



**POLITECNICO
DI TORINO**

Corso di laurea in Ingegneria Aerospaziale

Attività di calibrazione sperimentale di
sensori FBG per applicazioni aerospaziali

Relatore:

**Prof. Dalla Vedova Matteo Davide
Lorenzo**

Laureando:

Federico Sibilio

Correlatore:

Ing. Aimasso Alessandro

Correlatore:

Ing. Bertone Matteo

Indice

1	La fibra ottica e il sensore FBG	11
1.1	La fibra ottica	11
1.1.1	Come funziona la fibra ottica	12
1.1.2	Modi di propagazione	14
1.1.3	Sensori a fibra ottica	15
1.2	Sensori FBG	16
1.2.1	Metodi di realizzazione	17
1.2.2	Condizioni ambientali e al contorno sul sensore FBG	19
1.2.3	Sensori FBG nel settore aerospaziale	22
2	Strumentazione	25
2.1	Strumenti	25
2.1.1	Camera Climatica	25
2.1.2	Interrogatore	26
2.1.3	SmartSoft	27
2.1.4	Pesi	28
2.2	Banco di prova	29
3	Configurazione dei provini	30
3.1	Materiali	30
3.1.1	Fibra Ottica	30
3.1.2	Materiali di supporto	31
3.1.3	Specifiche materiali per fissare la fibra	33
3.2	Metodi di incollaggio	35
3.3	Descrizione Provini	37
3.3.1	Configurazioni per studio termico	37
3.3.2	Configurazioni per lo studio di deformazione meccanica	38
4	Stato dell'arte	39
4.1	Sensore FBG	39
4.2	FBG come sensore termico	40
4.2.1	Presentazione utilizzo dell'FBG come sensore termico	40
4.2.2	Provini utilizzati e ricerca effettuata	42
4.2.3	Risultati	42
4.3	Meccanico	44
4.3.1	FBG come sensore Meccanico	45
4.3.2	Provini utilizzati ed esperimenti fatti	45
4.3.3	Risultati	47

5	Analisi Termica	49
5.1	Presentazione Lavoro	49
5.2	Risultati e Confronto	62
6	Analisi Meccanica	80
6.1	Provino incastrato	80
6.1.1	FBG sottoposto a trazione	82
6.1.2	FBG sottoposto a compressione	87
6.1.3	FBG sottoposto a trazione per lunghi periodi	92
6.1.4	FBG sottoposto a compressione per lunghi periodi	94
6.2	Secondo provino	97
6.3	Risposta dinamica	99
6.4	Risultati	100
7	Analisi Termo-Meccaniche	103
7.1	Analisi Preliminare	105
7.2	Analisi estesa	106
8	Conclusioni	111
8.1	Futuri sviluppi	113

Elenco delle figure

1.1	Struttura fibra ottica	11
1.2	Funzionamento fibra ottica	12
1.3	Riflessione interna nella fibra ottica	13
1.4	Cono di accettazione	14
1.5	Modi di propagazione fibra ottica	15
1.6	Sensore FBG	16
1.7	Interferometer technology	18
1.8	Phase mask technology	19
1.9	Point-by-point	19
1.10	Sistemi aeronautici	23
2.1	Camera Climatica	26
2.2	Display comandi camera climatica	26
2.3	Interrogatore	27
2.4	Schermata SmartSoftSSI v.3.1 [18]	28
3.1	Provino in lega di alluminio	31
3.2	Provino in composito in fibra di carbonio	32
3.3	Immagine rappresentativa di FBG fissata con kapton [4]	35
3.4	Immagine rappresentativa di FBG fissata con resina epossidica [4]	36
3.5	Immagine rappresentativa di FBG fissata con colla [4]	36
4.1	Analisi precedenti: Risultati calibrazione alluminio [4]	43
4.2	Analisi precedenti: Risultati calibrazione carbonio [4]	44
4.3	Configurazione provini per studio deformazione [7]	46
4.4	Stato d'arte: Calibrazione Compressione [7]	47
4.5	Stato d'arte: Calibrazione Trazione [7]	48
5.1	Acquisizione dati Alluminio	51
5.2	Acquisizione dati Carbonio	52
5.3	Acquisizione dati CS C4	52
5.4	Calibrazione Risultati Alluminio	53
5.5	Calibrazione Risultati Carbonio	54
5.6	Calibrazione nuove configurazioni	54
5.7	Calibrazione per step AL3	55
5.8	Calibrazione per step AL2	56
5.9	Calibrazione per step AL1	56
5.10	Calibrazione per step C3	56
5.11	Calibrazione per step C2	57
5.12	Calibrazione per step C1	57
5.13	Calibrazione per step C4	57
5.14	Calibrazione per step CS	58

5.15	Risultati z-score: Alluminio	59
5.16	Risultati z-score: Carbonio	60
5.17	Ciclo termico di verifica Camera Climatica	60
5.18	Ciclo termico di verifica: Risultati Alluminio	61
5.19	Ciclo termico di verifica: Risultati Carbonio	61
5.20	Risultati calibrazione per step AL2	62
5.21	Analisi precedenti: Alluminio con resina pre tensionato [4]	63
5.22	Ripetibilità: Alluminio con resina pre-tensionato	64
5.23	Dettaglio Taratura: Carbonio con resina pre-tensionato	65
5.24	Linearizzazione: Alluminio fissato con kapton	66
5.25	Carlucci: Linearizzazione Alluminio fissato con kapton [4]	67
5.26	Acquisizione dati e calibrazione C3	68
5.27	Acquisizione dati: Carbonio resina pre-tensionato C4	69
5.28	Ripetibilità: Carbonio resina pre-tensionato C4	70
5.29	Ripetibilità Errorbar: Carbonio resina pre-tensionato C4	70
5.30	Verifica: Carbonio colla non tensionato	71
5.31	Verifica: Carbonio resina C4	72
5.32	C3: Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$	73
5.33	C3: Errore Assoluto $T_{Camera} - T_{FBG}$	73
5.34	C4: Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$	74
5.35	C3: Errore Assoluto $T_{Camera} - T_{FBG}$	74
5.36	Ciclo termico di verifica: Risultati C3	75
5.37	C3: Errore Assoluto ciclo termico di verifica	75
5.38	C3: Errore Assoluto per step di temperatura ciclo termico di verifica	76
5.39	C3: ciclo termico di verifica Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$	76
5.40	C4: Errore Assoluto ciclo termico di verifica	77
5.41	C3: Errore Assoluto per step di temperatura ciclo termico di verifica	78
5.42	C4: ciclo termico di verifica Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$	78
5.43	Deviazione standard acquisizione dati C3 e C4	79
6.1	Confronto fibra 1: Trazione 9/3/2023	82
6.2	Confronto fibra 2: Trazione 9/3/2023	83
6.3	Confronto fibra 1: Trazione 10/3/2023	83
6.4	Confronto fibra 2: Trazione 10/3/2023	83
6.5	Punti medi λ in funzione dei pesi	84
6.6	Calibrazione Trazione	85
6.7	Confronto Calibrazione: Trazione	85
6.8	Fibra 1: Varianza e Errore Assoluto	87
6.9	Fibra 2: Varianza e Errore Assoluto	87
6.10	Confronto dati Compressione: Fibra 1	88
6.11	Confronto dati Compressione: Fibra 2	88
6.12	Punti medi λ in funzione dei pesi	89
6.13	Calibrazione compressione	89
6.14	Calibrazione compressione Errorbar	90
6.15	FBG 1: Compressione - Varianza e Errore Assoluto	91
6.16	FBG 2: Compressione - Varianza e Errore Assoluto	91
6.17	Fibra 1: Confronto dati Trazione 5 min	92
6.18	Fibra 2: Confronto dati Trazione 5 min	92

6.19	Calibrazione Taratura 5 min FBG1 e FBG2	93
6.20	Trazione 5 min: varianza e errore assoluto FBG 1 e FBG 2	94
6.21	Fibra 1: Confronto dati compressione 5 min	95
6.22	Fibra 2: Confronto dati compressione 5 min	95
6.23	Calibrazione: compressione 5 min	95
6.24	FBG1 Compressione 5 min: Varianza e Errore Assoluto	96
6.25	FBG2 Compressione 5 min: Varianza e Errore Assoluto	97
6.26	Secondo provino: Trazione Confronto dati	98
6.27	Secondo provino: Compressione Confronto dati	98
6.28	Varianza trazione secondo provino	98
6.29	Varianza compressione secondo provino	98
6.30	Acquisizione dati oscillante 13,5 cm	99
6.31	Acquisizione dati oscillante 16 cm	100
6.32	Acquisizione dati oscillante 18 cm	100
7.1	Banco di Prova analisi termo-meccaniche	103
7.2	Acquisizione dati $T = 0^{\circ}\text{C}$	105
7.3	Acquisizione dati $-20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}$	106
7.4	Valori medi λ_m - Peso $[-20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}]$	106
7.5	Interpolazione λ_m - Peso $[-20^{\circ}\text{C}; 20^{\circ}\text{C}]$	107
7.6	Acquisizione dati $[-30^{\circ}\text{C}; 0^{\circ}\text{C}]$	107
7.7	Acquisizione dati $[10^{\circ}\text{C}; 40^{\circ}\text{C}]$	108
7.8	Valori medi λ_m - Peso $[-40^{\circ}\text{C}; 50^{\circ}\text{C}]$	108
7.9	Interpolazione λ_m - Peso $[-40^{\circ}\text{C}; 50^{\circ}\text{C}]$	109
7.10	Errore assoluto valori λ - retta interpolante	110

Elenco delle tabelle

3.1	Dimensioni lastra lega alluminio	31
3.2	Proprietà meccaniche lega di alluminio	32
3.3	Proprietà termiche lega di alluminio - prove termiche	32
3.4	Dimensioni composito fibra di carbonio - prove termiche	32
3.5	Dimensioni composito fibra di carbonio - prove meccaniche	33
3.6	Proprietà termiche kapton	34
3.7	Proprietà meccaniche kapton	34
3.8	Proprietà resina epossidica	35
4.1	Pesi utilizzati per prove deformazione meccanica	46
5.1	Valori K_{Tmean} e λ_{0mean}	55
5.2	Valori K_{Tmean} e λ_{0mean} AL1	67
5.3	C3: Varianza media per step di temperatura	75
5.4	C4: Varianza media per step di temperatura	77
6.1	Pesi totali applicati per step	81
6.2	FBG1: Trazione valori K_ϵ e λ_0	85
6.3	FBG2: Valori K_ϵ e λ_0	86
6.4	FBG1 FBG2 RMSE e RMSE normalizzato Trazione	86
6.5	Deviazione standard K_ϵ e λ_0 FBG1 e FBG2	87
6.6	FBG1: Compressione valori K_ϵ e λ_0	90
6.7	FBG1: Compressione valori K_ϵ e λ_0	90
6.8	FBG1 FBG2 compressione: deviazione standard K_ϵ e λ_0	91
6.9	FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm compressione	91
6.10	Confronto dati Trazione 5 min: Fibra 1	93
6.11	Confronto dati Trazione 5 min: Fibra 2	93
6.12	FBG1 FBG2 compressione: deviazione standard K_ϵ e λ_0	93
6.13	FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm trazione 5 min	94
6.14	Fibra 1: Confronto dati Trazione 5 min	96
6.15	Fibra 2: Confronto dati Trazione 5 min	96
6.16	FBG1 FBG2 compressione 5 min: deviazione standard K_ϵ e λ_0	96
6.17	FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm compressione 5 min	96
6.18	Trazione: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$	100
6.19	Trazione 5 min: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$	101
6.20	Compressione: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$	101
6.21	Compressione 5 min: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ [nm/g] e $\lambda_{0 mean}$ [nm]	101
6.22	Varianza confronto configurazioni	102
7.1	Valori medi K_T e λ_0 C4	104
7.2	Pesi applicati a temperatura costante	105

Abstract

La continua ricerca e sviluppo della fibra ottica e delle sue applicazioni ha portato questa tecnologia ad essere sempre più presente all'interno di diversi ambiti. Risulta essere una tecnologia ampiamente utilizzata in diversi settori grazie alle sue caratteristiche vantaggiose, come il peso ridotto, l'immunità alle interferenze elettromagnetiche e la capacità di multiplexing. In particolare, essa trova applicazioni nel campo delle comunicazioni e del trasferimento di dati, nonché nella medicina, nella ricerca scientifica e nell'ingegneria, inclusa l'aerospaziale. Questo lavoro di tesi si focalizza sull'utilizzo della fibra ottica come sensore, concentrandosi in particolare sul sensore FBG (Fiber Bragg Grating). Il sensore FBG è costituito da una microstruttura all'interno della fibra ottica chiamata reticolo di Bragg, che agisce come un filtro per la luce, permettendo la trasmissione di un'unica lunghezza d'onda nota come lunghezza d'onda di Bragg. Tale sensore è influenzato dalle condizioni esterne, come temperatura, umidità, pressione e deformazioni meccaniche, che provocano variazioni nella lunghezza d'onda di Bragg. Lo studio condotto in questa tesi si propone di valutare le proprietà del sensore FBG quando sottoposto a variazioni termiche e meccaniche, sia separatamente che in condizioni termo-meccaniche accoppiate. Il segnale emesso dal sensore presenta variazioni in termini di valore, precisione e accuratezza in base al metodo di montaggio sulla struttura. Pertanto, risulta importante valutare le diverse configurazioni di montaggio, considerando i materiali utilizzati e i metodi di fissaggio, nonché la presenza o l'assenza di tensionamento del sensore FBG. Il lavoro si basa su precedenti lavori condotti dal gruppo di ricerca del DIMEAS del Politecnico di Torino, che hanno studiato il sensore FBG sia come sensore di temperatura che come sensore di deformazione meccanica. Per lo studio termico, sono state esaminate sei diverse configurazioni del sensore, valutando la loro efficienza come sensori termici. Le stesse sei configurazioni sono state riprese e sottoposte ad analisi termiche, esponendo i campioni a diverse temperature al fine di valutare come sono variate le loro prestazioni con l'invecchiamento nel corso di diversi mesi. Inoltre, sono state introdotte altre 2 nuove configurazioni. Per la fissazione della fibra ottica, sono stati utilizzati come materiali una lastra in lega di alluminio e una in composito di fibra di carbonio, e per l'incollaggio sono state impiegate resina epossidica, colla di tipo cianoacrilato e nastro kapton. Per lo studio del sensore FBG come sensore di deformazione meccanica, sono stati utilizzati due campioni fissati allo stesso materiale composito in fibra di carbonio mediante resina epossidica. Uno dei campioni è stato pre-tensionato, mentre l'altro è stato semplicemente fissato senza tensionamento. I provini sono stati comparati con un altro campione in cui è stata variata la modalità di incollaggio, e sono stati sottoposti a deformazioni meccaniche sia statiche che dinamiche mediante l'applicazione di pesi, inducendo deformazioni sia di compressione che di trazione. Sono state effettuate analisi per valutare la precisione, la ripetibilità e l'affidabilità dei dati raccolti dal sensore FBG sia come sensore termico che come sensore di deformazione meccanica. I risultati sono stati ottenuti grazie al lavoro di un gruppo di ricerca del DIMEAS

del Politecnico di Torino. Infine, è stata identificata la configurazione ottimale del sensore e condotto uno studio per valutare le capacità del sensore FBG quando sottoposto contemporaneamente a sollecitazioni termiche e meccaniche, analizzando la sua risposta e studiandone il disaccoppiamento. In conclusione, questa tesi porta avanti come lavoro un'analisi per comprendere meglio l'utilizzo della fibra ottica come sensore termico e meccanico. Sono state valutate diverse configurazioni e diverse condizioni al fine di studiare e comprendere come la risposta varia, al fine di individuare la soluzione migliore possibile per future applicazioni.

Capitolo 1

La fibra ottica e il sensore FBG

1.1 La fibra ottica

La fibra ottica è un componente realizzato principalmente in fibra di vetro o materiali polimerici, che presenta la capacità di trasmettere segnali luminosi all'interno di sé. Nel corso del tempo, la fibra ottica ha trovato un numero sempre più crescente di applicazioni in diversi settori, comunicazioni, Internet e tra cui l'ambito aerospaziale. La struttura della fibra ottica è costituita da una serie di strati cilindrici concentrici composti da materiale vetroso, in cui la trasmissione della luce avviene nel nucleo, ovvero lo strato più interno.

Avendo una composizione vetrosa, la fibra ottica possiede un indice di rifrazione pari a circa $n = 1.5$, il che significa che è in grado di trasmettere la luce a una velocità pari a due terzi di quella di propagazione nel vuoto.

$$n = c/v \quad (1.1)$$

Gli strati concentrici che costituiscono la fibra ottica sono tre e vengono denominati rispettivamente: Core, Cladding e Coating.

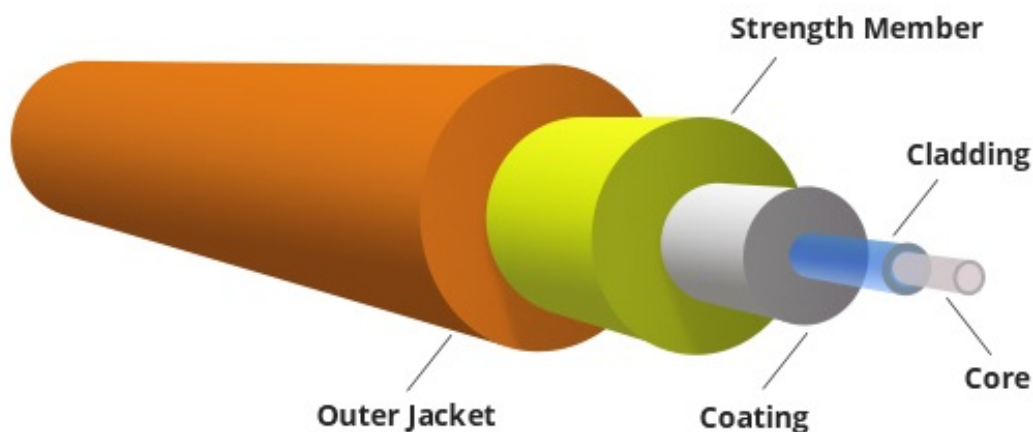


Figura 1.1: Struttura fibra ottica

- Core: costituisce lo strato più interno della fibra ottica, possiede una geometria cilindrica ed è composto da materiale vetroso. La sua dimensione presenta

un diametro che varia nell'intorno di 4-50 μm ; il core rappresenta il nucleo della fibra ed è la regione dove avviene la trasmissione del segnale luminoso. Essendo costituito da un tipo di materiale vetroso è caratterizzato da un indice di rifrazione specifico, identificato come n_{core} .

- Cladding: è lo strato successivo al core, anch'esso di forma cilindrica, realizzato con materiale vetroso, presenta un diametro di circa $\phi=125 \mu\text{m}$. Analogamente al core, il cladding essendo formato di materiale vetroso, possiede un indice di rifrazione specifico, il quale deve differire da quello del core. Questa caratteristica è essenziale in quanto consente la trasmissione dei segnali luminosi all'interno del core permettendo la riflessione totale del segnale.
- Coating: L'ultimo strato della fibra ottica e funge da copertura protettiva per il core e il cladding. Questo strato aggiuntivo conferisce alla fibra una maggiore resistenza meccanica e maneggevolezza durante l'installazione e la gestione della fibra ottica. Solitamente realizzato in materiali polimerici che aiutano a proteggere la fibra dagli agenti esterni, come l'umidità, la polvere o la corrosione, che potrebbero influenzare le prestazioni dell'FBG. Il coating, anch'esso di forma cilindrica presenta un diametro di circa $\phi=250 \mu\text{m}$.

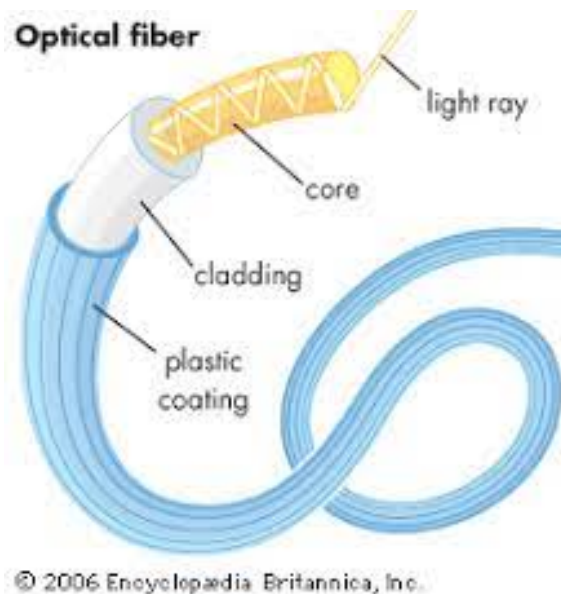


Figura 1.2: Funzionamento fibra ottica

1.1.1 Come funziona la fibra ottica

Il principio di funzionamento della fibra ottica come mezzo di trasmissione di un segnale luminoso si basa sul fenomeno della riflessione totale del segnale che avviene all'interfaccia tra il nucleo interno (core) e il cladding della fibra. Il core e il cladding sono entrambi costituiti da un materiale vetroso ma presentano un indice di rifrazione diverso. Affinché la riflessione totale si verifichi, l'indice di rifrazione del cladding deve essere inferiore a quello del core.

La riflessione interna totale si manifesta quando un fascio di luce che si propaga all'interno di un materiale con un indice di rifrazione specifico, incide all'interfaccia con un altro materiale caratterizzato da un indice di rifrazione inferiore: $n_{\text{cladding}} <$

n_{core} formando un angolo di incidenza superiore all'angolo limite critico.

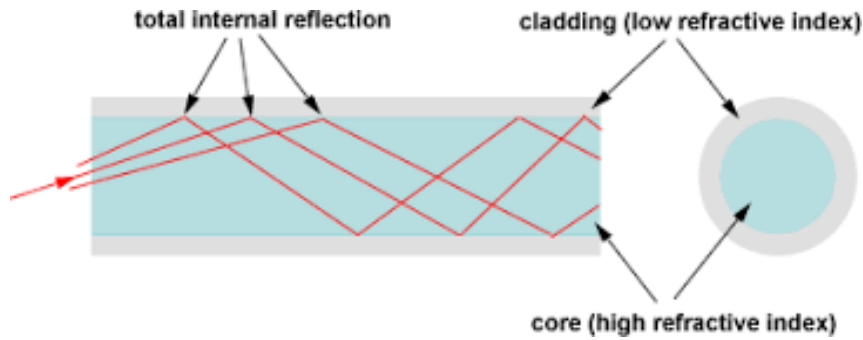


Figura 1.3: Riflessione interna nella fibra ottica

La legge a cui si fa riferimento per descrivere questo fenomeno è la legge di Snell.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (1.2)$$

La legge di Snell descrive il fenomeno della rifrazione della luce. Ovvero come varia l'angolo di propagazione della luce quando questo passa da un materiale con un determinato indice di rifrazione n_1 ad un altro materiale con indice di rifrazione diverso n_2 . Ci permette quindi di legare i due indici di rifrazione dei materiali con l'angolo di incidenza del fascio luminoso θ_i e l'angolo di rifrazione θ_t . Quando un raggio di luce passa da un mezzo con un certo indice di rifrazione ad un altro mezzo con un indice di rifrazione diverso, parte della luce viene riflessa all'interfaccia tra i due mezzi e parte viene rifratta, subendo una deviazione della direzione di propagazione. Esiste un angolo di incidenza critico, noto come angolo limite, al di sopra del quale il raggio di luce viene totalmente riflesso e non viene trasmessa attraverso l'interfaccia:

$$\theta_{i,max} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (1.3)$$

Per angoli di incidenza superiori al valore massimo calcolato dalla formula, il raggio luminoso non viene rifratto ma subisce una riflessione totale all'interfaccia tra i due materiali. Il raggio incidente viene totalmente riflesso e continua a propagarsi all'interno del primo materiale senza attraversare il secondo. L'angolo di incidenza massimo che garantisce la rifrazione minima è determinato dalla formula:

$$\theta_t = 90^\circ \quad (1.4)$$

Per ottenere la riflessione totale voluta nella fibra in modo tale che la luce venga guidata all'interno del core, si deve mantenere la condizione $\theta_i > \theta_{i,max}$ per ogni punto all'interfaccia core-cladding. Nel caso della fibra ottica oltre all'interfaccia core-cladding si deve considerare anche l'interfaccia tra il core e l'ambiente che circonda la fibra, ovvero l'aria. Queste condizioni portano alla definizione di un cono di accettazione, ovvero un angolo solido relativo all'ingresso della fibra entro il quale i raggi luminosi che si propagano all'interno della fibra subiscono la riflessione totale all'interfaccia core-cladding e quindi possono continuare a viaggiare lungo la fibra

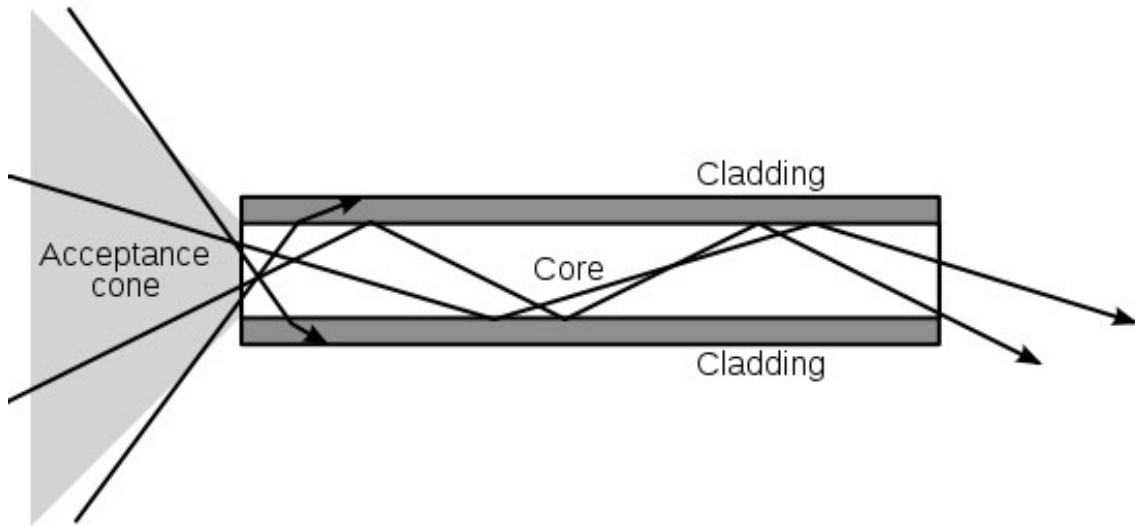


Figura 1.4: Cono di accettazione

ottica all'interno del core senza essere rifratti.

Considerando α l'angolo di ingresso nel core, quando $\theta > \theta_{max}$ avviene la riflessione totale, quindi si può definire un angolo di mezza apertura all'ingresso nel core α_{max}

Definendo n_0 indice di rifrazione dell'ambiente esterno, n_1 quello del core e n_2 del cladding, si può scrivere la legge:

$$\alpha_{max} = \arcsin(\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)/n_0^2}) \quad (1.5)$$

Quando α (angolo di entrata) all'ingresso della fibra è minore di α_{max} , allora verrà garantita la riflessione totale all'interfaccia core-cladding.

La dimensione del cono dipende solo dall'indice di rifrazione dei vari materiali. Viene quindi definito il valore di Apertura Numerica, indicato con $\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = NA$ il quale ci permetti di scrivere l'equazione

$$\alpha_{max} = \arcsin\left(\frac{NA}{n_0}\right) \quad (1.6)$$

1.1.2 Modi di propagazione

All'interno della fibra ottica, la propagazione della luce può avvenire con diversi modi di propagazione, i quali sono determinati da specifici schemi del campo elettrico. Ciascun modo di propagazione ha una propria velocità e, in base alla combinazione di questi modi che caratterizzano il percorso della luce, è possibile definire i diversi tipi di fibra ottica.

- Fibra a singolo modo (monomodale): la luce propaga in un solo modo e si trova a viaggiare lungo l'asse della fibra in un'unica direzione. Il core è molto sottile, circa $10\mu\text{m}$ mentre il cladding di $125\mu\text{m}$, e permette di avere meno perdite.

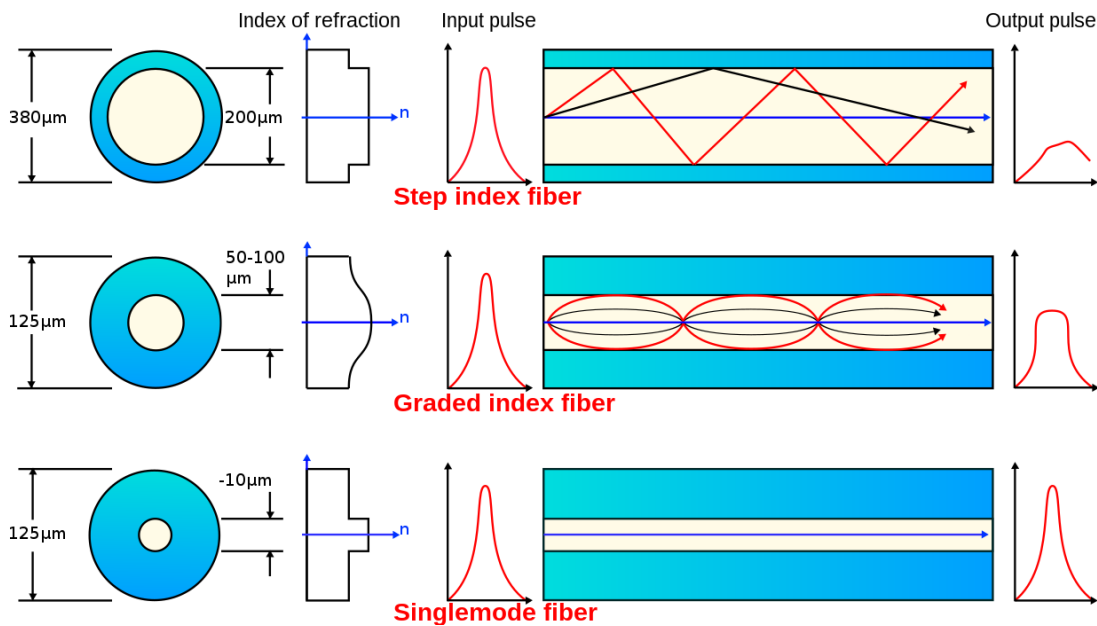


Figura 1.5: Modi di propagazione fibra ottica

- Multimode fiber: la fibra multimodale presenta più di un modo di propagazione. Il core si presenta largo, circa di $50\mu\text{m}$ mentre il cladding rimane di $125\mu\text{m}$. Sono presenti modi di ordine maggiore che tendono a propagare con angoli minori rispetto a quelli di ordine minore. presenta le distorsioni multimode, quindi comporta delle perdite.

1.1.3 Sensori a fibra ottica

La fibra ottica è una tecnologia che può essere influenzata da una serie di fattori ambientali, tra cui temperatura, tensione meccanica, umidità e vibrazioni meccaniche, le quali causano alterazioni nella propagazione della luce all'interno della fibra. Questo rende possibile l'utilizzo della fibra ottica come sensore, a condizione che sia correttamente calibrata.

I vantaggi di usare un sensore a fibra ottica rispetto ai classici sensori elettrici sono:

- Dimensioni ridotte
- Elettricamente passivo
- Assenza di disturbi legati ad interferenze elettriche ed elettromagnetiche
- Alta sensibilità
- Inerzia chimica
- Multiplexing del segnale che permette la gestione di più sensori con lo stesso strumento

Può essere impiegato un rivestimento metallico per conferire alla fibra una maggiore resistenza e una maggiore durabilità. Questo rivestimento metallico permette anche la trasmissione di segnali elettrici, consentendo così alla fibre di interfacciarsi ai sensori elettrici tradizionali.

E' possibile identificare due tipologie principali: i sensori a singolo punto e i sensori distribuiti.

- I sensori a singolo punto: presentano una capacità di misurazione molto elevata, ma sono in grado di rilevare e monitorare parametri soltanto in una posizione specifica.
- I sensori distribuiti, invece, consentono misurazioni simultanee in diverse località lungo la loro estensione. Questa caratteristica permette di ottenere informazioni dettagliate e precise su parametri fisici in centinaia di posizioni diverse. Un esempio di fibra ottica utilizzata per i sensori distribuiti sono le FBG (Fiber Bragg Gratings), che rappresentano una delle tecnologie più avanzate in questo ambito.
- OTDR (Optical Time Domain Reflectometry): usa lo scattering di Rayleigh.
- ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectometry): legato allo scattering di Raman
- BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry): basato sullo scattering di Brillouin.

1.2 Sensori FBG

Tra i sensori in fibra ottica è presente il sensore FBG (Fiber Bragg Grating), tale tecnologia è caratterizzata da una microstruttura reticolare interna alla fibra chiamata reticolo di Bragg. Tale microstruttura è dovuta ad una modulazione periodica dell'indice di rifrazione presente all'interno del core della fibra lungo la direzione longitudinale, ottenuta mediante l'esposizione del core a raggi UV grazie alla fotosensibilità della fibra ottica. La peculiarità del reticolo di Bragg è quella di fungere da sorta di filtro in frequenza; infatti, considerando un fascio di luce che viaggia all'interno della fibra, ci sarà un'unica lunghezza d'onda specifica che verrà riflessa. Questa lunghezza d'onda è chiamata lunghezza d'onda di Bragg e definisce il segnale emesso dal sensore. Tale lunghezza d'onda è sensibile alle variazioni dei parametri esterni come temperatura, umidità, vibrazione, deformazione e tende a modificare il proprio valore in base alle condizioni di contorno. Proprio a causa della sensibilità della lunghezza d'onda al variare di parametri esterni, questa tecnologia permette di essere usata come sensore capace di misurare diverse grandezze se opportunamente calibrato.

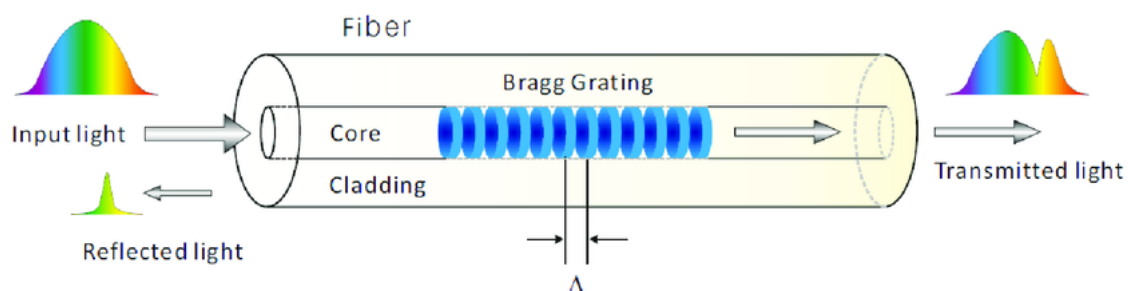


Figura 1.6: Sensore FBG

Il sensore FBG consiste quindi in una fibra ottica all'interno del quale si trova una microstruttura reticolare chiamata reticolo di Bragg. Questa microstruttura può essere schematizzata come una serie di sezioni con diversi indici di diffrazione, trasversalmente posizionate in relazione al core della fibra primaria. In questo modo, viene creato un pattern di vari indici di rifrazione. Come detto la configurazione funge da filtro riflettendo completamente una sola lunghezza d'onda. Tale lunghezza d'onda riflessa corrisponde al segnale in output emesso dalla fibra. Il valore della lunghezza d'onda di Bragg dipende da fattori ottici e fisici della struttura secondaria, come la distanza media tra due sezioni trasverse consecutive, chiamato grating period e viene indicato con Λ , e anche dall'indice di rifrazione del pattern del reticolo. La lunghezza d'onda di Bragg è legata al grating period e al grating refraction index dalla relazione:

$$\lambda = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (1.7)$$

Inoltre, sia il grating period Λ che l'indice di rifrazione effettiva η_{eff} dipendono sia dalla temperatura T che dallo strain meccanico ϵ . Pertanto è possibile notare come per via delle condizioni esterne questi due parametri subiscono delle variazioni, le quali ricadono sul valore della lunghezza d'onda.

1.2.1 Metodi di realizzazione

La realizzazione del reticolo di Bragg all'interno del core della fibra ottica può avvenire in diversi modi, il principio alla base è quello della fotosensibilità della fibra, ovvero il processo di assorbimento della luce ultravioletta (UV) che porta ad una variazione dell'indice di rifrazione nel core della fibra. Il processo di formazione del reticolo è conosciuto come "scrittura" ed è possibile identificare due principali tipologie per farlo, ovvero la scrittura interna e la scrittura esterna.

La scrittura interna fu dimostrata da Hill il quale espose una fibra dopata con germanio ad una radiazione di ioni di Argon, andando a studiare come sarebbe stato riflesso il segnale emesso dalla fibra. Il risultato ottenuto fu un aumento dell'intensità della luce riflessa e la realizzazione di un reticolo permanente all'interno del core. Il motivo di ciò risiede nel fatto che la luce coerente che propaga nella fibra interferisce con una piccola quantità di luce riflessa proveniente dalla fine della fibra, creando un modello di onda stazionaria che, grazie alla fotosensibilità, scrive un reticolo nel nucleo della fibra.

La scrittura esterna è il tipo di scrittura per la realizzazione dei reticoli all'interno della fibra più comune. Esistono diversi modi per realizzarla, tra cui interferometric method, phase mask technology, point-by-point

- **Interferometer technology:** Per questa metodologia, si utilizza la luce di un laser che viene divisa in due fasci distinti attraverso l'impiego di un prisma o un divisore di fascio (beam splitter). Due specchi vengono utilizzati per riflettere i due fasci separati sulla fibra ottica. Il periodo del modello di interferenza dipende dalla lunghezza d'onda della luce e dall'angolo relativo tra i fasci che interferiscono. La principale difficoltà nell'usare questo metodo risiede nella necessità di mantenere un allineamento preciso del fascio laser al fine di ottenere una migliore coerenza.

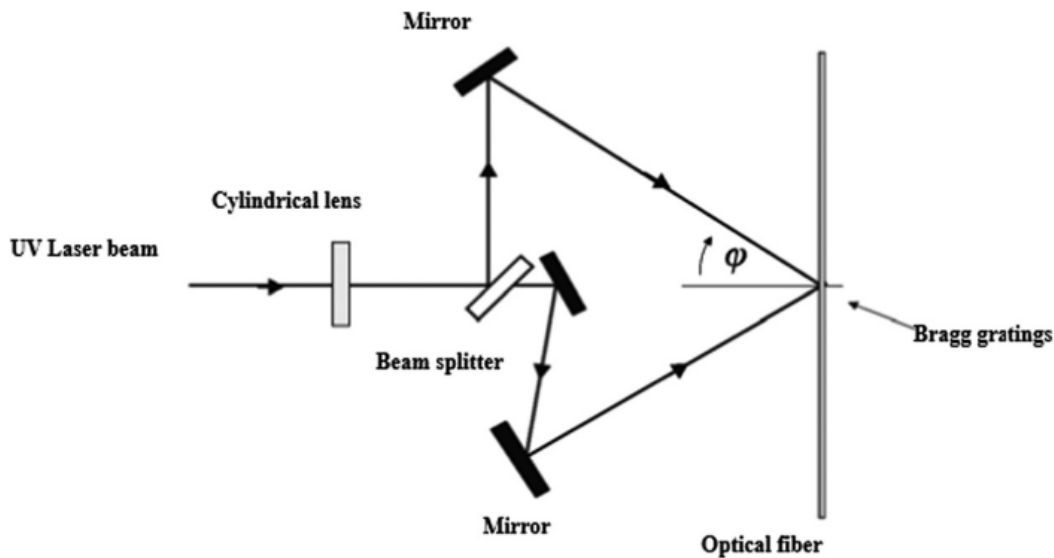


Figura 1.7: Interferometer technology

- Phase mask technology: viene utilizzata una lastra piatta di vetro di silice trasparente alla luce ultravioletta. Su una delle superfici piane, viene incisa una struttura di rilievo superficiale periodica unidimensionale utilizzando tecniche fotolitografiche o olografiche. La forma del modello periodico approssima una forma d'onda quadrata nel profilo. La fibra ottica viene posizionata quasi a contatto con le corrugazioni della fase. La luce ultravioletta, che incide perpendicolarmente sulla maschera di fase, attraversa e viene diffratta dalle corrugazioni periodiche della maschera di fase. Normalmente, la maggior parte della luce diffratta si trova negli ordini di diffrazione 0, -1,+1. La maschera di fase è progettata per sopprimere la diffrazione nell'ordine zero. I due fasci diffratti negli ordini ± 1 interferiscono tra loro per produrre un modello periodico che imprime fotograficamente un reticolo nella fibra ottica. Questa tecnica semplifica il processo di produzione del reticolo di Bragg, lo rende più economico e presenta la possibilità di fabbricare diversi reticoli con una singola esposizione irradiando fibre parallele attraverso la maschera di fase. Un aspetto negativo è che per ogni lunghezza d'onda è necessario avere una apposita maschera.
- point-by-point: con questo metodo ogni perturbazione dell'indice del reticolo viene scritto punto per punto. Fa parte de "Femtosecond pulsed laser technique", un metodo che porta alla realizzazione di reticoli precisi tramite l'uso di un laser ultra veloce. Pertanto mediante l'uso di un laser si va a modificare in un punto specifico, e tramite un meccanismo che controlla la traslazione è possibile ripetere lo stesso passaggio diverse volte. [15] [10]

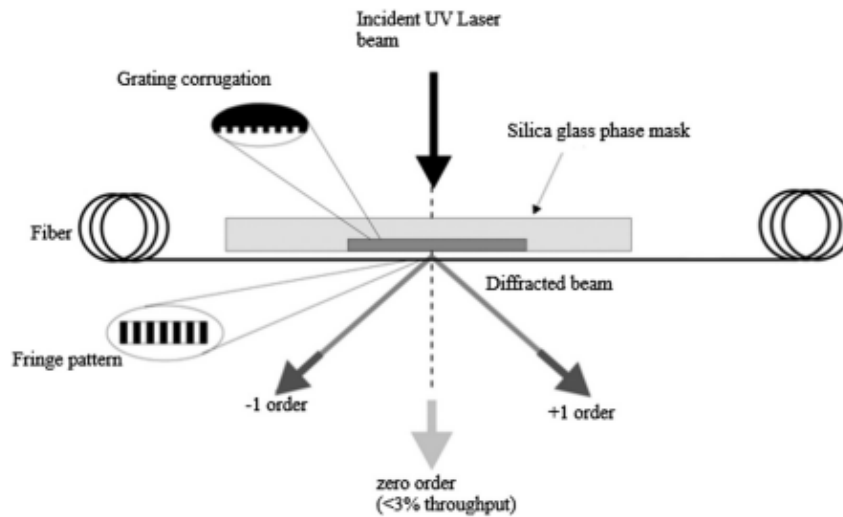


Figura 1.8: Phase mask technology

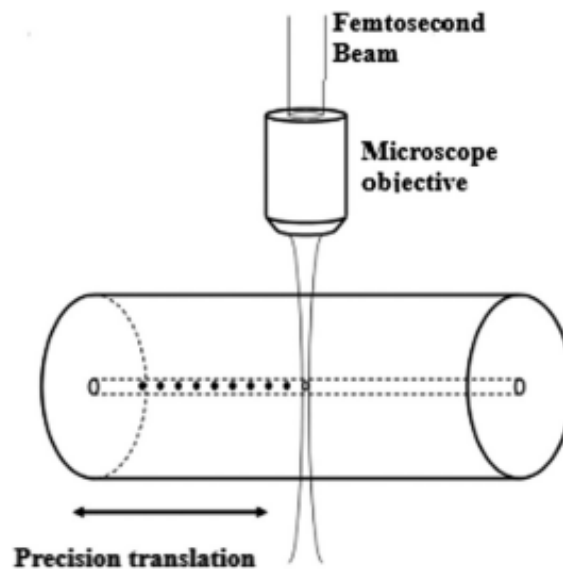


Figura 1.9: Point-by-point

1.2.2 Condizioni ambientali e al contorno sul sensore FBG

Essendo la fibra ottica sensibile alle condizioni esterne come temperatura, spostamento, vibrazione, umidità, è possibile studiare come questa possa comportarsi come sensore. Le variazioni delle condizioni esterne portano ad una espansione o compressione del materiale all'interno della fibra ottica. Questa variazione si converte in una alterazione del passo del reticolo di Bragg. Poiché come è stato mostrato la lunghezza d'onda di Bragg dipende dal passo del reticolo, allora di conseguenza anche questa varierà al variare delle condizioni ambientali. La variazione della temperatura può influire sull'indice di rifrazione della fibra, provocando una modifica del periodo del grating attraverso il coefficiente di dilatazione termica della fibra. Entrambi questi parametri hanno un impatto sulla lunghezza d'onda di Bragg. Come la temperatura, anche altre condizioni esterne e le forze applicate possono causare variazioni che modificano il segnale di uscita in output dal sensore. La dipendenza della lunghezza d'onda emessa dal sensore in funzione delle variazio-

ni esterne è possibile ricavarla andando a differenziare l'equazione (2.7) rispetto ad un parametro "X", che nel caso dello studio saranno temperatura e strain meccanico.

$$\frac{d\lambda}{dX} = 2 \frac{d(\Lambda n_{eff})}{dX} = 2\Lambda \frac{dn_{eff}}{dX} + 2n_{eff} \frac{d\Lambda}{dX} \quad (1.8)$$

Nella quale

- λ : Lunghezza d'onda
- Λ : Grating pitch
- n_{eff} : Refraction index

In primo luogo si mostra la dipendenza della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della variazione di temperatura, pertanto riprendendo l'equazione e considerando la variabile T si ottiene:

$$\frac{d\lambda}{dT} = 2 \frac{d(\Lambda n_{eff})}{dT} = 2\Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + 2n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (1.9)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_{\Lambda} + \alpha_n) \cdot \Delta T \quad (1.10)$$

In cui:

- α_{Λ} : coefficiente di espansione termica della fibra. Rappresenta l'impatto della temperatura sulla configurazione fisica della griglia di Bragg. Infatti, le variazioni di temperatura provocano una deformazione di questa struttura, influenzando la lunghezza d'onda riflessa. Presenta un valore di $\alpha_{\Lambda} = 0.55 \cdot 10^{-6} 1/C$
- α_n : coefficiente termo-ottico della fibra. Indica come la variazione di temperatura influisce sull'indice di rifrazione. Il valore dipende dal materiale con il quale è costituito la fibra. [5]

La sensitività del sensore FBG alla deformazione meccanica dipende da diversi fattori, come il coefficiente termo-ottico, il tipo di tensione, se è a compressione o a trazione, nonché dal tipo di materiale con cui viene fissato ad una superficie. Possiamo ricavare dall'equazione generica considerando come variabile ϵ l'equazione e considerando lo stress di tipo isotropico è possibile scrivere:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon \quad (1.11)$$

Dove P_e rappresenta lo strain-optic coefficient, il quale presenta un valore generalmente di $p_E = -0.212$.

