



# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

## Tesi Magistrale

### Fiber Bragg Gratings

Sperimentazione di sensori innovativi per implementazione di  
tecniche prognostiche in campo aerospaziale



Relatore:

Prof. Paolo Maggiore

Co-Relatori:

Prof. Davide Matteo Dalla Vedova

Prof. Daniel Milanese

Prof. Davide Luca Janner

Candidato:

Andrea Coscia

Ottobre 2018



# Sommario

Il presente lavoro di tesi è stato svolto presso i laboratori del DIMEAS (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale) del Politecnico di Torino in collaborazione con l'Istituto Superiore Mario Boella ed il centro Interdipartimentale PhotoNext. L'idea alla base di questo lavoro di tesi è quella di studiare il comportamento dei sensori in fibra ottica per una futura implementazione di questi nel campo della diagnostica e della prognostica. In particolare sono stati progettati, realizzati e studiati diversi sistemi di bloccaggio e una possibile logica di calcolo per la gestione e l'elaborazione dei dati provenienti dai sensori.

La prima parte della tesi tratta gli aspetti più teorici della fibra ottica, i suoi vantaggi e svantaggi e il suo impiego come mezzo di misura di grandezze fisiche. Successivamente si trattano più nel dettaglio i sensori a reticolo di Bragg (FBG) che sono quelli utilizzati durante la sperimentazione in laboratorio.

La seconda parte della tesi mette invece in evidenza l'esperienza pratica che è stata affrontata. In particolare un intero capitolo è dedicato alla costruzione ed all'assemblaggio del banco prova. Qui troviamo anche lo sviluppo e la realizzazione dei sistemi di bloccaggio che sono stati utilizzati. Viene poi descritto in modo dettagliato lo *script Matlab* creato per poter trattare i dati provenienti dall'interrogatore ed infine vengono descritte le tipologie di analisi effettuate ed i grafici risultanti. In quest'ultimo capitolo vengono anche evidenziati le problematiche relative alle misure effettuate, le possibili cause ed anche le possibili soluzioni per la risoluzione dei problemi analizzati.

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>I</b>
<b>1 Fibre Ottiche</b>	<b>1</b>
1.1 Panoramica sui Materiali . . . . .	1
1.2 Geometria e classificazione delle Fibre Ottiche . . . . .	2
1.3 Principi Fisici su cui si basano le Fibre Ottiche . . . . .	4
1.4 Vantaggi e Svantaggi nell'utilizzo delle Fibre Ottiche . . . . .	6
<b>2 Sensori in fibra ottica</b>	<b>8</b>
2.1 Teoria e modelli dei sensori a reticolo di Bragg . . . . .	10
<b>3 Codice di calcolo</b>	<b>12</b>
3.1 Struttura del codice di calcolo . . . . .	12
3.2 Principi fisici di base . . . . .	13
3.3 Descrizione funzioni . . . . .	14
3.3.1 Verifica presenza dei file necessari . . . . .	14
3.3.2 Verifica esistenza file di import dati . . . . .	14
3.3.3 Scelta della tipologia di analisi . . . . .	14
3.4 Input manuale dei dati . . . . .	15
3.5 Settaggio sensori . . . . .	17
3.5.1 Verifica correlazioni . . . . .	27
3.6 Salvataggio dati . . . . .	27
3.7 Plot Dati . . . . .	30
3.8 Logica di calcolo . . . . .	30
3.9 Analisi Statistica . . . . .	30
<b>4 Realizzazione del Banco Prova</b>	<b>38</b>
4.1 Base . . . . .	38
4.2 Sistemi di Bloccaggio per Test Meccanici . . . . .	39
4.2.1 Sistema di Bloccaggio in Alluminio . . . . .	39
4.2.2 Sistema di bloccaggio ottenuto da stampante 3D . . . . .	43
4.3 Sistema di Bloccaggio per Test Termico . . . . .	46
4.4 Splicing della Fibra Ottica . . . . .	50
4.5 Disposizione dell'Interrogatore . . . . .	53

