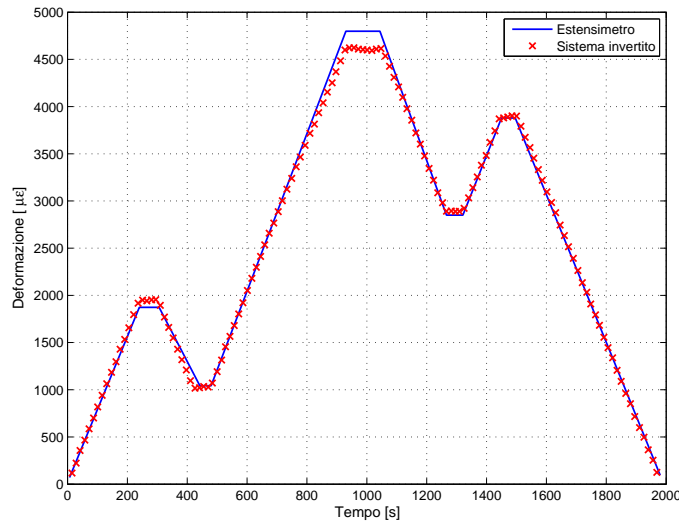


Figura 5.36: Deformazione misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) per deformazioni superiori a $2500\mu\varepsilon$

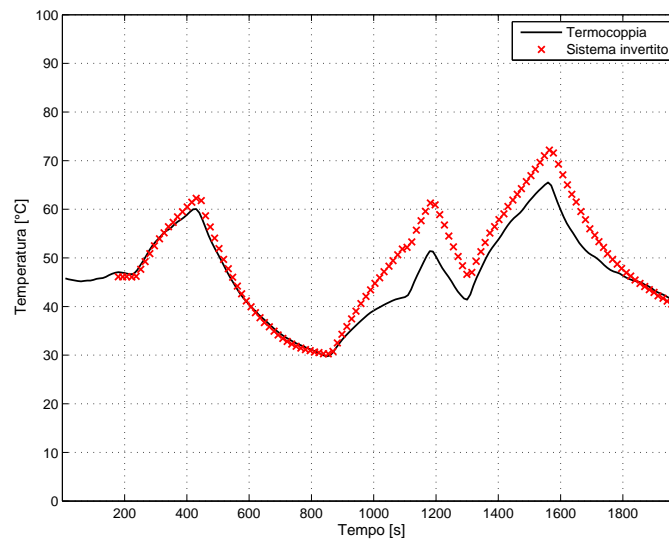


Figura 5.37: Temperatura misurata dai sensori del provino $CP - G - 03$ (tecnica 2) per deformazioni superiori a $2500\mu\varepsilon$

Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca condotta durante questa tesi ha avuto come obiettivo primario l'indagine delle problematiche tecnologiche connesse alla realizzazione di smart structures, con particolare attenzione rivolta allo sviluppo di sistemi di misura basati sull'impiego di sensori ottici.

La possibilità di disaccoppiare il segnale proveniente dai sensori ottici a reticolo di Bragg attraverso l'implementazione di tecniche di misura in grado di soddisfare i requisiti di progetto è stato il punto focale su cui è stato concentrato il lavoro di tesi.

L'analisi tecnologica svolta ha permesso di evidenziare i passi necessari per la realizzazione dei sistemi di misura indagati, evidenziando le problematiche riscontrate.

Per quanto concerne lo studio e la validazione sperimentale delle tecniche di misura presentate è possibile affermare che si è giunti a risultati nel complesso soddisfacenti, riuscendo a disaccoppiare correttamente il segnale e quindi rilevare le sollecitazioni applicate.

A causa delle differenti caratteristiche delle tecniche di misura studiate, è possibile evidenziarne le limitazioni di impiego. In particolare, nel caso in cui sia necessario rilevare deformazioni superiori a $2500\mu\varepsilon$ è necessario adottare la tecnica avente il sensore FBG posto sull'estremità della fibra ottica, in quanto l'altra tecnica studiata non permette un corretto disaccoppiamento del segnale per deformazioni superiori. Viceversa la possibilità di utilizzare le due tecniche è invertita nel caso in cui si decida di installare sensori a reticolo di Bragg a valle del capillare.

L'invasività presentata dall'impiego del capillare metallico potrebbe non presentare particolari problemi visti i requisiti considerati, ma sarà comunque opportuno effettuare nel prosieguo del progetto un'indagine relativa al grado di invasività dei capillari attraverso una campagna di prove di fatica.

Nel caso in cui le prove mostrassero una resistenza a fatica insufficiente sarà possibile ridurre l'invasività del sistema attraverso trattamenti chimici che possano incrementare l'adesione tra i capillari e la matrice del composito. Inoltre sarà possibile agire anche sulle dimensioni dei capillari utilizzando fibre ottiche di nuova generazione aventi diametri minimi di $50\mu m$ e sensori

FBG più corti ($1mm$).

L'apporto di queste migliorie permetterebbe, infatti, l'impiego di capillari aventi dimensioni trasversali e longitudinali minori, riducendone l'invasività e incrementando quindi le prestazioni della struttura.