Come già notato, il sensore FBG è sensibile a più fattori esterni contemporaneamente, pertanto è possibile esprimere la dipendenza della variazione della lunghezza d'onda in funzione di variazione esterne di temperatura e deformazione meccanica andando ad unire i contributi mostrati per scrivere l'equazione:

$$\Delta\lambda_B = [\lambda_B(1 - p_e) \cdot \Delta\epsilon] + [\lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T] \quad (1.12)$$

L'equazione può essere riformulata come:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (1.13)$$

Definendo:

$$K_T = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (1.14)$$

$$K_\epsilon = \lambda_B(1 - p_e) \quad (1.15)$$

- K_ϵ : coefficiente di deformazione meccanica
- K_T : coefficiente di temperatura

Questi due coefficienti rappresentano quindi la dipendenza della lunghezza d'onda di Bragg, emessa dall'FBG, dalla temperatura e dalla deformazione meccanica.

Come mostrato nello studio [5] la temperatura risulta essere un parametro che influenza in maniera preponderante la lunghezza d'onda di Bragg, inoltre, proprio per la sensibilità che la fibra ottica ha rispetto a diverse condizioni ambientali, il segnale in uscita è influenzato da più fattori. Per quanto riguarda la valutazione delle deformazioni meccaniche, è stato osservato che l'incertezza dei risultati tende ad aumentare proporzionalmente all'aumentare dell'escursione termica, a meno che non venga effettuata una compensazione adeguata.

Oltre all'influenza delle condizioni ambientali sul segnale che viene emesso dal sensore FBG, è importante considerare anche la modalità, il tipo di materiale e il posizionamento del sensore stesso, nonché il metodo di fissaggio dell'FBG al supporto. Infatti, in base a queste caratteristiche, il valore della lunghezza d'onda in output può variare, così come la sensibilità, la precisione nella raccolta dei dati e altri aspetti che influenzano le prestazioni del sensore FBG. Il sensore FBG può essere utilizzato con o senza pre-tensionamento e può essere fissato alla struttura di lavoro utilizzando diversi tipi di adesivi. Queste condizioni al contorno hanno un impatto significativo sul segnale in uscita. Pertanto, per l'utilizzo ottimale del sensore FBG, è necessario studiare diverse configurazioni al fine di identificare quella più appropriata per i diversi casi che possono essere presentati. Nell'ambito dello studio [3], sono state svolte analisi per dimostrare e quantificare la correlazione tra l'output dei sensori FBG e la temperatura, confermando l'idoneità di tali sensori per la rilevazione di variazioni termiche. Inoltre, si è riscontrata un'elevata sensibilità della fibra ottica alle condizioni ambientali e, in generale, agli stress meccanici. È emerso che la relazione tra lunghezza d'onda e temperatura varia in base alla tensione applicata sulla fibra. In particolare, si è osservato che la correlazione evidente nella fibra libera risulta più facilmente standardizzabile rispetto a quella della fibra pre-tensionata, la quale richiede una calibrazione specifica. Di conseguenza, per utilizzare la FBG come sensore è necessario eseguire una calibrazione accurata dell'apparecchiatura.

Questo processo richiede la considerazione dell'equazione che descrive la dipendenza dalle costanti di sensitività termica e meccanica. Attraverso questa calibrazione, è possibile convertire i valori della lunghezza d'onda nelle misure del fenomeno di interesse che si desidera monitorare. L'equazione di calibrazione permette di stabilire una relazione quantitativa tra il segnale dell'FBG e la grandezza fisica che si intende misurare, consentendo così una corretta interpretazione dei dati raccolti.

Inoltre, un aspetto che può risultare rilevante considerare è l'influenza dell'umidità sulla fibra ottica. Questo aspetto risulta importante in quanto è un fattore che può alterare i dati acquisiti durante una specifica misurazione. Il sensore FBG, infatti, può essere usato come sensore per la rilevazione di umidità relativa nell'ambiente proprio grazie alla sua sensibilità. Gli studi riguardanti l'impatto dell'umidità sul sensore FBG costituiscono un argomento di ricerca, e sono ancora in corso studi per definire un metodo adeguato per comprendere e compensare questo fenomeno nel contesto della calibrazione. In generale, è stato osservato che l'effetto dell'umidità dipende dalla configurazione di montaggio del sensore ottico, ovvero il materiale utilizzato come supporto sulla quale viene fissata la fibra, il metodo di incollaggio e il tipo di materiale utilizzato per il rivestimento del sensore ottico. Questi fattori possono causare variazioni nella lunghezza d'onda di Bragg misurata. In particolare, si è evidenziato che il tipo di materiale utilizzato come supporto e la tecnica di incollaggio portano ad effetti significativi dovuti all'umidità sulle prestazioni dei sensori ottici [13]. Tra i materiali comunemente utilizzati per rivestire le fibre ottiche, sono comuni l'utilizzo di guaine in poliammide e in acrilato, entrambi dimostrando una certa sensibilità all'umidità. Ad esempio, si è osservato che le fibre ottiche rivestite in poliammide mostrano uno spostamento del valore della lunghezza d'onda di Bragg, che può raggiungere fino a 0.5 nm per una lunghezza d'onda nominale di 1550 nm [14]. Anche il rivestimento in poliacrilato non è esente dall'influenza dell'umidità, anche se gli studi indicano che è meno sensibile a questo fattore esterno. Si è constatato che i rivestimenti in poliacrilato presentano una sensibilità all'umidità relativa nell'ambiente, soprattutto a temperature inferiori a 50°C. Inoltre, è stato studiato che una variazione del 10% dell'umidità può portare a un errore di misurazione della temperatura di 1.5°C [9], un valore che aumenta nel caso di fibre con rivestimenti in poliammide. Non solo i rivestimenti del sensore ottico sono influenzati dall'umidità, ma anche il materiale utilizzato per l'incollaggio gioca un ruolo importante. Ad esempio, l'influenza dell'umidità sulla resina epossidica è un esempio rilevante ai fini di questo studio. Il contatto con l'umidità provoca un deterioramento della presa della resina a causa della rottura dei legami che costituiscono la resina stessa, causando una diminuzione generale della resistenza meccanica [6].

1.2.3 Sensori FBG nel settore aerospaziale

Nell'ambito dell'aviazione, le fibre ottiche stanno progressivamente sostituendo determinati sistemi precedentemente utilizzati. In particolare, ci si concentra sui sistemi di controllo, che attualmente adottano un'architettura fly-by-wire (FBW), basata su componenti elettrici. La ricerca ha condotto all'introduzione delle fibre ottiche nel settore aeronautico, con l'obiettivo di sviluppare un sistema fly-by-light (FBL). Tale sistema presenta diversi vantaggi, tra cui la riduzione di peso e dimensioni, l'immunità alle interferenze elettromagnetiche (EMI) e alle radiazioni a radiofrequenza elevate (HIRF), nonché una maggiore larghezza di banda. Tuttavia, con l'aumento dell'uso di materiali compositi nelle strutture aeronautiche, si è verificata una diminuzione della protezione EMI precedentemente fornita dalle strutture metalliche.

Di conseguenza, i sistemi FBW potrebbero essere soggetti a interferenze elettriche maggiori. L'utilizzo dei sistemi FBL, che si basano sulla fibra ottica, offre notevoli vantaggi in quanto non sono influenzati dalle frequenze elettromagnetiche. Nel 1974, è iniziata l'applicazione delle fibre ottiche nei comandi di volo, inizialmente utilizzando una semplice connessione in fibra ottica per trasmettere i comandi del pilota correlati ai movimenti dell'aeromobile (elevator, aileron, rudder).

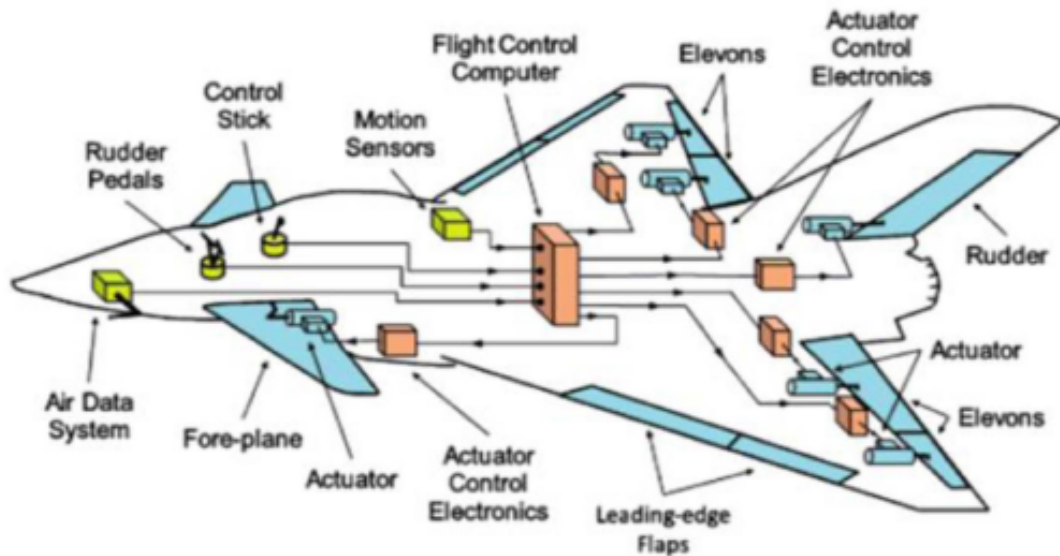


Figura 1.10: Sistemi aeronautici

Le fibre ottiche a reticolo di Bragg (FBG) presentano notevoli vantaggi nell'ambito delle applicazioni spaziali, in quanto consentono una riduzione del peso totale dei sensori e una maggiore flessibilità nell'implementazione di un numero più elevato di sensori. Tali sensori possono essere impiegati sia durante le fasi di volo sia per il monitoraggio dei test a terra. Risultano particolarmente utili per la misurazione dello stress e delle vibrazioni durante le fasi di assemblaggio, le analisi e i test di lancio, nonché per valutare l'integrità strutturale. Tra le applicazioni della fibra FBG nel settore spaziale, si enuncia come parte di un progetto FLPP2.2 (Future Launcher Proprietary Programme 2.2) dell'ESA, FAZ Technology ha valutato diversi sensori elettrici attualmente impiegati sugli stadi ESC-A e ESP dell'ARIA-NE 5, confrontandoli con i corrispondenti sensori ottici. L'obiettivo del progetto era dimostrare l'efficacia dell'integrazione dei sensori a fibra ottica e considerarli per l'utilizzo su futuri lanciatori, al fine di ottenere benefici come la riduzione del peso, il miglioramento della copertura delle misurazioni e la riduzione dei processi di assemblaggio, integrazione e test (AIT) rispetto ai sistemi elettrici tradizionali. Sono in corso studi per valutare l'applicazione della fibra ottica per le linee di comunicazione dei segnali elettrici nei satelliti, con particolare attenzione all'utilizzo dei sensori a Grata di Bragg in fibra ottica (FBG) come sensori di temperatura. Questi studi si concentrano anche sull'ottimizzazione dei processi di assemblaggio, integrazione e test (AIT) al fine di ottenere significativi benefici, tra cui la riduzione del peso del cablaggio e il miglioramento della facilità di assemblaggio. I sensori in fibra ottica pertanto si rivelano particolarmente versatili nel contesto del settore aerospaziale, poiché consentono il monitoraggio accurato del livello di deformazione che agisce sulla struttura. Ciò risulta particolarmente vantaggioso per la ricerca e lo sviluppo di strutture sempre più sottili e leggere, in cui la leggerezza del sensore e la sua

capacità di rilevare con precisione la deformazione diventano requisiti fondamentali.
[12] [8] [11]

Capitolo 2

Strumentazione

In questo capitolo vengono identificati e descritti gli strumenti utilizzati per svolgere le analisi della ricerca. Verrà spiegato il loro funzionamento e come sono stati utilizzati ai fini della ricerca.

2.1 Strumenti

Per il lavoro condotto in laboratorio sono stati impiegati vari strumenti sia per la ricerca relativa allo studio termico che per la parte relativa alla deformazione meccanica. Di seguito vengono elencati e descritti in ordine gli strumenti utilizzati, il loro funzionamento e il modo in cui sono stati messi insieme per formare il banco di prova.

2.1.1 Camera Climatica

Nel seguente studio sulla risposta della fibra ottica alla variazione di temperatura, è stato utilizzato uno strumento chiamato camera climatica. La camera climatica è un dispositivo che consente di modificare le condizioni ambientali all'interno di un ambiente chiuso, permettendo di variare la temperatura e l'umidità. Nel laboratorio, la camera climatica ha svolto quindi il ruolo di creare un ambiente dove controllare le variazioni di temperatura. Questo strumento è in grado di generare artificialmente all'interno temperature comprese tra -40°C e 180°C , e regolare l'umidità relativa. La temperatura può essere modificata manualmente o automaticamente, con la possibilità di definire un intervallo di tempo per il passaggio da una temperatura all'altra, specificando anche l'incremento di temperatura in gradi Celsius per unità di tempo ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$). La camera climatica è dotata di un display che facilita l'interazione con l'utente.

Attraverso un'interfaccia grafica, è possibile impartire comandi al dispositivo. All'interno della camera, è presente uno spazio in cui posizionare i campioni da studiare. Inoltre, è integrato un sensore di temperatura chiamato PT100, che sfrutta la resistenza elettrica del platino per misurare la temperatura. Il sensore è posizionabile manualmente all'interno della camera climatica e fornisce una misurazione generale della temperatura ambientale. I dati di temperatura possono essere visualizzati su uno schermo collegato alla camera climatica tramite cavo USB e il software KK-Tool installato su PC.

Durante gli esperimenti, i dati vengono raccolti dalla camera climatica a intervalli di tempo definiti dall'utente. Nel caso delle prove termiche, è stato scelto un

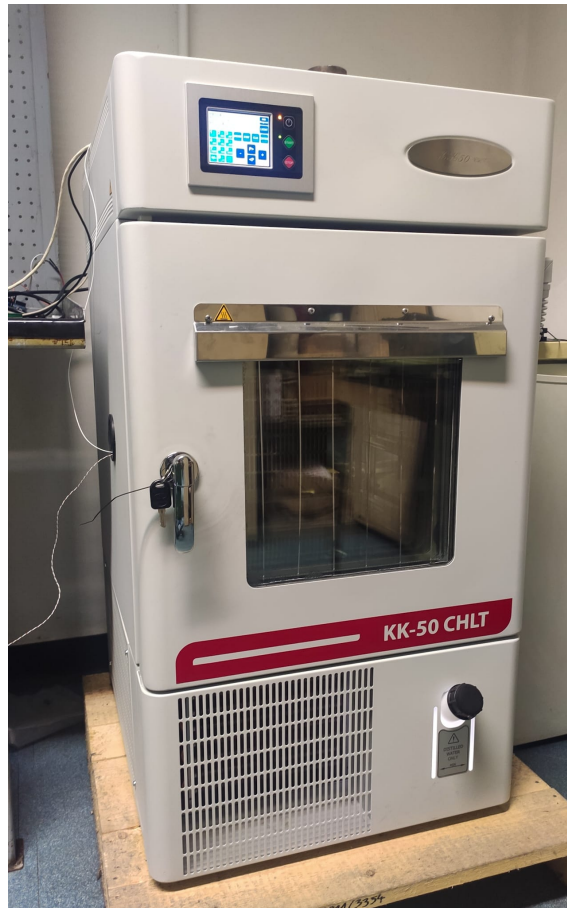


Figura 2.1: Camera Climatica

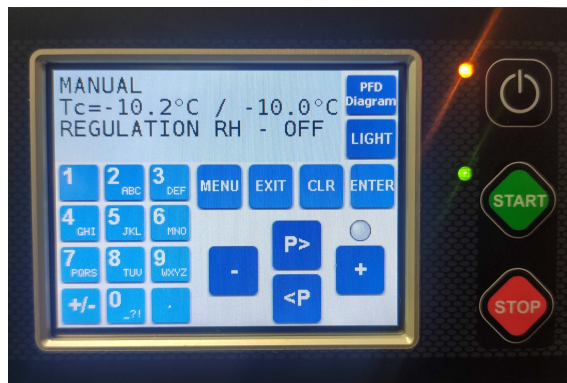


Figura 2.2: Display comandi camera climatica

intervallo di 5 secondi tra la registrazione di una temperatura e l'altra. I dati vengono visualizzati tramite il programma KK-Tool in un grafico, in cui sull'asse delle ascisse si rappresenta il tempo in secondi e sull'asse delle ordinate si indica la temperatura misurata all'interno della camera climatica. I dati relativi alle variazioni di temperatura registrate nel corso del tempo in camera climatica vengono salvati in un file .DAT, che viene costantemente archiviato in una specifica cartella del computer.

2.1.2 Interrogatore

L'interrogatore rappresenta uno strumento fondamentale per l'utilizzo e lo studio dei sensori in fibra ottica FBG. La fibra stessa viene connessa all'interrogatore mediante

appropriate connessioni, e quest'ultimo viene collegato al computer tramite un cavo WLAN. Grazie a specifici software, è possibile visualizzare e acquisire i dati generati dall'interrogatore.

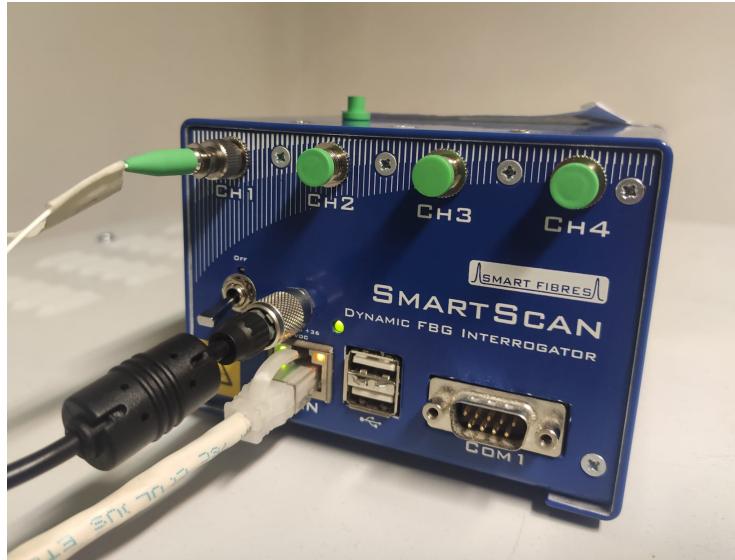


Figura 2.3: Interrogatore

Il principio di funzionamento dell'interrogatore consiste nell'invio di segnali luminosi alla fibra collegata allo strumento. A causa delle proprietà intrinseche dell'FBG, i segnali luminosi vengono filtrati e viene riflessa solo una singola lunghezza d'onda, ovvero la lunghezza d'onda di Bragg. Il segnale emesso dalla fibra viene quindi rilevato dall'interrogatore, convertito, visualizzato e acquisito tramite il computer.

L'interrogatore dispone di 4 ingressi, consentendo la connessione di fino a quattro sensori ottici e la simultanea acquisizione dei relativi dati. Per le nostre ricerche è stato necessario utilizzare due interrogatori, al fine di avere a disposizione un totale di otto canali utilizzabili. Di conseguenza, sono stati collegati due computer per la lettura dei dati.

L'interrogatore non è dotato di un'interfaccia autonoma. Pertanto, per visualizzare, acquisire i dati, gestire i canali, modificare la frequenza di campionamento e in generale controllare il funzionamento dell'interrogatore, è essenziale utilizzare un software specifico, in questo lavoro è stato utilizzato SmartSoftSSI.

2.1.3 SmartSoft

Il software utilizzato per il controllo dell'acquisizione dei dati dai sensori FBG tramite l'interrogatore è SmartSoftSSI v3.2.0. Questa versione del software è stata installata sul computer collegato all'interrogatore tramite cavo WLAN. SmartSoftSSI v3.2.0 presenta un'interfaccia che offre diverse funzionalità [18].

Per il l'attuale lavoro, si è usato principalmente utilizzato le funzioni di acquisizione dei dati

- Spectrum Tab: La schermata del software SmartSoftSSI v3.2.0 presenta la visualizzazione dei segnali corrispondenti ai singoli canali ai quali le fibre sono collegate. Per ciascun canale, vengono mostrati picchi che rappresentano i segnali in termini di lunghezza d'onda, espressa in nanometri (nm). Questa funzione consente di visualizzare contemporaneamente i segnali di ogni canale in modo separato. Tale visualizzazione risulta essere uno strumento utile

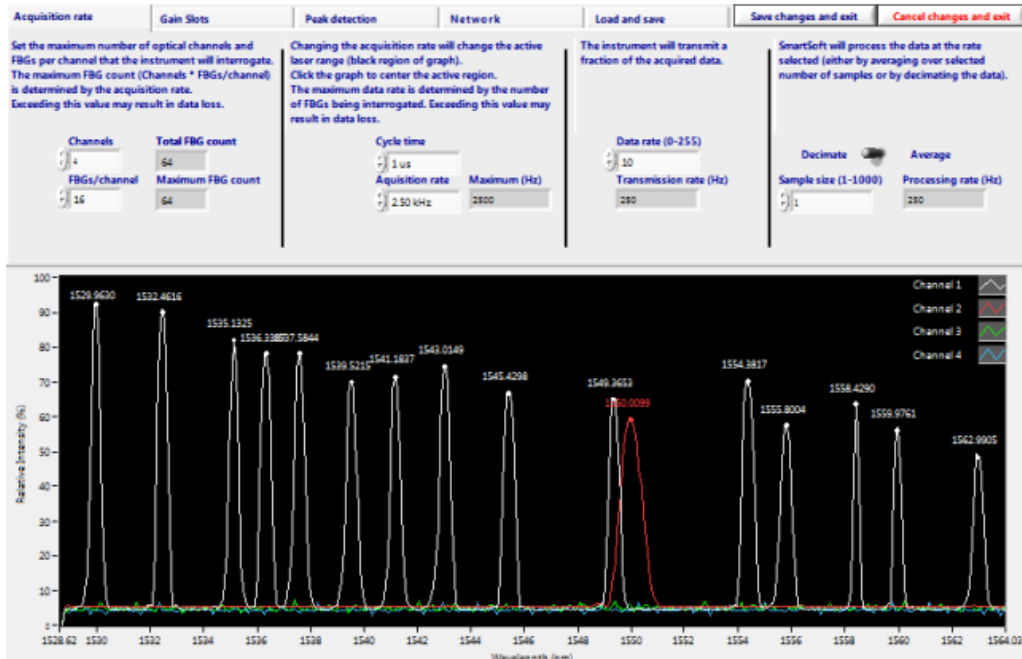


Figura 2.4: Schermata SmartSoftSSI v.3.1 [18]

per confermare la corretta connessione delle fibre all'interrogatore e verificare l'adeguato montaggio del sistema.

- **Sensor Tab:** All'interno di questa sezione del software, è presente una scheda che comprende una tabella suddivisa in quattro colonne, ciascuna corrispondente a un canale specifico. Nelle celle della tabella vengono mostrati i valori dei picchi misurati e elaborati dal software. Questi valori vengono continuamente aggiornati e variano in base alle sollecitazioni ambientali che la fibra ottica sperimenta nel suo posizionamento. Accanto alla tabella di raccolta dati, è presente un comando che consente il salvataggio dei dati in file di tipo .log. Inoltre, è disponibile un pulsante per avviare e interrompere l'acquisizione dei dati. I file salvati in una cartella dedicata contengono una colonna iniziale che rappresenta il tempo, che viene misurato dall'inizio dell'acquisizione fino alla sua conclusione. Questo tempo è scandito a intervalli temporali determinati da una specifica frequenza impostata dall'utente. Le altre colonne contengono i dati relativi ai picchi elaborati dal software per ciascun intervallo temporale.
- **Acquisition rate:** Nella sezione superiore della scheda "Spectrumb Tab" sono presenti una serie di comandi che risultano utili per l'acquisizione dei dati. In particolare, è possibile gestire il numero di canali e il numero di sensori FBG collegati a ciascun canale. È inoltre possibile configurare la frequenza di acquisizione dei dati, determinando l'intervallo temporale tra una misurazione e la successiva. Questi comandi consentono di personalizzare le impostazioni dell'acquisizione dati in base alle specifiche esigenze dell'esperimento.

2.1.4 Pesì

Per studiare l'influenza della deformazione meccanica sulle configurazioni proposte, sul sensore FBG sono stati applicati una serie di pesi di forma cilindrica ed un gancio sul quale poterli posizionare.

Il gancio è stato posizionato sul materiale di supporto dei campioni, consentendo di applicare i pesi in maniera controllata. Questa configurazione permette di esercitare una forza meccanica desiderata sulla fibra ottica, generando una deformazione che può essere analizzata in relazione alla risposta del sensore FBG. In seguito vengono elencati le quantità e la massa dei carichi utilizzati.

- Peso del gancio: 84 g
- 2 x 45,3 g
- 4 x 48,9 g
- 1 x 100,6 g
- 1 x 101 g

2.2 Banco di prova

Per condurre le analisi termiche, i campioni sono stati posizionati all'interno della camera climatica su appositi supporti. La fibra ottica è stata fatta uscire dalla camera climatica ed è stata collegata all'interrogatore. Al fine di gestire le otto configurazioni totali utilizzate nello studio termico, sono stati impiegati due interrogatori. Ciascun interrogatore è stato collegato a un computer sul quale è stato installato il software SmartSoftSSI.

Attraverso l'utilizzo del software, è stato possibile visualizzare i dati relativi al segnale emesso dai sensori FBG e acquisire i valori durante gli esperimenti. Inoltre, un computer è stato collegato anche alla camera climatica e, mediante l'utilizzo del software KK-Tool, è stato possibile monitorare la temperatura all'interno della camera, misurata dal sensore PT100, in funzione del tempo e acquisire i dati corrispondenti. Il successivo lavoro di elaborazione dei dati è stato eseguito utilizzando il software MATLAB, tramite il quale è stato possibile lo studio e l'interpretazione dei risultati ottenuti.

Per lo studio relativo alla deformazione meccanica, il banco di prova è stato costituito fissando un estremo libero del provino che funge da vincolo, all'estremo opposto è stato quindi possibile posizionare il gancio e conseguentemente posizionare i pesi per applicare lo stress meccanico. La fibra è stata quindi collegata all'interrogatore per raccogliere e visualizzare i dati via schermo.

L'ultimo banco di prova che è stato allestito riguarda invece quello costituito per studiare l'influenza del contributo termico e di quello relativo alla deformazione meccanica contemporaneamente sul sensore FBG. Per fare questo si è montato all'interno della camera climatica un supporto in legno su cui è stato fissato il provino ad un estremo tramite dei morsetti, mentre l'estremo opposto è stato lasciato libero. Ci si è serviti di una serie di pesi: 1 peso da 50 g e 4 pesi da 100 g, che sono stati posizionati sopra l'estremo libero del provino in esame. Seguendo il processo del banco di prova per lo studio termico è stata quindi collegata la fibra all'interrogatore per raccogliere e visualizzare i dati tramite il software SoftScanSSI e sono stati raccolti i valori della camera climatica tramite la sonda PT100 integrata e acquisiti tramite l'utilizzo del software apposito KK-Tool. Anche in questo caso, i dati e le analisi conseguenti alla acquisizione dei dati sono stati elaborati utilizzando il software MATLAB.

Capitolo 3

Configurazione dei provini

In questo paragrafo verranno descritti i provini utilizzati per lo studio in laboratorio. Come già introdotto lo studio si è concentrato su due tipi di analisi, una in relazione al termico e l'altra un'analisi della dipendenza meccanica. Le configurazioni utilizzate sono state create per studi precedenti, per lo studio delle proprietà termiche da [4] mentre per quelle meccaniche da [1]. In ordine verranno presentati i materiali utilizzati per le configurazioni adottate nello studio ed in seguito verrà presentato il criterio per il quale si è seguito il metodo di costruzione e il modo in cui sono stati assemblate le varie configurazioni.

3.1 Materiali

La seguente sezione presenta un elenco dettagliato dei materiali impiegati per la realizzazione dei provini utilizzati nello studio. Sono riportati sia i materiali di supporto utilizzati per posizionare le fibre ottiche, sia i materiali utilizzati per l'incollaggio della fibra.

3.1.1 Fibra Ottica

La fibra ottica impiegata per lo studio è un sensore ottico FBG, nel quale per il rivestimento è stato utilizzato un materiale in poliacrilato. Lo scopo del coating, quindi di fornire un rivestimento alla fibra, è quella di renderla più maneggevole e resistente. Il sensore ottico infatti può essere rivestito in diversi modi, la scelta del poliacrilato come materiale per il rivestimento è stata dovuta a scelte di facilità nel reperire questo materiale, inoltre, in linea con gli studi precedenti era adatto per ricoprire uno studio in camera climatica fino ad una temperatura di 120°C . Le proprietà termiche del poliacrilato utilizzato sono [17]:

- Coefficiente di espansione lineare $4 - 9\text{C}^{-1}$
- Conducibilità termica $5.5 - 6.7 \cdot 10^{-3}\text{W/cmK}$

Al fine di migliorare la maneggevolezza delle fibre e fornire una protezione aggiuntiva, sono state utilizzate guaine termo-restringenti. Queste guaine consistono in tubi cilindrici all'interno dei quali vengono inserite le fibre ottiche. Quando vengono sottoposte a calore, le guaine si contraggono riducendo il loro diametro fino a raggiungere quello della fibra, fornendo così una protezione aggiuntiva al sensore ottico.

3.1.2 Materiali di supporto

Per la realizzazione dei provini impiegati nelle prove, si sono utilizzati materiali di supporto sui quali è stata fissata la fibra tramite l'utilizzo di adesivi appropriati. In particolare, sono state impiegate lastre di materiale con superficie rettangolare, utilizzando una lega di alluminio e un materiale composito in fibra di carbonio per gli esperimenti relativi allo studio termico. Per lo studio meccanico, invece, si sono utilizzati esclusivamente provini in materiale composito in fibra di carbonio. Si riportano di seguito le specifiche proprietà dei materiali impiegati per i supporti e i materiali adesivi utilizzati per l'incollaggio del sensore.

Alluminio

La lastra in lega di alluminio è stata utilizzata esclusivamente per gli esperimenti condotti nell'ambito dello studio termico. Si tratta di una lega di alluminio appartenente al gruppo 1000, caratterizzata da una percentuale di alluminio del 99 %. Questo materiale è noto per la sua elevata resistenza alla corrosione, nonché per la sua eccellente conducibilità termica ed elettrica. Per effettuare la prova, il campione deve avere dimensioni adeguate in modo che il sensore FBG possa essere posizionato longitudinalmente sulla lastra di materiale.

Dimensioni	[cm]
Lunghezza	25
Larghezza	5
Spessore	0.5

Tabella 3.1: Dimensioni lastra lega alluminio



Figura 3.1: Provino in lega di alluminio

Per i fini dello studio vengono presentate le proprietà termiche e meccaniche del materiale [16]:

Caratteristiche meccaniche	
Modulo di Young	7500 Kg/mm^2
Carico di rottura	240 MPa
Carico di snervamento	130 MPa a 100°C height

Tabella 3.2: Proprietà meccaniche lega di alluminio

Caratteristiche termiche	
Coefficiente di espansione termica lineare	$21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ da 20°C a 200°C
Conduktività termica	$130 - 160 \text{ J/(mK)}$ a 20°C
Calore specifico	0.90 J/(gK) a 100°C height

Tabella 3.3: Proprietà termiche lega di alluminio - prove termiche

Composito in fibra di carbonio

Il materiale composito in fibra di carbonio è stato impiegato in diverse forme e diversi modelli per le analisi termiche e meccaniche condotte nello studio. Pertanto verranno presentati i diversi materiali che sono stati usati nelle configurazioni, identificando le diverse tipologie tra le lastre.

Focalizzandoci sui provini utilizzati nella parte termica, sono state impiegate tre lastre di fibra di carbonio identificate come C1, C2 e C3, come riportato in [4]. Queste lastre presentano le seguenti dimensioni:

Dimensioni	[cm]
Lunghezza	25
Larghezza	8
Spessore	0.5

Tabella 3.4: Dimensioni composito fibra di carbonio - prove termiche



Figura 3.2: Provino in composito in fibra di carbonio

Il materiale utilizzato per i provini corrisponde ad un segmento di ala di un modello di aeromobile e presenta una struttura a sandwich. Nello specifico, le facce

esterne sono costituite da un tessuto di carbonio denominato Carbonweave, mentre all'interno è presente un nucleo realizzato in Rohacell 51A. Il Carbonweave utilizzato è un materiale costituito da fibre di carbonio Tenax IMS65 24K, con una grammatura di 25 gsm. Le fibre di carbonio sono state laminate utilizzando una resina epossidica denominata resina epossidica L insieme all'indurente EPH161, che è la stessa combinazione utilizzata nello studio. Il tessuto Carbonweave è composto da fibre Tenax IMS65 24K, che sono fibre di carbonio di modulo intermedio (modulo di Young), con un'orientazione biaxiale di $\pm 45^\circ$. Questi due strati unidirezionali sono stati legati con una resina epossidica che polimerizza in combinazione con il catalizzatore EPH161. Il legante epossidico risultante è compatibile con il tipo di fibre di carbonio utilizzate. Nello specifico, per laminare il tessuto, è stato necessario considerare un consumo di resina di 36 g/m² per ottenere uno spessore del laminato di 0,045 mm, con una frazione volumetrica delle fibre del 35%. Il nucleo di questa lastra composita è realizzato in Rohacell 51A, un nucleo sandwich costituito da schiuma rigida a celle chiuse a base di PMI (Polimetacrilimide). [4] [15]. Invece, per quanto riguarda la configurazione identificata come CS, questa è stata formata sempre con un materiale composito in fibra di carbonio ma ottenuto tramite il processo di vacuum bagging, ovvero un processo che funziona mediante l'impiego di sacche o membrane sottovuoto, le quali vengono collegate ad una pompa di aspirazione generando una pressione negativa necessaria per comprimere il laminato situato al di sotto.

Per le analisi riguardanti l'utilizzo del sensore FBG come sensore di deformazione meccanica, sono stati preparati campioni di prova utilizzando esclusivamente materiali compositi in fibra di carbonio composti da 14 strati di fibre di carbonio unidirezionale.

Dimensioni	[cm]
Lunghezza	26
Larghezza	3.5
Spessore	0.16

Tabella 3.5: Dimensioni composito fibra di carbonio - prove meccaniche

3.1.3 Specifiche materiali per fissare la fibra

Kapton tape

Il nastro Kapton rappresenta una pellicola di poliimmide ampiamente utilizzata in diversi settori grazie alle sue molteplici applicazioni. Trova impiego in ambito meccanico ed elettronico, fornendo isolamento e svolgendo un ruolo fondamentale nel settore aeronautico e spaziale. Una delle caratteristiche distintive di questo materiale adesivo è la sua eccezionale capacità di mantenere le proprietà adesive in un ampio intervallo di temperature, che va da -269°C a 400°C. Oltre alla sua ampia gamma di temperature operative, il nastro Kapton offre anche vantaggi pratici nel suo utilizzo. Grazie alla sua natura adesiva, risulta più pratico nell'applicazione rispetto ad altre soluzioni come colle o resine, garantendo comunque una presa e un fissaggio affidabili.

Proprietà Termiche	Kapton Tape
Coefficiente termico di espansione lineare	20 ppm/°C
Coefficiente di Conduttività Termica	0.12 W/mK
Calore specifico	1.09 J/gK

Tabella 3.6: Proprietà termiche kapton

Proprietà Meccaniche	Kapton Tape
Ultimate Tensile Strength	231 MPa a 23°C 139 MPa a 200°C
Ultimate Elongation	72 % a 23°C 83 % a 200°C
Tensile Modulus	2.5 GPa a 23°C 2.0 GPa a 200°C
Density	1.42 g/cc

Tabella 3.7: Proprietà meccaniche kapton

Resina epossidica

Nelle configurazioni precedentemente studiate [4], è stata impiegata una resina epossidica di tipo L in combinazione con l'indurente EPH 161. La reazione tra la resina epossidica di tipo L e l'indurente EPH161 porta alla formazione di lunghe catene polimeriche che determinano l'indurimento del materiale adesivo. La resina epossidica di tipo L utilizzata è una resina bisfenolica A/F, in cui la componente F svolge un ruolo chiave nella riduzione della viscosità e nella prevenzione della formazione di cristalli all'interno del materiale a temperature inferiori a 5°C. La resina presenta :

- Bassa viscosità, privo di solventi e fillers
- impregnazione veloce per vetro, fibre aramidiche e fibre di carbonio
- Elevata resistenza statica e dinamica

L'indurente utilizzato è EPH 161

- tempo di lavorazione 90 minuti
- temperatura di curing 18°C

L'indurente impiegato con la resina ha un tempo di processo di 90 minuti, il quale rappresenta il periodo durante il quale la resina mantiene la sua viscosità, consentendo la lavorabilità del materiale. La resina epossidica, unita all'indurente, presenta un tempo di indurimento totale di 24 ore a temperatura ambiente (23°C), raggiungendo una temperatura di distorsione termica di 70°C [14]. Tuttavia, per ottenere una maggiore resistenza termica fino a 120°C, è necessario eseguire un post-curing ad elevate temperature. In questo caso specifico, è stato effettuato un post-curing di 15 ore. La combinazione della resina epossidica di tipo L e l'indurente EPH 161 ha determinato le seguenti caratteristiche della resina:

Tensile strength	156 MPa
Bending E-modulus	4300 MPa
Elongation at break	9.5 %
Initial viscosity	500mPas height

Tabella 3.8: Proprietà resina epossidica

Colla Cianoacrilato

La colla utilizzata nell'esperimento è un colla a base di etil-cianoacrilato, comunemente utilizzato. Questo tipo di colla è caratterizzato da una bassa viscosità e appartiene alla famiglia dei cianoacrilati. La sua polimerizzazione avviene facilmente in presenza di umidità, poiché richiede questa condizione per avviare il processo di indurimento. Le proprietà indurenti del cianoacrilato derivano dalla polimerizzazione dei monomeri che compongono il materiale, i quali reagiscono con l'umidità a temperatura ambiente.

La caratteristica principale di questa colla è la sua rapida velocità di indurimento, che è influenzata dall'umidità e dalla temperatura. In presenza di bassa umidità e temperature più basse, la velocità di indurimento sarà più lenta. Pertanto, la temperatura di applicazione consigliata non deve essere inferiore a 10°C.

I vantaggi di questa colla includono la sua ampia compatibilità con una vasta gamma di materiali, sia porosi che non porosi, di varie nature, garantendo una presa efficace. Inoltre, è in grado di resistere a temperature fino a circa 90°C. La sua disponibilità è elevata, poiché è di uso comune, ed è facile da applicare, polimerizzando rapidamente (in 5-60 secondi).

Tuttavia, presenta il difetto di essere sensibile a solventi polari come l'acqua, il che può compromettere le sue proprietà meccaniche e di adesione al materiale su cui è stata applicata.

3.2 Metodi di incollaggio

In seguito sono mostrati i vari metodi di incollaggio utilizzati, per la costruzione delle configurazioni per le analisi termiche sono stati utilizzati nastro kapton, resina epossidica e colla di tipo cianoacrilato. Invece, per la costituzione dei provini per le analisi di risposta alla deformazione meccanica sono stati usati due tipi di incollaggio, la resina epossidica e una colla di uso comune bostik. Quindi vengono mostrati come sono stati applicati i diversi materiali di incollaggio.

- Kapton

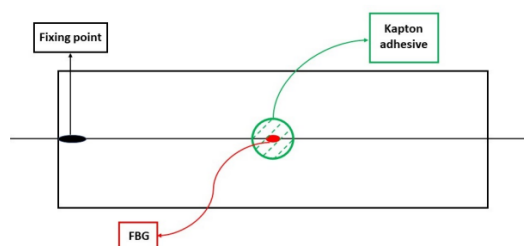


Figura 3.3: Immagine rappresentativa di FBG fissata con kapton [4]

Il kapton è un nastro di adesivo che si applica direttamente sul materiale in questione. Non necessita di processi per indurire e fissare meglio la presa, ma è sufficiente applicarlo, questo, rende il processo di applicazione e incollaggio della fibra al materiale molto semplice e veloce a differenza di altri metodi. Nel caso studiato è stato posto quindi per fissare il sensore FBG al materiale di supporto, per farlo si è scelto un punto un punto di fissaggio e il nastro è stato applicato sopra la fibra bloccandola al materiale.

- Resina

Per poter fissare la fibra al supporto con la resina è stato eseguito il procedimento standard, ovvero è stata applicata la fibra longitudinalmente alla lastra di materiale ed è stata applicata la resina ricoprendo la fibra. La resina usata è una resina epossidica di tipo L a cui è stato aggiunto indurente PH161. Per il caso di analisi in camera climatica, dove si sono raggiunte temperature superiori ai 70°C , le configurazioni con resina hanno subito un processo aggiuntivo di post curing, ovvero sono state poste per 24 h a 60°C , così da modificare le proprietà della resina, la quale dopo questo processo è capace di mantenere intatte le proprietà meccaniche e di adesione fino a 120°C .

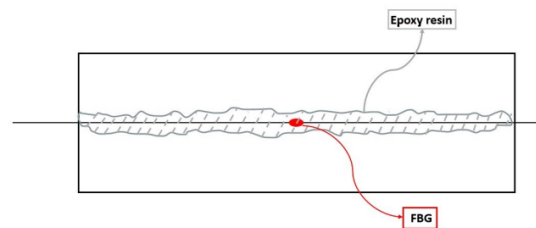


Figura 3.4: Immagine rappresentativa di FBG fissata con resina epossidica [4]

- Colla Cianoacrilato

La colla di tipo cianoacrilato è stata utilizzata applicandola solo sul sensore per poterlo fissare al materiale, il resto della fibra è stato invece fissato mediante l'uso della resina.

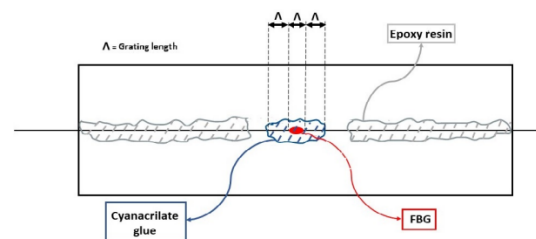


Figura 3.5: Immagine rappresentativa di FBG fissata con colla [4]

- Colla Commerciale L'impiego di questa particolare colla è stato limitato allo studio riguardante l'analisi della risposta alla deformazione meccanica. La colla è stata applicata sulla fibra posizionata sulla lastra in composito di fibra di carbonio e successivamente fatta indurire. Tuttavia, anche dopo il tempo necessario per la solidificazione, la colla non raggiunge una completa rigidità.

3.3 Descrizione Provini

Definiti quindi i materiali che compongono i provini e i metodi utilizzati per l'incollaggio, si vanno a descrivere i provini utilizzati

3.3.1 Configurazioni per studio termico

Per lo studio termico sono stati utilizzati in totale 8 configurazioni diverse, di cui tre presentano come materiale di supporto la lastra in alluminio, mentre le restanti 5 materiale in composito in fibra di carbonio. Di questi 8 configurazioni sei sono quelle riprese e già create nel lavoro precedente [4], queste sei configurazioni sono divise in due categorie, ovvero tre configurazioni prevedono l'utilizzo dell'alluminio come materiale di supporto e le altre tre presentano materiale composito in fibra di carbonio. In particolare, ci si concentra in primo luogo su le sei prove relative a configurazioni già testate ed analizzate, descrivendone le caratteristiche. Il materiale in fibra di carbonio utilizzato è il composito [Carbonwave/Rohacell 51A/Carbonweave], con il quale sono state costruite 3 diverse configurazioni. Su ciascuna di queste due categorie la fibra è stata montata seguendo le medesime specifiche illustrate:

- Kapton non tensionato: Le configurazioni nel quale troviamo il kapton come mezzo adesivo per fissare la fibra al supporto sono due, rispettivamente una con materiale di supporto l'alluminio e l'altra il materiale in composito di carbonio. La fibra non subisce pre-tensionamento, anche se una leggera tensione deve essere fatta per l'applicazione. Le configurazioni che presentano questo incollaggio verranno indicate nello studio con AL1 e C1.
- Resina pre-tensionato: l'utilizzo della resina epossidica è stato unita al pre-tensionamento della fibra per quanto riguarda queste configurazioni. La fibra viene quindi tensionata e successivamente ricoperta di resina epossidica con aggiunta di indurente. Le due specie che usano questa configurazione, rispettivamente con materiale di supporto in alluminio o in composito di carbonio sono indicate con AL2 e C2
- Colla non tensionato: La colla di tipo cianoacrilato viene utilizzata insieme alla resina epossidica, come illustrato precedentemente. In questa configurazione il pre-tensionamento non è di per se ricercato ma è necessario un minimo tensionamento per fissare la fibra con la colla.

Oltre alle sei configurazioni precedentemente menzionate, che sono state adottate da studi precedenti, sono state introdotte ulteriori due configurazioni che saranno utilizzate nello studio per valutare le prestazioni della fibra ottica come sensore termico.

- Carbonio con resina: Il modello di provino C4 si riferisce a una nuova configurazione in cui il sensore FBG è stato posizionato su un materiale in carbonio con una percentuale di resina superiore rispetto alle configurazioni mostrate precedentemente. La configurazione presenta pre-tensionamento e la fibra ottica è stata fissata sul materiale di supporto utilizzando resina epossidica di tipo L con aggiunta di indurente EPH161. La differenza significativa tra questa configurazione e quella presentata in precedenza indicata con C2 risiede nel modo in cui la resina è stata applicata per fissare la fibra al supporto. Nella configurazione C4, l'incollaggio è stato eseguito in modo più preciso,

prestando particolare attenzione a evitare un'eccessiva quantità di resina. Lo stesso materiale di supporto e la stessa resina sono stati utilizzati in entrambe le configurazioni, ma con un approccio più accurato nell'applicazione della resina nella configurazione C4.

- Carbonio Sottile: La configurazione denominata come Carbonio Sottile (CS) presenta come materiale di supporto una lastra di composito in fibra di carbonio ottenuta mediante vacuum bagging.

3.3.2 Configurazioni per lo studio di deformazione meccanica

Per la parte meccanica sono stati utilizzati due configurazioni che sono relative a quelle già create in precedenza per il lavoro [1]. Le configurazioni sono state riprese e riutilizzate per le prove di compressione e trazione. Il materiale sul quale sono state appoggiate le fibre è sempre materiale composito in fibra di carbonio, in questo caso si ha un materiale con 14 strati di fibre poste in modo unidirezionalme. L'incollaggio della sensore sul materiale è avvenuto mediante l'uso di resina epossidica, la differenza che intercorre tra i due sensori è il pre-tensionamento della fibra.

- FBG 1: non tensionata
- FBG 2: pre-tensionata

Oltre alle due configurazioni proposte, nello studio sul sensore di deformazione meccanica è stata considerata un'altra configurazione al fine di confrontare diversi metodi di incollaggio. In questa nuova configurazione, è stata utilizzata una colla Bostik come metodo di incollaggio per fissare la fibra al supporto. Si è osservato che il materiale impiegato richiedeva un lungo tempo per solidificarsi e, anche dopo un periodo di tempo considerevole, manteneva una consistenza gommosa, risultando quindi in una scarsa adesione al materiale in fibra di carbonio.

Capitolo 4

Stato dell'arte

Il presente capitolo intende fornire una panoramica degli studi precedenti che costituiscono la base del lavoro presentato in questa tesi. Verranno esaminati i risultati dei lavori, i quali sono stati condotti all'interno del dipartimento DIMEAS del Politecnico di Torino, che si sono concentrati sull'utilizzo, la valutazione e l'analisi della fibra ottica FBG come sensore di temperatura e deformazione meccanica.