<b>5</b>	<b>Test e Misure</b>	<b>54</b>
5.1	Sistema di bloccaggio a viti con interposizione di gomma dura . . . . .	55
5.1.1	Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea corta $L_0=53.59$ mm . . . . .	55
5.1.2	Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea intermedia $L_0=128.80$ mm . . . . .	60
5.1.3	Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea lunga $L_0=228.94$ mm . . . . .	62
5.1.4	Test di ripetibilità su sistema di bloccaggio a viti e gomma dura	64
5.2	Sistema di bloccaggio con gomma morbida . . . . .	66
5.2.1	Risposta in termini di deformazione e lunghezza d'onda per la linea corta $L_0=58.59$ mm e per la linea lunga $L_0=228.94$ mm .	66
5.3	Sistema di bloccaggio con resina epossidica . . . . .	69
5.3.1	Confronto tra due diversi concetti di sistemi di bloccaggio . .	69
5.3.2	Conclusioni riguardo al confronto tra i due differenti sistemi di bloccaggio . . . . .	75
5.3.3	Confronto tra due differenti linee: $L_0=53.59$ mm e $L_0=228.94$ mm . . . . .	77
5.3.4	Conclusioni sul confronto fra differenti lunghezze a riposo $L_0$ .	83
5.3.5	Test di ripetibilità con linea lunga $L_0=228.94$ mm al variare del pre-carico . . . . .	83
5.3.6	Possibile soluzione per risolvere il problema dello slittamento .	85
<b>6</b>	<b>Conclusioni e Sviluppi Futuri</b>	<b>87</b>
	<b>Referenze</b>	<b>88</b>

# Elenco delle figure

1.1	Esempio della struttura di una fibra ottica. . . . .	2
1.2	(a) Fibra <i>Single-mode</i> , (b) Fibra <i>Multi-mode</i> di tipo <i>step index</i> , (c) Fibra <i>Multi-mode</i> di tipo <i>graded index</i> . [1] . . . . .	3
1.3	Principali angoli di una fibra ottica. [2] . . . . .	5
2.1	Funzionamento di un sensore a reticolo di Bragg . . . . .	11
3.1	Diagramma di flusso implementato nel codice . . . . .	37
4.1	Carico-Frequenza per ciascuno smorzatore passivo ( <i>Copyright 1999-2018 Thorlabs, Inc.</i> ) . . . . .	39
4.2	Sistema di bloccaggio da montare sul micromovimentatore (CAD) . . . . .	40
4.3	Base inferiore montata sulla breadboard (CAD) . . . . .	40
4.4	Primo sistema di bloccaggio . . . . .	41
4.5	Secondo sistema di bloccaggio . . . . .	41
4.6	Base inferiore con particolare sulla scanalatura a V . . . . .	42
4.7	Allestimento completo breadboard per misure meccaniche . . . . .	42
4.8	Effetto "ghigliottina" . . . . .	43
4.9	Sistemi di bloccaggio in Acido Polilattico (PLA) (CAD) . . . . .	43
4.10	Cilindro contenitore per colata (CAD) . . . . .	44
4.11	Assemblaggio finale del sistema . . . . .	45
4.12	Cilindro contenitore per colata . . . . .	45
4.13	Piattina rettangolare . . . . .	46
4.14	Montaggio dei sisemi sulla <i>breadboard</i> . . . . .	46
4.15	Base per cella <i>Peltier</i> con foro filettato M20 (CAD) . . . . .	48
4.16	Complessivo del sistema per test termico . . . . .	49
4.17	Cleavers . . . . .	50
4.18	Posizionamento delle fibre . . . . .	51
4.19	Processo di splicing e stima della perdita di potenza . . . . .	51
4.20	Termorestringente . . . . .	52
4.21	Schema di funzionamento dell'interrogatore . . . . .	53
5.1	Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea corta. . . . .	56
5.2	Deformazione a taglio dello strato di gomma. . . . .	57
5.3	Dettaglio dello slittamento in termini di deformazione per la linea corta. . . . .	58
5.4	Curve teoriche e sperimentali per il sistema di bloccaggio con gomma dura e lunghezza della fibra a riposo $L_0=53.59$ mm . . . . .	59