Ulteriori sviluppi che andranno effettuati nel prosieguo del progetto e più in generale per la realizzazione di smart structures utilizzando sensori a fibra ottica, riguardano la possibilità di indagare soluzioni tecnologiche differenti rispetto a quelle prese in esame che possano quindi permettere l'inglobamento dei sensori direttamente nel materiale composito, senza la necessità di utilizzare tubi capillari.

Bibliografia

- [1] Raman Kashyap. *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, 2010
- [2] Rongqing Hui, Maurice O'Sullivan. *Fiber Optic Measurement Techniques*, Elsevier Academic Press, 2009
- [3] Francis Yu and Shizhouo Yin. *Fiber Optic Sensor*, Marcel Dekker, 2002
- [4] Y. Wang, B. Han, D.W. Kim, A. Bar-Cohen and P. Joseph. *Integrated Measurement Technique for Curing Process-Dependent Mechanical Properties of Polymeric Materials Using Fiber Bragg Grating*, Society for Experimental Mechanics, No. 279, 3 August 2007
- [5] P. Bettini. *Laminati Compositi Intelligenti: Problematiche Tecnologiche e Valutazione dell'Invasività dell'Inglobamento di Sensori e Attuatori*, PhD Thesis, Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, 2008
- [6] Y. Wang, B. Han, D.W. Kim, A. Bar-Cohen and P. Joseph. *Simultaneous Independent Temperature and Strain Measurement Using In-fibre Bragg Grating Sensor*, Electronics Letters, Vol. 32 No. 12, 6th June 1996
- [7] O. Frazão, L. Marques, J.M. Marques, J.M. Baptista and J.L. Santos. *Simple sensing head geometry using fibre Bragg gratings for strain-temperature discrimination*, Optics Communications, No. 279, 2007
- [8] Minho Song, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi and ByoungHo Lee. *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber*

- Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube*, Academic Press, 1997
- [9] Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Helen L. W. Chan, Chung-Loong Choy and Muhtesem Süleyman Demokan. *Discrimination Between Strain and Temperature With a Single Fiber Bragg Grating*, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 33, No. 3, May 5 2002
- [10] R. Montanini and L. D'Acquisto. *Simultaneous measurement of temperature and strain in glass fiber/epoxy composites by embedded fiber optic sensors: I. Cure monitoring*, IOP Publishing Ltd, 13 August 2007
- [11] T. Iwashima, A. Inoue, M. Shigematsu, M. Nishimura and Y. Hattori. *Temperature compensation technique for fibre Bragg gratings using liquid crystalline polymer tubes*, Electronics Letters, Vol. 33 No.5, 27th February 1997
- [12] Whitten L. Schulz, Eric Udd, John M. Seim, and Galen E. McGill. *Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highways*, Blue Road Research
- [13] Sui P. Yam, Greg W. Baxter, Scott A. Wade and Stephen F. Collins *Modelling of an Alternative Pi-phase-shifted Fibre Bragg Grating Operating at Twice the Bragg Wavelength*, CTME, Victoria University, Melbourne
- [14] Wei-Chong Du, Xiao-Ming Tao, and Hwa-Yaw Tam *Fiber Bragg Grating Cavity Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature*, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 11, NO. 1, JANUARY 1999
- [15] Young-Geun Han, Ju Han Lee, and Sang Bae Lee *Discrimination of bending and temperature sensitivities with phase-shifted long-period fiber gratings depending on initial coupling strength*, OPTICS EXPRESS, Vol. 12, No. 14, 12 July 2004
- [16] L. Jin, W. Zhang, H. Zhang, B. Liu, J. Zhao, Q. Tu, G. Kai and X. Dong. *An Embedded FBG Sensor for Simultaneous Measurement of Stress*

- and Temperature*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18 No. 1, January 1, 2006
- [17] S. F. O. Silva, O. Frazão, J. L. Santos, F. M. Araújo, and L. A. Ferreira. *Discrimination of Temperature, Strain, and Transverse Load by Using Fiber Bragg Gratings in a Twisted Configuration*, IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 6, December 2006
- [18] N. Lagakos, J. A. Bucaro, and J. Jarzynski. *Temperature-induced optical phase shifts in fibers*, Applied Optics, Vol. 20, No. 13, 1 July 1981
- [19] Nittapon Srisuk. *A Micromechanics Model Of Thermal Expansion Coefficient in Fiber Reinforced Composites*, The University of Texas at Arlington, December 2010
- [20] Suchandan Pal, Tong Sun, Kenneth T.V. Grattan, Scott A. Wade, Stephen F. Collins, Gregory W. Baxter, Bernard Dussardier, Gerard Monnom *Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimised for sensor applications over a wide range of temperatures*, Elsevier, Sensors and Actuators A 112, 2004
- [21] P. Bettini and G. Sala. *Preliminary Assessment of Helicopter Rotor Blades Fatigue Endurance Through Embedded F.O. Sensors*, 24th ICAF Symposium, 2007
- [22] Dassault Systèmes Simulia. *Abaqus Keywords Reference Manual*. Version 6.10
- [23] P. Nastuzzo. *Inglobamento di sensori in fibra ottica per il monitoraggio strutturale di pale di elicottero: Aspetti tecnologici e caratterizzazione sperimentale*, Master's thesis, Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, 2007
- [24] P. A. M. Agazzani. *Monitoraggio della Delaminazione nei Laminati in Composito tramite Sensori in Fibra Ottica*, Master's thesis, Politecnico di

Milano - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, AA 2007-2008