4.1 Sensore FBG

Le capacità e le potenzialità del sensore FBG nell'ambito aeronautico e spaziale sono state ampiamente analizzate in diversi studi. In particolare, nel dipartimento DIMEAS del Politecnico di Torino sono state svolte ricerche che hanno permesso di gettare le basi su studi sempre più profondi della fibra ottica come sensore termico e meccanico nel settore aerospaziale, dimostrandone le capacità e la sensibilità di questa tecnologia. In particolare, come presente nello studio [5] viene confermato che il sensore FBG è estremamente sensibile alle condizioni ambientali, e il segnale emesso dalla fibra ottica, ovvero la lunghezza d'onda di Bragg, varia in risposta alle influenze esterne e alle condizioni ambientali a cui è esposto. In particolare, si è osservato che la temperatura rappresenta un fattore esterno di grande influenza su tale segnale. Quando si utilizzano sensori FBG per misurare deformazioni meccaniche, la temperatura può creare una maggiore incertezza nell'acquisizione del segnale. Inoltre, è stato evidenziato che l'umidità rappresenta un parametro non completamente trascurabile per l'uso della fibra ottica come sensore, poiché può alterare la misurazione della temperatura in ambienti nei quali è presente.

Pertanto, per garantire una corretta corrispondenza e taratura dello strumento, è necessario adottare metodi di compensazione e filtraggio dei dati al fine di eliminare i disturbi e i rumori causati dalle condizioni ambientali. Queste pratiche di correzione sono fondamentali per ottenere misurazioni accurate e affidabili mediante l'impiego dei sensori FBG in ambienti variabili e soggetti a diverse condizioni esterne.

La possibilità di utilizzare la fibra ottica come sensore per rilevare parametri esterni richiede una calibrazione accurata. Lo studio condotto da [3] evidenzia come diverse configurazioni di implementazione della fibra all'interno di un sistema possano influenzare le prestazioni del sensore FBG. In particolare ci permette di vedere come abbia un impatto importante la tecnica con la quale avviene l'incollaggio quando si sta eseguendo il processo di calibrazione. Si nota come la temperatura rilevata dal sensore possa essere affetta da errori non trascurabili. Ciò che si nota è che si hanno errori minori derivanti dall'uso della fibra libera rispetto ad una pre-tensionata in situazioni di stabilità meccanica. D'altro canto quando ci si trova in

ambienti soggetti a flussi turbolenti risulta vantaggioso l'utilizzo di una fibra ottica tensionata in quanto produce una escursione del valore della lunghezza d'onda maggiore, pertanto le perturbazioni attaccano in maniera inferiore il segnale [2].

La fibra ottica mostra una grande sensibilità, come confermato in questo studio. La relazione lineare tra la lunghezza d'onda e la temperatura è stata confermata analizzando i dati raccolti, consentendo una valutazione quantitativa del coefficiente K_t . Si è osservato che il valore di questo coefficiente può variare a seconda della configurazione scelta durante la ripetizione di uno stesso esperimento. Questa considerazione sottolinea l'importanza dei materiali utilizzati per posizionare il sensore ottico FBG e l'importanza del metodo di fissaggio e incollaggio della fibra al materiale. L'adozione di un adeguato metodo di incollaggio e l'utilizzo di materiali appropriati sono fondamentali per ottenere risultati precisi, coerenti e ripetibili nel tempo. È particolarmente evidente che una maggiore stabilità dei dati si verifica quando si utilizza una fibra ottica pre-tensionata, poiché questa procedura porta a una significativa escursione della lunghezza d'onda e, di conseguenza, eventuali perturbazioni nella misurazione (causate, ad esempio, da piccoli fenomeni meccanici casuali o da turbolenze dovute a flussi convettivi dell'aria) risultano essere non rilevanti.

L'ampiezza della perturbazione sul segnale rimane costante, tuttavia, nella fibra ottica che presenta tensionamento, questa si traduce in un $\Delta\lambda$ complessivo che è quasi un ordine di grandezza superiore, rendendo le oscillazioni praticamente insignificanti. Tale risultato suggerisce una sensibilità estremamente elevata della fibra alle condizioni ambientali, specialmente alle sollecitazioni meccaniche. L'analisi porta quindi ad evidenziare l'importanza di avere un efficace filtraggio, in quanto si potrebbero effettuare tarature termiche errate. La fibra ottica sottoposta a un pre-tensionamento ha dimostrato quindi non solo una sensibilità migliorata, ma anche un aumento della stabilità dei dati di fronte a potenziali disturbi esterni. La relazione tra la lunghezza d'onda e la temperatura varia in base alla tensione applicata alla fibra. Si osserva che la correlazione presente nella fibra libera risulta più facilmente standardizzabile rispetto a quella calcolata per la fibra soggetta a tensione, che richiede una calibrazione specifica per ciascuna applicazione tenendo conto della tensione. Inoltre, si può dedurre che l'uso di una fibra ottica pre-tensionata potrebbe offrire vantaggi significativi per misurazioni altamente accurate della temperatura, soprattutto in presenza di escursioni termiche che potrebbero causare disturbi.

4.2 FBG come sensore termico

Questo lavoro di tesi prosegue e amplia gli studi svolti in precedenza presso il DIM-EAS del Politecnico di Torino. Durante ricerche precedenti [4] [2], è stato analizzato l'utilizzo della fibra come sensore termico. Nel presente lavoro, vengono esaminate 6 diverse configurazioni di montaggio della fibra, studiando come queste si comportano come sensori di temperatura. Viene effettuata un'analisi approfondita sulle prestazioni di ciascuna configurazione, valutandone le caratteristiche specifiche.

4.2.1 Presentazione utilizzo dell'FBG come sensore termico

Il presente lavoro si concentra sull'analisi delle capacità della fibra ottica come sensore di temperatura. Lo studio si è concentrato sull'effetto che la variazione di temperatura apporta al segnale in uscita dall'FBG, analizzando i valori per poter

tarare lo strumento. Per raggiungere questo obiettivo, sono stati proposti sei diversi modelli, in cui le condizioni ambientali sono state fatte variare. I sei modelli sono stati fissati su due supporti di materiale differente, uno in lega di alluminio e l'altro in materiale in composito in fibra di carbonio, e per ciascun campione sono stati testati diversi metodi di incollaggio della fibra sul supporto, ovvero tramite nastro adesivo kapton, colla di tipo cianoacrilato e resina epossidica con aggiunta di indurente.

Per queste analisi sono stati utilizzati:

- Camera Climatica
- Interrogatore
- PC
- Arduino

Dopo la fabbricazione dei campioni di prova, questi sono stati collocati all'interno di una camera climatica su supporti appositi, e ciascuna fibra è stata collegata all'interrogatore. All'interno della camera climatica, la temperatura è stata variata da -40°C a 120°C , con incrementi di $20^{\circ}\text{C}/\text{h}$. La variazione di temperatura ha influenzato il segnale di output della fibra, che è stato rilevato dall'interrogatore e visualizzato sul computer. Sono stati stabiliti specifici intervalli di temperatura per consentire alla camera climatica di raggiungere la temperatura desiderata e alla fibra di raggiungere uno stato di risposta stabile. I campioni di prova sono stati sottoposti a cinque cicli termici distinti, sia con un incremento graduale della temperatura da -40°C a 120°C , sia con una riduzione graduale dalla temperatura di 120°C a -40°C .

Dopo la raccolta dei dati, è stata eseguita la calibrazione per ciascun tipo di campione, ovvero sono stati registrati i dati sulle variazioni della lunghezza d'onda in funzione della temperatura e successivamente correlati linearmente tra di loro. Questa procedura ha permesso di ottenere una curva teorica di primo grado, che si adatta ai punti del grafico. Successivamente, tramite l'identificazione della retta di interpolazione, è stato possibile calcolare i valori del coefficiente di sensitività termica, indicato come K_T , che corrisponde alla pendenza della retta, e il punto di offset, che rappresenta il valore iniziale della lunghezza d'onda λ_0 . Utilizzando questi parametri di calibrazione, l'FBG può essere impiegato come sensore di temperatura, seguendo la formula:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + K_T T \quad (4.1)$$

$$\lambda(T) = \lambda_{0mean} + K_{Tmean} T \quad (4.2)$$

$$T(t) = \frac{\lambda(t) - \lambda_{0mean}}{K_{Tmean}} \quad (4.3)$$

Seguendo l'equazione sopra descritta, è stato eseguito un ciclo termico sulle diverse configurazioni al fine di valutare la risposta del segnale e l'accuratezza della temperatura misurata dal sensore, potendo confrontare la temperatura misurata dal sensore FBG mediante calibrazione con quella rilevata all'interno della camera climatica, valutandone l'accuratezza.

4.2.2 Provini utilizzati e ricerca effettuata

Al fine di utilizzare l'FBG come sensore di temperatura, è stato necessario fissare le fibre ottiche su supporti realizzati con diversi materiali utilizzando vari metodi di fissaggio. Questi campioni sono stati successivamente collocati all'interno di una camera climatica al fine di variare la temperatura e monitorare le variazioni del segnale attraverso un interrogatore collegato a un computer. Lo studio è stato condotto su un totale di sei modelli differenti. Per ciascun modello, sono state variate le condizioni al contorno, incluse la selezione del materiale di supporto della fibra ottica, il metodo di incollaggio dell'FBG al supporto e l'applicazione di tensionamento della fibra ottica:

- Alluminio
 - Fibra fissata con Kapton
 - Fibra pre-tensionata fissata con Resina epossidica
 - Fibra non tensionata fissata con Colla

- Composto in fibra di Carbonio
 - Fibra fissata con Kapton
 - Fibra pre-tensionata fissata con Resina epossidica
 - Fibra non tensionata fissata con Colla

Successivamente alla raccolta dei dati riguardanti le variazioni della lunghezza d'onda in nanometri, tali informazioni sono state salvate e sottoposte ad un'attenta analisi. Per ciascuna specie presa in esame, è stato individuato un intervallo di stabilità termica nel quale la camera climatica e la fibra ottica erano in equilibrio termico. Questo ha permesso di registrare, per ogni incremento di temperatura, un valore medio della lunghezza d'onda corrispondente.

I dati ottenuti sono stati poi elaborati e analizzati al fine di costruire un grafico rappresentativo della variazione della lunghezza d'onda in funzione della temperatura.

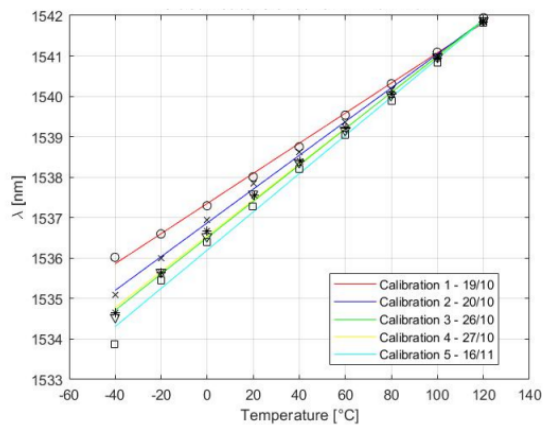
Dall'insieme dei dati medi ottenuti, è stato possibile tracciare una retta interpolante che attraversasse tutti i punti. La retta così ottenuta ha fornito i valori dei coefficienti K_t e λ_0 , necessari per la calibrazione del sensore.

Dopo aver determinato le costanti di taratura, si è proceduto ad analizzare il fenomeno inverso. In particolare, la fibra ottica è stata sottoposta ad un ciclo termico con temperature variabili, senza un ordine prestabilito, e si sono registrate le risposte dell'output della fibra. Successivamente, i dati raccolti sono stati convertiti in valori di temperatura utilizzando le costanti di taratura precedentemente calcolate.

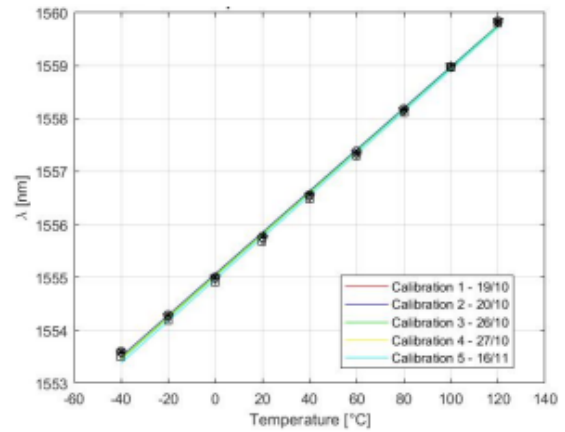
4.2.3 Risultati

Una volta ottenuti i coefficienti di taratura per ciascun provino, è stata condotta un'analisi comparativa per determinare la specie più adatta in termini di ripetibilità e accuratezza.

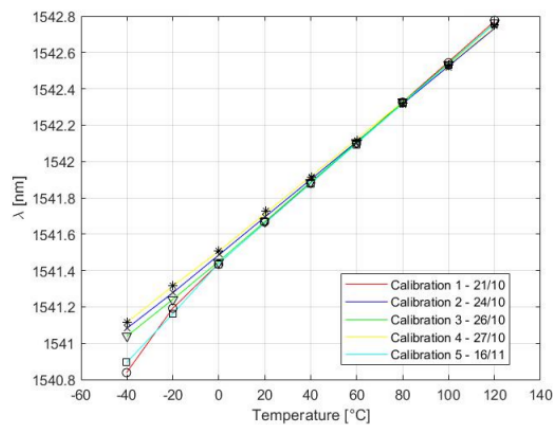
La ripetibilità è stata valutata confrontando i risultati della taratura per ogni singola specie al variare del giorno in cui i provini sono stati sottoposti ai cicli termici.



(a) Alluminio colla non tensionato



(b) Alluminio resina pre-tensionato



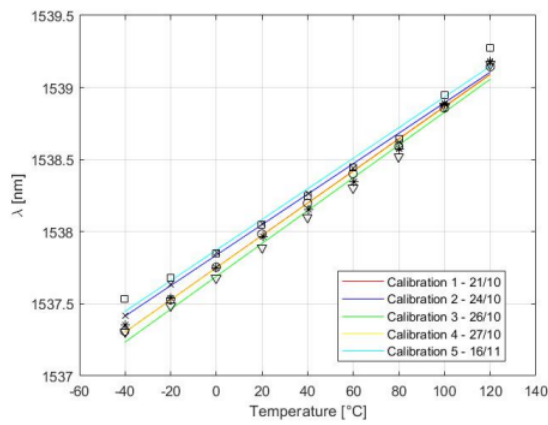
(c) Alluminio fissato con kapton

Figura 4.1: Analisi precedenti: Risultati calibrazione alluminio [4]

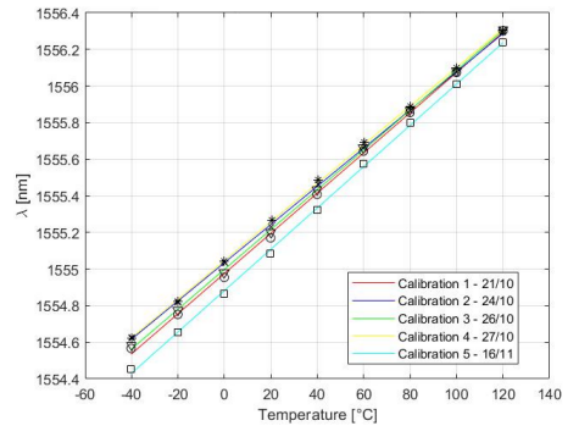
L'accuratezza è stata studiata sottoponendo i provini ad un ciclo termico in cui la variazione di temperatura è stata casuale. Sono stati raccolti i valori della lunghezza d'onda in output e convertiti in temperatura usando i parametri di taratura precedentemente ricavati. Dopo la conversione, si confrontano i valori di temperatura ottenuti T_{FBG} con quelli effettivamente misurati in camera climatica al fine di valutare l'accuratezza. Per stimare l'accuratezza dei dati, si è scelto di utilizzare il Root Mean Square Error (RMSE) come indice di precisione statistica.

I risultati ottenuti dalla ricerca conducono a diverse conclusioni significative: In primo luogo, i risultati della ricerca indicano che, indipendentemente dal tipo di materiale sul quale la fibra è stata fissata, l'utilizzo di una colla (sia resina epossidica che colla cianoacrilato) per l'incollaggio produce una risposta del sensore alla temperatura lineare nel range di temperatura analizzato.

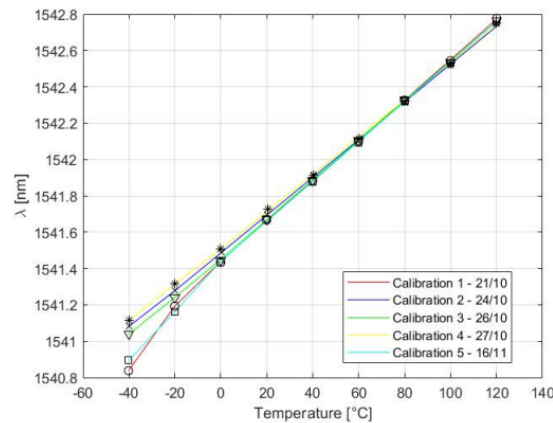
Il comportamento della FBG incollata con nastro adesivo Kapton varia a seconda del materiale di supporto utilizzato. Nel caso in cui la FBG sia fissata su un campione di composito in fibra di carbonio si ha un andamento lineare della variazione di lunghezza d'onda al variare della temperatura. Tuttavia, quando la FBG è applicata sulla lastra di alluminio, si osserva un cambiamento del comportamento: si identifica infatti una zona di transizione della linearità attorno ai 10°C. Questo fenomeno è causato dallo slittamento presente tra il coating e il core, a causa dello shear stress. Il kapton presenta nella sua parte adesiva un proprio silicone che, quando applicato su un campione di composito in fibra di carbonio, aderisce in maniera simile a quella



(a) Carbonio con colla non tensionato



(b) Carbonio resina pre-tensionato



(c) Carbonio fissato con kapton

Figura 4.2: Analisi precedenti: Risultati calibrazione carbonio [4]

di una colla, impedendo lo scorrimento garantendo una risposta lineare. Tuttavia, nel caso di applicazione su lastra di alluminio, l'espansione termica del metallo causa un parziale distacco del kapton, formando bolle d'aria all'interno del nastro adesivo e determinando un cambiamento del comportamento lineare.

Le FBG fissate al materiale mediante incollaggio non presentano il fenomeno della transizione, in quanto la colla impedisce lo slittamento del coating. Inoltre, la colla fornisce una sensibilità termica imposta dalla espansione termica del supporto stesso che è lineare, garantendo così un andamento lineare della variazione di lunghezza d'onda al variare della temperatura.

Secondo il precedente studio la configurazione ottimale tra le diverse configurazioni risulta essere il caso di FBG pre-tensionato e incollato usando resina epossidica sul campione in lega di alluminio. Questa configurazione fornisce infatti buoni risultati in termini di reperibilità e accuratezza. Per quanto riguarda l'incollaggio sul composito in fibra di carbonio, la soluzione migliore è risultata essere la configurazione nella quale l'adesione della fibra ottica è avvenuta mediante nastro kapton.

4.3 Meccanico

L'analisi della fibra ottica FBG come sensore di deformazione meccanica è stata già trattata in precedenza nel DIMEAS del Politecnico di Torino, nello studio [1]

sono state realizzate due configurazioni analizzandone la risposta quando soggette a sole variazioni di deformazione a compressione e trazione. Lo scopo della ricerca è stata quella di valutare i parametri di taratura dei campioni, andando a variare le condizioni al contorno tra una specie e l'altra, così da notare ed evidenziare come variano le performance in termini di sensore meccanico da una configurazione all'altra.

4.3.1 FBG come sensore Meccanico

Come evidenziato nel Capitolo 1, la fibra ottica FBG è sensibile a diversi fattori esterni, tra cui la deformazione meccanica. Lo strain meccanico provoca una variazione dell'indice di rifrazione nella fibra ottica e nel grating pitch, influenzando il segnale riflesso dal sensore ottico. L'equazione che descrive la variazione della lunghezza d'onda di Bragg in funzione dello strain e della temperatura è la seguente:

$$\Delta\lambda = K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (4.4)$$

Lo studio condotto da E. si è articolato in due parti principali. Nella prima parte, si sono realizzate le due configurazioni utilizzate per l'esperimento. La realizzazione è avvenuta prendendo come materiale su cui posizionare la fibra un lastra in fibra di carbonio e il sensore è stato fissato con resina epossidica. In questa prima parte è stata pertanto analizzata la fase di assestamento della resina epossidica sul campione di composito di carbonio. Nella seconda parte dello studio, sono state condotte prove statiche di trazione e compressione sui provini. Sono stati presi in considerazione due casi: configurazione con fibra ottica pre-caricate e l'altra non pre-caricata. Durante le prove, sono state effettuate misurazioni della lunghezza d'onda di Bragg al fine di valutare l'effetto della deformazione meccanica sui sensori FBG, con conseguente analisi dei valori acquisiti.

4.3.2 Provini utilizzati ed esperimenti fatti

Sono state realizzate due configurazioni di montaggio della fibra ottica su un supporto, entrambe caratterizzate dall'utilizzo del medesimo materiale e dello stesso metodo di incollaggio:

- Materiale: Composto in fibra di carbonio (14 strati di fibra di carbonio)
- Incollaggio: Resina epossidica tipo L con indurente

Nel presente studio, sono state applicate due fibre ottiche al materiale di supporto utilizzando una procedura di incollaggio con resina epossidica. La procedura di incollaggio è stata eseguita posizionando inizialmente la fibra ottica sul materiale di supporto e successivamente applicando la resina epossidica, la quale è stata lasciata indurire. La distinzione tra le due fibre ottiche utilizzate risiede nella presenza di un pre-tensionamento su una delle fibre, mentre l'altra è stata lasciata priva di pre-tensionamento. Di conseguenza, questo studio mira a esaminare l'effetto del tensionamento nella raccolta dei dati relativi all'effetto dello strain meccanico.

Ai fini dello studio presentato, le due fibre ottiche sono state posizionate equidistanti dall'asse centrale del materiale di supporto. In ciascuna fibra sono presenti due FBG a lunghezze d'onda di Bragg di 1546 nm e 1538 nm, rispettivamente. Una delle fibre è stata pre-tensionata con $3500 \mu\epsilon$.

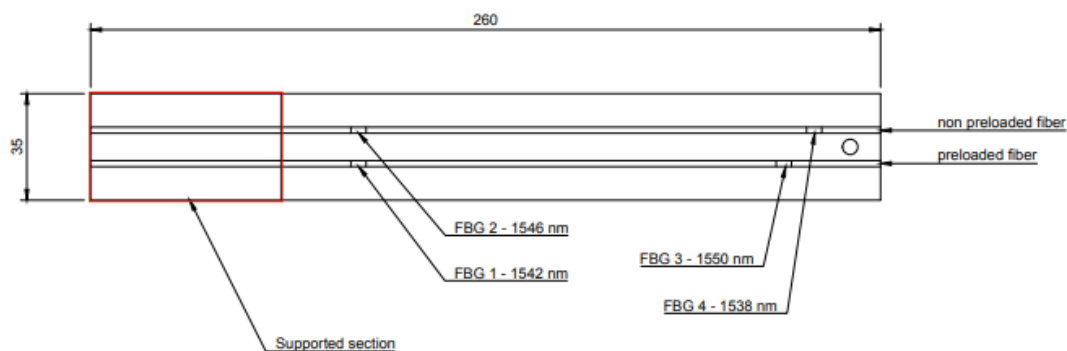


Figura 4.3: Configurazione provini per studio deformazione [7]

- $\lambda_{01} = 1546nm$
- $\lambda_{f1} = 1550nm$
- $\lambda_{02} = 1538nm$
- $\lambda_{f2} = 1542nm$

Ai fini di un'analisi comparativa parallela, sono state selezionate rispettivamente lunghezze d'onda di 1546 nm e 1542 nm.

Il test è stato condotto fissando un'estremità su un supporto, ottenendo così una configurazione ad incastro. Sul lato opposto è stato posizionato un gancio che ha svolto la funzione di supporto per l'applicazione di pesi. Tale configurazione ha consentito di aumentare il carico e di studiare la risposta alle diverse tipologie di deformazioni indotte, variando la quantità di peso applicato all'estremità libera.

Gancio per pesi	85 g
Serie di 4 pesi	50 g per peso
Serie di 2 pesi	100 g per peso

Tabella 4.1: Pesi utilizzati per prove deformazione meccanica

La campagna sperimentale è stata condotta seguendo un procedimento sequenziale. Innanzitutto, il gancio è stato posizionato sul provino e, successivamente, sono stati aggiunti incrementi di 50 g di peso alla volta, fino a raggiungere il carico totale di 434 g.

È stata data attenzione allo studio del tempo necessario per raggiungere uno stato stabile sotto ciascun carico applicato. Questo approccio è stato adottato al fine di analizzare la risposta del sensore per periodi di stabilità della fibra ottica.

I sensori FBG sono stati collegati all'interrogatore ottico e i valori del segnale in frequenza in uscita sono stati visualizzati e acquisiti tramite un software dedicato sul computer SmartSoftSSI. Le analisi sono state condotte al fine di monitorare la risposta dei sensori sia durante l'applicazione di carichi di trazione che di compressione sul provino.

Dopo l'acquisizione dei dati, è stata generata una rappresentazione grafica delle variazioni di lunghezza d'onda nel tempo. Per rendere più evidente il cambiamento

della lunghezza d'onda in relazione allo strain meccanico, i dati sono stati normalizzati. Questo processo ha consentito di apprezzare meglio l'incremento o la diminuzione del valore della lunghezza d'onda al variare dello strain meccanico. Successivamente, è stata eseguita un'analisi di post-processing dei dati. I valori acquisiti sono stati utilizzati per tracciare un grafico delle variazioni di lunghezza d'onda in funzione della massa applicata. Questa procedura ha permesso di ottenere una curva di calibrazione per la misurazione dello strain. Lo stesso approccio è stato applicato anche per l'analisi della compressione, consentendo di ottenere una curva di calibrazione specifica per tale modalità di carico.

4.3.3 Risultati

I risultati ottenuti hanno permesso di confrontare le performance di due sensori FBG, denominati FBG1 e FBG2, che sono stati posizionati alla stessa distanza dal margine di supporto. FBG1 è associato a una fibra pre-caricata, mentre FBG2 si riferisce a una fibra non pre-tensionata.

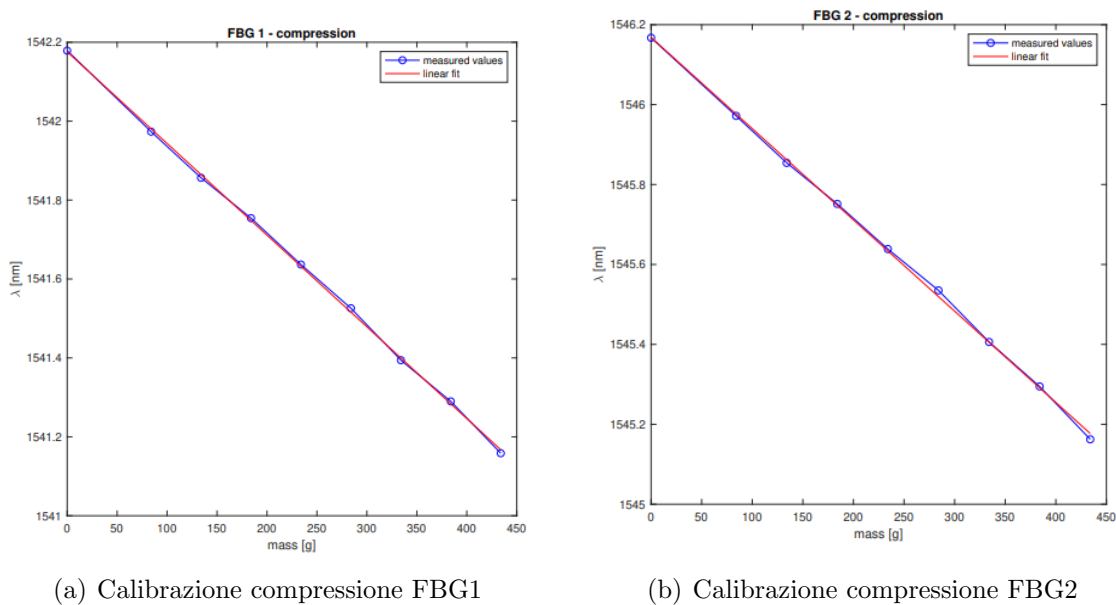
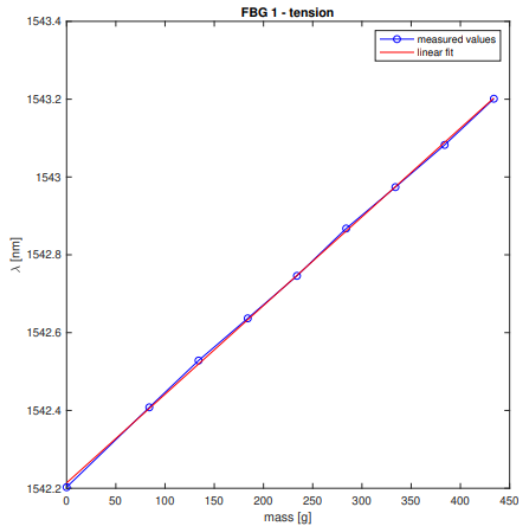
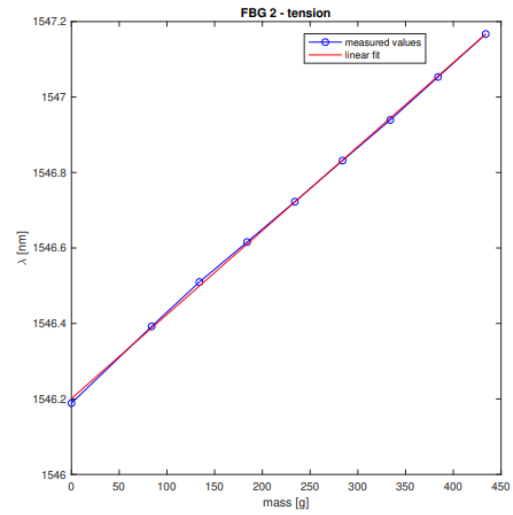


Figura 4.4: Stato d'arte: Calibrazione Compressione [7]

I risultati dimostrano una somiglianza nella risposta dei due sensori FBG ai carichi applicati, evidenziando una differenza di sensibilità minima tra di essi. È emerso che la variazione della lunghezza d'onda di output, indicata come λ , è direttamente proporzionale al carico applicato. Tale andamento lineare della variazione di λ in relazione al peso applicato è stato riscontrato sia nei test di compressione che in quelli di trazione. L'errore relativo alla pendenza dell'adattamento lineare sono infatti trascurabili, andando in contrasto con la teoria che porta a dare maggiori capacità alla configurazione di fibra ottica pre-tensionata. L'ipotesi afferma infatti che le FBG montate su fibre non pre-caricate fossero significativamente meno affidabili quando sottoposte a carichi di compressione. Pertanto, dallo studio si può affermare che non vi sia alcuna differenza essenziale nel comportamento tra le FBG montate sulla fibra pre-caricata e quelle montate sulla fibra non pre-caricata. In altre parole, i risultati indicano che entrambi i sensori FBG sono in grado di rilevare in modo accurato e affidabile i carichi meccanici, mostrando una risposta



(a) Calibrazione trazione FBG 1



(b) Calibrazione trazione FBG 2

Figura 4.5: Stato d'arte: Calibrazione Trazione [7]

lineare e proporzionale alla quantità di peso applicata. Dall'analisi comparativa effettuata, è emerso che non si evidenzia una differenza sostanziale tra i valori rilevati dalla fibra pre-caricata e dalla fibra non pre-caricata. Entrambe le fibre hanno mostrato un comportamento simile, fornendo una risposta comparabile per carichi di piccola entità. Questa conclusione riveste un'importanza significativa poiché suggerisce che per le misurazioni di compressione e trazione non è necessario utilizzare una fibra ottica sia soggetta ad un pre-tensionamento specifico, la quale richiede un procedimento di montaggio più complesso.

Capitolo 5

Analisi Termica

In questo capitolo, viene presentata una delle attività svolte in laboratorio durante il periodo di studio. In particolare, sono state condotte prove per valutare le prestazioni del sensore ottico come sensore di temperatura. Le analisi si basano sullo studio presentato nella sezione 4.2 e ne estendono la ricerca riprendendo anche l'utilizzo delle configurazioni utilizzate in ricerche precedenti [4]. L'obiettivo delle seguenti analisi è valutare l'effetto dell'invecchiamento del materiale utilizzato per l'incollaggio sulle diverse configurazioni, presentare due nuove configurazioni da accompagnare allo studio e quindi analizzare e discutere le prestazioni dei diversi metodi di montaggio del sensore FBG, confrontandoli tra loro e con i dati ottenuti dagli studi precedenti.

5.1 Presentazione Lavoro

Lo studio si propone diversi obiettivi. Innanzitutto, verranno presentate le capacità di risposta del sensore ottico in un ambiente che presenta variazioni di temperatura da un minimo di -40°C fino a 50°C . Saranno analizzati i dati relativi alla risposta e alla variazione della lunghezza d'onda di Bragg, al fine di valutarne la precisione. Successivamente, sarà studiata la relazione di proporzionalità tra la lunghezza d'onda e la temperatura, con l'obiettivo di valutare la linearità di tale relazione e di determinare le costanti caratteristiche K_T e λ_0 per ciascuna configurazione. Grazie agli studi precedenti, sarà possibile confrontare il comportamento dei campioni in quanto sottoposti a prove simili a quelle effettuate 6 mesi prima dell'attuale studio. Ciò consentirà di valutare come la risposta dei campioni sia variata nel tempo e quanto l'invecchiamento, causato dal periodo trascorso e dai cicli termici precedentemente subiti, abbia influito sui risultati. In parallelo, verranno condotte analisi per studiare le capacità di altre due nuove configurazioni proposte. Verrà eseguita la calibrazione del sensore ottico per valutare la temperatura misurata mediante conversione e valutare l'affidabilità dei risultati. Saranno quindi evidenziate le scelte che possono svolgere al meglio questo ruolo in termini di precisione, accuratezza e ripetibilità. Come riportato precedentemente, le configurazioni adottate differiscono per il materiale di supporto su cui è montato il sensore ottico, per il metodo di fissaggio utilizzato e per l'utilizzo o meno del pre-tensionamento della fibra ottica. Di seguito sono elencate le configurazioni utilizzate e il nome con le quali verranno indicate nel corso dello studio:

- Alluminio
 - AL1: FBG fissato con kapton

- AL2: FBG pre-tensionato fissato con Resina epossidica
- AL3: FBG non tensionata fissata con Colla
- Composto in fibra di Carbonio
 - C1: FBG fissato con kapton
 - C2: FBG pre-tensionato fissato con Resina epossidica
 - C3: FBG non tensionata fissata con Colla

Le due nuove configurazioni introdotte per l'analisi comparativa presentano entrambe una lastra in composito di fibra di carbonio come materiale di supporto.

- C4: FBG pre-tensionato su Carbonio fissato con Resina epossidica
- CS: Carbonio Semplice fissato con colla

I campioni in esame sono stati posti all'interno della camera climatica e sottoposti a cicli termici ripetuti. Sono stati eseguiti 4 cicli manuali e 3 cicli automatici. In particolare, i cicli automatici sono stati strutturati in 3 serie, le prime due composte da 2 cicli ciascuna e l'ultima da 8 cicli. I cicli manuali sono stati utili per definire un set up iniziale per l'acquisizione dei dati, nonché identificare un intervallo di tempo necessario per il quale il sensore si trova ad una temperatura costante così da rilevare i dati in un contesto il più stazionario possibile. I cicli termici ai quali sono stati posti i provini sono di temperatura crescente, in particolare il range di temperatura selezionato per i cicli automatici è stato limitato tra -40°C e 50°C con step di temperatura di 10°C al fine di concentrarsi sulla regione di transizione e di evitare possibili problemi derivanti dalla deformazione della colla ad elevate temperature. Inoltre, l'adozione dei cicli automatici ha permesso di analizzare gli effetti dell'umidità, poiché la camera climatica rimane chiusa durante l'operazione, evitando l'introduzione di aria esterna. Le fibre poste all'interno della camera climatica vengono collegate all'interrogatore, il quale acquisisce i dati e li mostra su schermo. Nelle seguenti analisi, saranno presentati esclusivamente i dati relativi ai cicli automatici, in quanto consentono di ottenere una visione più approfondita delle caratteristiche e della ripetibilità del sensore in un ambiente chiuso e controllato. L'acquisizione dei dati sperimentali, relativi alla variazione della lunghezza d'onda della fibra ottica in funzione del tempo, sono stati rappresentati graficamente (5.1) (5.2) (5.3). In particolare, l'asse delle ascisse indica il tempo espresso in secondi, mentre quello delle ordinate indica la lunghezza d'onda misurata in nanometri, così da visualizzare l'andamento della risposta della fibra ottica all'incrementare della temperatura.

Per quanto riguarda le fibre fissate sull'alluminio si possono notare alcuni aspetti:

- La configurazione di fibra fissata con nastro kapton presenta notevoli discostamenti dalle altre configurazioni. In particolare, riguarda le curve relative ai primi cicli di ogni serie. In questi casi la temperatura all'interno della camera climatica non ha ancora raggiunto per la prima volta i 50°C , e le curve mostrano una significativa differenza rispetto alle altre. Tale differenza potrebbe essere causata dall'effetto dell'umidità, portando dunque ad influire sulla variazione dei risultati nei primi cicli. Infatti, l'aria riscaldata a 50°C comporta una riduzione significativa dell'umidità relativa presente in camera climatica. Dopo il compimento del primo ciclo scompare questo effetto, rendendo così le analisi più precise dal punto di vista della ripetibilità.

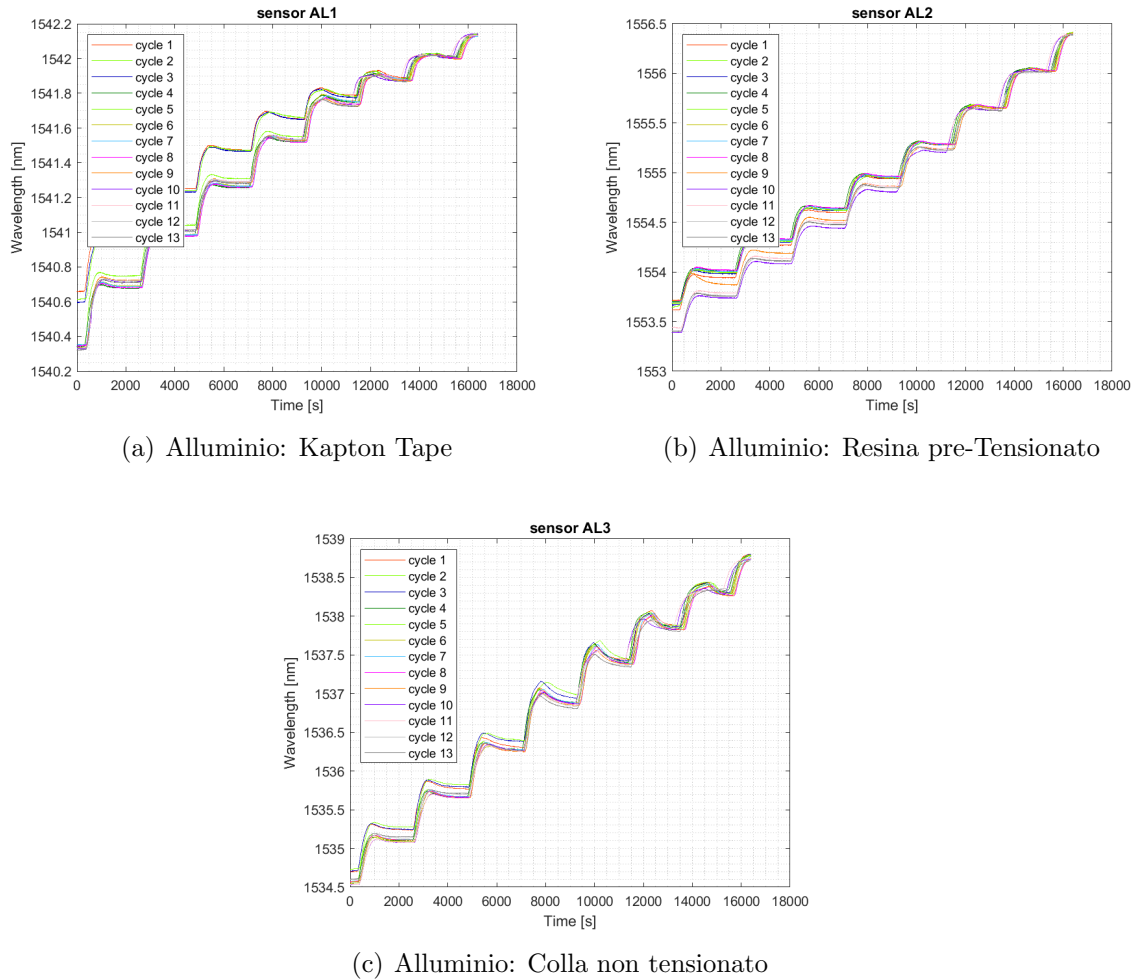
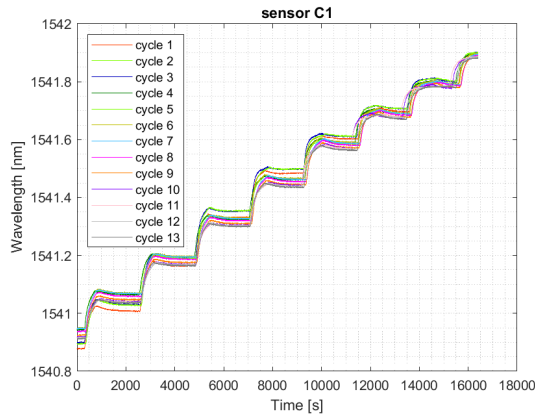


Figura 5.1: Acquisizione dati Alluminio

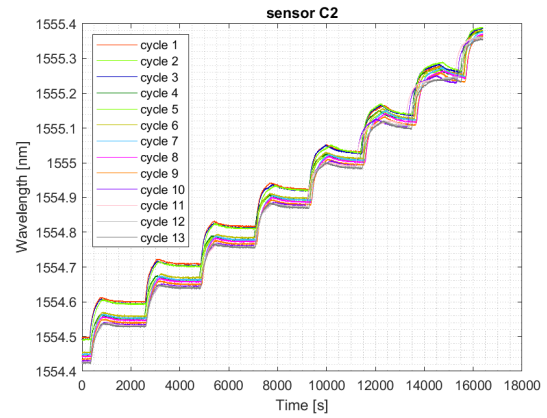
- La configurazione con l'utilizzo di resina epossidica e fibra pre-tensionata ha dimostrato una buona ripetibilità nella zona a temperature elevate, tuttavia si è riscontrata una discrepanza tra i valori di lunghezza d'onda rilevata per la stessa temperatura nella zona più fredda, portando ad una non univocità dei dati acquisiti in istanti diversi.
- La risposta della fibra ottica per l'incollaggio con colla ha evidenziato la comparsa di picchi prima del raggiungimento della stabilità termica della camera climatica. Questo fenomeno è avvenuto durante gli step di temperatura che sono prossimi alla temperatura ambiente. In particolare per le temperature di 0°C, 10°C e 20°C. Tuttavia, le curve sovrapposte hanno evidenziato una buona ripetibilità dei dati.

I provini fissati realizzati che presentano come materiale di supporto il composito in fibra di carbonio presentano i seguenti risultati per l'acquisizione dei dati:

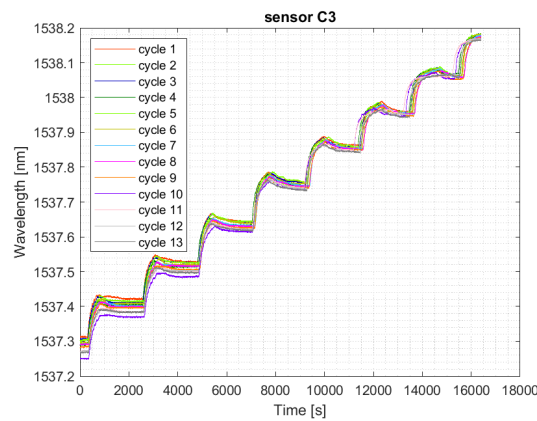
- In linea generale, l'utilizzo del composito in fibra di carbonio come supporto per il sensore ottico presenta una maggiore coerenza nell'acquisizione dei dati rispetto all'utilizzo della lastra in lega di alluminio e un minore $\Delta\lambda$ tra gli step di temperatura.



(a) Carbonio: Kapton Tape



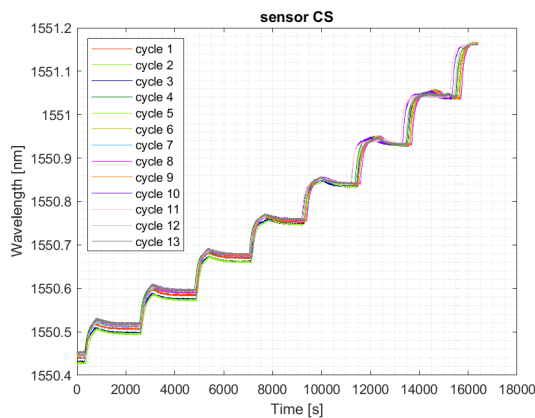
(b) Carbonio: Resina pre-tensionato



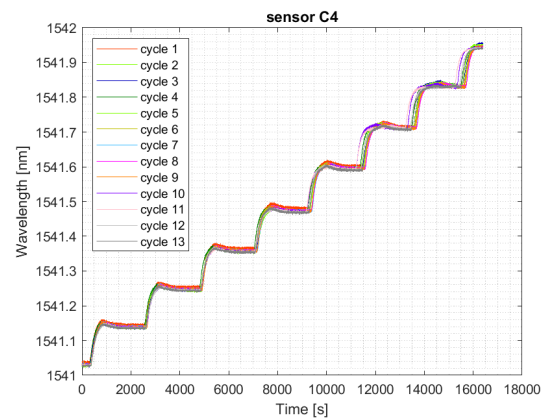
(c) Carbonio: Colla non tensionato

Figura 5.2: Acquisizione dati Carbonio

Infine sono riportati le analisi ricavate dallo studio dei due campioni aggiunti allo studio precedente, ovvero il caso di Carbonio Semplice e della configurazione in cui il sensore è stato fissato sul materiale in fibra di carbonio con resina epossidica.



(a) Carbonio Semplice



(b) Carbonio: Resina pre-tensionato C4

Figura 5.3: Acquisizione dati CS C4

La procedura adottata ha previsto, in linea con le precedenti ricerche, la determinazione di un intervallo di tempo da mantenere per ogni step di temperatura,

individuati da ciascun gradino visualizzato nel grafico tempo - lunghezza d'onda. Definire un corretto intervallo di tempo per l'acquisizione dei dati è fondamentale per permettere sia alla camera climatica che al sensore ottico di raggiungere una stabilità, così da garantire una migliore coerenza nell'acquisizione dei dati. Considerando ogni singola prova effettuata, per ciascun intervallo di stabilità a temperatura costante, è stata calcolata la media dei valori della lunghezza d'onda di output. Questi valori medi sono stati rappresentati come punti individuali su un diagramma cartesiano e rapportati rispetto alla temperatura a cui fanno riferimento, in cui l'asse delle ascisse corrisponde alla temperatura e l'asse delle ordinate rappresenta la lunghezza d'onda.