5.5	Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea intermedia. . . . .	60
5.6	Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale sulla linea intermedia. . . . .	61
5.7	Dettaglio dello slittamento in termini di deformazione per la linea intermedia. . . . .	61
5.8	Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea corta. . . . .	62
5.9	Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale sulla linea lunga. . . . .	63
5.10	Confronto sulla risposta alla deformazione tra la linea corta, quella intermedia e quella lunga. . . . .	64
5.11	Test di ripetibilità con sistema di bloccaggio a viti con gomma dura . . . . .	65
5.12	Test a step incrementali con sistema di bloccaggio con gomma morbida su linea corta $L_0=58.59$ mm . . . . .	67
5.13	Test a step incrementali con sistema di bloccaggio con gomma morbida su linea lunga $L_0=228.94$ mm . . . . .	67
5.14	Test di ripetibilità su sistema di bloccaggio su linea lunga $L_0=228.94$ mm e gomma morbida . . . . .	68
5.15	Confronto sulla risposta dei sensori utilizzando due differenti sistemi di bloccaggio. . . . .	70
5.16	Risposta in termini di $\Delta L$ [mm] del sistema di bloccaggio a "bottoncino" . . . . .	70
5.17	Risposta in termini di $\Delta L$ [mm] del sistema di bloccaggio con piattine . . . . .	71
5.18	Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale (senza coefficiente correttivo). . . . .	72
5.19	Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale. . . . .	73
5.20	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale (senza coefficiente correttivo). . . . .	74
5.21	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale . . . . .	74
5.22	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con carichi a step crescenti . . . . .	78
5.23	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare . . . . .	78
5.24	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con coefficiente correttivo . . . . .	79
5.25	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare e coefficiente correttivo . . . . .	79
5.26	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con carico a step incrementale . . . . .	81
5.27	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare . . . . .	81
5.28	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con coefficiente correttivo . . . . .	82
5.29	Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare e coefficiente correttivo . . . . .	82
5.30	Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.30 mm . . . . .	84
5.31	Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.20 mm . . . . .	84
5.32	Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.10 mm . . . . .	85

5.33	Realizzazione CAD di un possibile sistema di bloccaggio a superficie di aderenza maggiorata . . . . .	86
------	--	----

# Capitolo 1

## Fibre Ottiche

Al giorno d'oggi la diffusione e l'utilizzo della fibra ottica sta avendo una crescita esponenziale anche nei campi di uso più comuni e non solo nel campo della ricerca. La loro versatilità tuttavia consente di utilizzarle come sensori in campi come quello Aerospaziale e quello Spaziale dove le prestazioni hanno una importanza fondamentale.

La peculiarità della fibra ottica è la sua capacità di trasportare al suo interno un fascio luminoso con una perdita di segnale di soli  $0.2 \text{ dBkm}^{-1}$  [3]. Inoltre le fibre sono immuni alle interferenze elettromagnetiche [4]. Nel corso del capitolo verranno illustrati i vantaggi nell'uso di questa tecnologia.

### 1.1 Panoramica sui Materiali

La maggior parte delle fibre ottiche commerciali sono prodotte in vetro o in materiale plastico. La scelta del materiale viene dettata dall'applicazione finale a cui sarà destinata la fibra stessa. Infatti una fibra ottica di tipo plastico (POF) ha una perdita di potenza del segnale molto elevata e, di conseguenza, può essere utilizzata nelle applicazioni caratterizzate da un basso rateo di trasmissione di informazioni e su distanze molto corte.[5]. Questi lati negativi sono però compensati da un costo molto più basso rispetto alle fibre ottiche in vetro ed inoltre consentono una maggiore manovrabilità della fibra stessa grazie alla maggior flessibilità di queste fibre.[5]. Le fibre ottiche realizzate a partire dalla silice hanno invece, generalmente, una bassa perdita di potenza di segnale; per questo motivo vengono utilizzate nelle applicazioni che richiedono una trasmissione di dati su lunghe distanze e quando viene richiesto un elevato rateo di trasmissione dei dati. Per aumentare o diminuire l'indice di rifrazione del vetro si utilizzano degli elementi droganti. Solitamente per aumentare l'indice di rifrazione si utilizzano composti chimici come il biossido di Germanio  $GeO_2$ , l'anidride fosforica  $P_2O_5$ , il biossido di Titanio  $TiO_2$  e l'ossido di Alluminio  $Al_2O_3$ . Per ridurre invece l'indice di rifrazione vengono solitamente utilizzati il triossido di Boro  $B_2O_3$  ed il Fluoro  $F$  [6]. Per esempio l' $GeO_2$  e la  $P_2O_5$  hanno la peculiarità di aumentare l'indice di rifrazione e vengono quindi impiegati per la produzione del *core* della fibra, mentre il  $F$  ed il  $B_2O_3$  vengono utilizzati per la creazione del *cladding* dal momento che hanno la capacità di diminuire l'indice di rifrazione [7].

## 1.2 Geometria e classificazione delle Fibre Ottiche

In generale le fibre ottiche hanno una geometria cilindrica e sono costituite da un *core*, un *cladding* ed un *coating* esterno come mostra la figura 1.1.