È stato possibile identificare la curva interpolante che passa attraverso i punti medi relativi a ciascun incremento di temperatura. Questo processo è stato eseguito utilizzando i comandi *polyfit* e *polyval* disponibili su MATLAB. Mediante tali comandi, è stato effettuato un processo di linearizzazione che ha permesso di identificare la retta interpolante i punti medi e determinare i coefficienti K_T e λ_0 per ciascun caso di studio. Si ricorda che K_T rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante i punti nel piano T- λ , mentre λ_0 indica la quota della retta.

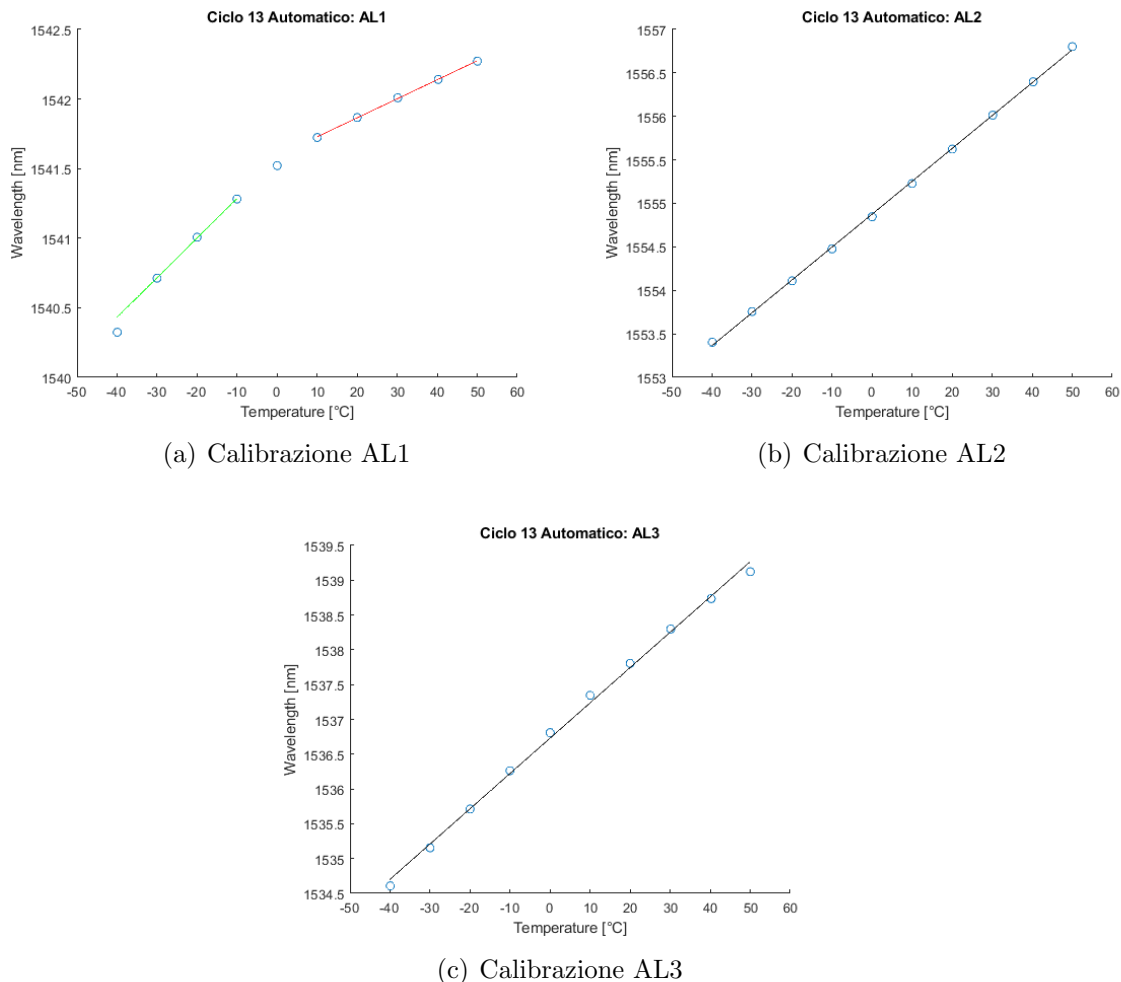
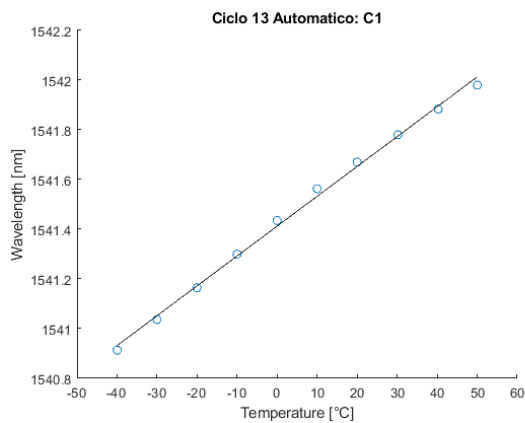
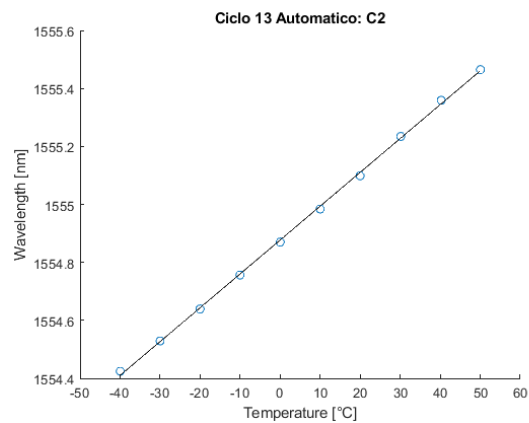


Figura 5.4: Calibrazione Risultati Alluminio

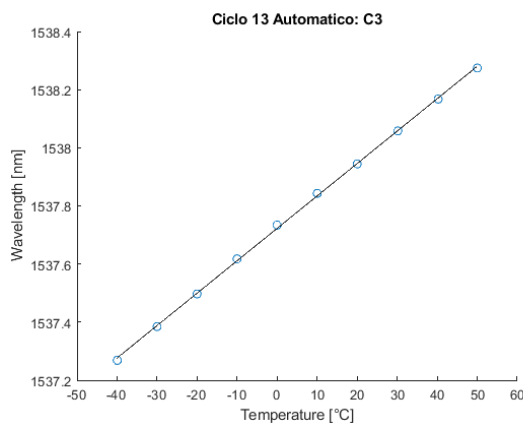
Il procedimento per determinare i coefficienti K_T e λ_0 è stato eseguito per ogni ciclo termico, al fine di ottenere i valori caratteristici specifici per ciascuna prova.



(a) Calibrazione C1

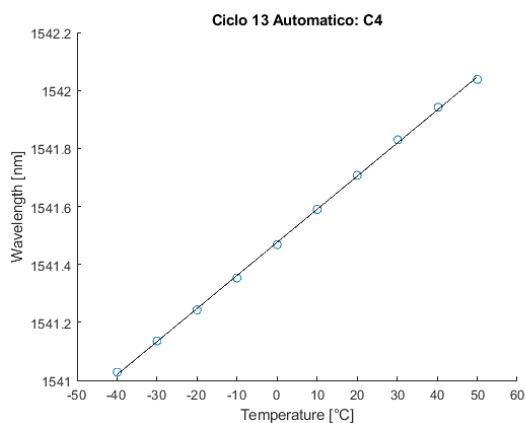


(b) Calibrazione C2

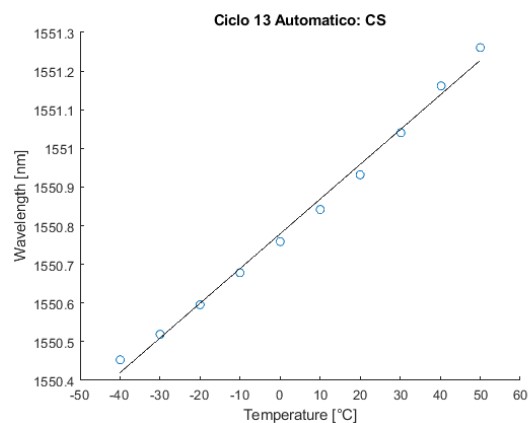


(c) Calibrazione C3

Figura 5.5: Calibrazione Risultati Carbonio



(a) Calibrazione C4



(b) Calibrazione C5

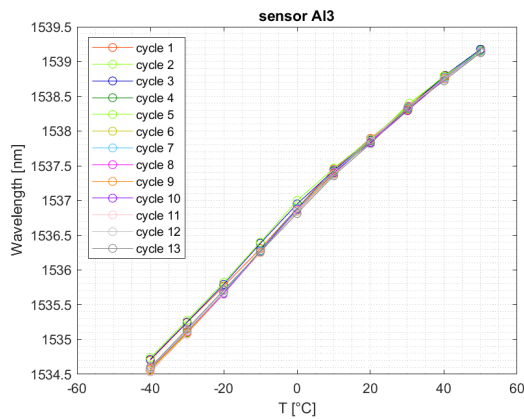
Figura 5.6: Calibrazione nuove configurazioni

Successivamente, per ogni configurazione presente, è stata calcolata la media aritmetica dei coefficienti ottenuti dai diversi cicli termici. Questo calcolo è stato effettuato al fine di ottenere un valore medio unico rappresentativo del campione considerato. In tabella vengono riportati i valori medi calcolati

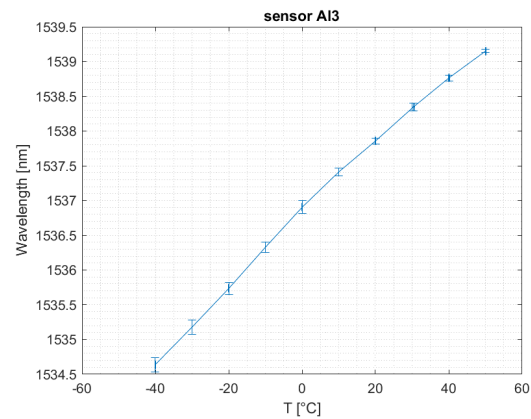
Configurazioni	K_{Tmean} [nm/°C]	λ_{0mean} [nm]
Alluminio Kapton AL1	0.01921	1541.4343
Alluminio Resina pre-tensionato AL2	0.03516	1554.9787
Alluminio colla non tensionato AL3	0.05088	1536.7593
Carbonio Kapton C1	0.01212	1541.4274
Carbonio Resina pre-tensionato C2	0.01143	1554.906439
Carbonio colla non tensionato C3	0.01095	1537.7378
Carbonio Resina C4	0.01140	1541.4787
Carbonio Semplice CS	0.00909	1550.7747

Tabella 5.1: Valori K_{Tmean} e λ_{0mean}

Le curve di taratura, valutate per ogni ciclo, sono presentate con un'interpolazione effettuata per ciascun intervallo rappresentante l'incremento di temperatura e sovrapposte tra di loro. Ciò è stato fatto al fine di evidenziare in modo più preciso le variazioni di linearità al variare della temperatura e per valutare la ripetibilità del processo tramite il confronto tra le curve. Inoltre, è stato incluso un grafico che rappresenta la media dell'andamento, accompagnato da un indicatore dell'errore associato mediante una barra di errore.



(a) Alluminio: Colla Calibrazione

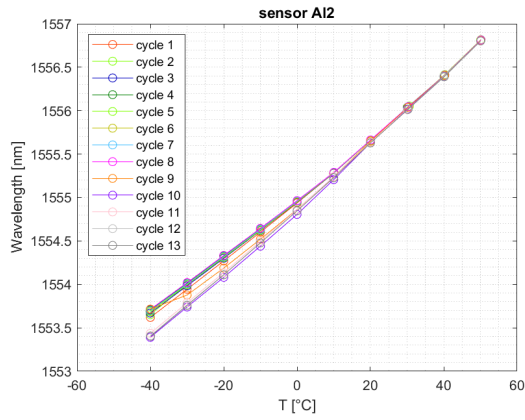


(b) Alluminio: Colla Calibrazione Errorbar

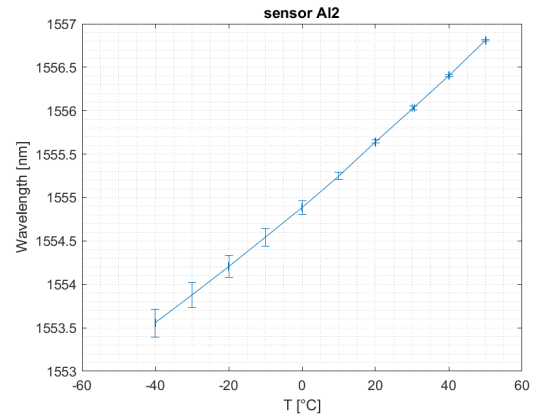
Figura 5.7: Calibrazione per step AL3

L'analisi quindi oltre a fornire le costanti necessarie per la calibrazione del sensore K_t e λ_0 , ci permette di comprendere le caratteristiche di ripetibilità della configurazione. Il comportamento delle curve infatti permette di notare in che situazioni e di quanto si discostano i valori dal caso teorico che prevede una retta interpolante i punti segnati.

Possiamo osservare, ad esempio, che nel caso specifico in cui l'FBG sia fissata su

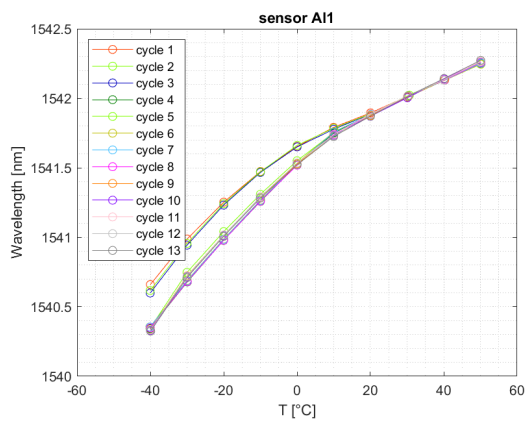


(a) Alluminio: Resina pre-tensionato

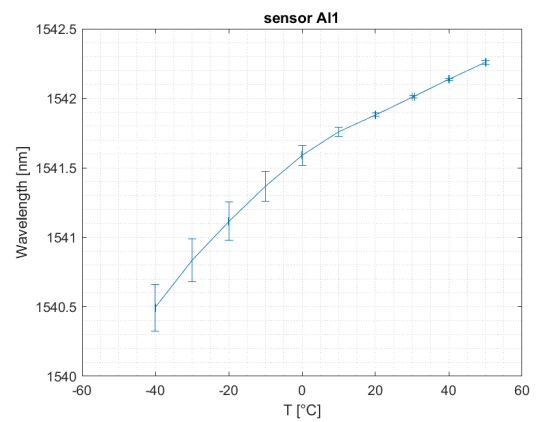


(b) Alluminio: Resina pre-tensionato Errorbar

Figura 5.8: Calibrazione per step AL2

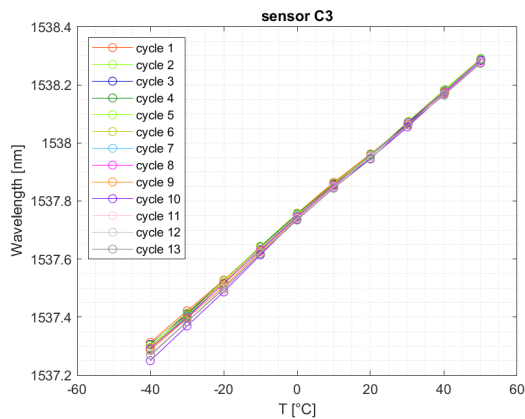


(a) Alluminio: Kapton

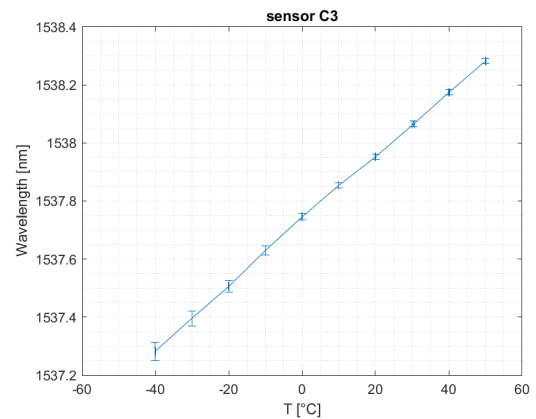


(b) Alluminio: Kapton Errorbar

Figura 5.9: Calibrazione per step AL1



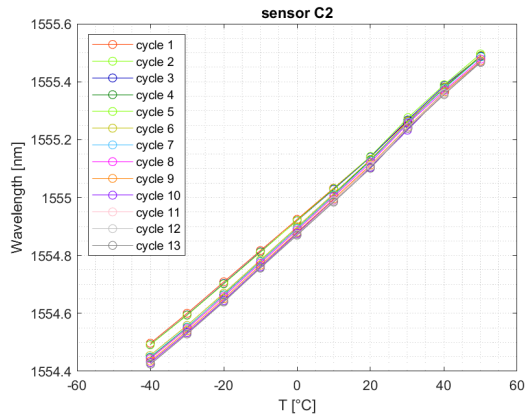
(a) Carbonio: Colla Calibrazione



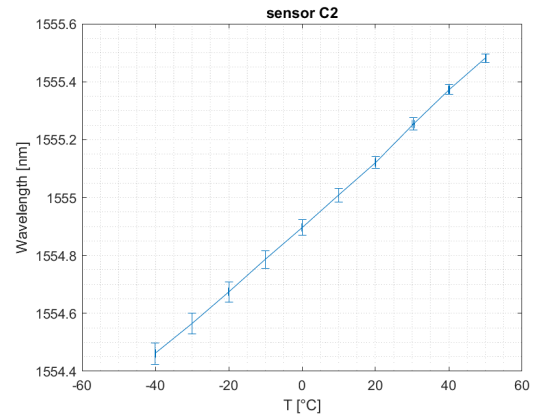
(b) Carbonio: Colla Calibrazione Errorbar

Figura 5.10: Calibrazione per step C3

lastra in lega di alluminio utilizzando nastro kapton, si verifica una significativa discrepanza tra i valori calcolarli dai diversi cicli. Al contrario, nel caso in cui l'FBG sia fissata utilizzando la resina su composito in fibra di carbonio, si evidenzia non solo un'ottima ripetibilità, ma anche una buona linearità della curva. Lo studio

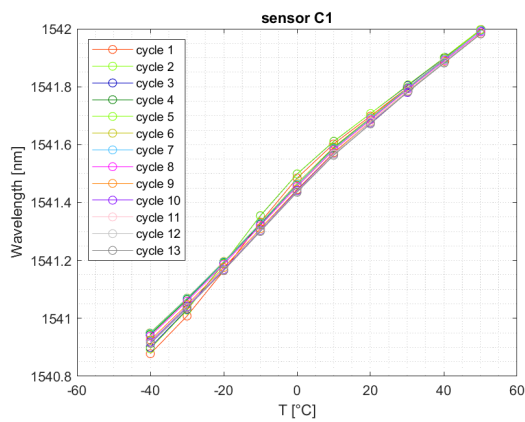


(a) Carbonio: Resina pre-tensionato

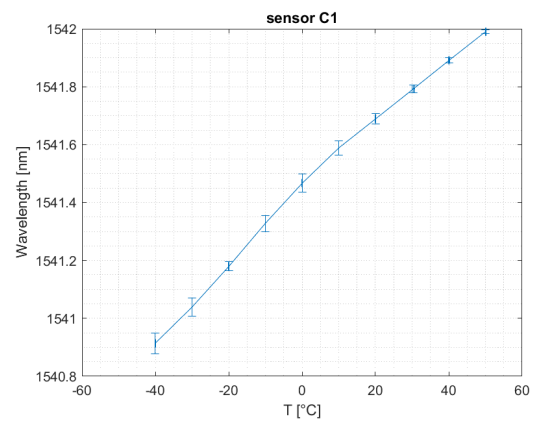


(b) Carbonio: Resina pre-tensionato Errorbar

Figura 5.11: Calibrazione per step C2

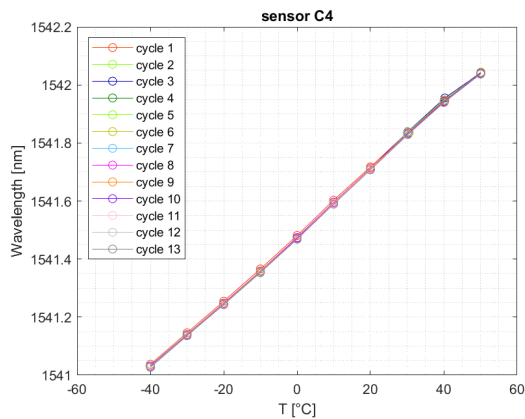


(a) Carbonio: Kapton

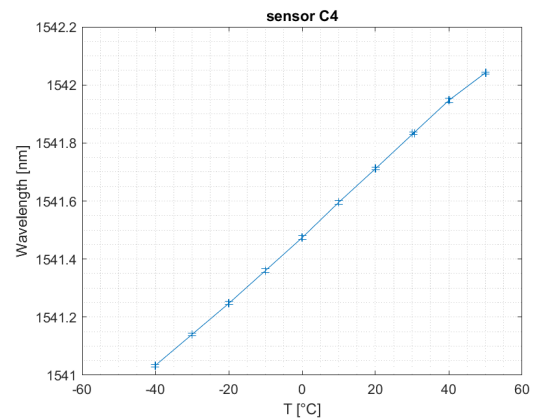


(b) Carbonio: Kapton Errorbar

Figura 5.12: Calibrazione per step C1



(a) Carbonio: Resina pre-tensionato C4



(b) Carbonio: Resina pre-tensionato C4 Errorbar

Figura 5.13: Calibrazione per step C4

verrà discusso in seguito alla fine della presentazione del lavoro. Ai fini della quantificazione delle capacità delle varie configurazioni si sono calcolati diversi valori che possono rendere di più facile interpretazione i dati ricavati. Un metodo proposto per valutare la precisione nell'acquisizione dei dati per le confi-

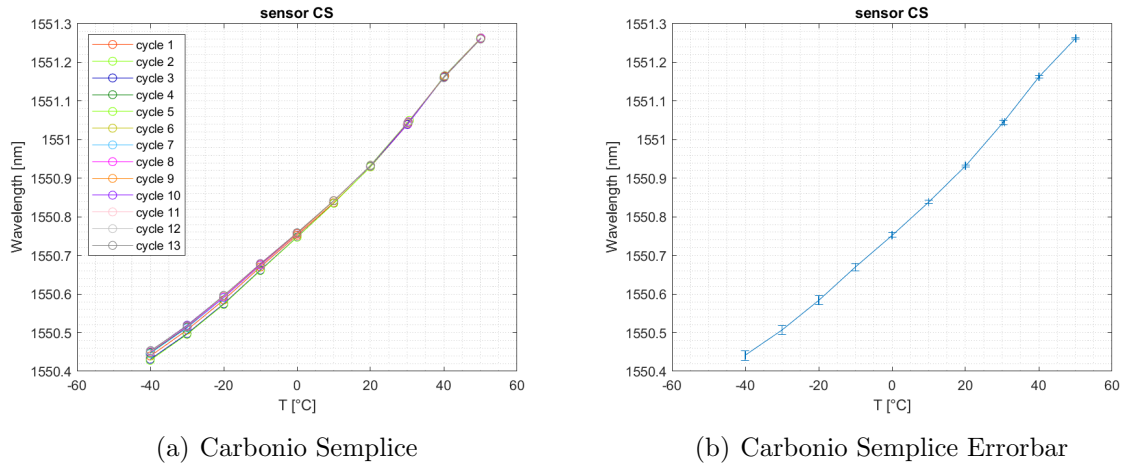


Figura 5.14: Calibrazione per step CS

gurazioni proposte è quello dell'utilizzo dello z-score. Lo z-score è un indice statistico che permette di determinare quanto i valori acquisiti si discostano dalla media per ciascun incremento di temperatura, evidenziando così la precisione delle misurazioni.

$$z = (x - \mu) / \sigma \quad (5.1)$$

- x : valore della singola misura
- μ : media aritmetica totale dei valori
- σ : deviazione standard
- z : valore di riferimento, un valore unitario corrisponde ad una lontananza del valore da quello medio pari a σ

Viene preso in considerazione il ciclo 13 poiché rappresenta l'ultimo ciclo della serie, ed è presumibilmente meno influenzato da deviazioni causate da fattori diversi da quelli termici, come l'umidità. Mediante grafici, è possibile visualizzare quanti valori raccolti dalla fibra si distribuiscono intorno al valore medio e quanti invece si discostano significativamente da tale valore. L'unità utilizzata per rappresentare la distanza di un valore rispetto alla media è μ/σ , dove μ rappresenta il valore medio e σ è la deviazione standard della distribuzione dei dati. Tale rappresentazione grafica permette di valutare la dispersione dei dati rispetto alla media e di individuare eventuali valori anomali o significativamente devianti.

L'analisi condotta ci consente di valutare la quantità di valori che si discostano in modo significativo dal valore medio, consentendoci di identificare le configurazioni nelle quali i valori presentano maggiori divergenze ed valutare eventuali errori. Questo permette di individuare le configurazioni in cui i valori presentano maggiori fluttuazioni e, di conseguenza permette di rilevare le configurazioni in cui lo strumento mostra una minore stabilità e precisione nell'acquisizione dei dati.

Dopo aver ricavato i parametri necessari per la calibrazione del sensore ottico per ciascuna configurazione proposta, è stato possibile utilizzare il sensore per rilevare i valori di temperatura tramite conversione. Pertanto, per validare i risultati ottenuti, sono state condotte prove di verifica inversa al fine di testare l'affidabilità e l'accuratezza del sensore nelle misurazioni di temperatura. Ovvero, per valutare l'accuratezza del sensore ottico si è convertito il segnale di lunghezza d'onda acquisito in

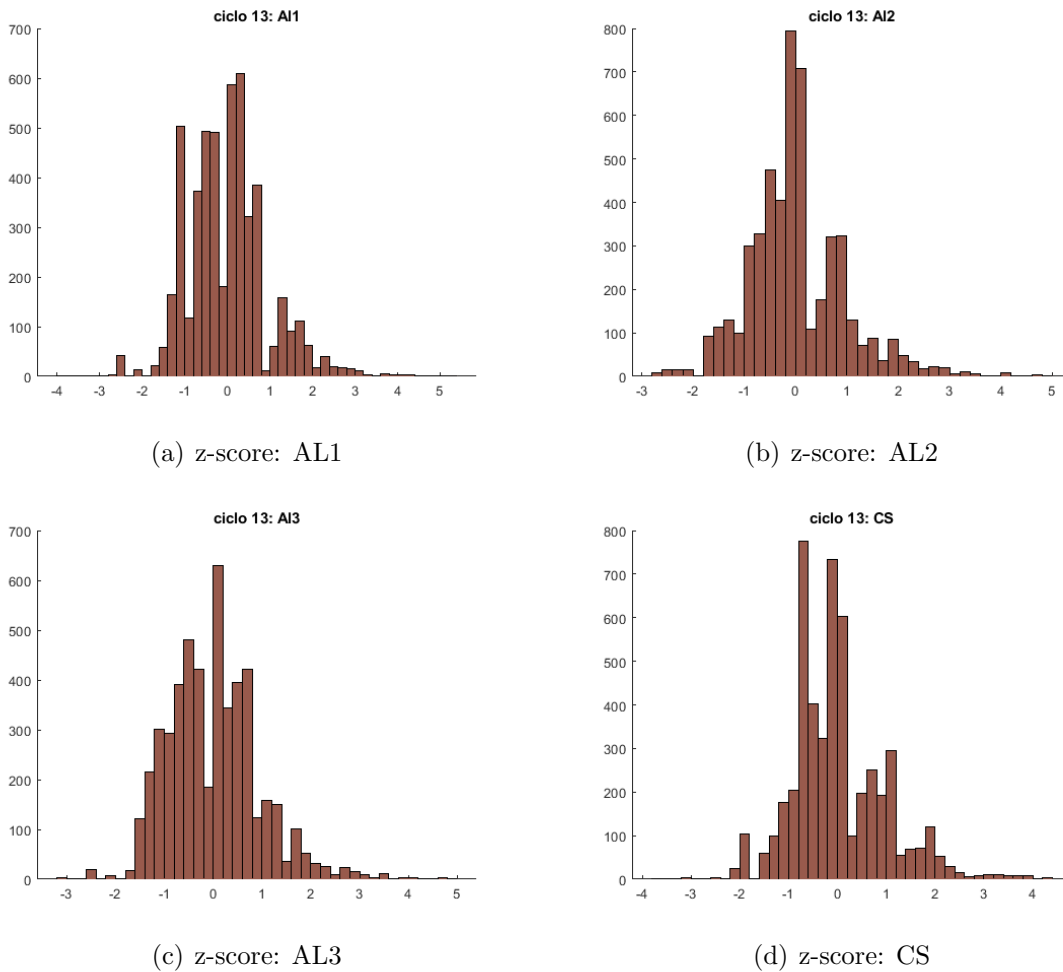


Figura 5.15: Risultati z-score: Alluminio

output durante le prove in valori di temperatura, per poi confrontarlo con la misura acquisita allo stesso istante in camera climatica. Una prima prova è stata eseguita misurando la temperatura mediante FBG per un ciclo casuale. Tale prova prevede l'esecuzione di un ciclo termico che non segue una salita o una discesa costante, ma un andamento vario tra diverse temperature senza un criterio prestabilito. Durante l'esecuzione del ciclo, la camera climatica è stata mantenuta chiusa e si è rispettato un intervallo di tempo necessario per consentire la stabilizzazione sia della camera che del sensore FBG.

Il processo di conversione segue quanto detto nella parte teorica. Una volta acquisiti i dati relativi alla risposta della fibra ottica alle variazioni di temperatura in termini di variazione di lunghezza d'onda, è stato possibile utilizzare i valori della costante di taratura K_T e della λ_0 precedentemente calcolati per convertire i dati di λ in temperatura.

Grazie alla relazione che lega la variazione di lunghezza d'onda dell'FBG alla temperatura, si può ricavare la formula per il calcolo della temperatura:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + K_T T \quad (5.2)$$

Poiché lo studio è condotto considerando intervalli di tempo in cui la stazionarietà viene raggiunta, è possibile utilizzare valori medi dei coefficienti calcolati.

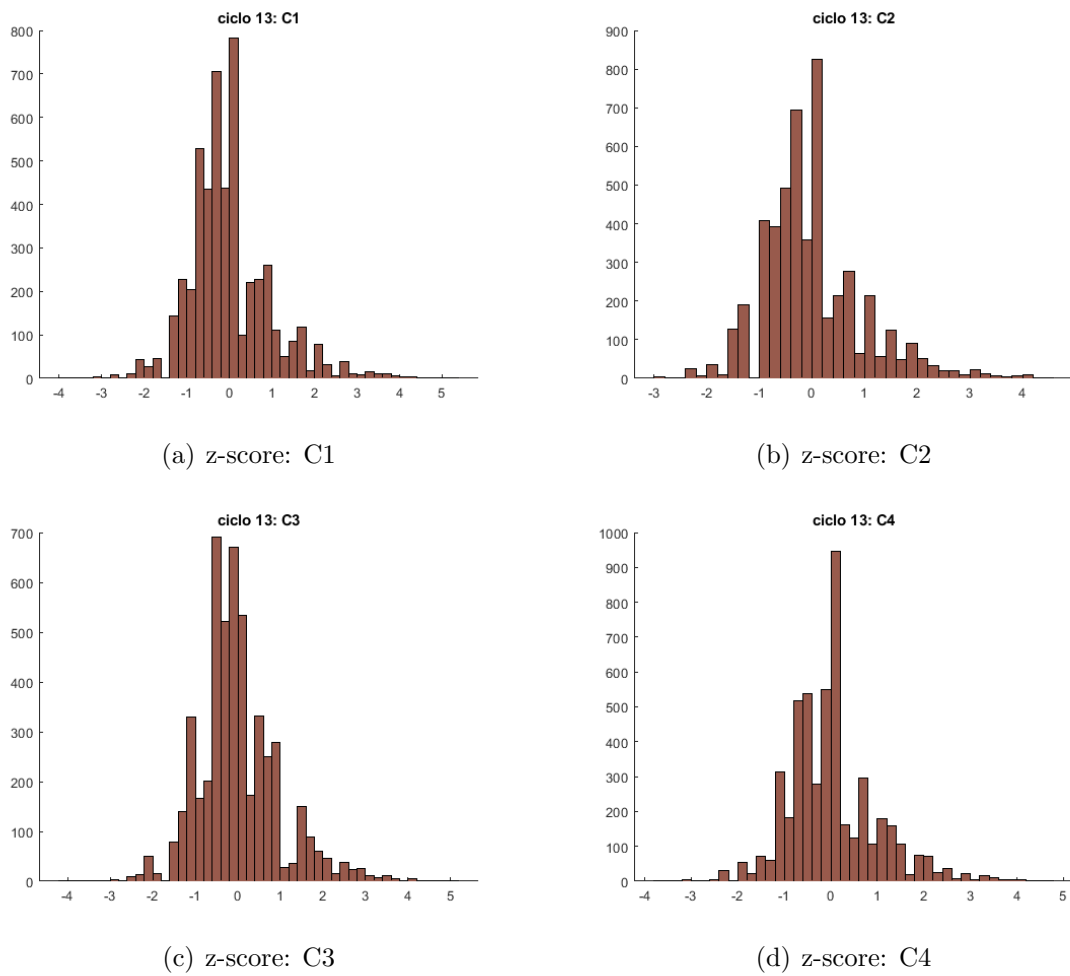


Figura 5.16: Risultati z-score: Carbonio

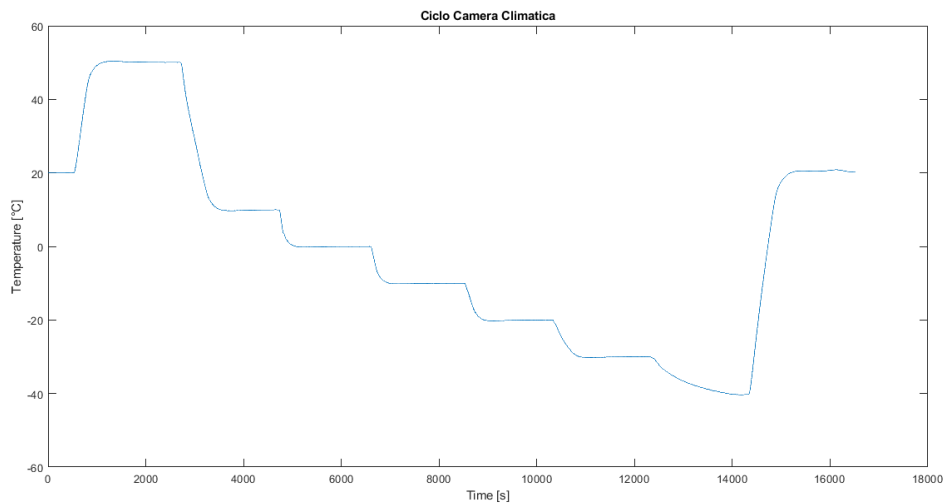


Figura 5.17: Ciclo termico di verifica Camera Climatica

$$\lambda(T) = \lambda_{0mean} + K_{Tmean}T \quad (5.3)$$

Considerando l'andamento temporale della temperatura durante il ciclo termico e i valori della lunghezza d'onda in uscita dall'FBG, è possibile ricavare la formula che permette di valutare la temperatura.

$$T(t) = \frac{\lambda(t) - \lambda_{0mean}}{K_{Tmean}} \quad (5.4)$$

La conversione è stata effettuata utilizzando i valori medi di K_T (coefficiente di temperatura) e λ (lunghezza d'onda) per ciascuna configurazione. La camera climatica è stata programmata per eseguire nove step di temperatura: -20°C , 50°C , 10°C , 0°C , -10°C , -20°C , -30°C , -40°C e 20°C . I risultati ottenuti dall'esecuzione del ciclo per valutare le prestazioni delle diverse configurazioni come sensori hanno portato ai seguenti risultati.

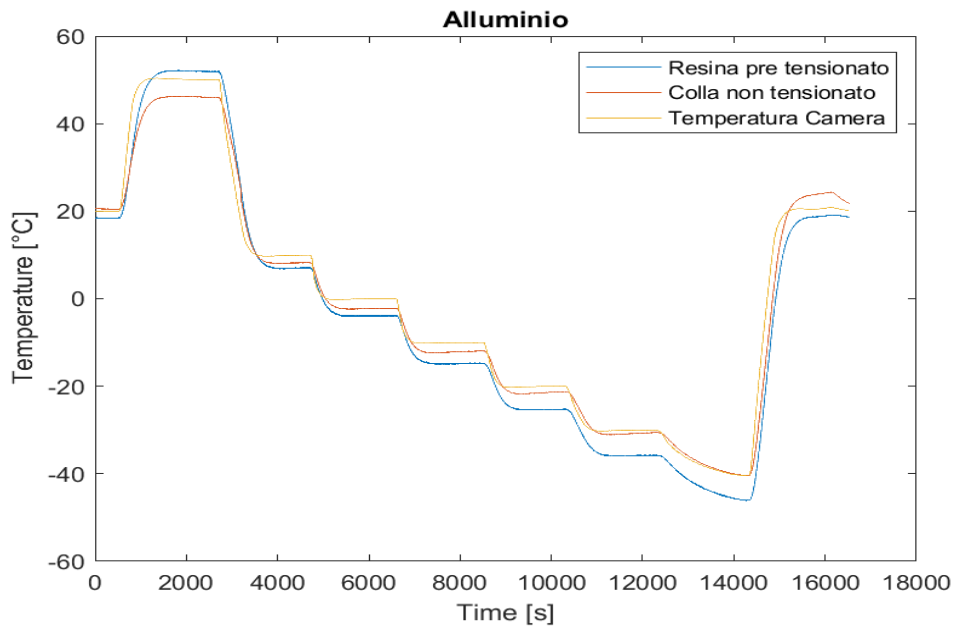


Figura 5.18: Ciclo termico di verifica: Risultati Alluminio

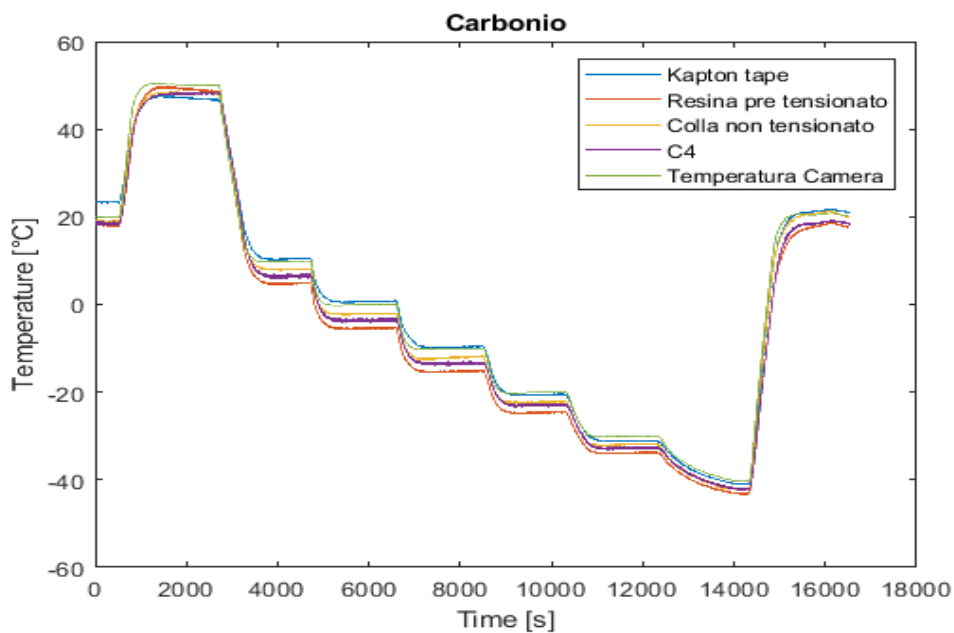
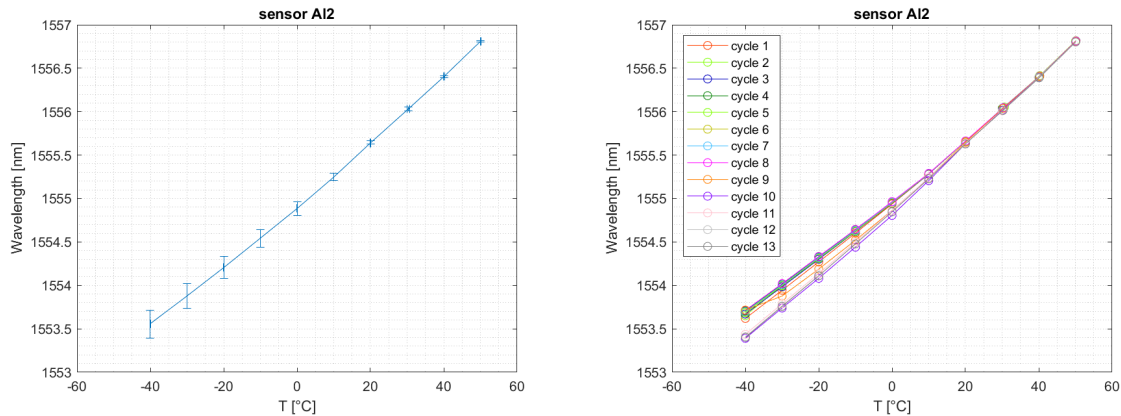


Figura 5.19: Ciclo termico di verifica: Risultati Carbonio

5.2 Risultati e Confronto

Dalle analisi effettuate è possibile trarre alcune conclusioni; lo studio condotto è stato eseguito su provini realizzati e già analizzati in studi precedenti, mostrati nel capitolo 4.2, pertanto è possibile condurre analisi comparative sui dati ricavati dagli studi precedenti e valutare come l'invecchiamento dei materiali usati per l'incollaggio ha portato a delle variazioni sul comportamento del sensore ottico quando sottoposto a variazioni termiche. Verranno quindi trattati i casi che hanno portato un maggiore interesse ai fini dello studio. Risulta importante notare che lo studio precedente ha esaminato un intervallo di temperatura più ampio, compreso tra -40°C e 120°C , rispetto allo studio attuale dove il range operativo è stato tra -40°C e 50°C . Questa informazione è significativa in quanto i materiali che compongono le configurazioni, sottoposti a temperature elevate possono aver subito cambiamenti fisici che potrebbero influenzare le prestazioni del sensore. Pertanto, è importante considerare l'impatto di tali variazioni sulla affidabilità e sulla precisione del sensore.

Inizialmente si esamina il caso di fibra pre-tensionata incollata su lastra in lega di alluminio utilizzando resina epossidica, ovvero il provino indicato con AL2. Tale configurazione è stata presentata nello studio precedente [4] come la più promettente tra le varie opzioni proposte in termini di precisione e ripetibilità. Infatti, questa configurazione aveva mostrato risultati eccellenti, consentendo di ottenere un'ottima dipendenza lineare della lunghezza d'onda in funzione della temperatura e una notevole precisione nei valori calcolati mediante il sensore. Tuttavia, attraverso la ripetizione dello studio a distanza di cinque mesi, si osserva una significativa differenza nei risultati ottenuti.



(a) Dispersione: Alluminio pre-tensionato con resina (b) Ripetibilità taratura: Alluminio pre-tensionato con resina

Figura 5.20: Risultati calibrazione per step AL2

Dalle analisi di interpolazione e linearizzazione dei dati si nota infatti che nella zona a temperature più fredde le curve si discostano significativamente dal valore medio per poi sovrapporsi nel range di temperature più calde. Questo comportamento scostante tra le basse e le alte temperature è visibile sia osservando i grafici relativi all'acquisizione dei dati che nello studio di interpolazione lineare. Quindi si nota che non è più presente la ripetibilità studiata in precedenza portando ad un generale calo della performance del sensore ottico montato in questa specifica configurazione.

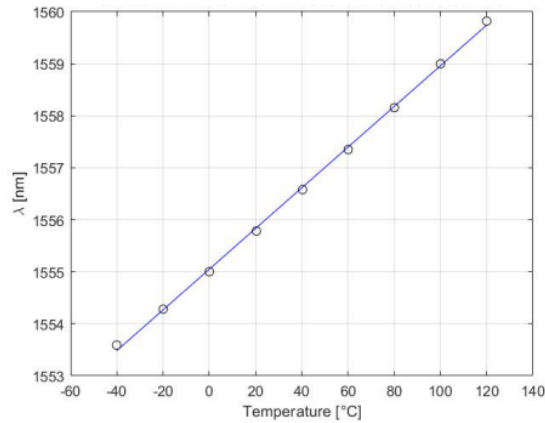


Figura 5.21: Analisi precedenti: Alluminio con resina pre tensionato [4]

Essendo la resina un materiale sensibile all'umidità, il calo delle prestazioni evidenziato dallo studio potrebbe essere causato proprio dall'assorbimento di umidità da parte della resina, conseguente alle ripetute variazioni termiche a cui è stata sottoposta durante i cicli termici. L'assorbimento di umidità da parte della resina epossidica porta ad aver compromesso sia le proprietà adesive che meccaniche del materiale in questione causando un generale generale delle prestazioni.

Inoltre, come evidenziato è rilevante sottolineare che nelle ricerche precedenti le configurazioni oggetto di studio sono state esposte a temperature più elevate rispetto al presente studio. Tutti i campioni sono stati sottoposti a temperature fino a 120°C, un valore considerato limite per i materiali utilizzati, il che potrebbe aver influenzato negativamente le prestazioni del sensore ottico. È pertanto plausibile ipotizzare che il deterioramento delle prestazioni osservato possa essere attribuito a queste due cause, ovvero ad aver sottoposto la configurazione a tali condizioni di temperatura, le quali hanno danneggiato le proprietà meccaniche della resina ed ad una permeabilità del materiale all'umidità.

Nonostante la FBG pre-tensionata e incollata con resina sulla lamina di alluminio abbia mostrato una riduzione delle prestazioni nel tempo, questa configurazione ha dimostrato una buona precisione nella taratura, quindi il rispetto di una condizione di linearità nella dipendenza della variazione di lunghezza d'onda in funzione della temperatura, ma poca ripetibilità, nel momento in cui si sono ripetuti gli esperimenti e poca accuratezza del valore di temperatura calcolato tramite calibrazione e conversione dei dati acquisiti. Questo caso risulta comunque significativo in quanto evidenzia l'utilità del pre-tensionamento della fibra per ottenere dati più precisi, garantendo una retta di interpolazione che passa per i punti medi usati nella calibrazione, senza la presenza di curve di secondo grado o una variazione di linearità.

Andando nello specifico dell'analisi, nel grafico riportante l'acquisizione dei dati acquisiti, sono evidenti due distinti comportamenti dei valori di lunghezza d'onda, partendo dalla zona fredda, per poi appoggiarsi su valori simili a temperature calde dopo i 20°C. In particolare, nella zona fredda, si osserva uno scarto significativo tra i valori di lunghezza d'onda registrati dai primi cicli di ogni serie rispetto ai cicli successivi. Si fa notare che lo studio è stato condotto eseguendo tre diverse prove di cicli automatici all'interno della camera climatica. Durante ciascuna prova, la camera climatica è rimasta chiusa, creando un ambiente sigillato durante l'esecuzione dei cicli. È importante sottolineare che non sono state apportate modifiche all'umidità

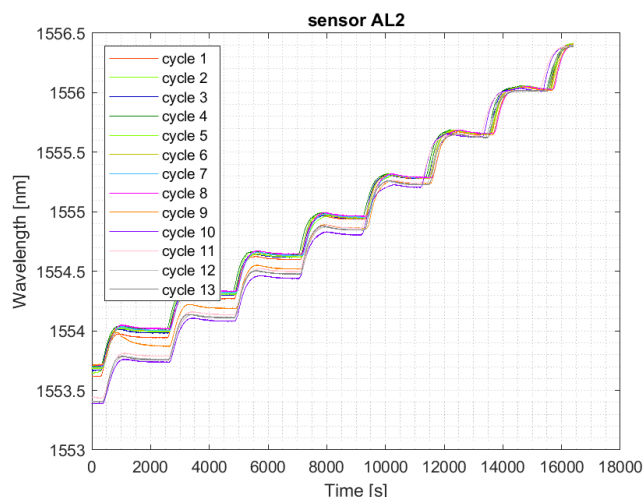


Figura 5.22: Ripetibilità: Alluminio con resina pre-tensionato

presente nello spazio mediante comandi della camera climatica. Eventuali modifiche dell'aria all'interno della camera climatica sono dovute all'apertura e ricircolo dell'ambiente al termine di ogni serie di cicli automatici, durante la transizione da una prova alla successiva. Una volta che il primo ciclo è portato a compimento, quindi la camera climatica ha raggiunto la temperatura di 50°C , ritorna direttamente alla temperatura iniziale di -40°C mantenendo l'ambiente isolato. I cicli successivi al primo di ogni serie, mostrano tutti valori di lunghezza d'onda più bassi a temperature fredde, e si collocano in maniera simile sul grafico di acquisizione dei dati. Il comportamento osservato nel grafico permette di valutare l'effetto dell'umidità sulla lunghezza d'onda acquisita. Si può notare come durante i primi cicli di ogni serie [ciclo1,ciclo3,ciclo5], la presenza di umidità nella camera climatica influenza i valori della lunghezza d'onda, portando a valori più elevati. Tuttavia, una volta che la camera viene portata ad una temperatura ambiente fino ai 50°C si nota un compattamento simile delle curve mostrate. L'andamento dei cicli successivi al primo ci fa intuire quindi che il calore all'interno dell'ambiente porta ad una dissipazione dell'umidità assorbita dalla resina, rendendo possibile una buona ripetibilità dei dati per le successive prove.

Questo comportamento si può notare anche nei grafici relativi alla calibrazione del sensore, dove tutte le rette caratteristiche valutate per poter calcolare i coefficienti di sensibilità sono state poste insieme per poterle confrontare e valutarne la ripetibilità. Si nota come ogni serie presenti un salto tra la retta di calibrazione relativa al primo ciclo e quelle relative ai cicli successivi, coerentemente con quanto evidenziato per l'acquisizione dei dati. In particolare, si può apprezzare meglio tale comportamento concentrandosi sull'ultima serie di cicli, compresa tra il 5° e il 13°, dove le rette si spostano progressivamente verso valori inferiori di λ_0 fino a raggiungere un valore quasi asintotico e con un salto considerevole tra il ciclo 5 e il ciclo 13, rispettivamente il primo e l'ultimo della serie. Le caratteristiche emerse dal caso di FBG pre-tensionata incollata con resina epossidica sulla lamina di alluminio, si sono riscontrate anche nella configurazione di FBG pre-tensionata posta sul materiale in composito in carbonio. In particolare, in tale configurazione è stata riscontrata una buona precisione dei dati di calibrazione. Questa configurazione risulta importante nello studio poiché consente di apprezzare ulteriormente l'effetto dell'umidità sul campione. Questo effetto è possibile notarlo sia dal grafico dell'acquisizione dei dati che dal grafico utilizzato per valutare la ripetibilità della taratura.

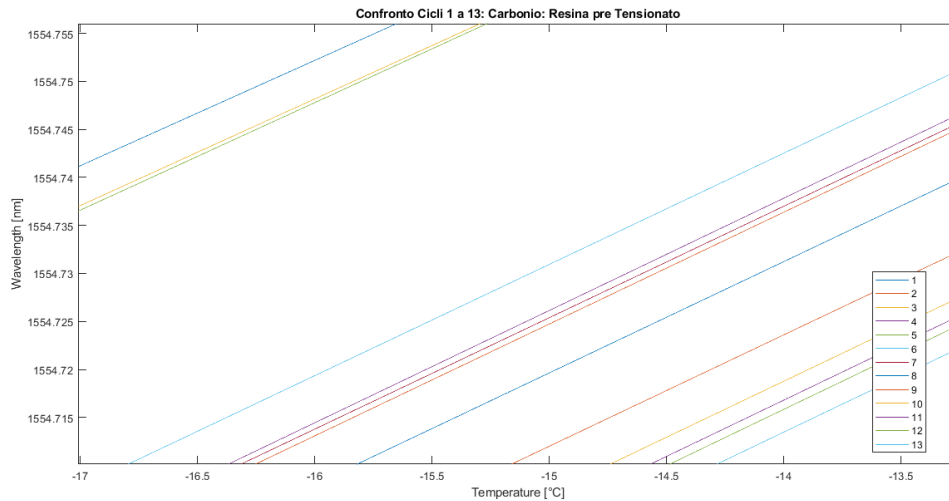


Figura 5.23: Dettaglio Taratura: Carbonio con resina pre-tensionato

Da tale rappresentazione grafica dei dati è possibile osservare l'effetto dell'umidità sulla resina e identificare le condizioni utili affinché un campione di resina su composto in fibra di carbonio riesca a liberarsi dell'effetto dell'umidità. Considerando un sistema chiuso, se il sensore in fibra ottica posto in tale configurazione viene esposto ad una temperatura superiore a quella ambiente, allora si nota che la resina epossidica non è più soggetta all'effetto dell'umidità assorbita che ne compromette le performance in termini di ripetibilità, evidente dal grafico in cui si nota una progressiva diminuzione del valore di λ_0 fino a che tale valore non sembra assestarsi. L'analisi e il confronto di queste due categorie hanno consentito di osservare come i valori acquisiti possano variare in base alle condizioni ambientali e alla temperatura a cui ci si riferisce per le configurazioni fissate con resina epossidica. Inoltre, è stato possibile notare che la dissipazione dell'umidità è regolare e significativa già dopo una singola esposizione a temperature superiori a quella ambiente.

Attraverso l'analisi delle configurazioni C2 e C4, è possibile effettuare un confronto in quanto entrambe utilizzano lo stesso materiale di supporto per fissare il sensore ottico, impiegano la stessa resina epossidica di tipo L con indurente per l'incollaggio e la fibra ottica è stata sottoposta a pre-tensionamento. Tuttavia, le due configurazioni si differenziano per il metodo di incollaggio, con l'applicazione della resina nella configurazione C4 che è stata eseguita con maggior meticolosità e precisione rispetto a C2. Effettuare un confronto tra queste configurazioni, sia in relazione alle analisi condotte precedentemente a questa tesi che a quelle presentate nello studio attuale, consente di valutare l'influenza del metodo di incollaggio sulle prestazioni complessive della configurazione e di osservare come l'uso del campione a temperature elevate possa comportare una degradazione delle proprietà del sensore. Come menzionato nella sezione precedente, la configurazione analizzata mostra una buona linearità nell'interpolazione dei valori medi della lunghezza d'onda in uscita del sensore in relazione alle variazioni di temperatura. Tuttavia, è stato osservato un fenomeno in cui si verifica un discostamento dall'andamento generale nei valori acquisiti durante i primi cicli delle serie di misurazioni (ciclo 1, ciclo 3, ciclo 5) nella zona a temperature più basse. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito all'as-

sorbimento di umidità da parte della resina, che viene però quasi completamente dissipata quando il campione raggiunge una temperatura superiore ai 20°C.

D'altra parte, l'analisi della configurazione C4 mostra una buona ripetibilità dei dati fin dall'inizio del ciclo a temperature basse, senza l'effetto di discostamento osservato nei primi cicli delle serie come nel caso di C2. Da ciò si può dedurre che la configurazione C2 ha subito un degrado delle proprietà a causa delle precedenti esposizioni a temperature elevate negli studi precedenti, ma allo stesso tempo la resina è in grado di dissipare l'umidità assorbita una volta esposta a temperature più calde. Effettuando un confronto con gli studi condotti in precedenza, quando la configurazione è stata utilizzata per la prima volta, si evidenzia che la discrepanza osservata era già presente fin dall'inizio. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito a problemi significativi legati al fissaggio della resina sulla superficie. La configurazione C2 mostrava una buona precisione e ripetibilità, tuttavia, durante la conversione dei dati relativi alla lunghezza d'onda, si riscontrava una ridotta accuratezza. Mediante il confronto dei dati ottenuti dalla configurazione C4 con i risultati dei lavori precedenti sulla configurazione C2, si nota un miglioramento dei risultati con C4. Ciò suggerisce che un dosaggio adeguato di resina epossidica durante il montaggio della configurazione possa comportare benefici in termini di prestazioni. Tali analisi possono quindi contribuire allo sviluppo di un metodo di incollaggio standardizzato che massimizzi le qualità del sensore.

Si analizza ora il caso di fibra fissata con nastro kapton su alluminio e confrontando i risultati con quelli ottenuti nello studio precedente si nota come la fibra presenta il fenomeno definito a "gomito". Questo fenomeno è visibile nel grafico di calibrazione dei dati, e corrisponde ad un cambio di linearità della retta interpolante. Questo effetto si verifica intorno ai 10°C, come ricavato dagli studi precedenti, un fenomeno simile al ginocchio osservato per le FBG applicate su un piatto metallico senza incollaggio. Si può dire che il kapton porta a variazioni specifiche nelle prestazioni del sensore in base al materiale di supporto, in quanto l'FBG fissata sulla lega di alluminio presenta una transizione, mentre quella fissata su materiale composito mostra una linearità.

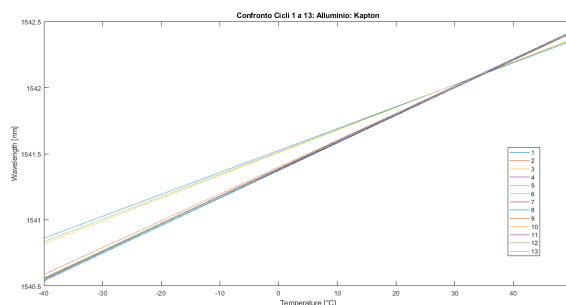


Figura 5.24: Linearizzazione: Alluminio fissato con kapton

L'effetto delle proprietà termiche dell'alluminio diventa rilevante, poiché il metallo provoca un aumento delle dilatazioni locali rispetto a quelle della sola fibra ottica, determinando un aumento della lunghezza d'onda (λ) a parità di differenza di temperatura (ΔT). Le prove relative a questa configurazione sono state condotte in un intervallo di temperatura compreso tra -40°C e 50°C, che rappresenta un range di prova più limitato rispetto a quello precedente, consentendo un'analisi più dettagliata di questo fenomeno. Si osserva un comportamento simile, con la presenza di una zona di transizione caratterizzata da una variazione dell'incidenza tra la zona fredda

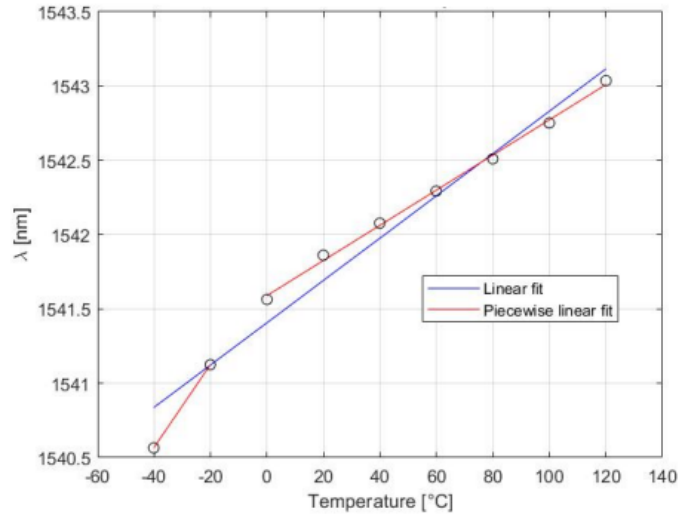


Figura 5.25: Carlucci: Linearizzazione Alluminio fissato con kapton [4]

e quella calda. La regione in cui si osserva un cambiamento nel comportamento della curva e una non linearità dei dati corrisponde a valori di temperatura compresi tra -10°C e 10°C . La linearità dei valori della lunghezza d'onda al variare della temperatura è presente per due intervalli, rispettivamente uno nella zona fredda e uno in quella calda. I valori corrispondenti alle temperature che vanno da -30°C e -10°C indicano il primo intervallo di linearità, mentre tra 10°C e 50°C , è presente il secondo intervallo. Nella zona fredda, i parametri K_T e λ_0 variano significativamente. D'altra parte, nella zona calda, questi parametri assumono valori stabili, evidenziando un comportamento molto simile tra di loro.

ΔT	K_{Tmean} [nm/°C]	λ_{0mean} [nm]
$[-40^{\circ}\text{C}; -10^{\circ}\text{C}]$	0.03233	1541.73090
$[-10^{\circ}\text{C}; 10^{\circ}\text{C}]$	0.02271	1541.54632
$[10^{\circ}\text{C}; 50^{\circ}\text{C}]$	0.01244	1541.63135

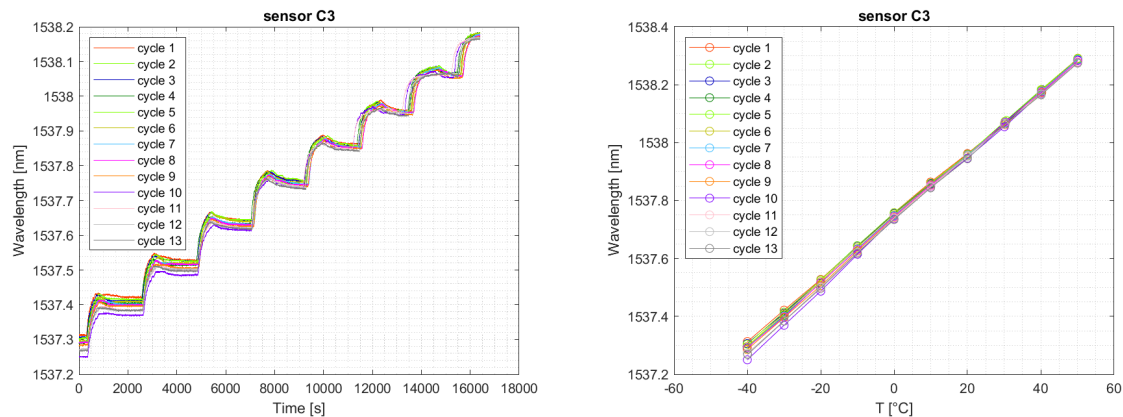
Tabella 5.2: Valori K_{Tmean} e λ_{0mean} AL1

Il fenomeno dell'incertezza di questi valori e il comportamento peculiare del nastro kapton quando applicato sulla lastra in lega di alluminio sono probabilmente correlati al comportamento del silicone presente nella parte adesiva del nastro in relazione alla temperatura locale e alla dilatazione termica della lastra di alluminio. La dilatazione termica crea uno scivolamento tra il rivestimento della fibra e il materiale sottostante, generando uno spazio tra il nastro adesivo e la fibra stessa. Questo spazio porta alla formazione di bolle d'aria che influiscono sull'acquisizione dei dati. Di conseguenza, si osserva una linearizzazione interrotta nel grafico di interpolazione dei dati. Questo fenomeno si riscontra in questo specifico caso, mentre si osserva che l'utilizzo di resine per l'incollaggio garantisce una linearità nel range completo di temperature. Questo accade poiché l'uso di adesivi come resina o colla previene lo scivolamento tra il rivestimento e la lastra in materiale metallico.

Di conseguenza, è possibile affermare che l'impiego della lega di alluminio come materiale di supporto per la fibra influisce sul segnale emesso dalla FBG, soprattutto quando vengono utilizzati materiali adesivi come il nastro kapton proposto, il

quale non riesce a garantire un completo fissaggio del rivestimento del sensore ottico al supporto. Dall'analisi e dal confronto effettuati, è emerso che le prestazioni del sensore in questa configurazione sono rimaste grossomodo invariate.

Ci si focalizza ora sulle analisi effettuate per il caso di sensore ottico fissato sul composito in fibra di carbonio tramite l'utilizzo di una colla di tipo cianoacrilato, individuato nello studio con C3. Dallo studio condotto, emerge che questa configurazione dimostra la capacità di produrre risultati soddisfacenti nello studio della calibrazione e relativa interpolazione dei dati, evidenziando una dipendenza lineare tra la variazione della lunghezza d'onda e la temperatura. Questa conclusione è confermata dai risultati ottenuti mediante il calcolo dei coefficienti necessari per la calibrazione del sensore.



(a) Carbonio con colla non tensionato: Acquisizione dati (b) Carbonio con colla non tensionato: Linearizzazione

Figura 5.26: Acquisizione dati e calibrazione C3

Nonostante si siano ottenuti questi risultati promettenti nella fase di taratura, la quale si osserva nel fatto che la retta interpolante passante attraverso i punti del grafico $T-\lambda$ produce risultati soddisfacenti, dimostrando quindi una buona precisione nella determinazione delle relazioni tra temperatura e lunghezza d'onda, è importante notare che questa configurazione presenta alcune limitazioni in termini di ripetibilità dei dati nella fase di acquisizione. Infatti, in primo luogo è possibile notare che soprattutto nella zona a temperature più fredde, ci sia un range di incertezza nell'acquisizione dei dati evidenziando una non univocità dei dati raccolti.

Inoltre, si osserva un fenomeno comune sia in questa configurazione specifica, che nel caso della fibra ottica fissata sulla lastra in lega di alluminio utilizzando la stessa colla. Entrambi i casi mostrano la presenza di picchi nei grafici che rappresentano i dati raccolti nel corso del tempo. Tali picchi diventano evidenti ogni volta che la camera climatica raggiunge un nuovo valore di temperatura durante il ciclo, soprattutto quando si avvicina alla temperatura ambiente. Questo fenomeno è riscontrato esclusivamente in queste configurazioni in cui è stata utilizzata la colla cianoacrilato per fissare la fibra ottica, suggerendo che possa essere attribuito a specifiche proprietà della colla che influenzano la risposta alle variazioni nell'ambiente della camera climatica. È importante considerare che, quando la camera climatica passa da una temperatura a un'altra, tende ad aumentare gradualmente la temperatura fino a raggiungere il valore impostato. Nel raggiungimento porta ad andare a valori superiori rispetto alla temperatura voluto, per poi stabilizzarsi. Ciò provoca che i valori di temperatura all'inizio di ogni intervallo di temperatura sono più elevati.

Inoltre, la camera climatica presenta maggiori difficoltà nel raggiungere uno stato stazionario per temperature che si avvicinano alla temperatura ambiente. Nonostante ciò, le configurazioni menzionate sono le uniche a mostrare tale comportamento, anche se le analisi sono state condotte simultaneamente con tutte le altre configurazioni. Questa peculiarità crea difficoltà nella stabilizzazione del segnale emesso dalla fibra e, di conseguenza, introduce incertezza nell'acquisizione dei dati.

Anche se i risultati ottenuti sono soddisfacenti, il processo di incollaggio adottato presenta scarse performance in termini di ripetibilità. Il provino sperimentale non subisce stress meccanico, quindi il segnale di lunghezza d'onda in uscita all'interno della camera climatica è strettamente dipendente dalle variazioni di temperatura. Si può ipotizzare che la scarsa accuratezza sia dovuta nell'umidità presente nell'ambiente di prova e all'invecchiamento della colla. La presenza di umidità all'interno della camera di prova tende ad essere rapidamente assorbita dalla colla utilizzata, generando variazioni meccaniche e di prestazioni nella fibra ottica. Rispetto alla tecnica di incollaggio tramite resina, questa configurazione presenta una maggiore difficoltà nel dissipare l'umidità, e lo fa in maniera non regolare, portando quindi ad un effetto negativo sulla performance del campione.

Le analisi ripetute a distanza di mesi sulle medesime configurazioni hanno mostrato come sono variate le prestazioni di questi sensori ottici. Il caso AL2 nel quale la fibra ottica è stata fissata con resina epossidica su lastra di alluminio non è più la configurazione più promettente, in quanto i ripetuti cicli di umidità hanno portato ad una degradazione delle proprietà fisiche. Allo stesso tempo vengono confermati alcune conclusioni ricavate da studi precedenti, come il fenomeno del ginocchio nel caso in cui si usa il kapton sulla lastra in lega di alluminio e la buona capacità del materiale composito in fibra di carbonio nel creare un ambiente buono per un'acquisizione dei dati precisa.

Tra le configurazioni analizzate, la configurazione C4, che consiste nel provino fissato su composto di carbonio incollato con resina epossidica, si distingue per le sue ottime prestazioni in termini di ripetibilità dei dati durante l'acquisizione e lo studio della dipendenza lineare. Dall'analisi dei dati, possiamo osservare che la configurazione C4 soddisfa a pieno il criterio di ripetibilità, poiché i dati acquisiti presentano una distribuzione molto simile tra di loro e si sovrappongono in modo significativo.

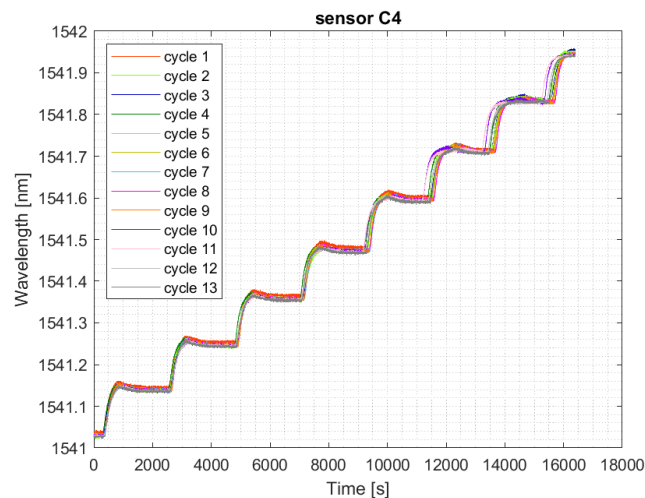


Figura 5.27: Acquisizione dati: Carbonio resina pre-tensionato C4

Tracciando sull'asse delle ordinate i valori della lunghezza d'onda e sull'asse delle ascisse il tempo, è possibile visualizzare come i dati raccolti per la configurazione in

esame e si può osservare come questi si collocano lungo le stesse curve quando varia la temperatura. È importante sottolineare che l'acquisizione dei dati è stata effettuata in momenti diversi, ma i risultati ottenuti dimostrano una notevole capacità della configurazione nella ripetibilità della risposta. In altre parole, i valori della lunghezza d'onda raccolti in diversi istanti temporali seguono un andamento simile e mostrano una buona consistenza tra loro.

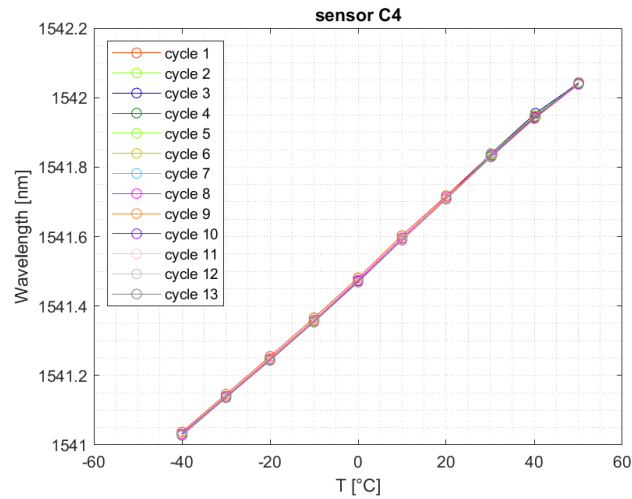


Figura 5.28: Ripetibilità: Carbonio resina pre-tensionato C4

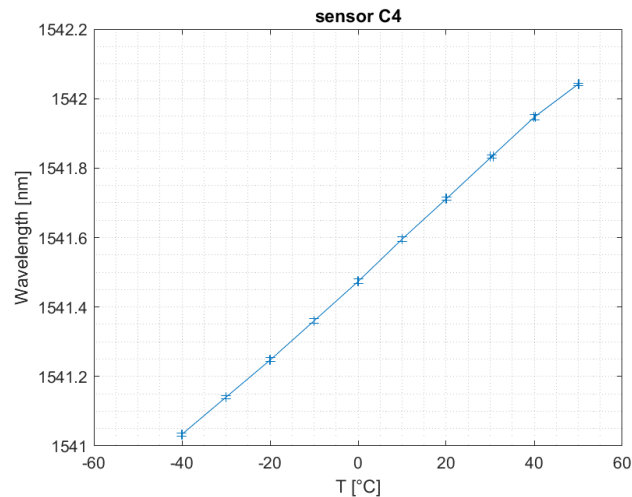


Figura 5.29: Ripetibilità Errorbar: Carbonio resina pre-tensionato C4

Durante la fase di calibrazione, i dati di lunghezza d'onda associati alla temperatura hanno permesso di ottenere una retta interpolante che copre in modo uniforme tutti i punti sparsi, senza evidenziare cambiamenti di linearità. Questo risultato testimonia l'elevata ripetibilità della configurazione, con un errore minimo dell'ordine di $10e-4$.

Pertanto è possibile dire che si ottiene una misurazione precisa dei valori di lunghezza d'onda, che si ripetono in modo coerente. Di conseguenza, si ottiene una quasi univocità nei parametri di calibrazione, come K_T e λ_0 , per il sensore. Tra tutte le altre configurazioni esaminate, questa risulta essere di particolare interesse e rilevanza.

Una volta completato lo studio sulla modalità di acquisizione dei valori della lunghezza d'onda e la loro correlazione con le variazioni di temperatura, è necessario valutare le prestazioni delle diverse configurazioni come sensori termici. A tale scopo, sono state condotte due tipologie di analisi. La prima consiste nell'esporre le diverse configurazioni a un ciclo termico, durante il quale sono state valutate le temperature per ciascun campione utilizzando i valori medi dei coefficienti K_T e λ_0 per ciascun provino. La seconda consiste in un'analisi inversa dei dati, valutando la capacità delle configurazioni di rivelare misure di temperatura precise. Queste analisi sono state condotte considerando le due configurazioni che, per specifiche caratteristiche, sono state identificate come le più promettenti:

- Supporto in carbonio e incollaggio con colla cianoacrilato
- Supporto in carbonio e incollaggio con resina C4

La verifica inversa dei dati risulta essere una prova per valutarne l'accuratezza dei valori di temperatura misurati dal sensore ottico, in riferimento ai valori misurati in camera climatica dalla sonda P100. Ricavati i parametri di dipendenza K_T e λ_0 sono stati convertiti i valori di lunghezza d'onda misurati temperatura, per quindi confrontarli con i valori di temperatura presenti in camera climatica misurati allo stesso istante.

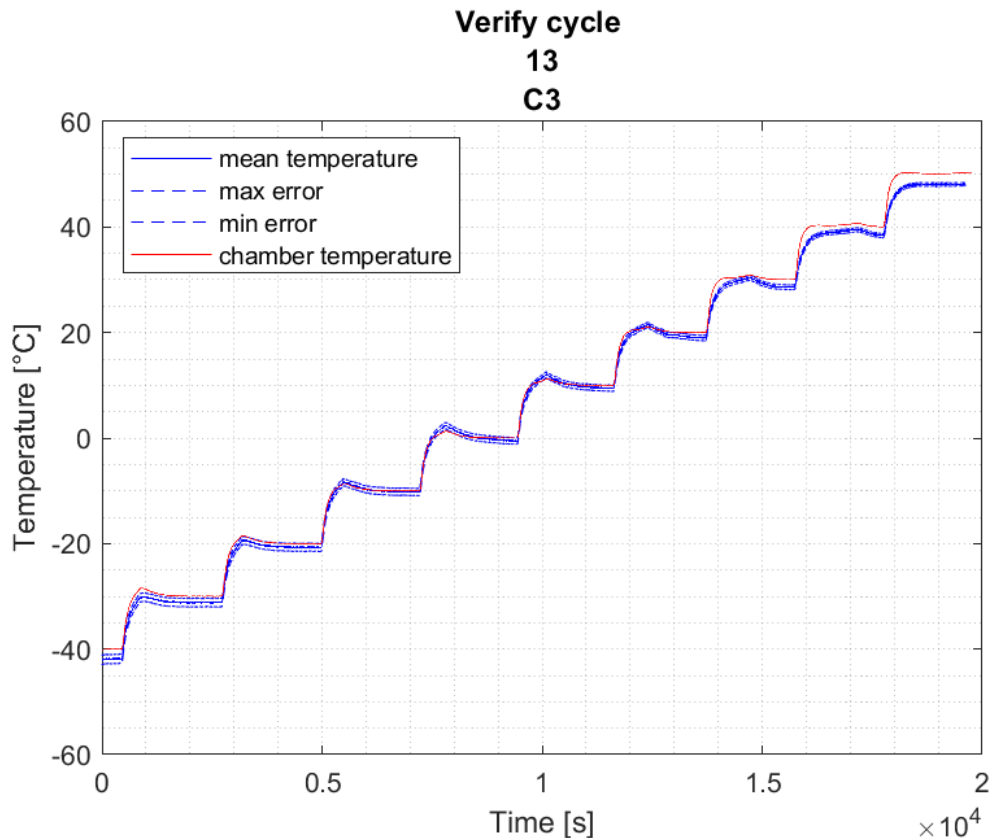


Figura 5.30: Verifica: Carbonio colla non tensionato

Nei grafici viene mostrato l'andamento della temperatura ricavata mediante conversione confrontata con la temperatura misurata in camera climatica. La conversione è stata effettuata utilizzando tre costanti K_T diverse per ciascun caso, rispettivamente la $K_{T_{media}}$ ricavata dalla media aritmetica di tutte le prove effettuate, e

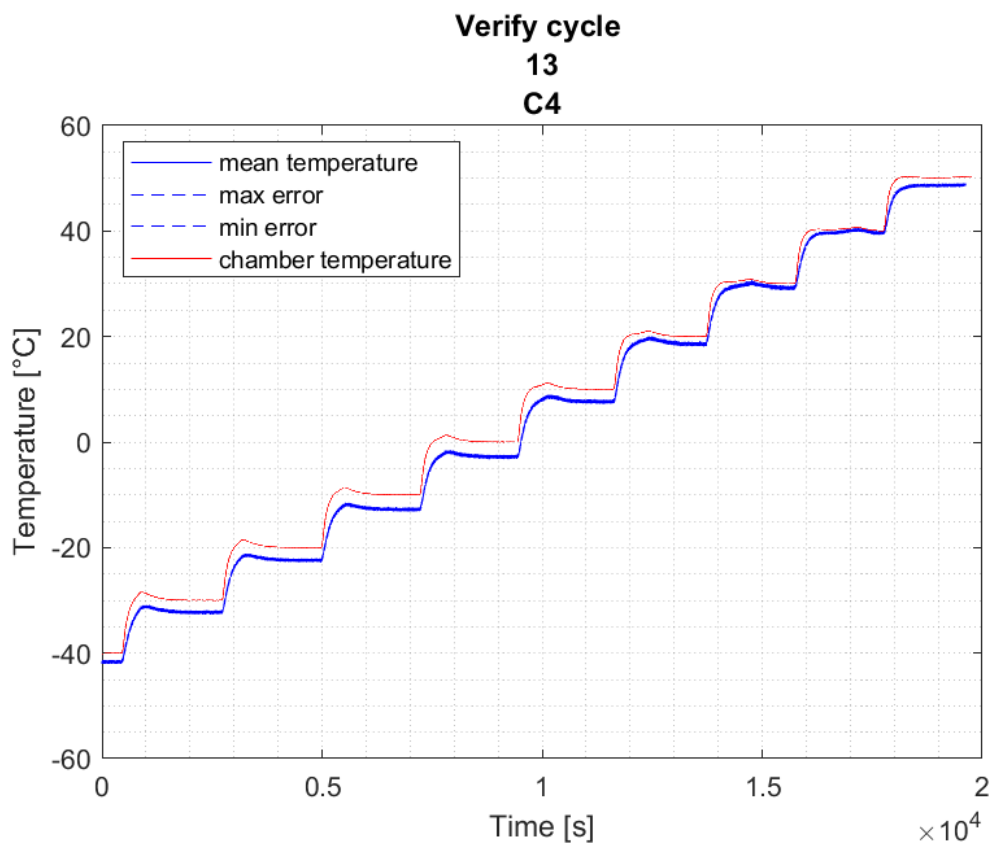


Figura 5.31: Verifica: Carbonio resina C4

la K_{Tmax} e K_{Tmin} , ovvero il valore massimo e minimo ricavato. La non univocità del valore K_T è dovuta ad una non esatta corrispondenza di valori della lunghezza d'onda in acquisizione al variare della temperatura, pertanto nei casi in cui i dati rilevati discostano maggiormente tra loro, si avrà un range di differenza tra K_{Tmax} e K_{Tmin} maggiore.

Configurazione	K_{Tmean} [nm/°C]	K_{Tmax} [nm/°C]	K_{Tmin} [nm/°C]
Carbonio con colla	0.0111	0.0109	0.0113
Carbonio con resina	0.0114	0.0114	0.0114

Andando ad analizzare i risultati ottenuti si riscontra che:

- (C3) FBG su composito in fibra di carbonio fissata con colla: I valori ricavati si posizionano quasi completamente sulla curva rappresentante i valori di temperatura misurata in camera climatica, mostrandoci che questo caso risulta accurato. Ovvero, la temperatura misurata dal sensore ottico e dal sensore P100 sono molto simili tra di loro.

Per quanto detto in precedenza sul caso di FBG legata ad una lastra di composito in fibra di carbonio mediante l'uso di colla ciancoacrilato, questa non presenta una buona ripetibilità e linearità dei dati acquisiti, infatti non porta alla determinazione di una costante di dipendenza univoca K_T , ma presenta una variazione considerevole di questo valore. Ciò porta ad avere dei valori di temperatura diversi tra di loro a parità di condizioni ambiente.

Infatti, viene presentato a parità di tempo quanto possono variare i valori della misura di temperatura del sensore ottico in base al coefficiente di proporziona-

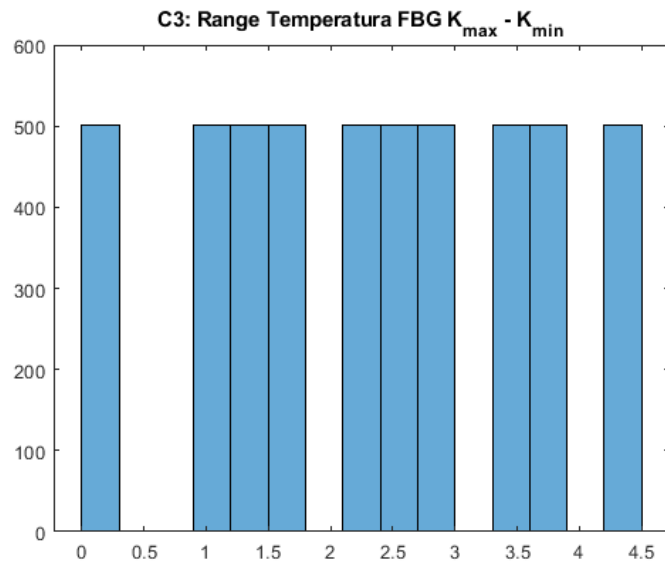


Figura 5.32: C3: Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$

lità utilizzato. Si nota come ci sia un ampio range di varietà andando ad avere una differenza massima di 4.5°C come risposta all'utilizzo di K_{max} e K_{min} .

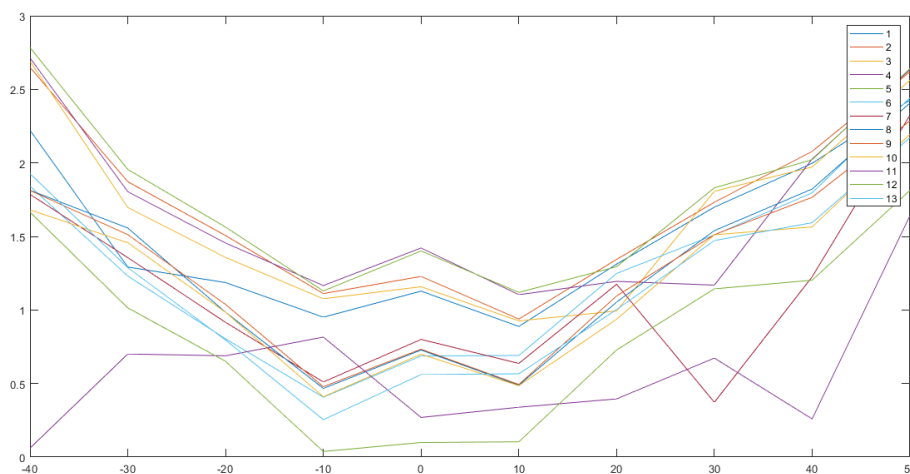


Figura 5.33: C3: Errore Assoluto $T_{Camera} - T_{FBG}$

In generale si può notare l'errore assoluto rispetto alla temperatura rilevata in camera climatica, mostrando un andamento dove l'errore maggiore si ha per alte e basse temperature, mentre l'errore si riduce quando il sensore ottico si trova a temperature nel range di $[-10^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C}]$.

- FBG su carbonio fissata con resina C4: In questo caso le costanti K_T ricavate risultano essere molto simili tra di loro, portando ad un valore di temperatura misurato più preciso, con un range massimo di differenza di 1°C .

Tuttavia i valori misurati di temperatura, nonostante la buona precisione, discordano da i valori effettivi di temperatura in camera climatica misurata dal sensore P100 in alcuni tratti, fino ad un valore di 3.5°C . Questo errore tra i valori di temperatura misurati tramite sensore ottico e la misura effettiva in

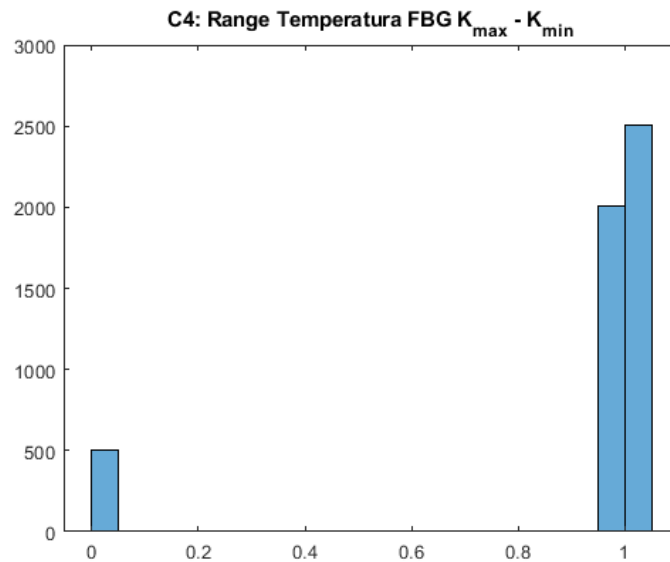


Figura 5.34: C4: Massima differenza valori temperatura per $K_{T_{max}} - K_{T_{min}}$

camera climatica è presente in quasi tutto il range di temperatura, in particolar modo a temperature più basse.

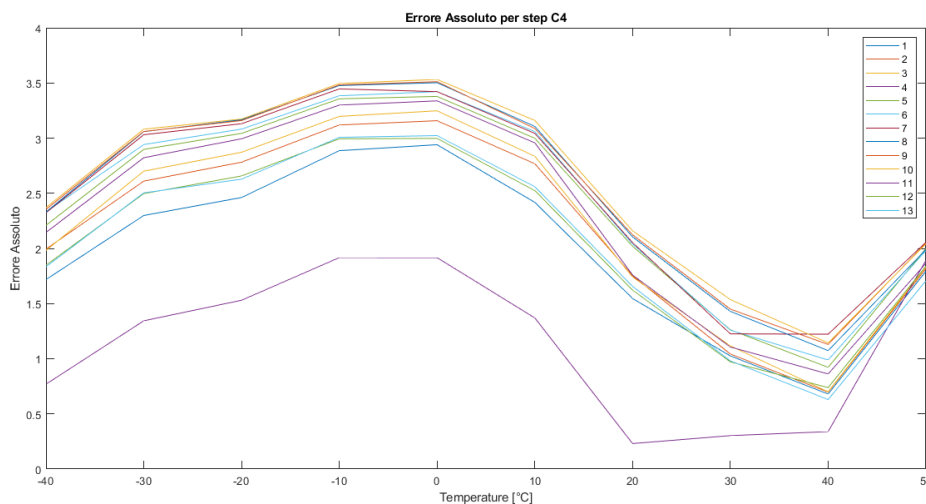


Figura 5.35: C3: Errore Assoluto $T_{Camera} - T_{FBG}$

Per avere un ulteriore confronto con la temperatura misurata dal sensore ottico e la temperatura misurata in camera climatica, si riprende l'analisi di verifica effettuata mediante l'applicazione del ciclo termico non strettamente crescente o discendente, mostrando i risultati per le due configurazioni prese in considerazione. È stato osservato che lo step relativo alla temperatura di -40°C non ha raggiunto la condizione di stabilità nella camera climatica, rendendo impossibile considerare tale step come idoneo per le analisi condotte. In primo luogo si riprende lo studio fatto sulla configurazione nominata C3.

Al fine di valutare la precisione dei dati di temperatura ottenuti dalla calibrazione della FBG incollata su lastra di carbonio con colla cianoacrilato, è stata calcolata la varianza media per ciascuno step di temperatura. Tale analisi fornisce una stima delle fluttuazioni dei dati misurati al variare della temperatura:

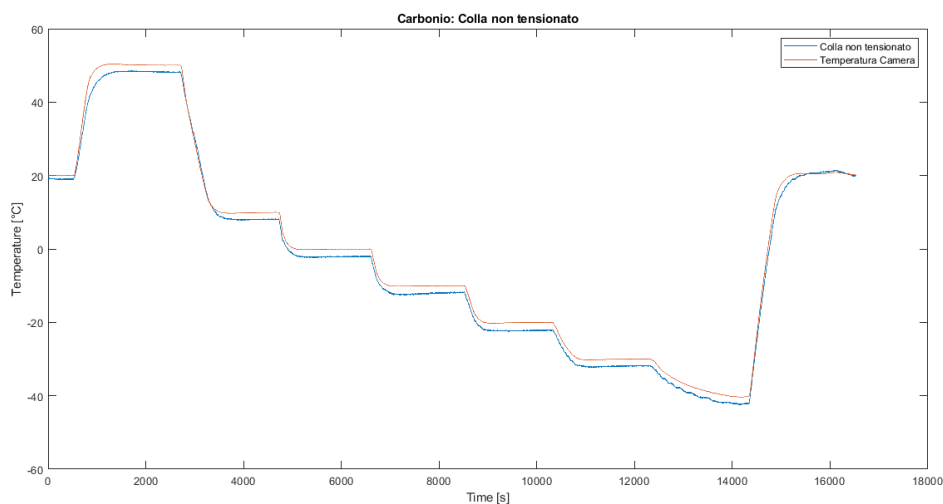


Figura 5.36: Ciclo termico di verifica: Risultati C3

Varianza	Step:1	Step:2	Step:3	Step:4	Step:5	Step:6	Step:7	Step: 8
C3	0.00253	0.00065	0.00125	0.00195	0.00255	0.00216	0.00139	0.00501

Tabella 5.3: C3: Varianza media per step di temperatura

Al fine di valutare l'accuratezza della temperatura misurata dal sensore rispetto ai valori di temperatura ricavati dal sensore P100 nella camera climatica, viene calcolato l'errore assoluto per determinare il numero di valori che si discostano dalla temperatura effettiva.

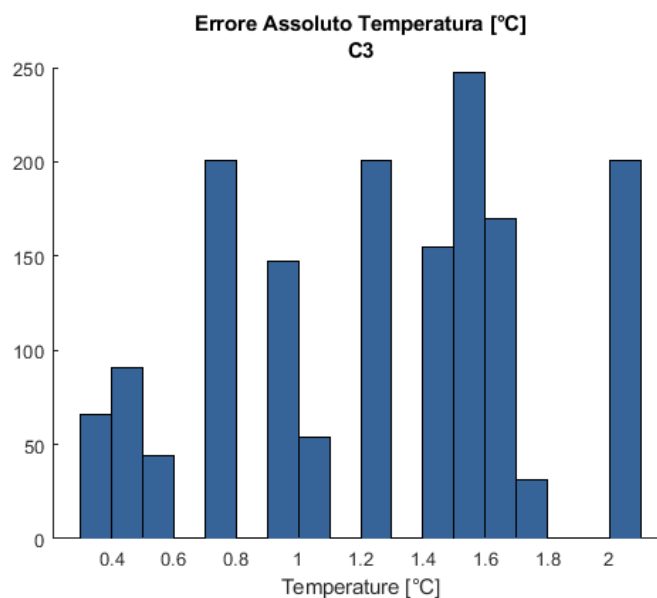


Figura 5.37: C3: Errore Assoluto ciclo termico di verifica

Dai risultati ottenuti, si può concludere che nel caso in questione vi è un errore massimo di 2°C presente quando la camera climatica raggiunge una temperatura di 50°C. Per valori di temperatura più vicini a quella ambiente, si osserva una discrepanza minore tra i valori di temperatura misurati tramite la conversione e quelli di riferimento nella camera climatica. Inoltre, sono state condotte analisi considerando

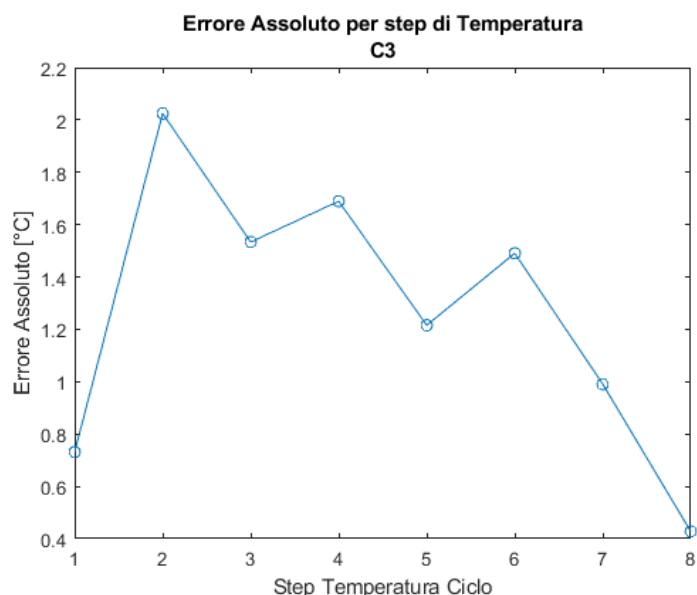


Figura 5.38: C3: Errore Assoluto per step di temperatura ciclo termico di verifica

i valori massimi e minimi del coefficiente K_T ottenuti tramite l'analisi di calibrazione. È stato valutato lo scarto che si verifica quando si utilizzano il valore massimo e minimo di K_T , per determinare l'errore che si propagherebbe nella conversione dei dati di temperatura.