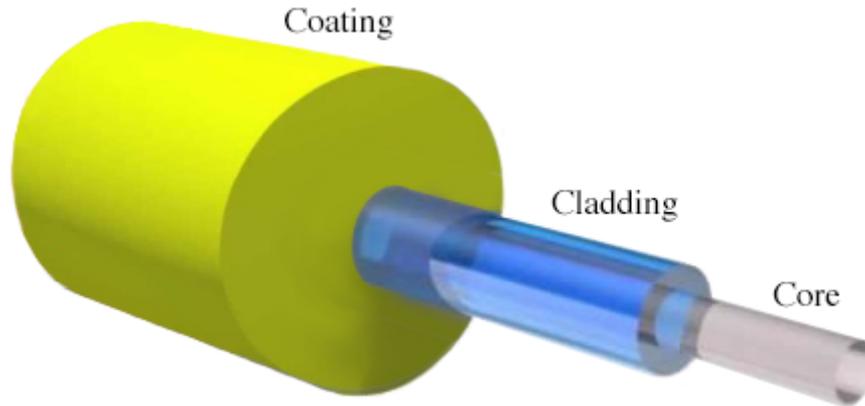


Figura 1.1. Esempio della struttura di una fibra ottica.

Una possibile classificazione delle fibre ottiche basata sui modi di propagazione della luce è la seguente:

- Fibra ottica di tipo *Single-mode*
- Fibra ottica di tipo *Multi-mode*

La fibra ottica di tipo *Single-mode* (SI) permette solamente la propagazione di un modo ed è caratterizzata da un *core* più piccolo di una fibra ottica di tipo *Multi-mode* (MM) 1.2 (Immagine presa da [1]). Le fibre di tipo *Multi-mode* infatti hanno un diametro del *core* di circa  $50\ \mu\text{m}$  al contrario delle fibre di tipo *Single-mode* che hanno un diametro di circa  $10\ \mu\text{m}$ . La dimensione del *cladding*, come già accennato in precedenza, è di  $125\ \mu\text{m}$  e questo è un valore standardizzato per tutte le tipologie di fibre ottiche.

Sono tuttavia possibili delle eccezioni a questo valore ma sono molto rare.

Grazie alla grande apertura numerica (1.7) di una fibra MM, è possibile inviare una maggior quantità di luce all'interno della fibra utilizzando una sorgente ottica molto economica e di facile reperibilità, come un LED [5]. Inoltre, avendo un diametro del *core* maggiore, su questa classe di fibre è più facile effettuare l'operazione di *splicing* rispetto alle fibre SI. Le fibre MM hanno però anche degli svantaggi; a causa della dispersione intermodale che affligge questa tipologia di fibre, non è possibile utilizzarle per lunghe distanze e/o per applicazioni che richiedono un elevato rateo di trasmissione di dati [5]. Per questa ragione, nel caso di cablaggi ad ampio raggio e/o per elevati ratei di trasmissione, vengono utilizzate solamente le fibre ottiche di tipo *Single-mode*, che permettono di avere linee lunghe dai 1000 km ai 30000 km e supportano un rateo di trasmissione che va dai  $10\ \text{Gb/s}$  ai  $100\ \text{Gb/s}$  [5].

Un'altra classificazione delle fibre ottiche si basa sull'indice di rifrazione del *core*:

- *Step index fiber*

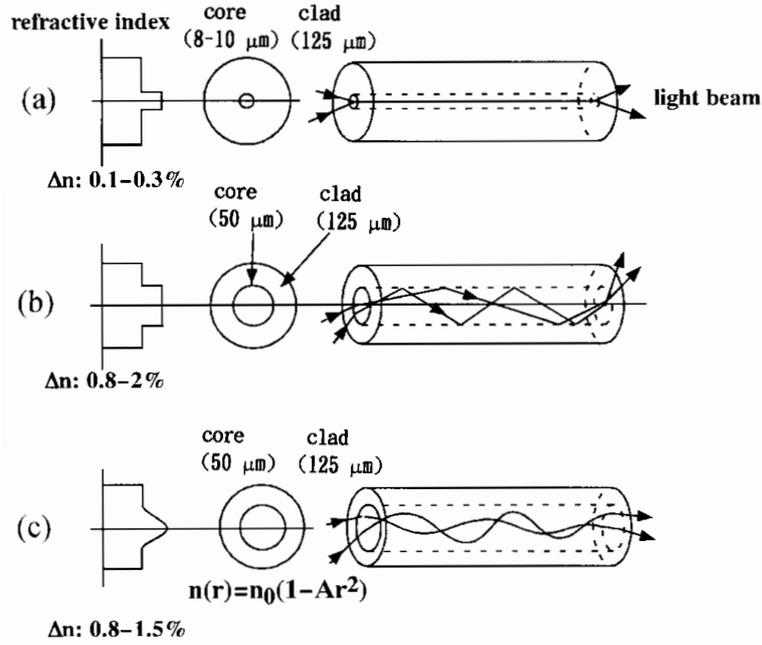


Figura 1.2. (a) Fibra *Single-mode*, (b) Fibra *Multi-mode* di tipo *step index*, (c) Fibra *Multi-mode* di tipo *graded index*. [1]