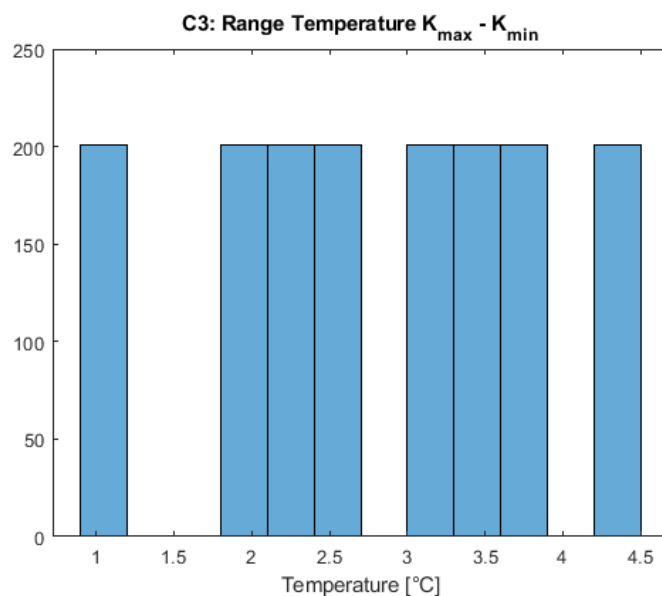


Figura 5.39: C3: ciclo termico di verifica Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$

Come già precedentemente sottolineato e confermato anche in questa analisi, la mancanza di ripetibilità nel provino in carbonio fissato con colla cianoacrilato si traduce in un'elevata variabilità dei valori del coefficiente K_T . Questa variabilità porta a raggiungere una differenza massima di $4,5^{\circ}\text{C}$ tra i valori di temperatura misurati tramite conversione nello stesso istante di acquisizione dei dati.

Considerando il caso di sensore ottico pre-tensionato fissato su lastra in composito in fibra di carbonio mediante l'uso di resina (C4) si sono calcolati i valori di varianza per step, per valutare la precisione dei dati e la mancanza di fluttuazioni:

Varianza	Step:1	Step:2	Step:3	Step:4	Step:5	Step:6	Step:7	Step: 8
C4	0.01525	0.00118	0.01843	0.02366	0.01076	0.01117	0.00612	0.01523

Tabella 5.4: C4: Varianza media per step di temperatura

Questa configurazione presenta un livello di errore simile a quanto verificato in precedenza, in cui si osserva un picco nell'intervallo di $[-10^{\circ}\text{C}$ a 10°C] con una errore tra le due temperature, quella misurata dalla fibra ottica e quella in camera climatica di circa 3.5°C . Tuttavia, per temperature più elevate, tale deviazione diminuisce fino a raggiungere un errore di 1.8°C .

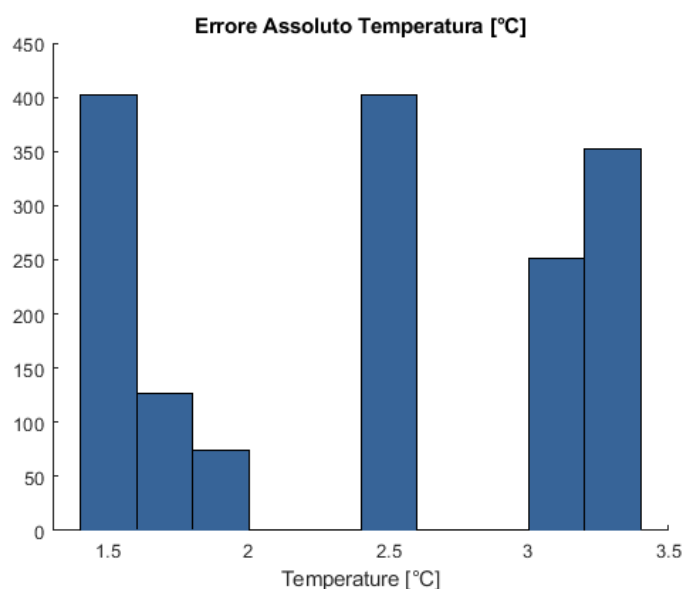


Figura 5.40: C4: Errore Assoluto ciclo termico di verifica

In conclusione, si può affermare che tra le 8 configurazioni analizzate, ciascuna presenta vantaggi e svantaggi specifici. In primo luogo, è stato evidenziato che l'utilizzo della lega di alluminio come materiale di supporto non rappresenta una soluzione ottimale. Ciò è dovuto alla sua maggiore dilatazione termica rispetto al composito in fibra di carbonio. Infatti, questa porta a cambiamenti delle proprietà meccaniche, o slittamento, nell'adesivo quando viene sottoposto a elevate temperature. Questa deformazione influisce sull'efficacia dell'incollaggio utilizzato, determinando un deterioramento delle condizioni fisiche del campione.

Sia l'utilizzo della resina nella configurazione nominata AL2 che in C2 ha evidenziato una marcata tendenza all'assorbimento di umidità, il quale ha comportato una non ripetibilità dei risultati. In altre parole, la resina ha dimostrato di assorbire l'umidità presente nell'ambiente e di dissiparla una volta raggiunte temperature elevate. Tuttavia, è importante sottolineare che mentre la resina dissipa l'umidità in modo rapido e regolare, la colla cianoacrilato tende ad assorbire una maggiore quantità di umidità e a dissiparla in modo irregolare.

Tra le 8 configurazioni prese in considerazione nello studio, sono state selezionate per un'analisi più approfondita due opzioni: la fibra ottica non tensionata

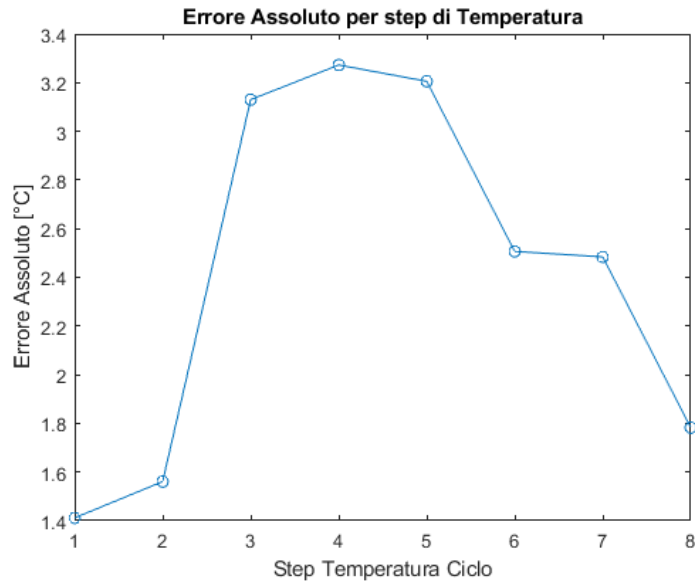


Figura 5.41: C3: Errore Assoluto per step di temperatura ciclo termico di verifica

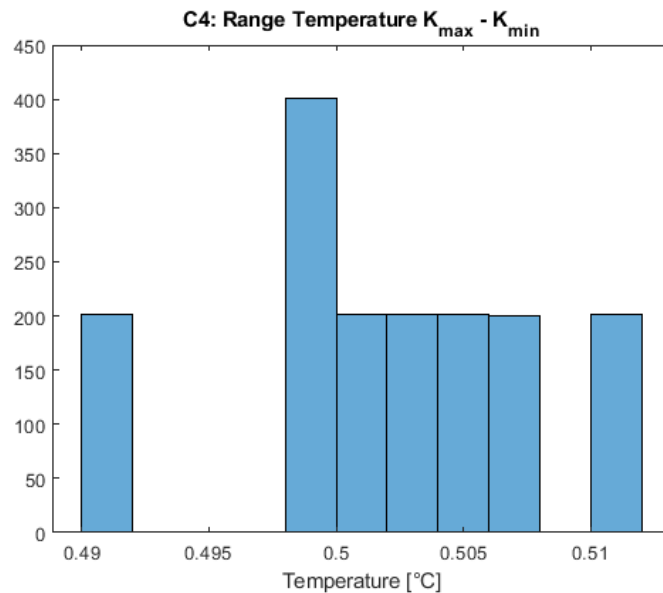


Figura 5.42: C4: ciclo termico di verifica Massima differenza valori temperatura per $K_{Tmax} - K_{Tmin}$

fissata su composito in fibra di carbonio con colla cianoacrilato (C3) e la fibra ottica pre-tensionata fissata su un su composito in carbonio tramite resina epossidica (C4). Entrambe le configurazioni utilizzano il carbonio come materiale di supporto, ma differiscono per il tipo di adesivo utilizzato e per la presenza o meno di pre-tensionamento del sensore ottico. Nonostante il caso C3 abbia mostrato risultati accettabili in termini di corrispondenza tra la temperatura misurata e quella rilevata in camera climatica dal sensore P100 durante le analisi, si è riscontrato che i dati raccolti in questo campione presentano una bassa ripetibilità e incertezza, come discusso in precedenza. Fin dall'inizio, l'acquisizione dei dati ha mostrato una scarsa ripetibilità e una difficoltà nella stabilizzazione. Questo è evidenziato nel grafico sottostante, che rappresenta la deviazione standard relativa dei dati acquisiti, mettendo in evidenza l'instabilità della risposta del sensore in questa configurazione.

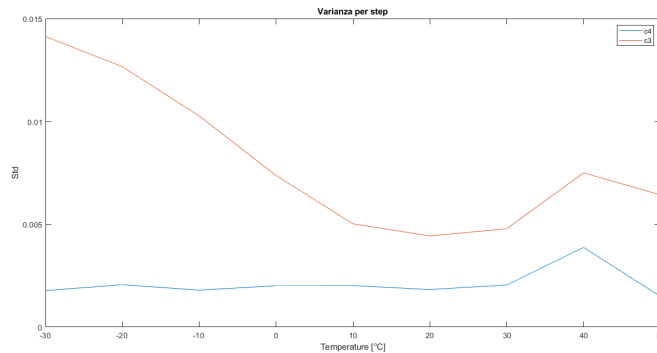


Figura 5.43: Deviazione standard acquisizione dati C3 e C4

Questo fenomeno si riflette in una mancanza di univocità dei parametri necessari per la calibrazione, come K_T e λ_0 , che si traduce in un'ampia variazione degli errori nei valori di temperatura calcolati durante la conversione dei dati da lunghezza d'onda a temperatura. D'altra parte, il caso C4 si distingue per la sua elevata precisione nell'acquisizione dei dati, nonché per la linearità e la ripetibilità dei risultati. Tuttavia, rispetto al caso C3, si osserva un errore maggiore nella misurazione della temperatura mediante la calibrazione del sensore. Nonostante l'errore più significativo, la configurazione C4 consente di ottenere una certezza elevata durante le analisi ripetute. Di conseguenza, la configurazione C4 fornisce risultati più coerenti e stabili rispetto alla configurazione C3. Questa caratteristica la rende la scelta più interessante, in quanto è possibile correggere il valore della temperatura attraverso una compensazione adeguata. Inoltre, è necessario evidenziare che la sonda utilizzata trasmette un valore della temperatura che può essere affetta da errore, sia per errori intrinseci nello strumento che per il posizionamento di questa all'interno della camera. Infatti, la sonda P100 misura una temperatura ambiente, e il sistema della camera climatica è soggetto a flussi convettivi interni necessari per il funzionamento. Il sensore in fibra ottica è uno strumento di misurazione puntuale, pertanto, è giusto evidenziare che l'errore che è stato presentato tra i valori di temperatura misurati dal sensore FBG e quella segnata dalla sonda P100 della camera climatica può essere dovuto a diverse motivazioni che prescindono dall'accuratezza del sensore ottico. In definitiva, il provino C4 ha dimostrato una maggiore coerenza, stabilità e ripetibilità dei dati, confermandosi come la configurazione più promettente.

Capitolo 6

Analisi Meccanica

In questo paragrafo, viene presentata l'indagine sperimentale condotta presso il Dipartimento DIMEAS del Politecnico di Torino, focalizzata sull'utilizzo del sensore a fibra ottica FBG come strumento per la misurazione delle deformazioni meccaniche. Come precedentemente discusso, la fibra ottica risulta sensibile a diversi fattori, tra cui le deformazioni meccaniche, che causano una variazione nel periodo del reticolo di Bragg, determinando una modifica nella lunghezza d'onda del segnale di uscita. Lo studio si propone di analizzare la risposta del sensore sia alle deformazioni di tipo statico che a quelle di tipo dinamico. Per l'analisi delle diverse condizioni al contorno, sono stati utilizzati campioni di prova distinti al fine di valutare l'effetto delle variazioni. I campioni sono stati caratterizzati da diverse modalità di incollaggio e tensionamento della fibra ottica FBG, nonché da differenti materiali di supporto, al fine di esaminare l'influenza su variazioni nella lunghezza d'onda riflessa trasmessa. Nello specifico, sono stati realizzati due provini, entrambi presentano come materiale di supporto una lastra di composito in fibra di carbonio ma i due campioni differiscono tra loro per le proprietà meccaniche, in quanto sono costituiti da materiali con livelli di rigidità distinti. La principale differenza risiede nel metodo di incollaggio: nel primo provino, è stata impiegata una resina epossidica con indurente, mentre nel secondo provino è stata utilizzata una resina commerciale per fissare il sensore ottico al materiale di supporto. L'analisi consentirà di comprendere come le variazioni nelle condizioni al contorno influenzano la risposta del sensore FBG e la sua capacità di misurare la deformazione meccanica.

6.1 Provino incastrato

In primo luogo, viene condotta un'analisi sulla risposta del sensore FBG alle deformazioni meccaniche di tipo statico, sia in condizioni di trazione che di compressione. Per questa prima fase dello studio, si prevede l'impiego di una prima configurazione di sensore applicato su lastra di carbonio mediante resina epossidica tecnica. La seguente attività di laboratorio, è stata suddivisa in due fasi di analisi, che si distinguono per il diverso intervallo di tempo dedicato alla stabilizzazione del sensore dopo l'applicazione della sollecitazione meccanica: un intervallo di un minuto e un intervallo di cinque minuti. Di seguito, verrà descritto il processo di analisi adottato per condurre la ricerca.

Lo studio prevede l'applicazione di una deformazione meccanica sulla lastra sopra la quale è incollata la fibra ottica, al fine di esaminare la risposta del sensore attraverso l'analisi del segnale riflesso in uscita. Per fare ciò una delle estremità della lastra viene fissata ad un vincolo, mentre all'estremità opposta, viene posizionato un gan-

cio capace di reggere i carichi. Vengono quindi aggiunti dei pesi in serie, generando una forza che provoca la deformazione meccanica della lastra tramite il loro peso. In questo modo, è possibile controllare e misurare la deformazione meccanica applicata e correlarla alla variazione della lunghezza d'onda riflessa emessa dalla fibra ottica. I provini utilizzati sono gli stessi presentati nello studio di riferimento [1]. Questi consistono in due sensori ottici FBG montati su una lastra di composito in carbonio utilizzando resina tecnica. La resina strutturale impiegata è una resina epossidica di tipo L, la quale è stata combinata con un opportuno indurente EPH161. La distinzione tra i due provini risiede nel fatto che in uno la fibra è stata pre-tensionata mentre l'altra è stata fissata al supporto. Le prove sperimentali sono state condotte posizionando i campioni a una distanza di 19,1 cm dal vincolo esterno, mentre il carico è stato applicato sul corrispondente vincolo opposto. La lunghezza d'onda di output è stata misurata e registrata utilizzando un interrogatore, i cui dati sono stati successivamente visualizzati e acquisiti tramite il software SmartSoft SSI. Per l'analisi e l'elaborazione dei dati raccolti, è stato utilizzato il software MATLAB. L'intero studio è stato condotto in un ambiente controllato al chiuso, con particolare attenzione cercando di mantenere il banco di prova lontano da fonti di calore che potrebbero influenzare le analisi acquisite, causando una variazione nella lunghezza d'onda (λ) dovuta ad un effetto termico.

I pesi utilizzati come carichi nello studio sono stati i seguenti:

- Peso del gancio: 84 g
- 2 x 45,3 g
- 4 x 48,9 g
- 1 x 100,6 g
- 1 x 101 g

Come precedentemente illustrato, le analisi sono state eseguite mediante l'aggiunta graduale di pesi a forma cilindrica sul supporto che ospitava il sensore ottico. Il processo di applicazione dei pesi è stato eseguito seguendo l'ordine:

Step	Pesi [g]
0	84
1	129,3
2	174,6
3	224,4
4	274,2
5	325
6	374,8
7	426
8	475,8

Tabella 6.1: Pesi totali applicati per step

Dopo l'applicazione di ciascun carico, si osservano delle oscillazioni iniziali a causa delle vibrazioni meccaniche. Al fine di raggiungere un regime stazionario, è stato introdotto un intervallo di tempo tra l'aggiunta di un carico e il successivo, consentendo così la stabilizzazione della fibra. Sono stati condotti due studi in cui è stato

variato il tempo di attesa per valutare il suo effetto. Nel primo studio, l'intervallo di tempo tra i carichi è stato di 1 minuto, mentre nel secondo studio è stato di 5 minuti. Questo ha permesso di analizzare l'influenza del tempo di stabilizzazione sul comportamento della fibra e ottenere risultati confrontabili tra loro. Registrati i dati relativi alla variazione della lunghezza d'onda in funzione della deformazione meccanica, questi sono stati analizzati per tracciare un grafico che mostra la relazione tra la variazione della lunghezza d'onda e la massa applicata. Questo grafico permette di confrontare e analizzare la risposta del sensore in relazione alla quantità di carico applicata.

La configurazione adottata per questo primo studio consiste nell'utilizzo di due fibre ottiche applicate su una lastra di composito in fibra di carbonio. Ogni fibra ottica contiene due sensori FBG. Nello specifico, è stata utilizzata una resina di tipo L con l'aggiunta dell'indurente EPH161. Il materiale su cui i sensori ottici sono stati fissati è un composito di fibra di carbonio composto da 14 strati unidirezionali. Le due fibre ottiche fissate sulla lastra differiscono per il tensionamento. Una delle fibre è stata pre-tensionata, mentre l'altra è stata fissata senza pre-tensionamento. Tuttavia, a causa della loro prossimità al vincolo esterno, si è deciso di analizzare solo le due fibre lontane dal vincolo. Le due fibre selezionate saranno indicate come FBG1 e FBG2 e presentano i seguenti valori di lunghezza d'onda a temperatura ambiente senza l'applicazione di sollecitazioni meccaniche:

- Fibra 1: Non Pre-tensionata - $\lambda = 1542nm$
- Fibra 2: Pre-tensionata - $\lambda = 1546nm$

6.1.1 FBG sottoposto a trazione

Nel primo studio, sono state condotte prove di trazione sul provino utilizzando i carichi precedentemente elencati. Tra l'aggiunta di un carico e il successivo è stato osservato un intervallo temporale di 1 minuto per raggiungere uno stato di stazionarietà. Inizialmente, vengono presentati i valori di lunghezza d'onda (λ) raccolti in funzione del carico applicato. Le analisi sono state eseguite in due giorni diversi, il 9 marzo 2023 e il 10 marzo 2023. I grafici mostrano i valori raccolti per le due fibre nei due giorni, sia i dati grezzi che quelli normalizzati rispetto a λ_0 .

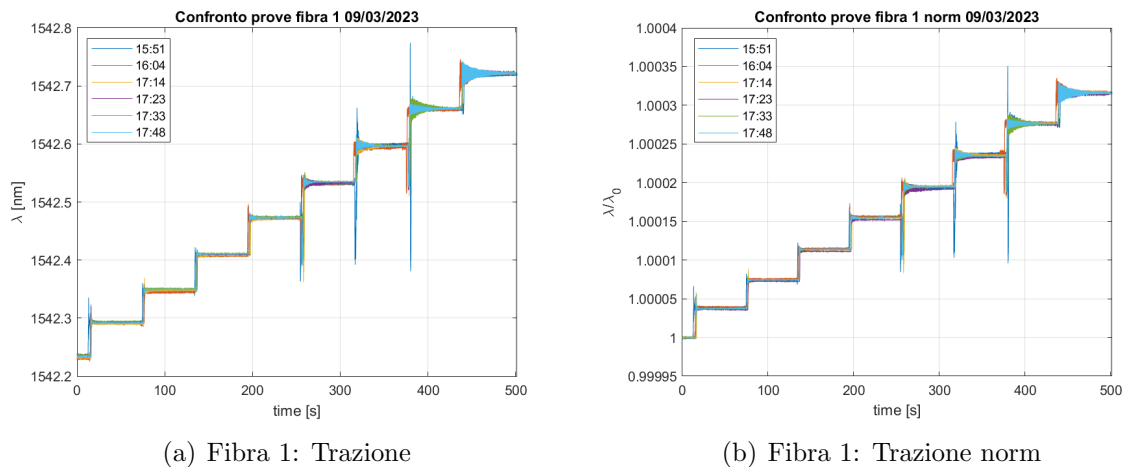
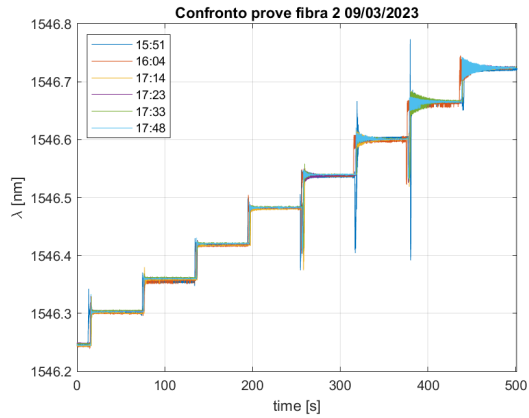
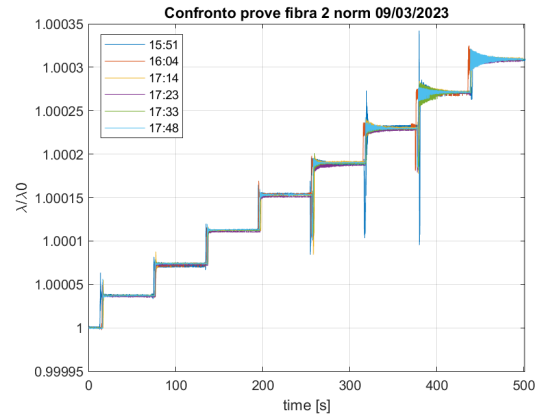


Figura 6.1: Confronto fibra 1: Trazione 9/3/2023

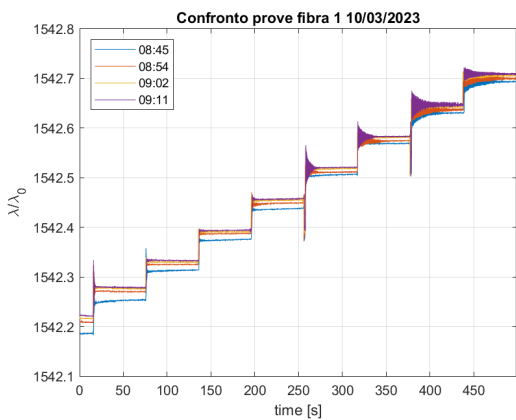


(a) Fibra 2: Trazione

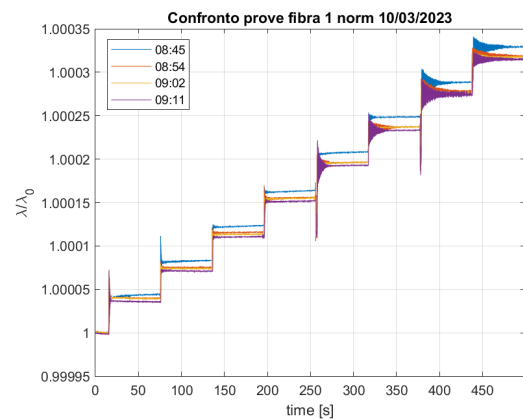


(b) Fibra 2: Trazione norm

Figura 6.2: Confronto fibra 2: Trazione 9/3/2023

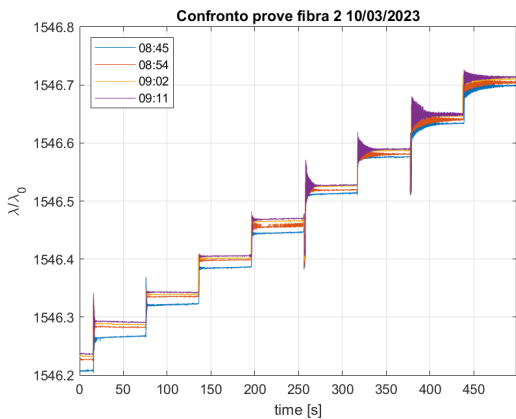


(a) Fibra 1: Trazione

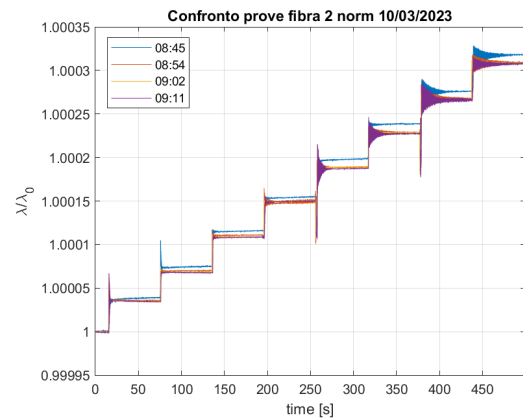


(b) Fibra 1: Trazione norm

Figura 6.3: Confronto fibra 1: Trazione 10/3/2023



(a) Fibra 2: Trazione



(b) Fibra 2: Trazione norm

Figura 6.4: Confronto fibra 2: Trazione 10/3/2023

Dalle analisi effettuate, si osserva un comportamento molto simile dei dati acquisiti. In particolare, per le prove eseguite il giorno 09/03/2023, si evidenzia una sovrapposizione dei dati acquisiti. Lo stesso si osserva nelle analisi condotte il giorno 10/03/2023, con una leggera deviazione per quanto riguarda il primo ciclo. Poiché

queste prove sono state eseguite a breve distanza temporale l'una dall'altra, tale variazione potrebbe essere attribuita alla presenza di fonti di calore nell'area di acquisizione dei dati, che hanno influenzato, seppur in misura minima, la registrazione dei valori.

Acquisiti i dati e definito l'intervallo di tempo per ottenere una stazionarietà delle misurazioni, è stato selezionato un insieme di valori di lunghezza d'onda in tale intervallo temporale, quindi calcolato il valore medio di λ per ciascun incremento di carico. Ciò ha consentito di rappresentare l'andamento della variazione di λ al variare del carico applicato.

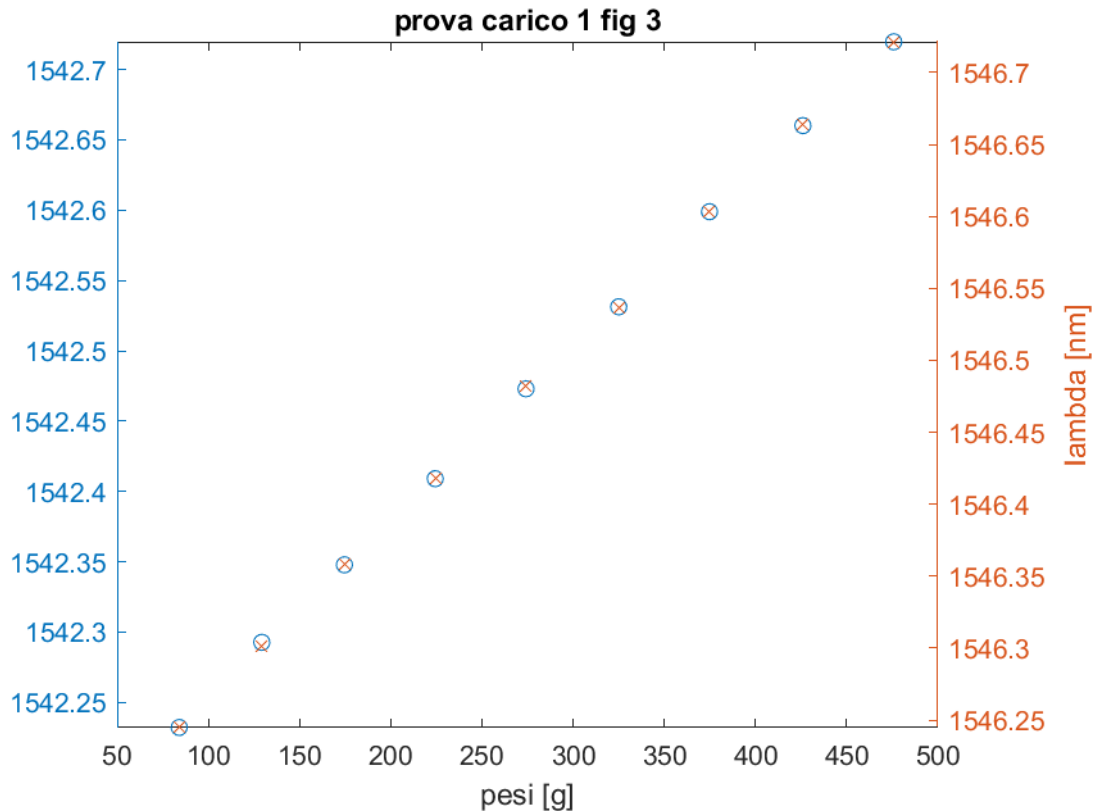


Figura 6.5: Punti medi λ in funzione dei pesi

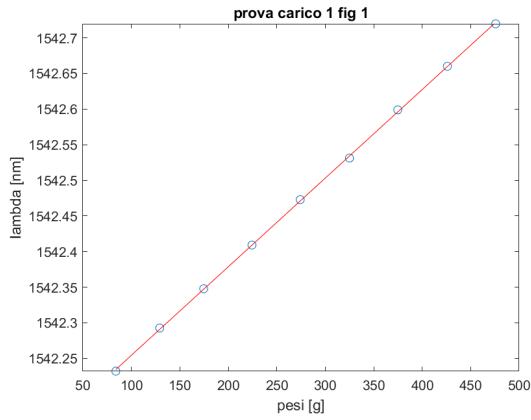
Una volta calcolati i dati medi puntuali, è stato seguito il processo per valutare la variazione della lunghezza d'onda in funzione della deformazione meccanica. E' stata quindi tracciata una retta interpolante che passa attraverso i punti medi dei dati sperimentali nel grafico della massa - λ . Ciò permette di determinare il valore della costante di proporzionalità K_ϵ , che rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante, e il valore di λ_0 , che corrisponde alla quota della retta. Questi due valori sono fondamentali per calibrare il sensore, seguendo la seguente formula:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(K_\epsilon\epsilon + K_T\Delta T) \quad (6.1)$$

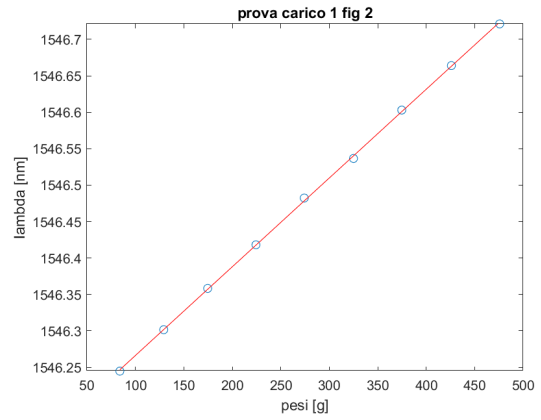
La taratura è stata eseguita per tutti i casi proposti, e viene presentata la linea media ottenuta considerando tutte le rette di interpolazione ricavate per i diversi cicli di carico, insieme al relativo scostamento dal valore medio.

I valori ottenuti di K_ϵ e λ_0 per lo studio di deformazione a trazione vengono mostrati in tabella

Come osservato nella figura, i dati raccolti mostrano un'elevata sovrapposizione e quindi ripetibilità sia nella fase di acquisizione che nella fase di calibrazione. L'er-

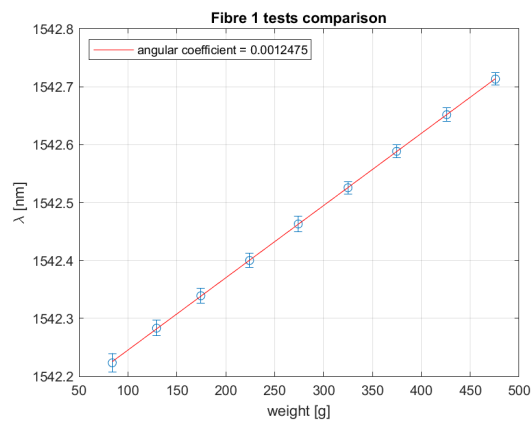


(a) Fibra 1: Trazione Calibrazione

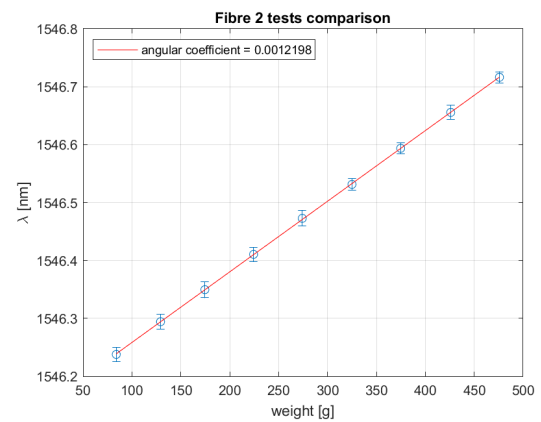


(b) Fibra 2: Trazione Calibrzione

Figura 6.6: Calibrazione Trazione



(a) Fibra 1: Trazione Confronto Taratura



(b) Fibra 2: Trazione Confronto Taratura

Figura 6.7: Confronto Calibrazione: Trazione

FBG 1	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	0.0012432	1542.13013
2	0.0012449	1542.12725
3	0.0012500	1542.12775
4	0.0012385	1542.13288
5	0.0012381	1542.13371
6	0.0012432	1542.13093
7	0.0012852	1542.08476
8	0.0012448	1542.10713
9	0.0012449	1542.11309
10	0.0012430	1542.11685

Tabella 6.2: FBG1: Trazione valori K_ϵ e λ_0

rore associato è relativamente basso, il che ci consente di trarre alcune conclusioni significative:

- I dati acquisiti e rappresentati nel grafico mostrano una relazione lineare tra la variazione della lunghezza d'onda (λ) e la massa applicata. Questo indica che

FBG 2	K_ϵ [nm/°C]	λ_0 [nm]
1	0.0012170	1546.14465
2	0.0012179	1546.14255
3	0.0012228	1546.14289
4	0.0012130	1546.14753
5	0.0012137	1546.14797
6	0.0012181	1546.14562
7	0.0012501	1546.10384
8	0.0012141	1546.12466
9	0.0012186	1546.12921
10	0.0012148	1546.13357

Tabella 6.3: FBG2: Valori K_ϵ e λ_0

esiste una proporzionalità diretta tra la deformazione meccanica e la variazione della lunghezza d'onda. La linearità osservata in tutti i casi proposti suggerisce una buona risposta del sensore FBG al carico meccanico applicato.

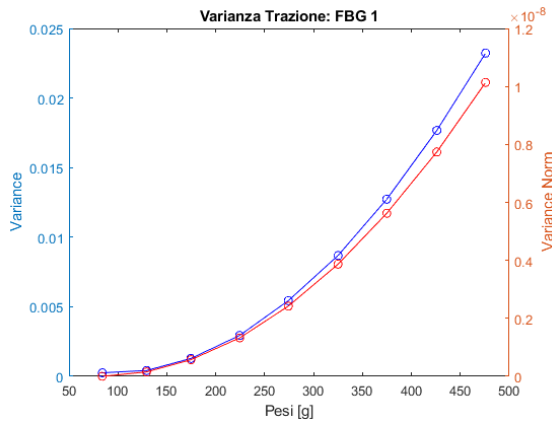
- I dati raccolti mostrano un'ottima ripetibilità della fibra ottica a trazione, poiché l'errore presente nella curva è minimo. Ciò indica che la fibra è in grado di fornire misurazioni coerenti durante l'applicazione ripetuta dei carichi. La bassa variabilità dei dati evidenzia la capacità della fibra di mantenere la sua risposta meccanica stabile nel tempo, confermando la sua affidabilità e precisione come sensore di deformazione.
- I risultati ottenuti sia per la fibra pre-tensionata che per quella non pre-tensionata mostrano buone performance nel caso di trazione. Non sono stati rilevati deficit significativi nelle prestazioni tra le due configurazioni. Ciò indica che entrambe le configurazioni sono altamente affidabili e forniscono una risposta coerente durante l'applicazione dei carichi per lo studio di deformazione meccanica a trazione. Pertanto, entrambe le configurazioni possono essere considerate valide per le applicazioni di trazione, senza differenze sostanziali in termini di performance.

Al fine di valutare la ripetibilità del sensore, sono stati calcolati la varianza, l'errore assoluto e l'errore quadratico medio (RMSE) considerando tutte le prove effettuate al variare del carico applicato.

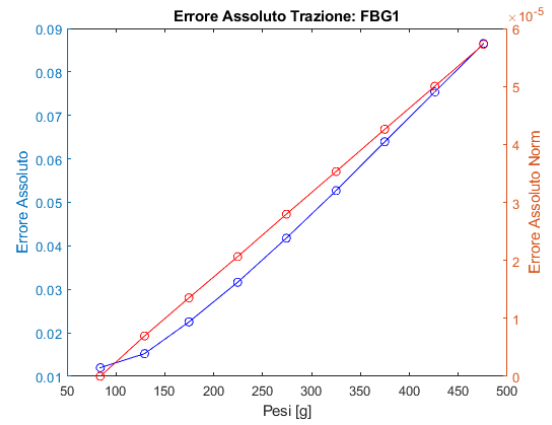
Trazione	RMSE [nm]	RMSE norm
FBG 1	0.07291	4.72025e-05
FBG 2	0.071139	4.58077e-05

Tabella 6.4: FBG1 FBG2 RMSE e RMSE normalizzato Trazione

Dai risultati ottenuti emerge come i valori risultano migliorare considerevolmente quando i dati vengono normalizzati. Dai valori ottenuti per la lunghezza d'onda iniziale λ_0 , si può osservare che le variazioni delle condizioni ambientali influiscono sul valore di λ_0 , determinando una traslazione nel grafico massa-lunghezza d'onda. Tuttavia, una volta che i dati vengono normalizzati, eliminando così l'effetto del valore iniziale della lunghezza d'onda, i valori acquisiti mostrano coerenza e una notevole

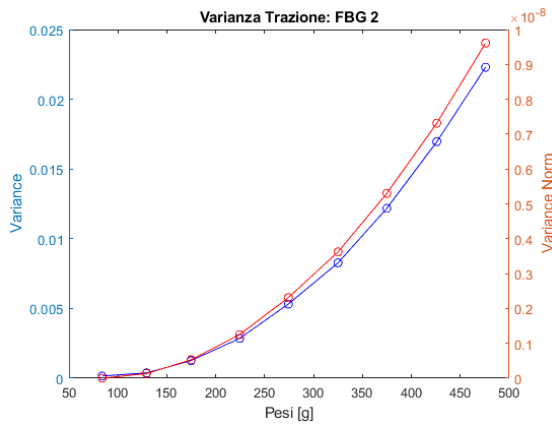


(a) Fibra 1: Trazione Varianza

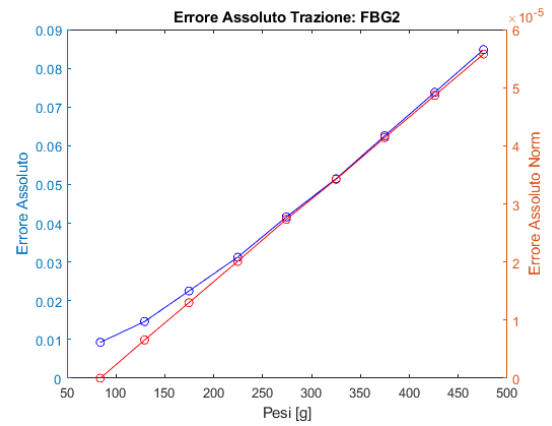


(b) Fibra 1: Trazione Errore Assoluto

Figura 6.8: Fibra 1: Varianza e Errore Assoluto



(a) Fibra 2: Trazione Varianza



(b) Fibra 2: Trazione Errore Assoluto

Figura 6.9: Fibra 2: Varianza e Errore Assoluto

ripetibilità. Questo è possibile apprezzarlo considerando la deviazione standard dei valori di K_ϵ e λ_0 mostrato nella tabella sottostante.

Trazione	$K_\epsilon [nm/g]$	$\lambda_0 [nm]$
FBG 1	1.3634e-05	0.0155
FBG 2	1.0974e-05	0.0139

Tabella 6.5: Deviazione standard K_ϵ e λ_0 FBG1 e FBG2

L'analisi dei risultati rivela in modo significativo che la differenza osservata è principalmente attribuibile al discostamento del valore iniziale della lunghezza d'onda, mentre i valori della costante di proporzionalità dimostrano una maggiore stabilità nel tempo. Questa osservazione sottolinea che nonostante la variazione nel valore iniziale della lunghezza d'onda, la relazione lineare tra la lunghezza d'onda e la grandezza misurata viene mantenuta con un alto grado di coerenza.

6.1.2 FBG sottoposto a compressione

Dopo aver completato le analisi di trazione, è stato condotto un esperimento di deformazione a compressione seguendo lo stesso protocollo utilizzato nelle prove

precedenti. In questa sezione, vengono presentati i risultati dello studio del sensore ottico sottoposto a compressione con un intervallo di tempo tra l'aggiunta di un carico ed il successivo di 1 minuto. Nella prova di compressione, la variazione della lunghezza d'onda riflessa λ diminuisce all'aumentare del carico applicato. I dati raccolti vengono quindi normalizzati rispetto a un valore di riferimento, come fatto in precedenza, per ottenere una rappresentazione più significativa della variazione relativa.

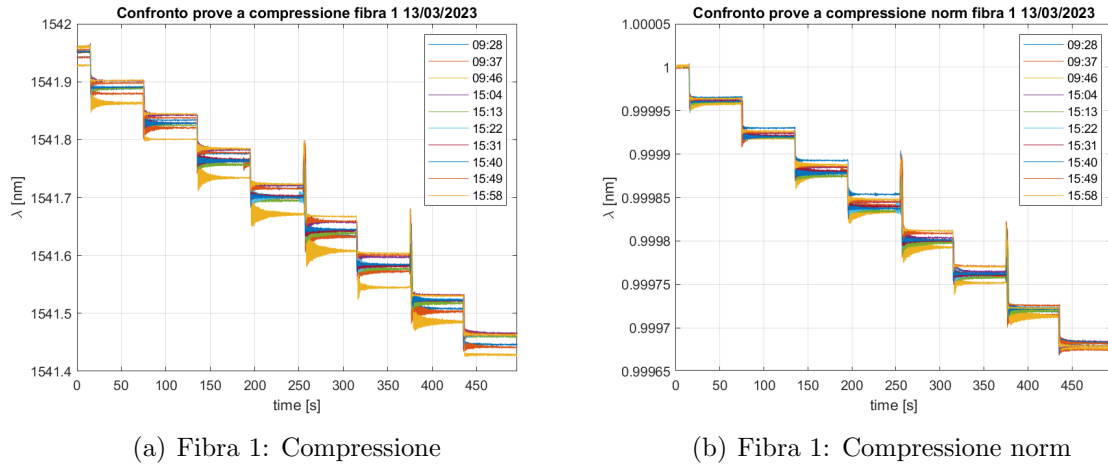


Figura 6.10: Confronto dati Compressione: Fibra 1

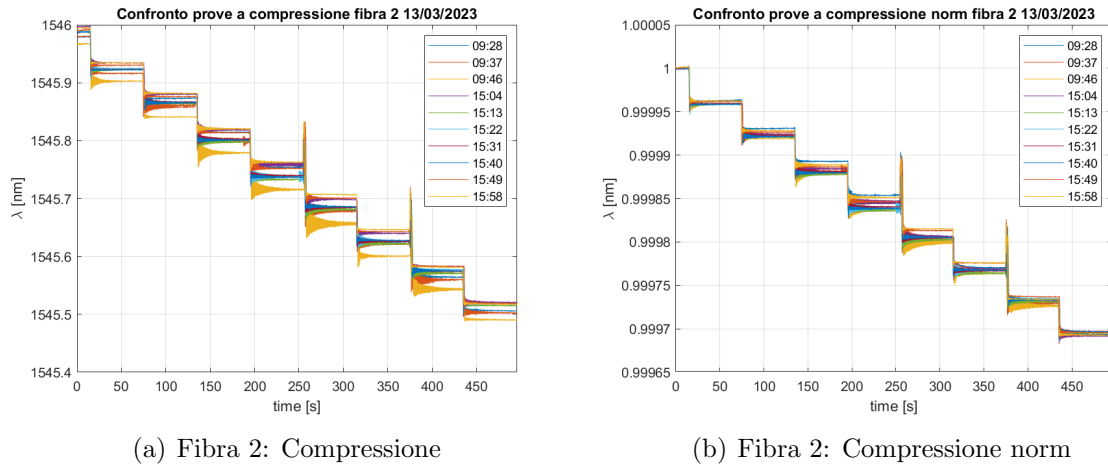


Figura 6.11: Confronto dati Compressione: Fibra 2

Dalle analisi condotte, emerge che il provino sottoposto a compressione mostra una minore precisione dei dati rispetto al provino sottoposto a trazione. Si procede con l'analisi della relazione tra la variazione della lunghezza d'onda e la deformazione meccanica, come precedentemente eseguito.

In generale, le prove di compressione mostrano una minore ripetibilità rispetto alle prove di trazione. Tuttavia, osservando il grafico normalizzato, si nota una significativa sovrapposizione dei dati, suggerendo che le condizioni iniziali abbiano influenzato l'acquisizione dei dati. Pertanto anche nelle analisi in compressione si presenta quanto analizzato nelle prove precedenti di deformazione a trazione. Le influenze ambientali condizionano il valore di λ_0 ma viene mantenuta la linearità dei dati acquisiti, con una buona stabilità di K_ϵ .

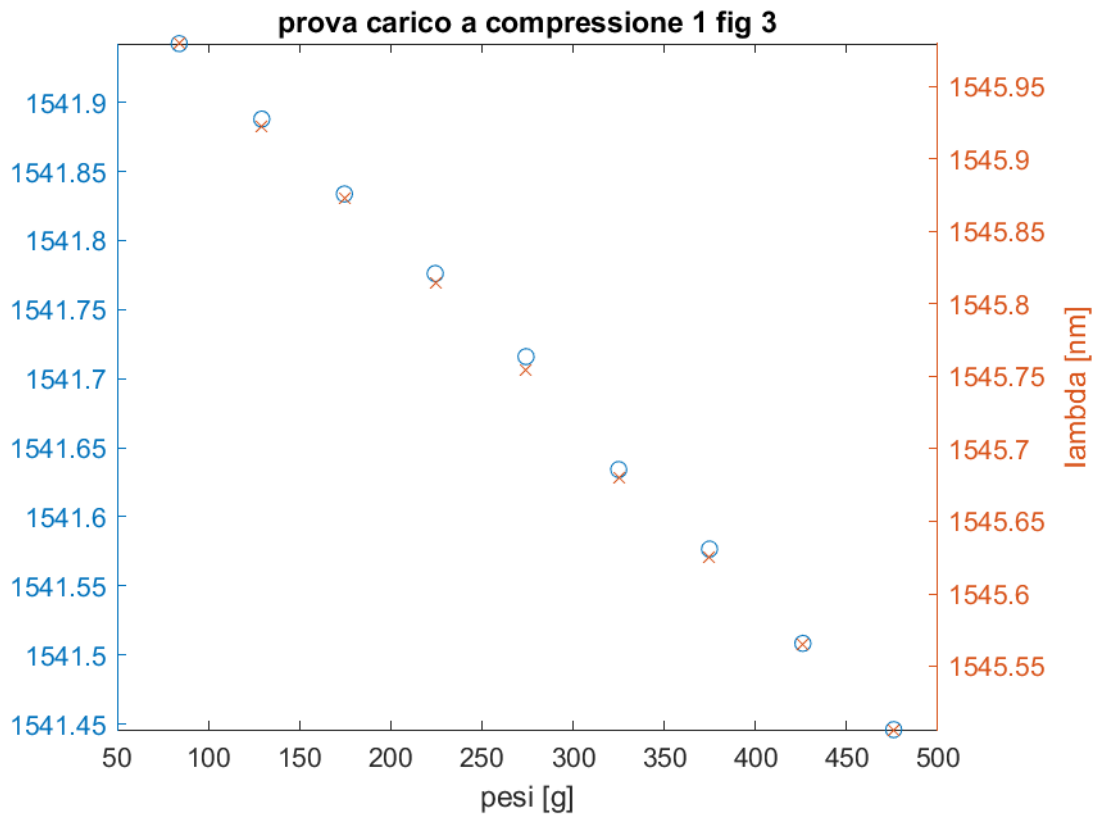
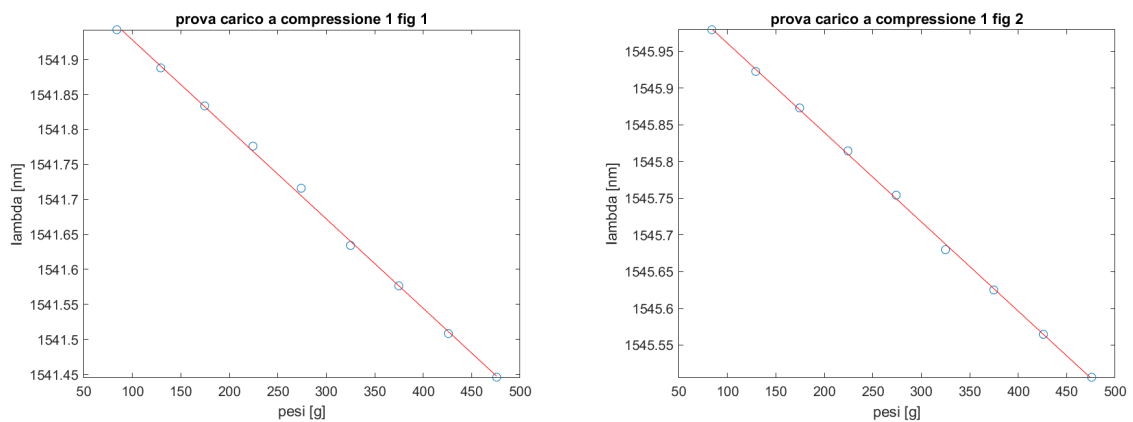


Figura 6.12: Punti medi λ in funzione dei pesi



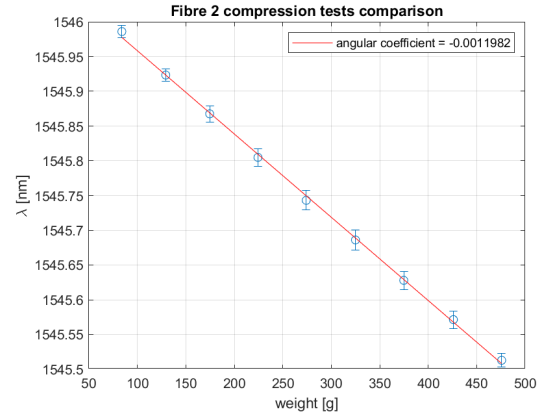
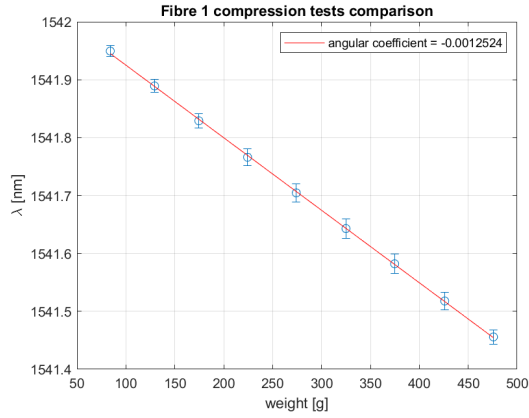
(a) Fibra 1: Compressione Confronto Taratura

(b) Fibra 2: Compressione Confronto Taratura

Figura 6.13: Calibrazione compressione

Riprendendo l'approccio adottato nell'analisi della deformazione meccanica a trazione, viene valutata la deviazione standard dei valori di K_ϵ e λ_0 al fine di determinare la concordanza con i risultati precedentemente analizzati.

Come osservato anche in questo caso, la presenza di oscillazioni è principalmente attribuibile a fattori esterni che influenzano il punto di inizio dell'acquisizione dei dati, portando a lievi variazioni nel valore iniziale. Tuttavia, la relazione di proporzionalità, rappresentata dal valore di K_ϵ , rimane costante e stabile. Anche in questa situazione, vengono riportati i valori calcolati di varianza e radice dell'errore quadratico medio (RMSE) per i dati raccolti a parità di carico applicato, sia per i



(a) Fibra 1: Compressione Taratura Statistica

(b) Fibra 2: Compressione Taratura Statistica

Figura 6.14: Calibrazione compressione Errorbar

FBG 1	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	-0.0012780	1542.05563
2	-0.0012681	1542.04472
3	-0.0012742	1542.02601
4	-0.0012530	1542.06427
5	-0.0012463	1542.04550
6	-0.0012408	1542.04856
7	-0.0012415	1542.04847
8	-0.0012378	1542.04797
9	-0.0012359	1542.05704
10	-0.0012514	1542.06569

Tabella 6.6: FBG1: Compressione valori K_ϵ e λ_0

Prova	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	-0.0012157	1546.08262
2	-0.0012089	1546.07373
3	-0.0012116	1546.05677
4	-0.0012024	1546.09150
5	-0.0011968	1546.07462
6	-0.0011893	1546.07656
7	-0.0011897	1546.07589
8	-0.0011849	1546.07437
9	-0.0011853	1546.08418
10	-0.0012002	1546.09250

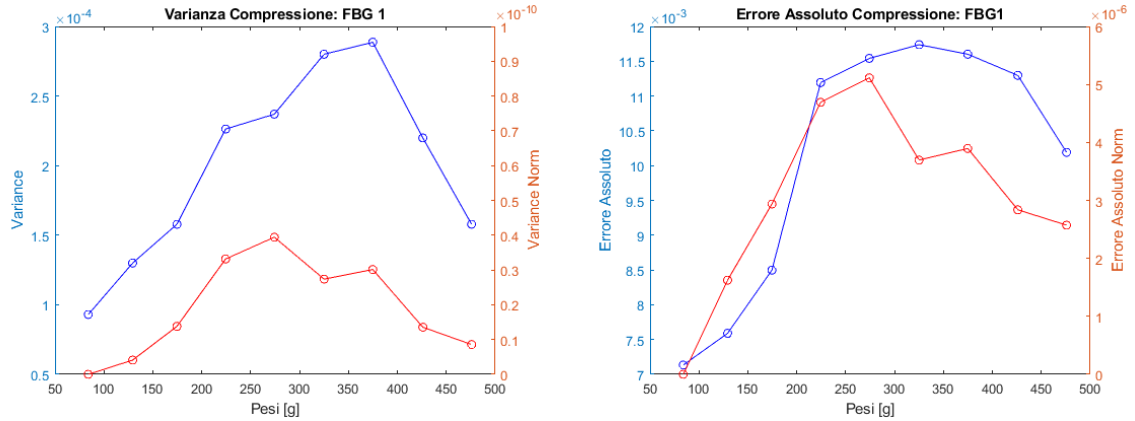
Tabella 6.7: FBG1: Compressione valori K_ϵ e λ_0

dati grezzi acquisiti che per i valori normalizzati.

Sono state condotte ulteriori analisi modificando l'intervallo di attesa tra il caricamento dei pesi, aumentandolo da 1 minuto a 5 minuti. Le prove sono state ripetute sia per la configurazione di trazione che per quella di compressione. Le analisi risultano utili per valutare se l'intervallo di tempo di 1 minuto tra il carica-

Compressione	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
FBG 1	1.5469e-05	0.0114
FBG 2	1.1145e-05	0.0103

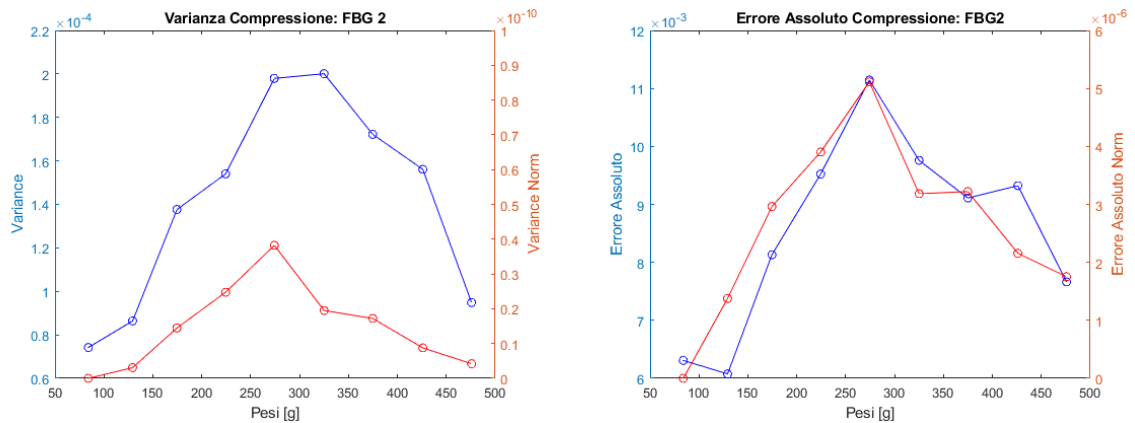
Tabella 6.8: FBG1 FBG2 compressione: deviazione standard K_ϵ e λ_0



(a) Fibra 1: Compressione Varianza

(b) Fibra 1: Compressione Errore Assoluto

Figura 6.15: FBG 1: Compressione - Varianza e Errore Assoluto



(a) Fibra 2: Compressione Varianza

(b) Fibra 2: Compressione Errore Assoluto

Figura 6.16: FBG 2: Compressione - Varianza e Errore Assoluto

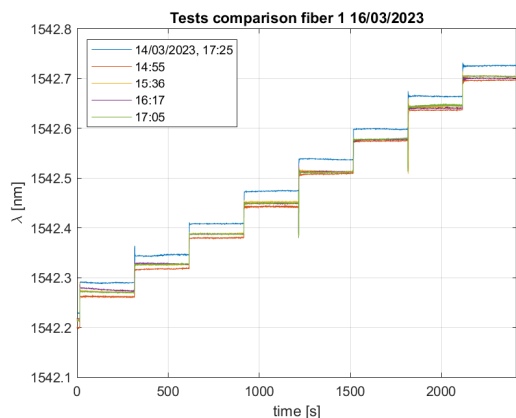
Compressione	RMSE [nm]	RMSE norm
FBG 1	0.013193	3.69992e-06
FBG 2	0.011133	3.19258e-06

Tabella 6.9: FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm compressione

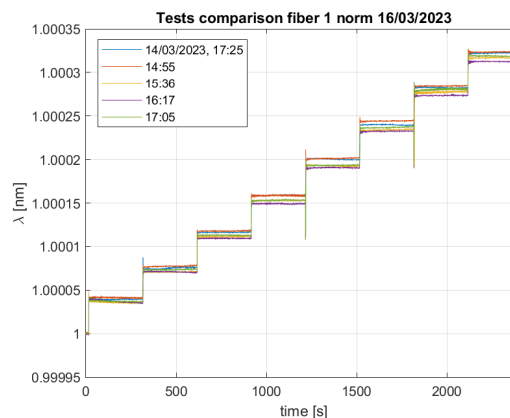
mento di un peso ed il successivo sia sufficiente per raggiungere una stazionarietà e a fornire un confronto aggiuntivo tra i dati acquisiti.

6.1.3 FBG sottoposto a trazione per lunghi periodi

Vengono presentati inizialmente i risultati delle prove di trazione, seguendo il procedimento adottato in precedenza, ma con un aumento dell'intervallo di tempo tra l'applicazione successiva di ciascun carico, passando da 1 a 5 minuti. Di seguito, viene mostrato un grafico che rappresenta l'acquisizione dei dati grezzi nel corso del tempo, e un secondo grafico che visualizza i medesimi dati normalizzati.

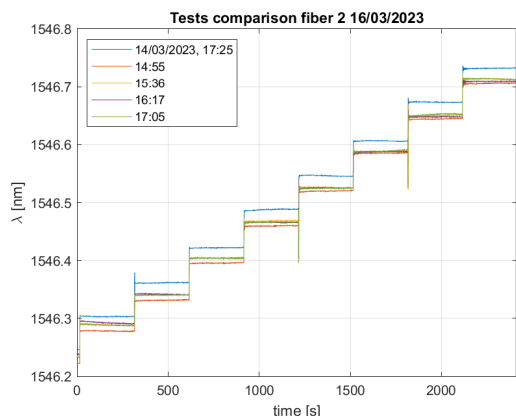


(a) Fibra 1: Trazione

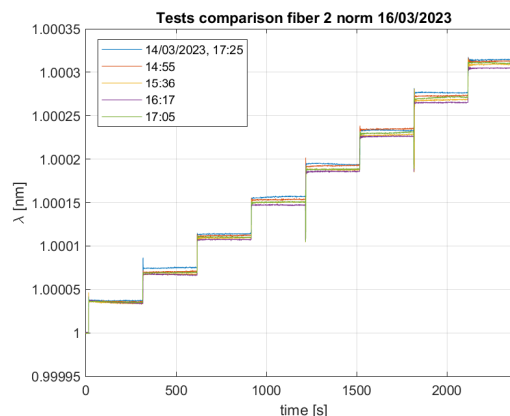


(b) Fibra 1: Trazione norm

Figura 6.17: Fibra 1: Confronto dati Trazione 5 min



(a) Fibra 2: Trazione



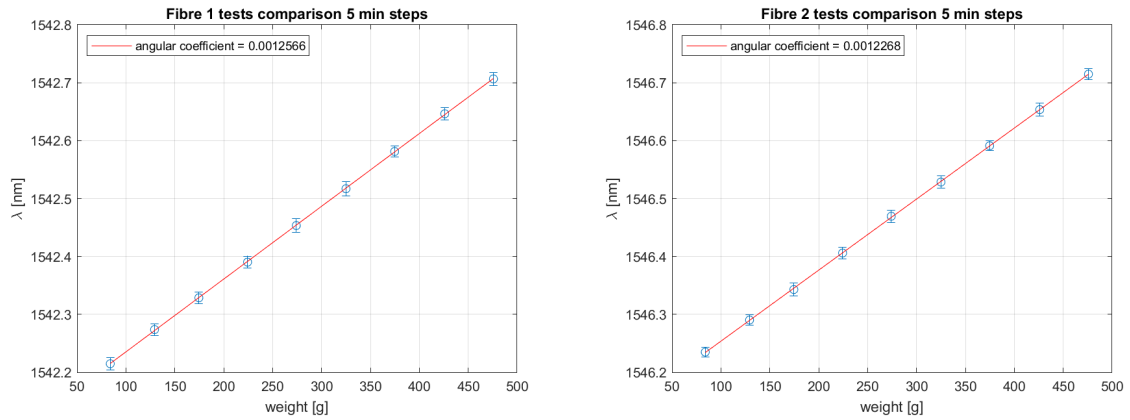
(b) Fibra 2: Trazione norm

Figura 6.18: Fibra 2: Confronto dati Trazione 5 min

Dall'analisi dei dati grezzi acquisiti emerge una buona ripetibilità, come già evidenziato nel caso precedente. Tuttavia, si osserva una deviazione nella curva di acquisizione dei dati relativa al giorno 14/03/2023, che è stata eseguita in una data diversa rispetto alle altre prove. Anche in questo caso, coerentemente con quanto analizzato nel caso di intervallo temporale di 1 minuto, normalizzando i dati rispetto a λ_0 , non si rilevano più differenze significative rispetto alle altre curve. Questo suggerisce che i due giorni potrebbero presentare condizioni ambientali diverse, come variazioni di temperatura, che hanno influenzato i valori di lunghezza d'onda in uscita dall'FBG.

Inoltre, sia per FBG1 che per FBG2 sono stati acquisiti i dati necessari per determinare la relazione tra la variazione della lunghezza d'onda e lo strain meccanico. È

stata quindi tracciata una retta interpolante che passa attraverso i punti sperimentali. Questa retta consente di calcolare il valore della costante K_ϵ , che rappresenta la relazione di proporzionalità tra la variazione della lunghezza d'onda e lo strain meccanico.



(a) Fibra 1: Trazione 5 min Taratura Statistica (b) Fibra 2: Trazione 5 min Taratura Statistica

Figura 6.19: Calibrazione Taratura 5 min FBG1 e FBG2

FBG1	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	0.0012682	1542.12411
2	0.0012704	1542.09513
3	0.0012527	1542.10848
4	0.0012345	1542.11317
5	0.0012574	1542.10671

Tabella 6.10: Confronto dati Trazione 5 min: Fibra 1

FBG 2	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	0.0012399	1546.14369
2	0.0012392	1546.11763
3	0.0012218	1546.13040
4	0.0012049	1546.13493
5	0.0012283	1546.12824

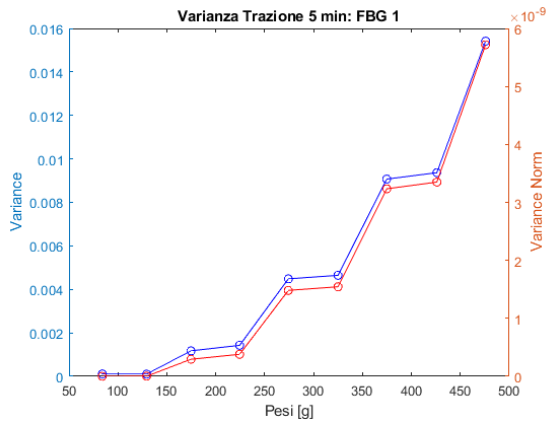
Tabella 6.11: Confronto dati Trazione 5 min: Fibra 2

Viene calcolata la deviazione standard dei valori di K_ϵ e λ_0 al fine di valutare la coerenza con i risultati precedentemente analizzati.

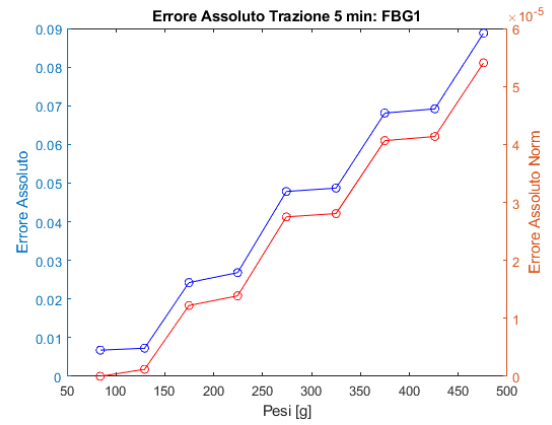
Trazione	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
FBG 1	1.4389e-05	0.0105
FBG 2	1.4424e-05	0.0095

Tabella 6.12: FBG1 FBG2 compressione: deviazione standard K_ϵ e λ_0

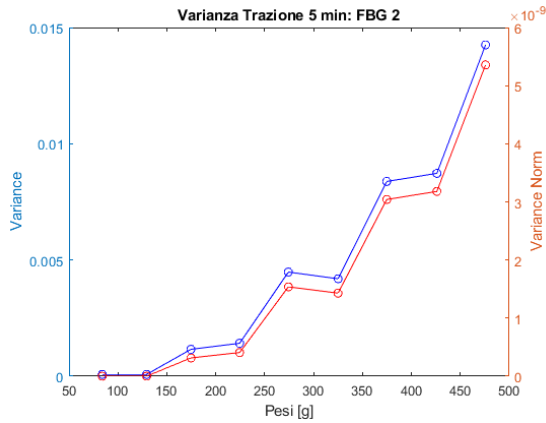
Vengono mostrato anche il valore della varianza per step e RMSE e RMSE per i valori normalizzati per valutare l'accuratezza dei dati.



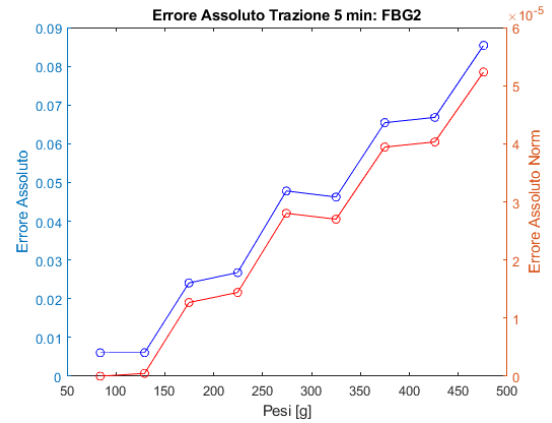
(a) Fibra 1: Trazione 5 min Varianza



(b) Fibra 1: Trazione 5 min Errore Assoluto



(c) Fibra 2: Trazione 5 min Varianza



(d) Fibra 2: Trazione 5 min Errore Assoluto

Figura 6.20: Trazione 5 min: varianza e errore assoluto FBG 1 e FBG 2

Trazione 5 min	RMSE [nm]	RMSE norm
FBG 1	0.05405	3.04471e-05
FBG 2	0.052214	2.98448e-05

Tabella 6.13: FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm trazione 5 min

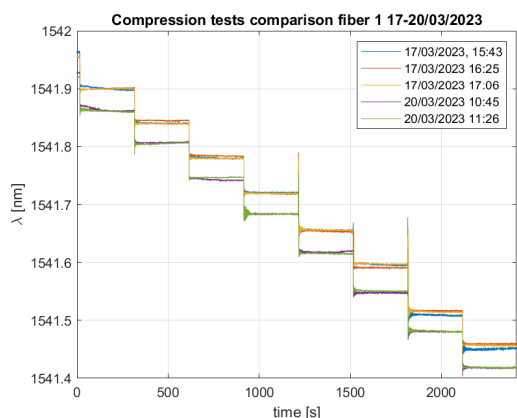
6.1.4 FBG sottoposto a compressione per lunghi periodi

Sempre considerando il tempo necessario per la stabilizzazione del provino quando sottoposto a deformazione meccanica pari a 5 minuti, si è eseguita un'analisi specifica sul caso di compressione meccanica. Sono state adottate le stesse metodologie e procedure di studio precedentemente descritte per le prove effettuate.

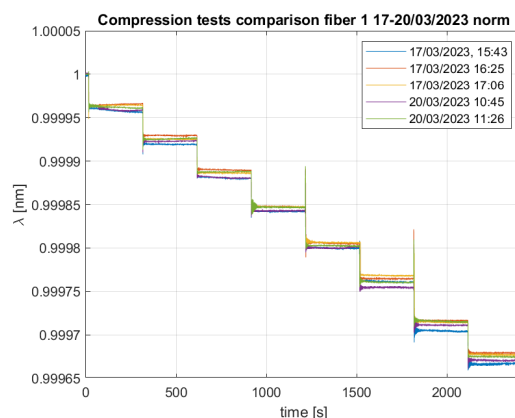
Mostrando la varianza per questi valori:

L'analisi delle prove di compressione, con un intervallo di tempo di stabilizzazione di 5 minuti tra l'aggiunta di un carico ed il successivo, conferma la sensibilità del sensore alle condizioni ambientali e la sua rapida stabilizzazione per la quale è sufficiente un intervallo di tempo di 1 minuto. Pertanto, possiamo affermare che il sensore risponde tempestivamente alle sollecitazioni meccaniche e segue il processo di stabilizzazione del provino alle vibrazioni meccaniche. La fibra ottica ha dimostrato di acquisire in modo preciso i valori delle prove a cui è stata sottoposta.

Inoltre, i risultati acquisiti presentano delle variazioni dei valori iniziali a di-

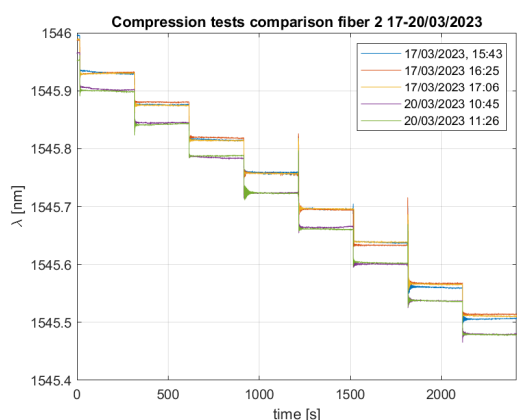


(a) Fibra 1: Compressione

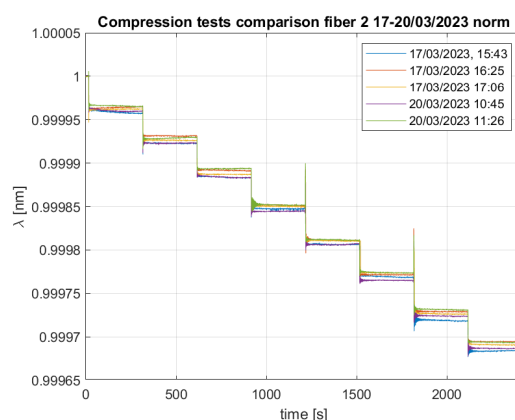


(b) Fibra 1: Compressione norm

Figura 6.21: Fibra 1: Confronto dati compressione 5 min

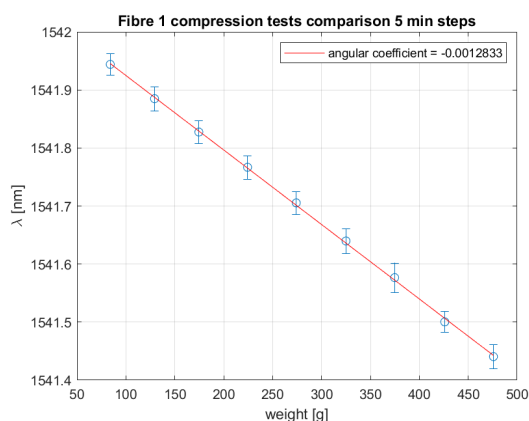


(a) Fibra 2: Compressione

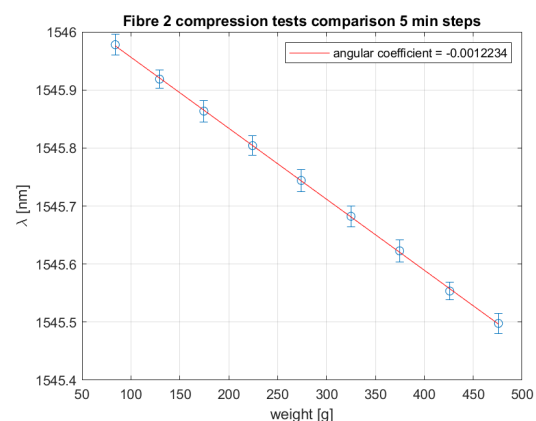


(b) Fibra 2: Compressione norm

Figura 6.22: Fibra 2: Confronto dati compressione 5 min



(a) Fibra 1: Compressione 5 min Taratura Statistica



(b) Fibra 2: Compressione 5 min Taratura Statistica

Figura 6.23: Calibrazione: compressione 5 min

stanza dei giorni nei quali sono state eseguite le prove, ma evidenziano comunque un andamento simile nel corso del tempo. La normalizzazione dei dati permette di eliminare le differenze iniziali, consentendo di evidenziare in modo più chiaro

FBG 1	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	-0.001297107	1540.0
2	-0.001274705	1542.066072
3	-0.001269833	1542.064102
4	-0.001295154	1542.03454
5	-0.001280058	1542.029721

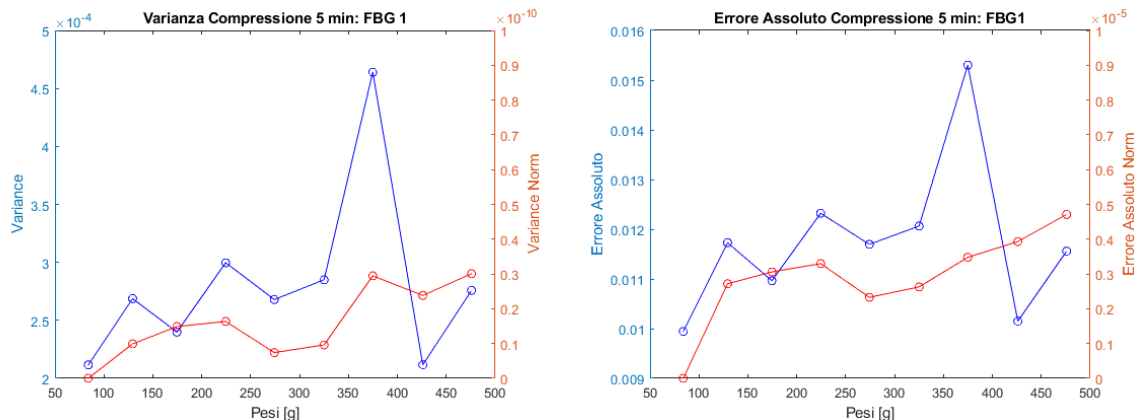
Tabella 6.14: Fibra 1: Confronto dati Trazione 5 min

FBG 2	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
1	-0.0012385	1546.09535
2	-0.0012179	1546.09048
3	-0.0012149	1546.08876
4	-0.0012329	1546.06326
5	-0.0012130	1546.05583

Tabella 6.15: Fibra 2: Confronto dati Trazione 5 min

Compressione	K_ϵ [nm/g]	λ_0 [nm]
FBG 1	1.2215e-05	0.0195
FBG 2	1.1522e-05	0.0179

Tabella 6.16: FBG1 FBG2 compressione 5 min: deviazione standard K_ϵ e λ_0



(a) Fibra 1: Compressione 5 min Varianza

(b) Fibra 1: Compressione 5 min Errore Assoluto

Figura 6.24: FBG1 Compressione 5 min: Varianza e Errore Assoluto

Trazione 5 min	RMSE [nm]	RMSE norm
FBG 1	0.014876	3.24614e-06
FBG 2	0.072908	4.72025e-05

Tabella 6.17: FBG1 FBG2: RMSE e RMSE norm compressione 5 min

l'andamento dei dati nel tempo che risulta coerente. Pertanto fattori ambientali, quali variazioni di temperatura o altre influenze esterne, influenzano la risposta del sensore, contribuendo alle differenze iniziali osservate.

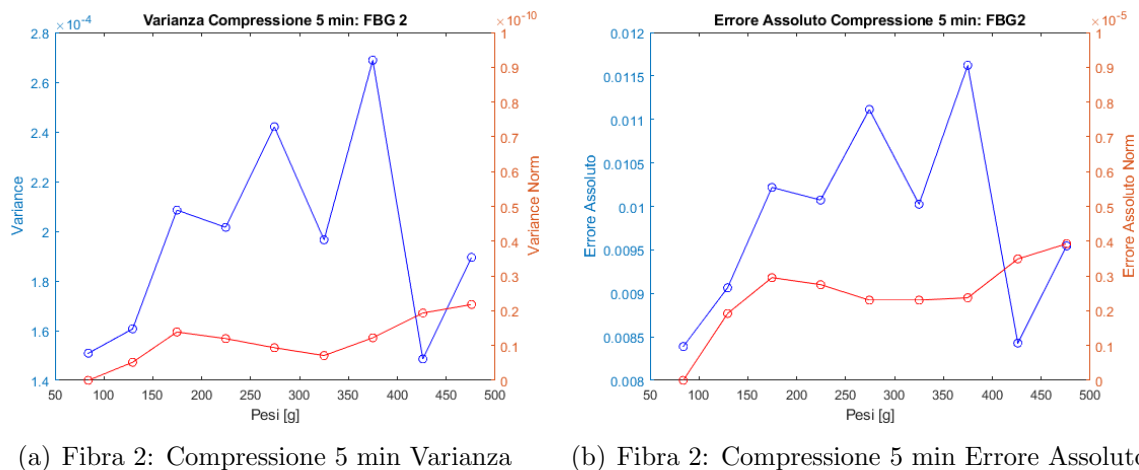


Figura 6.25: FBG2 Compressione 5 min: Varianza e Errore Assoluto

In conclusione, l'analisi delle prove di compressione e trazione con un intervallo di attesa di 5 minuti riafferma la sensibilità del sensore alle condizioni ambientali. Questi risultati sottolineano l'importanza di considerare e controllare attentamente le condizioni ambientali durante le misurazioni, al fine di ottenere dati accurati e ripetibili.

In generale, sia la fibra pre-caricata che quella non pre-caricata presentano un comportamento simile in risposta al carico meccanico. Inoltre, i valori della costante K_t , ovvero il coefficiente di proporzionalità tra la variazione della lunghezza d'onda e la deformazione meccanica, sono simili per entrambe le configurazioni. Questo risultato conferma una delle conclusioni degli studi di partenza [1], secondo la quale la differenza tra i due trattamenti delle fibre non è essenziale per ottenere una buona acquisizione ed elaborazione dei dati.

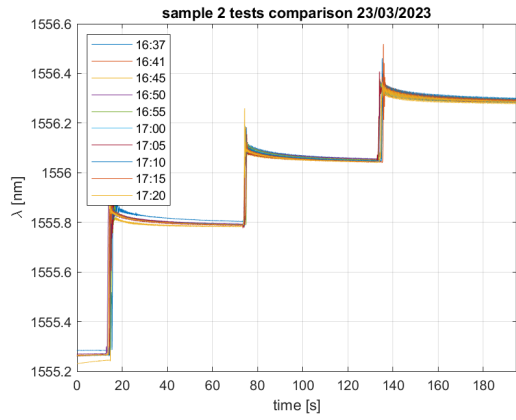
6.2 Secondo provino

Riguardo alle prove statiche di risposta al carico meccanico applicato, è stato condotto uno studio aggiuntivo che ha coinvolto la modifica del materiale di supporto e del metodo di adesione. Le stesse analisi eseguite nello studio precedente sono state ripetute, con un intervallo di tempo tra l'applicazione di un carico e l'altro di 1 minuto, al fine di osservare come la fibra ottica risponda alle stesse sollecitazioni in presenza di diverse condizioni al contorno.

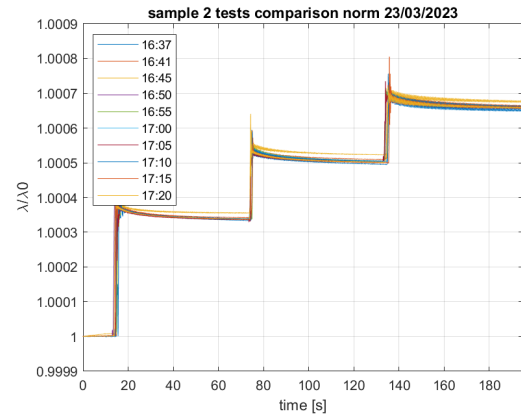
In particolare, per questo studio è stato utilizzato un provino realizzato in materiale in fibra di carbonio, e come metodo di incollaggio è stata impiegata una resina commerciale, a differenza della resina utilizzata nello studio precedente. Il materiale utilizzato risulta essere più sottile e presenta una minore rigidità rispetto al composito in fibra di carbonio utilizzato in precedenza.

Il provino risulta essere sottile e poco rigido e quando subisce una forza si deforma maggiormente rispetto alla prima configurazione studiata. Infatti dal grafico si può notare come varia la lunghezza raggiungendo con più fatica una situazione di stazionarietà.

il provino risulta essere più flessibile, pertanto porta ad una minore precisione nella raccolta dati. per quantificare questo valore si è fatta una media delle varianze che fanno riferimento all'oscillazione dei dati quando si va a posizionare un carico sul provino.

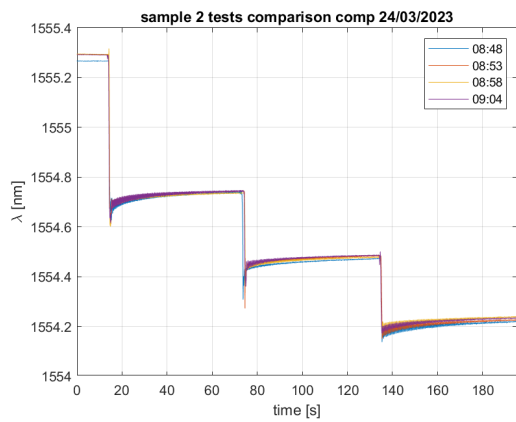


(a) Trazione

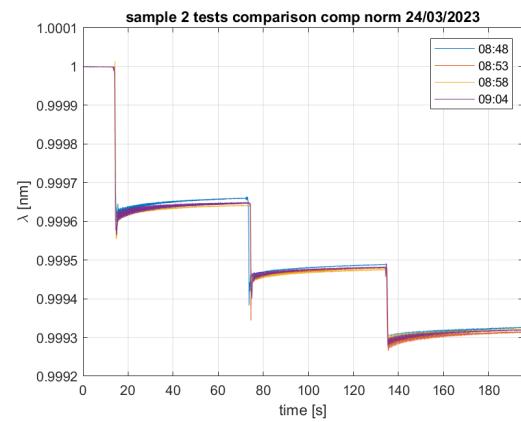


(b) Trazione norm

Figura 6.26: Secondo provino: Trazione Confronto dati



(a) Compressione



(b) Compressione norm

Figura 6.27: Secondo provino: Compressione Confronto dati

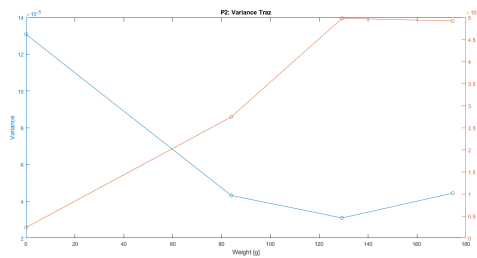


Figura 6.28: Varianza trazione secondo provino

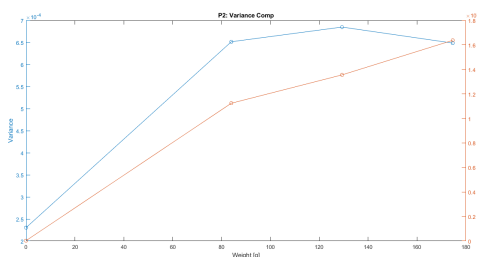


Figura 6.29: Varianza compressione secondo provino

Inoltre un fattore rilevante è il metodo di incollaggio proposto in questa configurazione. Infatti, la colla non rimane rigida come la resina epossidica una volta indurita, andando così a non tenere fermo il sensore ottico al materiale allo stesso modo della resina. Questo comportamento della colla porta ad un'ulteriore incertezza sui dati raccolti, mostrando quindi che la configurazione proposta porta incertezza.

6.3 Risposta dinamica

In aggiunta alle prove statiche, sono state condotte prove dinamiche al fine di valutare la risposta del sensore FBG all'applicazione di una forza impulsiva sul provino. Tali prove hanno permesso di studiare come vengono visualizzati i dati rilevati e acquisiti dall'FBG in presenza di una sollecitazione dinamica.

Nell'ambito di questo studio, sono stati impiegati provini sui quali sono stati applicati carichi con l'obiettivo di generare impulsi. La scelta di condurre questa ricerca è stata motivata dalla necessità di valutare la capacità dell'FBG di misurare e trasmettere la lunghezza d'onda quando sottoposta a una forza impulsiva. Di conseguenza, sono state effettuate un totale di otto prove, in cui sono stati generati rispettivamente carichi di 1N, 2N, 3N e 4N. I dati ottenuti sono stati successivamente acquisiti al fine di analizzare le oscillazioni rilevate.

Sono state variate le condizioni al contorno, andando a variare la distanza tra il vincolo su quale è stata fissata la lastra e il punto in cui viene applicata la forza, rispettivamente di 13,5 cm, 16 cm e 18,5 cm. Per ciascuna configurazione, sono state condotte prove multiple con l'applicazione delle forze 1N, 2N, 3N e 4N. Ogni prova è stata ripetuta due volte per aumentarne la precisione.

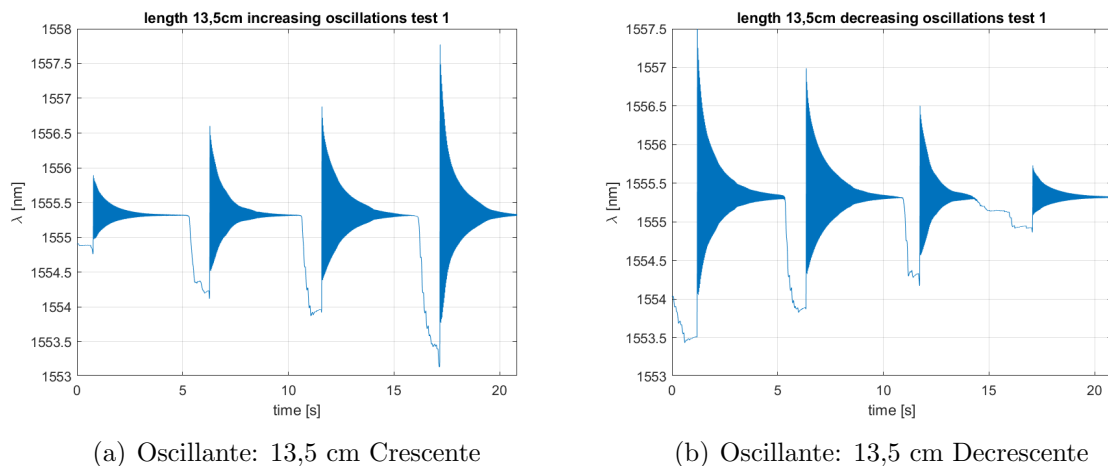
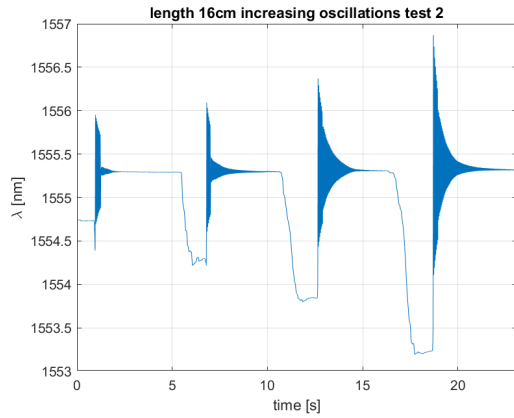
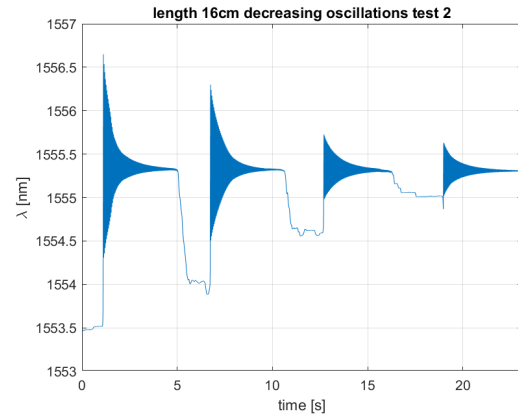


Figura 6.30: Acquisizione dati oscillante 13,5 cm

Lo scopo delle analisi condotte era quello di valutare la capacità del sensore nell'acquisire in modo adeguato le deformazioni di tipo dinamico, andando oltre la capacità di rilevamento limitata alle sole deformazioni statiche. I risultati ottenuti dimostrano chiaramente che la fibra ottica è in grado di rilevare con precisione le variazioni causate dallo smorzamento in diverse situazioni, al variare della forza applicata sul provino. I risultati ottenuti, evidenziando la versatilità e l'efficacia del sensore nell'acquisizione di deformazioni di tipo dinamico, aprono nuove prospettive di ricerca per approfondire ulteriormente il contributo di tale componente nelle configurazioni analizzate.

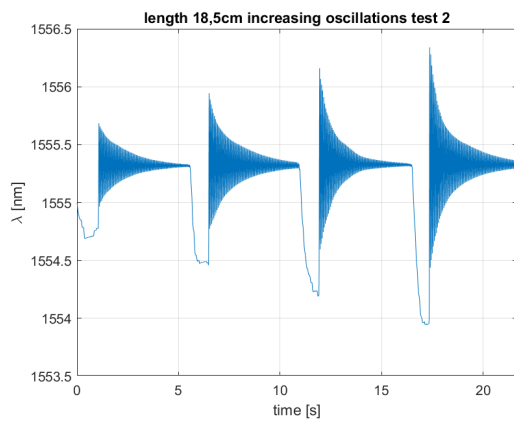


(a) Oscillante: 16 cm Crescente

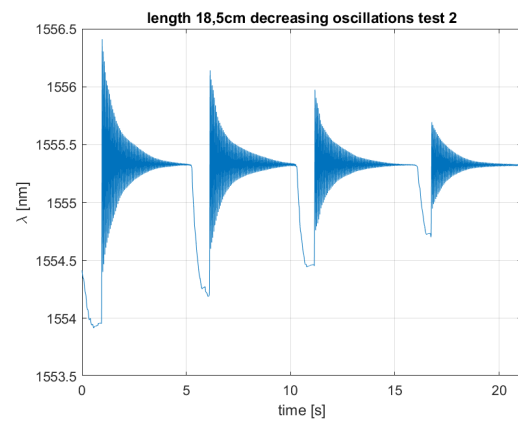


(b) Oscillante: 16 cm Decrescente

Figura 6.31: Acquisizione dati oscillante 16 cm



(a) Oscillante: 18 cm Crescente



(b) Oscillante: 18 cm Decrescente

Figura 6.32: Acquisizione dati oscillante 18 cm

6.4 Risultati

Il seguente studio porta a diverse conclusioni.

L'analisi condotta ha permesso di determinare i valori della costante di proporzionalità K_ϵ per la deformazione meccanica, sia nel caso di deformazione per compressione che per trazione, e il valore della quota iniziale della lunghezza d'onda λ_0 . I valori ottenuti per le diverse prove in media sono mostrati in tabella:

Trazione 1 min	$K_{\epsilon mean}$ [nm/g]	$\lambda_{0 mean}$ [nm]
FBG 1	0.001248067	1542.11928
FBG 2	0.001220221	1546.135208

Tabella 6.18: Trazione: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$

Dall'analisi condotta sulla prima configurazione, è emerso innanzitutto che le condizioni ambientali esterne influenzano la quantità iniziale della lunghezza d'onda λ_0 , generando un diverso valore di partenza per l'acquisizione dei dati. Tuttavia, una volta normalizzati i dati, si è osservata coerenza e ripetibilità nei valori acquisiti, evidenziando che l'effetto della deformazione meccanica causata dall'applicazione dei pesi è comparabile tra le diverse prove. Lo studio per determinare l'intervallo di

Trazione 5 min	$K_{\epsilon mean}$ [nm/g]	$\lambda_{0 mean}$ [nm]
FBG 1	0.001256709	1542.109524
FBG 2	0.001226801	1546.130979

Tabella 6.19: Trazione 5 min: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$

Compressione 1 min	$K_{\epsilon mean}$ [nm/g]	$\lambda_{0 mean}$ [nm]
FBG 1	-0.001252689	1542.050385
FBG 2	-0.001198473	1546.078274

Tabella 6.20: Compressione: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ e $\lambda_{0 mean}$

Compressione 5 min	$K_{\epsilon mean}$ [nm/g]	$\lambda_{0 mean}$ [nm]
FBG 1	-0.001283371	1542.053213
FBG 2	-0.001223441	1546.078735

Tabella 6.21: Compressione 5 min: Coefficienti $K_{\epsilon mean}$ [nm/g] e $\lambda_{0 mean}$ [nm]

tempo necessario per raggiungere la stabilità ha dimostrato che un minuto di attesa è sufficiente, poiché un intervallo di cinque minuti tra l'applicazione di un carico e l'altro non ha portato a differenze sostanziali nei valori acquisiti. Infine, è stato effettuato un confronto tra le due configurazioni, che consistono nell'applicazione delle due fibre ottiche sullo stesso materiale mediante lo stesso metodo di fissaggio, ma differiscono per il fatto che una fibra ottica è stata sottoposta a pre-tensionamento, mentre l'altra è stata fissata sulla lastra di materiale composito. I risultati hanno evidenziato che non esiste una differenza sostanziale tra i dati raccolti nelle due configurazioni, indicando che entrambe le configurazioni possono essere utilizzate con buoni risultati in termini di precisione dei dati e ripetibilità.

Le analisi condotte sul secondo campione hanno consentito un confronto con la configurazione precedente, introducendo una variazione nel tipo di materiale utilizzato per l'incollaggio. Nel primo caso, i due sensori ottici sono stati fissati su una lastra composita in carbonio utilizzando una resina epossidica, mentre nel secondo caso è stata impiegata una resina commerciale come materiale di incollaggio. I due campioni mostrano un comportamento leggermente diverso: sebbene entrambe le configurazioni permettano l'acquisizione dei dati, la prima configurazione offre una maggiore precisione nella rilevazione. Questo è evidenziato mediante l'analisi della varianza dei dati raccolti all'interno di un intervallo di stabilità, dove si osserva che i dati acquisiti con la prima configurazione presentano un ordine di varianza inferiore, indicando una maggiore accuratezza. Il secondo campione, a causa delle sue specifiche configurazioni di supporto e metodo di incollaggio del sensore alla fibra, mostra una minore stabilità.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi sperimentali, è possibile concludere che tra le due configurazioni prese in esame, la prima, in cui è stato utilizzato come metodo di incollaggio la resina epossidica con indurente, risulta essere la più adatta per il tipo di lavoro considerato. Questa configurazione ha mostrato prestazioni superiori rispetto alla seconda configurazione, evidenziando una maggiore stabilità e affidabilità nel contesto specifico delle nostre indagini.

Per quanto riguarda l'analisi della risposta del sensore ottico alle deformazioni di tipo dinamico, lo studio ha evidenziato una buona capacità di acquisizione dei dati.

Provini	Trazione	Compressione
1° Configurazione		
FBG 1	1.28E-06	1.40E-06
FBG 2	1.09E-06	1.02E-06
2° Configurazione	1.49E-05	1.94E-05

Tabella 6.22: Varianza confronto configurazioni

Infatti, la fibra ottica ha dimostrato una buona sensibilità alle oscillazioni, riuscendo ad acquisire in modo efficace le variazioni quando il sistema è sottoposto a forze non statiche. Ciò indica che il sensore ottico è in grado di rilevare e registrare in modo adeguato le dinamiche del sistema in esame.

Capitolo 7

Analisi Termo-Meccaniche

In questo capitolo viene studiato e mostrato tramite risultati di prove sperimentali l'effetto termo-meccanico sul sensore FBG. Dalle analisi scritte in precedenza si è valutato come la configurazione più promettente tra quelle mostrate sia quella di FBG pre-tensionata fissata su una lastra di materiale in composito in fibra di carbonio tramite l'uso di resina epossidica. La configurazione con queste caratteristiche è stata infatti sottoposta a prove meccaniche e termiche disaccoppiate in modo da valutare la risposta del sensore ai singoli stimoli di temperatura e deformazione meccanica. Lo step successivo risulta quindi considerare il campione con le caratteristiche descritte e sottoporlo a sollecitazioni termiche e meccaniche contemporaneamente.

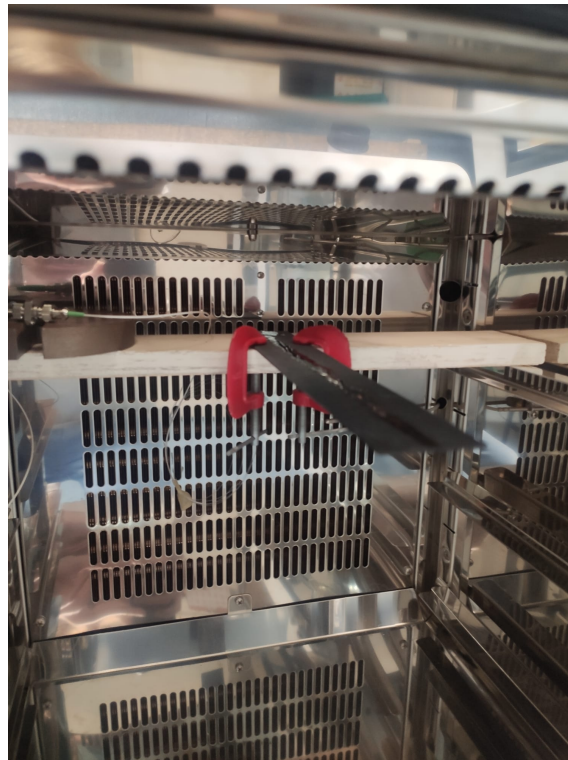


Figura 7.1: Banco di Prova analisi termo-meccaniche

Per fare questo si è fissato il campione tramite l'aiuto di supporti all'interno della camera climatica e su di esso sono stati appoggiati una serie di pesi per creare una deformazione meccanica a trazione al campione. Come mostrato dalla teoria infatti la dipendenza della lunghezza d'onda di Bragg, il segnale in uscita dal sensore, può essere scritta come dovuta da due contributi, uno termico ed uno meccanico.

$$\Delta\lambda = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (7.1)$$

Lo scopo è quello di valutare il disaccoppiamento tra la componente termica e quella meccanica, pertanto valutare la linearità dei dati acquisiti ed estrarre i valori della costante di proporzionalità meccanica. Per compiere questo si è utilizzato:

- Camera Climatica
- Serie di pesi
- Interrogatore
- Software SmartSoftSSI
- Supporti

L'analisi di raccolta dei dati è avvenuta applicando una serie progressiva di pesi sul supporto sopra il quale è stata fissata la fibra posto all'interno della camera climatica a temperatura costante, ripetendo il ciclo di carico meccanico a diverse temperature. I dati raccolti contengono informazioni riguardanti sia il contributo meccanico che termico, per separare i due contributi si è usato il seguente procedimento. In primo luogo si sono considerati i risultati ricavati dalle analisi precedenti, in particolare si riprende il valore delle costanti di proporzionalità ricavate nell'analisi termica. Per quanto riguarda il campione evidenziato, segnato anche come C4 nel corso delle analisi, si sono ricavati i seguenti valori di K_{Tmean} e λ_{0mean}

K_{Tmean} nm/°C	λ_{0mean} [nm]
0.01140	1541.4787

Tabella 7.1: Valori medi K_T e λ_0 C4

Mediante l'utilizzo della costante K_T per ogni intervallo di temperatura è possibile valutare il solo contributo termico presente nella lunghezza d'onda:

$$\Delta\lambda_T = K_T\Delta T \quad (7.2)$$

La $\Delta\lambda_T$ misurata in maniera teorica risulta essere dipendente solo della temperatura. Pertanto, per poter valutare il contributo della deformazione meccanica sulla lunghezza d'onda si sottrae al valore della lunghezza d'onda totale misurata quella calcolata grazie al coefficiente di dipendenza termico K_T . Il contributo meccanico risulta essere inferiore rispetto a quello termico.

$$K_\epsilon\epsilon = \Delta\lambda - K_T T \quad (7.3)$$

In questo caso si fa un'ipotesi per la quale si suppone che il contributo della lunghezza d'onda di deformazione corrisponda al contributo dovuto al peso applicato, così da poter legare direttamente il valore dei pesi al segnale studiato.

$$K_m m = \lambda - K_T T \quad (7.4)$$

$$K_m = \frac{(\lambda - K_T T)}{m} \quad (7.5)$$

7.1 Analisi Preliminare

Una prima analisi effettuata è stata compiuta utilizzando 4 carichi da 100 g per 3 temperature diverse. I carichi sono stati applicati in maniera consecutiva mantenendo la temperatura in camera climatica costante, per i tre valori di temperatura considerati nello studio. Tra l'applicazione di un carico ed il successivo, si è aspettato un intervallo di tempo di 10 minuti, necessario per acquisire i dati in una situazione di stazionarietà.

Temperature [°C]	Pesi applicati [g]
-20	0,100,200,300,400
0	0,100,200,300,400
20	0,100,200,300,400

Tabella 7.2: Pesi applicati a temperatura costante

I dati sono stati acquisiti e diagrammati in funzione del tempo.

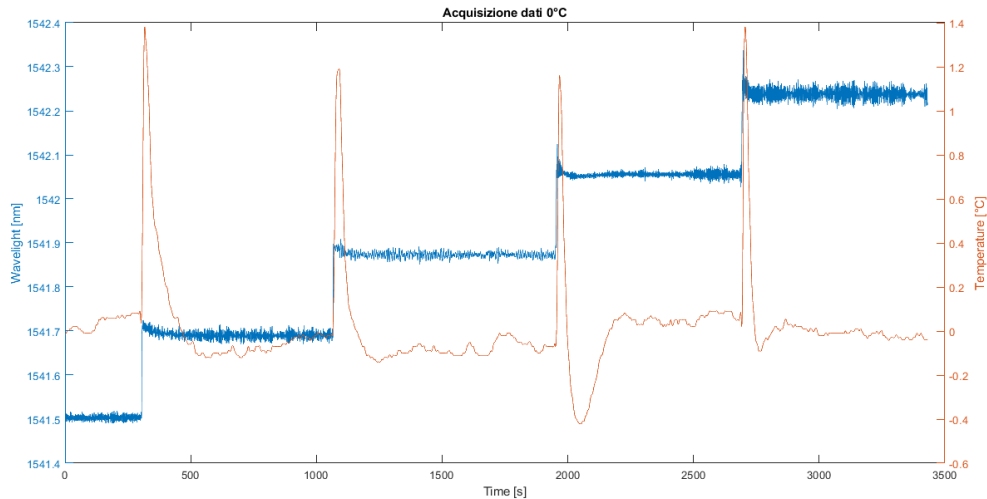


Figura 7.2: Acquisizione dati $T = 0^\circ\text{C}$

Dopo aver acquisito i dati, sono stati elaborati considerando un intervallo di tempo in cui i valori risultano essere stabili. Calcolato il contributo termico associato alla variazione di lunghezza d'onda è stato dunque sottratto dal valore complessivo della della lunghezza d'onda acquisito. Questa procedura ha consentito la visualizzazione del contributo della deformazione meccanica sul segnale generato dal sensore FBG. L'operazione di sottrazione permette di evidenziare il solo contributo dell'effetto meccanico. Per ogni intervallo definito dal carico applicato, sono stati dunque calcolati i valori medi della lunghezza d'onda. Questi valori medi sono stati rappresentati in un diagramma in cui l'asse delle ascisse rappresenta i carichi applicati in grammi [g] e l'asse delle ordinate rappresenta la lunghezza d'onda in nanometri [nm].

La visualizzazione mostra un andamento crescente per le tre temperature considerate. In particolare, si possono individuare alcuni punti anomali all'inizio e alla fine dei test, mentre nella regione centrale si osserva una buona linearità dei risultati. Poiché stiamo considerando il contributo meccanico, l'obiettivo è ottenere

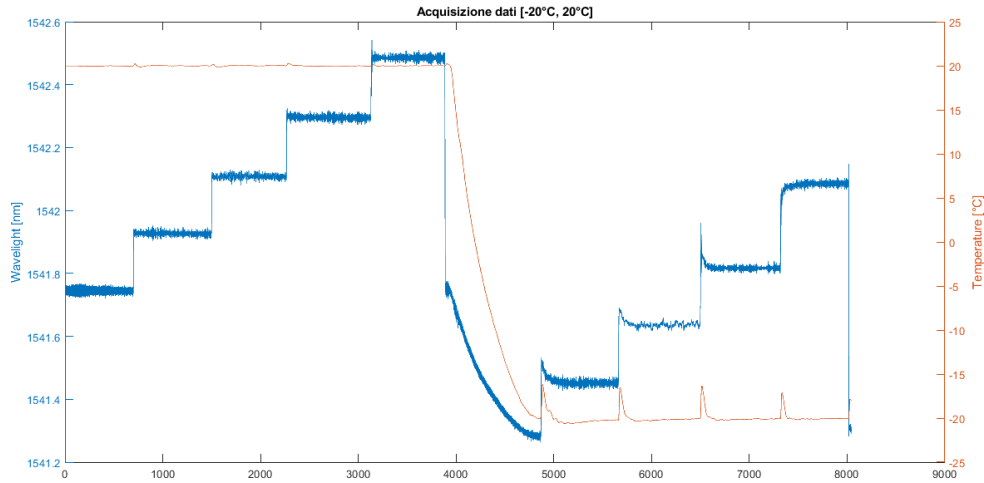


Figura 7.3: Acquisizione dati -20°C,20°C

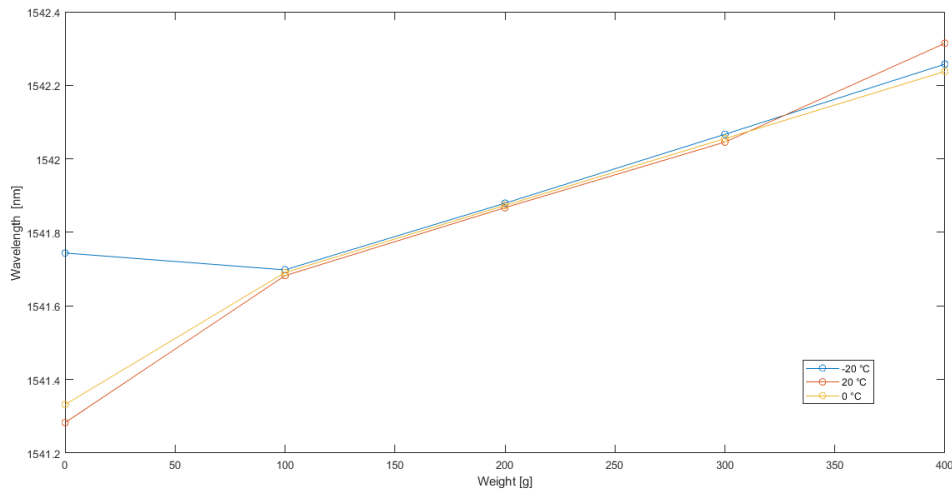


Figura 7.4: Valori medi λ_m - Peso [-20°C;20°C]

un'interpolazione lineare tra i punti medi al fine di valutare il coefficiente K_m , il quale corrisponde alla pendenza della retta che interpola i punti.

La retta generata che attraversa i punti medi calcolati risulta essere un'approssimazione accurata nelle regioni in cui è stato applicato il carico. Tuttavia, quando il sensore rimane privo di carichi, si osservano maggiori fluttuazioni dei valori rilevati. Dalle analisi viene valutato un valore di $K_m = 0.0020$ nm/g. Le analisi risultano promettenti, i valori outlier possono essere dovuti a diversi fattori. Per quanto riguarda il punto a 20°C con carico di 400 g può essere dovuto ad effetti viscosi. In generale, le variazioni possono essere dovute a flussi turbolenti presenti in camera e vibrazioni eccessive del modello sottoposto all'analisi.

7.2 Analisi estesa

Lo studio condotto ha fornito una panoramica preliminare sull'analisi di disaccoppiamento termo-meccanico del sensore FBG, considerando simultaneamente variazioni

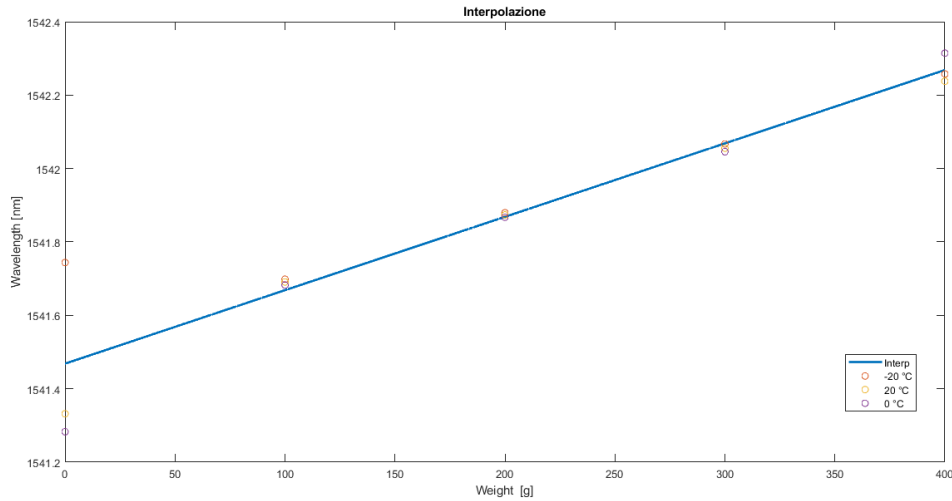


Figura 7.5: Interpolazione λ_m - Peso [-20°C;20°C]

di temperatura e deformazioni meccaniche. Pertanto, è stata presa la decisione di ripetere l'analisi estendendo il range di temperatura. Per mantenere la coerenza degli studi, è stato scelto di utilizzare lo stesso intervallo di temperatura utilizzato nell'analisi termica precedente, ovvero da -40°C a 50°C con incrementi di 10°C tra le temperature. Inoltre, è stato deciso di aumentare la quantità di carico applicata, partendo da una condizione di carico zero fino a raggiungere un valore di 400 g, aggiungendo incrementi di 50 g ad ogni passo. Lo schema e il processo di acquisizione ed elaborazione dei dati sono stati gli stessi utilizzati in precedenza. Lo studio è stato condotto in giorni diversi a causa del tempo necessario per la raccolta dei dati. L'ampliamento dello studio ha consentito di ottenere una visione più completa del fenomeno in queste specifiche condizioni.

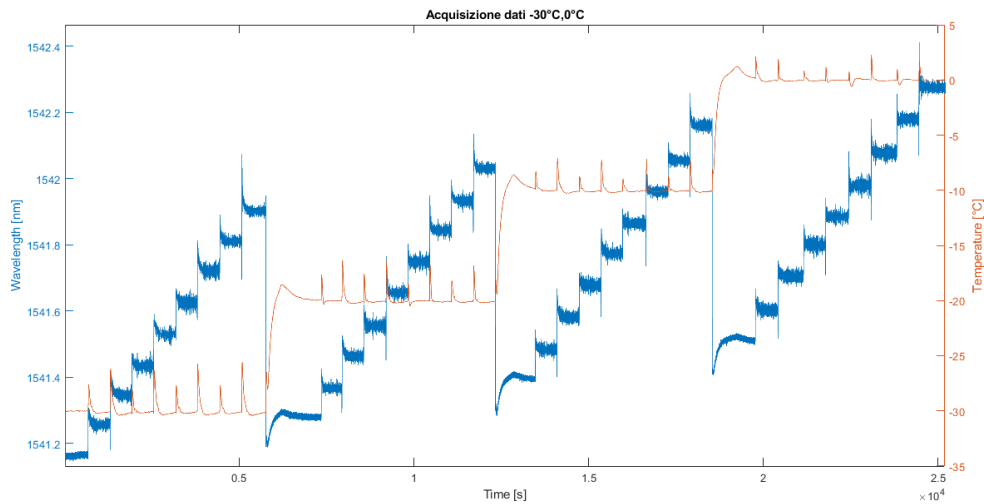


Figura 7.6: Acquisizione dati [-30°C;0°C]

Mediante il processo di analisi e sottrazione del contributo termico al fine di isolare l'influenza della deformazione meccanica sui campioni, sono stati ottenuti i seguenti valori medi della lunghezza d'onda per ciascuna temperatura considerata. Il grafico

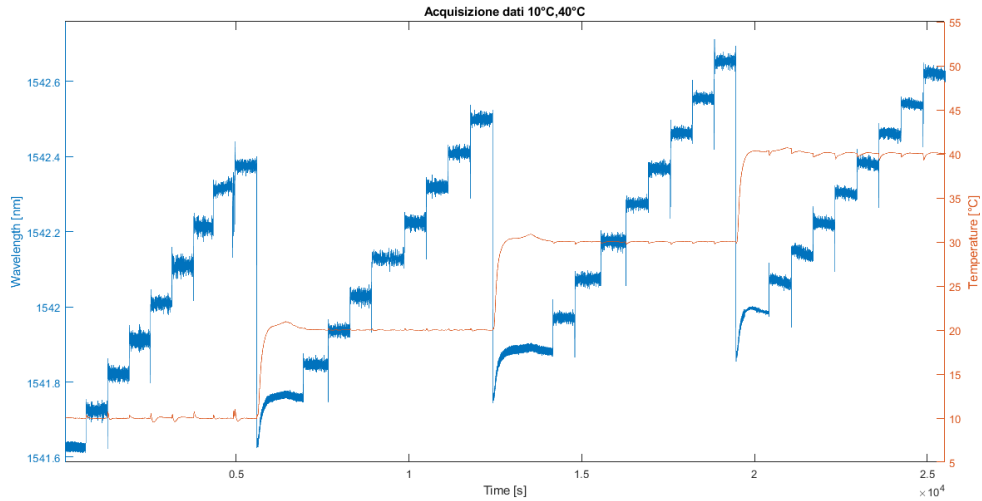


Figura 7.7: Acquisizione dati [10°C;40°C]

riporta sull'asse delle ascisse i carichi utilizzati per ottenere la deformazione meccanica, mentre sull'asse delle ordinate sono rappresentati i valori della lunghezza d'onda. Tale procedura è stata ripetuta per ogni intervallo di temperatura.

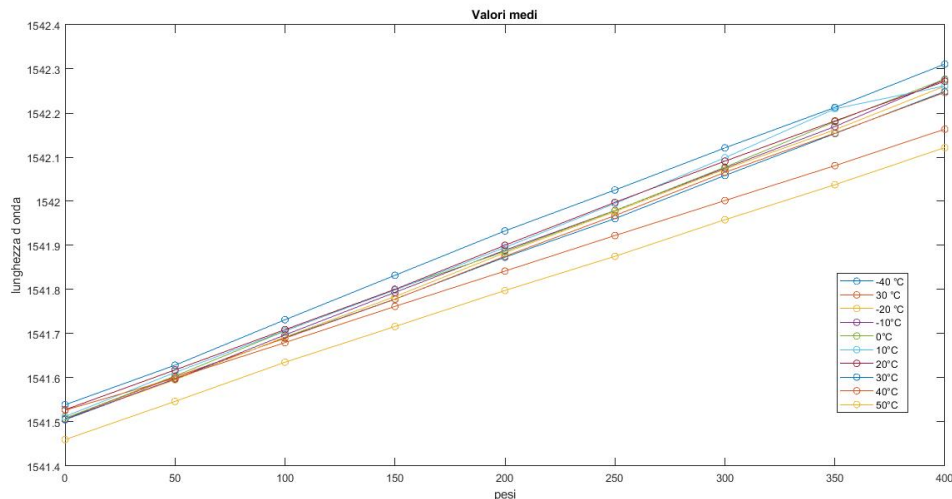


Figura 7.8: Valori medi λ_m - Peso [-40°C;50°C]

Successivamente, sono stati presi in considerazione i valori medi della lunghezza d'onda ottenuti per ogni step di temperatura analizzato, mantenendo costante il carico applicato. Sulla base di tali valori, è stato possibile tracciare una retta interpolante che connette i punti ottenuti sperimentalmente.

Il coefficiente angolare della retta di regressione rappresenta il valore del coefficiente di proporzionalità K_ϵ relativo al sensore FBG. Nel nostro caso, il valore ottenuto è $K_\epsilon = 0.00184$. L'analisi condotta ha permesso quindi di calcolare il coefficiente di dipendenza della deformazione meccanica. Questo risultato è risultato essere significativo in quanto è stato possibile separare il contributo termico e valutare esclusivamente la dipendenza dovuta alla deformazione meccanica. In particolare, si è osservato che tale dipendenza è lineare considerando un range di temperature elevato, consentendo di determinare con precisione il coefficiente di dipendenza. I risultati ottenuti sono promettenti e confermano le condizioni teoriche descritte in

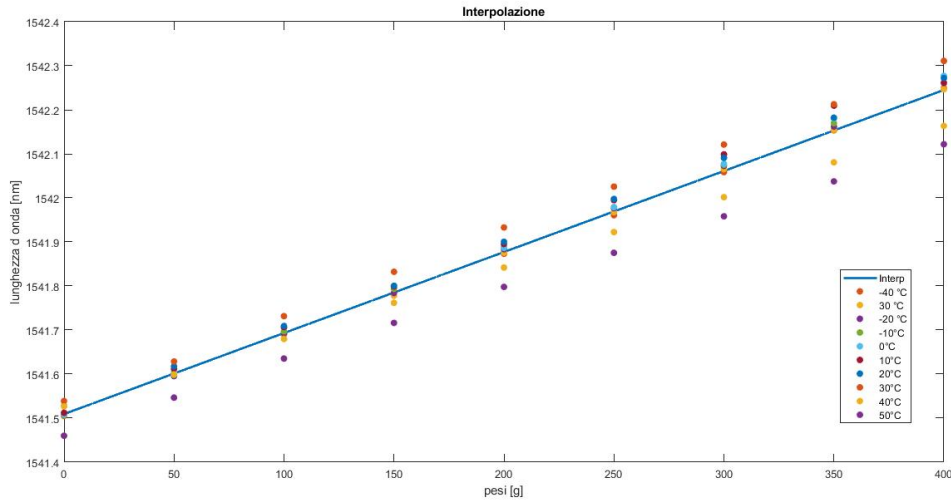


Figura 7.9: Interpolazione λ_m - Peso [-40°C;50°C]

precedenza.

Effettuando un confronto tra i due studi, considerando attentamente la configurazione e le caratteristiche sperimentali, si può osservare una significativa somiglianza tra i coefficienti di proporzionalità calcolati. Tuttavia, emerge una diminuzione del valore ottenuto nel secondo studio rispetto al primo. Tale differenza può essere attribuita a possibili variazioni nelle condizioni sperimentali.

- [-20C; 20C] : $K_m = 0.0020 \text{ nm/g}$
- [-40C; 50C] : $K_m = 0.0018 \text{ nm/g}$

In generale, osserviamo che tra i due coefficienti calcolati nelle diverse prove si riscontra un errore relativo di circa il 10%. Nel caso della seconda prova, condotta su un intervallo di temperatura più ampio, ma considerando solo gli stessi valori di temperatura utilizzati nella prova precedente, il valore ottenuto è di circa $K_m = 0.001891$. Questo valore risulta inferiore rispetto alla considerazione dell'intero range di temperatura, e si avvicina maggiormente al risultato ottenuto nella prima prova.

Durante la fase di interpolazione, emerge un aspetto significativo: i valori associati a temperature più elevate mostrano una deviazione maggiore rispetto alla retta di interpolazione, mentre per temperature più basse si registra una maggiore stabilità dei dati. Questo comportamento è evidenziato nel grafico che rappresenta la differenza in valore assoluto tra le lunghezze d'onda misurate al variare della temperatura e i corrispondenti valori della retta di interpolazione. È osservabile un aumento dell'errore assoluto all'aumentare della temperatura.

Questo fenomeno suggerisce l'esistenza di una maggiore incertezza nella stima delle lunghezze d'onda per le temperature più elevate, mentre si osserva una maggiore stabilità dei dati alle temperature più basse. Il maggiore discostamento da questi valori è probabilmente dovuto ad effetti viscosi della resina nel momento in cui ci si sposta verso temperature di transizione.

Come evidenziato nello studio precedente sull'analisi delle prestazioni del sensore termico, si è constatato che i valori del coefficiente K_T possono variare in un intervallo di valori, a seconda della precisione con cui sono stati acquisiti i dati relativi

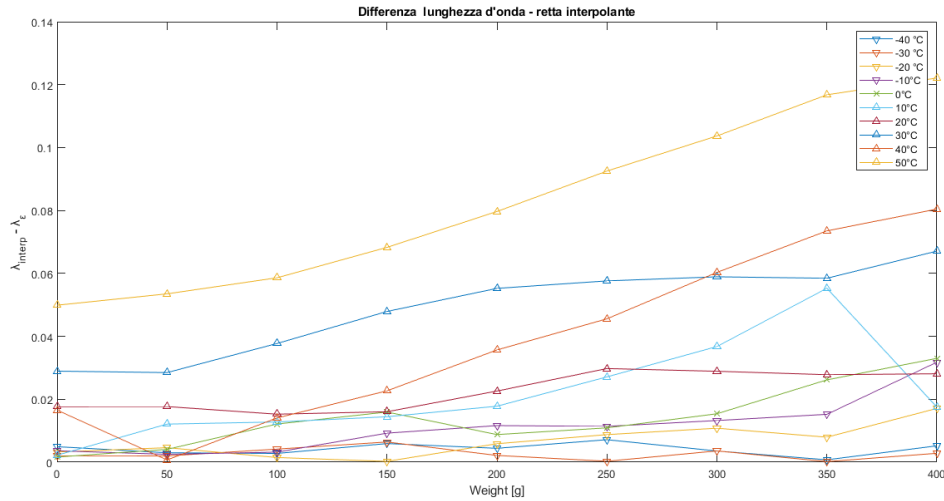


Figura 7.10: Errore assoluto valori λ - retta interpolante

alla risposta della lunghezza d'onda al variare della sola temperatura. Nel caso specifico dello studio condotto su un sensore ottico pre-tensionato fissato su una lastra di composito in fibra di carbonio mediante resina epossidica (C4), si è osservato che il valore del coefficiente K_T non presentava variazioni significative, mostrando quasi un valore univoco.

- $K_{Tmean} = 0.01139 \text{ nm}/^\circ\text{C}$
- $K_{Tmin} = 0.01138 \text{ nm}/^\circ\text{C}$
- $K_{Tmax} = 0.01139 \text{ nm}/^\circ\text{C}$

Utilizzando i diversi valori di K_T e confrontando i dati ottenibili tra il valore massimo e il valore minimo del coefficiente, si sono ottenuti i seguenti valori corrispondenti per K_m :

- $K_{mmax} = 0.001823693 \text{ nm/g}$
- $K_{mmin} = 0.001823694 \text{ nm/g}$

Si è osservata una differenza tra i due valori di K_m pari a $2.07\text{e-}9$, ovvero un discostamento molto piccolo. Infatti, come commentato in precedenza, la configurazione C4 è risultata essere molto precisa e stabile nell'acquisizione dei dati, pertanto porta a valori quasi univoci nel momento in cui si hanno sollecitazioni meccaniche oltre a quelle termiche. In conclusione si può dunque affermare che il disaccoppiamento dei contributi relativi a fattori termici e deformazioni meccaniche è stato effettuato analiticamente con buoni risultati, rendendo visibile l'influenza di entrambi i fattori e potendo definire la costante di proporzionalità K_ϵ .

Capitolo 8

Conclusioni

Lo studio condotto ha incluso un ampio numero di prove finalizzate all'analisi delle funzionalità e delle capacità del sensore FBG in diversi contesti. In particolare, sono state esaminate le capacità del sensore nell'utilizzo delle fibre ottiche come strumento di rilevamento sia per la temperatura che per la deformazione meccanica. Inoltre, è stato investigato il modo in cui il sensore può misurare entrambi i parametri simultaneamente, cercando di disaccoppiare le relative misurazioni. In questa ricerca, sono state approfondite le capacità della fibra ottica come sensore di temperatura mediante l'utilizzo di otto diverse configurazioni sperimentali. In queste configurazioni, sono state variate le caratteristiche del materiale di supporto della fibra, il metodo di adesione tra la fibra e il materiale di supporto, nonché il tensionamento della fibra stessa e le relative influenze sulla risposta del sensore. Le otto configurazioni proposte per lo studio rappresentano una combinazione dei diversi metodi e materiali presi in considerazione, e per ciascuna di queste configurazioni sono state analizzate le capacità del sensore come misuratore di temperatura. L'obiettivo dello studio è stato quello di fornire un'ulteriore comprensione delle proprietà di ciascuna configurazione, mettendo in evidenza l'influenza delle condizioni ambientali sul sensore, valutarne le prestazioni in termini di precisione nella risposta e capacità di acquisizione dei dati, la stabilità del sensore, l'affidabilità delle misure ottenute e la ripetibilità dei risultati. Inoltre, la ricerca è stata arricchita dal confronto con studi precedenti che hanno coinvolto sei delle configurazioni analizzate. Ciò ha consentito di studiare l'effetto dell'invecchiamento dei materiali usati per l'incollaggio sul comportamento del sensore ottico. Le analisi hanno incluso anche l'applicazione della fibra ottica come sensore di deformazione meccanica, focalizzandosi sulla risposta del sensore alle deformazioni applicate alla lastra che funge da supporto per la fibra ottica. Sono state studiate tre diverse configurazioni, in cui sono state variate la tensione della fibra e il materiale utilizzato per l'adesione, al fine di valutare la qualità della risposta del sensore ottico nel rilevare le deformazioni, sia statiche che dinamiche.

Attraverso lo studio condotto sulle capacità del sensore nell'individuare variazioni di temperatura, considerando le diverse configurazioni sperimentali, è stato possibile valutare quale di esse avesse prestazioni migliori rispetto alle restanti. Tra tutte le configurazioni prese in considerazione, quella che ha mostrato le migliori performance è stata quella della fibra ottica pre-tensionata fissata tramite resina epossidica su una lastra di composito in fibra di carbonio, indicata nel lavoro come configurazione (C4). Questa configurazione ha dimostrato una notevole precisione nella risposta alle variazioni di temperatura, evitando ambiguità nei dati raccolti e fornendo risultati quasi univoci. Si è rilevato che questa configurazione è stata la più precisa

e ripetibile, tuttavia, la misurazione della temperatura mediante conversione può comportare un errore di circa 2.5°C rispetto alla temperatura misurata dalla sonda PT100. Come evidenziato nel corso dello studio però, il sensore PT100 risulta essere più adatto a misurazioni ambientali, mentre il sensore FBG porta all'acquisizione di valori più puntuali. Questo fattore rimane rilevante nel momento in cui all'interno della camera climatica sono presenti flussi d'aria necessari per il funzionamento dello strumento. Pertanto l'errore può essere dovuta ad una incertezza dovuta, oltre che dalla configurazione proposta, ma anche dagli strumenti utilizzati come riferimenti. Le analisi condotte sull'invecchiamento delle proprietà adesive nelle diverse configurazioni e il loro impatto sulle prestazioni del sensore ottico hanno evidenziato un degradamento generale delle proprietà del sensore. Questo è possibilmente dovuto a seguito dell'esposizione a temperature elevate che hanno subito le diverse prove nei lavori precedenti. In particolare, si è osservato che le colle utilizzate hanno subito un effetto negativo dovuto alla presenza di umidità nell'ambiente, creando incertezza nella risposta del sensore alle variazioni di temperatura e influenzando la ripetibilità delle misurazioni. In particolare, si è notato un deterioramento significativo delle capacità di risposta alle variazioni di temperatura nella configurazione AL2, che prevede il fissaggio della fibra pre-tensionata su una lastra in lega di alluminio mediante resina epossidica. In generale, si è osservata una diminuzione delle capacità di risposta, creando incertezza nei dati raccolti. In questa configurazione si nota che l'umidità viene dissipata rapidamente dalla resina a temperature superiori a 20°C , ma al di sotto di questa temperatura si osserva una discrepanza tra i valori misurati. Nel momento in cui la resina viene esposta a temperature superiori a 20°C in un ambiente di prova chiuso, si osserva una significativa riduzione dell'influenza dell'umidità e si ottengono risultati più precisi, anche ritornando successivamente a basse temperature. Diversamente da questa configurazione, l'adesione a base di colla cianoacrilato, che ha anch'esso subito influenze a causa dell'umidità, ha dimostrato una maggiore capacità di assorbire l'umidità e dissiparla in modo irregolare. In generale, considerando le configurazioni esaminate, si è riscontrato che utilizzando gli stessi metodi di incollaggio, i provini realizzati con materiale in lega di alluminio presentano prestazioni inferiori rispetto a quelle realizzate con materiale in composito di fibra di carbonio. In particolare, nel caso dell'utilizzo del nastro kapton, si è osservato che la configurazione C1 non presenta il fenomeno del "gomito", ovvero quel fenomeno presente durante la fase di calibrazione, dove si ricava la retta di interpolazione dei valori medi delle lunghezze d'onda, tale retta risulta avere cambi di linearità. Questo fenomeno è stato invece apprezzabile nella configurazione AL1. Questo fenomeno può complicare la fase di calibrazione del sensore, creando incertezza soprattutto per le temperature comprese tra -10°C e 10°C . Inoltre, il confronto ha fatto notare come l'uso del pre-tensionamento per l'applicazione del sensore nell'ambito termico ha dimostrato vantaggi in termini di precisione dei dati nel contesto considerato. È importante sottolineare che l'ambiente di lavoro, ossia la camera climatica utilizzata per creare un sistema con temperature diverse, può generare flussi di corrente all'interno della camera, il che potrebbe causare problemi sulla rilevazione finale dei dati ricavati, soprattutto se la fibra è lasciata libera senza pre-tensionamento.

La configurazione C3 ha dimostrato un'elevata accuratezza nel calcolo della temperatura attraverso la calibrazione. Tuttavia, è importante sottolineare che la forte irregolarità nella risposta del sensore alle variazioni di temperatura ha generato una notevole incertezza nei dati acquisiti, rendendo la configurazione complessivamente non affidabile.

Inoltre, confrontando le configurazioni C2 e C4, che utilizzano gli stessi materiali di costruzione ma differiscono nel modo in cui è stata applicata la resina, è emerso che un'applicazione corretta della quantità di resina comporta un miglioramento delle prestazioni del sensore in un ambiente controllato. Ciò sottolinea l'importanza di sviluppare una metodologia di installazione adeguata per il sensore, al fine di ottenere risultati ottimali.

Le analisi condotte sullo studio della risposta alla deformazione meccanica hanno confermato le ricerche precedenti riguardanti la risposta del sensore alle deformazioni meccaniche, evidenziando che il pre-tensionamento non è un requisito essenziale per questa specifica applicazione. Entrambe le configurazioni studiate hanno mostrato ottimi risultati, consentendo l'acquisizione dei dati con elevata precisione e una buona sensibilità. Tuttavia, il confronto con l'altra configurazione identificata come secondo provino ha evidenziato come l'utilizzo della resina epossidica risulti efficace, mentre l'utilizzo di metodi di incollaggio meno rigidi comporta oscillazioni che compromettono la capacità di rilevazione della deformazione, generando maggiore incertezza sui dati ottenuti. Il sensore ha dunque dimostrato la capacità di valutare correttamente sia la deformazione meccanica statica che quella dinamica.

L'ultima fase dello studio ha indagato sull'influenza simultanea delle sollecitazioni termiche e meccaniche sul sensore. I risultati ottenuti sono stati positivi, consentendo di disaccoppiare tali influenze utilizzando i valori di calibrazione precedentemente determinati. Ciò ha permesso di sviluppare un metodo in grado di valutare la deformazione applicata in base alla temperatura ambiente. La configurazione C4, utilizzata per questo studio, ha mostrato eccellenti risultati, con una buona precisione dei valori misurati e la capacità di separare i due contributi. Nel range di funzionamento da -40°C a 50°C , sono state osservate lievi discrepanze solo a temperature più elevate, probabilmente dovuto ad effetti viscosi della resina. Questa ricerca si presenta come molto promettente, poiché la capacità di distinguere correttamente le due componenti, temperatura e deformazione, utilizzando un unico sensore, permette di ottenere misurazioni di entrambe le misure partendo da un unico segnale di lunghezza d'onda.

8.1 Futuri sviluppi

La ricerca ha condotto un'analisi e una serie di considerazioni significative, le quali hanno portato a conclusioni utili per l'avanzamento degli studi sulla comprensione dei sensori a fibra ottica a FBG e delle sue applicazioni nell'ambito aerospaziale. È stato evidenziato che i metodi di incollaggio hanno un'influenza significativa sulle performance del sensore, e in particolare è emerso che l'utilizzo di una specifica resina epossidica di tipo L, arricchita con indurente EPH161, si è dimostrato essere una soluzione ottima ai fini dello studio. Un aspetto importante analizzato, è stato individuare che il dosaggio e la metodologia di applicazione della resina rappresentano elementi importanti per garantire prestazioni affidabili del sensore ottico. Questa considerazione può costituire un punto di partenza rilevante per lo sviluppo di un metodo di incollaggio preciso e ben regolamentato, il quale permetta di ottenere prestazioni ottimali del sensore e, soprattutto, garantire la ripetibilità dell'applicazione sul modello.

L'influenza dell'umidità come fattore che porti a variazioni del segnale e delle possibili conseguenze sulla performance del sensore è stata ampiamente discussa in diversi contesti scientifici. Si è osservato che l'umidità può causare degradazione dei materiali utilizzati nel sensore, compromettendone le proprietà. Pertanto, è di

fondamentale importanza approfondire lo studio sulla sensibilità del sensore all'umidità e comprendere come questa possa influenzare le misurazioni, soprattutto in contesti caratterizzati da temperature più basse, dove l'effetto dell'umidità risulta amplificato. La comprensione di tali dinamiche consentirà di migliorare la robustezza del sensore e di adottare opportune strategie per mitigare gli effetti negativi dell'umidità sulle prestazioni del sistema di misurazione.

Lo studio relativo alla rilevazione di deformazione meccanica è stato condotto al fine di valutare la capacità del sensore di rispondere alle variazioni esterne e di misurare la deformazione meccanica generata dall'applicazione di carichi sul supporto. Uno sviluppo dello studio potrebbe includere l'utilizzo di estensimetri per valutare la deformazione applicata e calibrare la fibra ottica al fine di valutarne l'accuratezza nella misura. Questa integrazione è di fondamentale importanza per diversi motivi. In primo luogo, consentirebbe di svincolarsi dalla deformazione carico-lunghezza d'onda presentato nello studio e poter analizzare direttamente un rapporto deformazione-lunghezza d'onda. Inoltre, l'utilizzo dell'estensimetro apporterebbe ulteriori vantaggi nello studio della termo-meccanica. Nella ricerca presentata, è stato utilizzato il coefficiente di dilatazione termica (K_T) per separare gli effetti meccanici da quelli termici. L'utilizzo dell'estensimetro come riferimento per la deformazione meccanica consentirebbe di effettuare una verifica inversa, confermando ulteriormente i risultati ottenuti e fornendo un'opportunità per correggere sia il contributo termico che quello meccanico, portando ad una visione completa dello studio.

Bibliografia

- [1] Alessandro Aimasso, Matteo DL Dalla Vedova e Paolo Maggiore. “Analysis of FBG Sensors Performances When Integrated Using Different Methods for Health and Structural Monitoring in Aerospace Applications”. In: *2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*. IEEE. 2022, pp. 138–144.
- [2] Alessandro Aimasso, Matteo DL Dalla Vedova e Paolo Maggiore. “Innovative sensor networks for massive distributed thermal measurements in space applications under different environmental testing conditions”. In: *2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. IEEE. 2022, pp. 503–508.
- [3] Alessandro Aimasso et al. “FBG based optical sensor networks for thermal measurements in aerospace applications”. In: *Proceedings of the 32st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)*. 2022.
- [4] Alessio Carlucci. *Effects of boundary conditions on FBG calibration for aerospace applications*. Politecnico di Torino, 2022.
- [5] Matteo Dalla Vedova, Pier Berri e Alessandro Aimasso. “Environmental sensitivity of fiber Bragg grating sensors for aerospace prognostics”. In: *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)*. 2021.
- [6] B De Nève e MER Shanahan. “Effects of humidity on an epoxy adhesive”. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 12.3 (1992), pp. 191–196.
- [7] Alfredo Esposito. *An experimental study of innovative mounting methods for optical sensors in aerospace applications*. Politecnico di Torino, 2022.
- [8] Atul Garg, Rezawana Islam Linda e Tonoy Chowdhury. “Evolution of aircraft flight control system and fly-by-light flight control system”. In: *International Journal of Emerging technology and advanced Engineering* 3.12 (2013), pp. 61–63.
- [9] Ph Giaccari, HG Limberger e P Kronenberg. “Influence of humidity and temperature on polyimide-coated fiber Bragg gratings”. In: *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*. Optica Publishing Group. 2001, BFB2.
- [10] Kenneth O Hill e Gerald Meltz. “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview”. In: *Journal of lightwave technology* 15.8 (1997), pp. 1263–1276.

- [11] Selwan K Ibrahim et al. “Fiber sensing for space applications”. In: *European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental Testing (ECSSMET 2018)*. 2018.
- [12] Iain McKenzie et al. “Fiber optic sensing in spacecraft engineering: An historical perspective from the European space agency”. In: *Frontiers in Physics* 9 (2021), p. 719441.
- [13] Ander Montero et al. “Influence of humidity on fiber Bragg grating sensors”. In: *Advances in Materials Science and Engineering 2014* (2014).
- [14] Tiago Neves et al. “Humidity effect on acrylate-and polyimide-coated fibres for distributed sensing applications”. In: *Optical Fiber Sensors*. Optica Publishing Group. 2020, T3–73.
- [15] Jasjot K Sahota, Neena Gupta e Divya Dhawan. “Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review”. In: *Optical Engineering* 59.6 (2020), pp. 060901–060901.

Altri riferimenti

[1] <https://www.r-g.de/en/art/100130>.

[2] <https://www.r-g.de/en/art/192030060-CBA310>.

[3] https://www.raffmetal.it/scarica_file.aspx=/dati/SearchAlloy/ITA/f=EN44300.pdf.

[4] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/coefficient-of-linear-thermal-expansionPM-PP>.

[5] https://www.smartfibres.com/files/pdf/3100-3008-B_SmartSoft_v3.1_user_manual.pdf.