- *Graded index fiber*

All'interno della prima classe di fibre, chiamando  $r_1$  il raggio del *core* e  $r_2$  il raggio del *cladding*, sono presenti vari rapporti di diametri: 8/125, 50/125, 62.5/125, 85/125 e 100/140 [ $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ] [8]. L'indice di rifrazione per questa classe di fibre è costante ed uniforme sia per il *core* che per il *cladding* ma varia drasticamente all'interfaccia *core-cladding*. Questa leggera differenza tra i valori dei due indici di rifrazione viene ottenuta andando ad aggiungere una bassa concentrazione di elementi droganti all'interno della silice [8]. Nelle fibre ottiche di tipo *graded* l'indice di rifrazione del *core* e del *cladding* hanno una variazione puntuale lungo lo spessore e, come prima, hanno un valore diverso tra *core* e *cladding*.

La variazione dell'indice di rifrazione all'interno dei due diversi strati segue un andamento parabolico e presenta un massimo lungo l'asse della fibra ed un minimo all'interfaccia *core-cladding*.

Dal momento che l'indice di rifrazione del *core* è funzione della posizione radiale  $r$  vi sarà una variazione molto graduale dell'indice di rifrazione all'aumentare del raggio della fibra. I materiali per le fibre con un indice di rifrazione di tipo *graded* vengono ottenuti aggiungendo gli elementi droganti in rapporti ben precisi, all'interno della silice [8]. A causa di questa variazione puntuale dell'indice di rifrazione i raggi luminosi non seguono un percorso rettilineo lungo l'asse della fibra bensì uno curvilineo[8]. La seguente funzione generale 1.1 (presa da [8]) descrive la variazione dell'indice di rifrazione in questa particolare tipologia di fibra:

$$n^2(r) = n_1^2 \left[ 1 - 2 \left( \frac{r}{a} \right)^p \Delta \right] \quad r \leq a \quad (1.1)$$

Dove  $p$  è definito come un parametro di gradazione del profilo e, facendo variare il suo valore da 1 a  $\infty$  è possibile ottenere diversi profili di rifrazione;  $\Delta$  è invece

l'indice di rifrazione normalizzato.

### 1.3 Principi Fisici su cui si basano le Fibre Ottiche

La propagazione della luce all'interno del *core* della fibra ottica si basa sulla TIR (*Total Internal Reflection*-Riflessione Totale Interna). Questo fenomeno si instaura quando l'indice di rifrazione del *core* è maggiore di quello del *cladding*. Questo fenomeno impone anche delle restrizioni sull'angolo massimo di incidenza del fascio luminoso sulla fibra; questo infatti dovrà essere maggiore dell'angolo critico.

L'angolo critico, o angolo limite, viene calcolato sfruttando la formula (1.4).

L'indice di rifrazione viene invece calcolato sfruttando la formula (1.2):

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

Dove:

- $n$ =indice di rifrazione del mezzo
- $v$ =velocità della luce (nel mezzo)
- $c$ =velocità della luce (nel vuoto)

In accordo con il fenomeno ottico appena descritto, è necessario introdurre la legge di Snell (1.3):

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_i) = n_2 \cdot \sin(\alpha_r) \quad (1.3)$$

Dove:

- $n_1$ =indice di rifrazione del primo mezzo
- $n_2$ =indice di rifrazione del secondo mezzo
- $\alpha_i$ =angolo di incidenza.
- $\alpha_r$ =angolo di rifrazione.

L'angolo critico (o angolo limite) viene definito da (1.4):

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

Questo valore si ottiene quando l'angolo di rifrazione  $\alpha_r$  è di  $90^\circ$  e la luce propaga lungo la superficie di interfaccia tra il *core* ed il *cladding*. Un angolo maggiore permette la riflessione totale interna della luce all'interno della fibra. Inoltre, è necessario introdurre il fascio luminoso all'interno del *core* della fibra con un angolo minore di  $\alpha_{max}$  in modo che la luce possa propagare lungo la fibra stessa, come si può vedere dalla figura 1.3 (immagine tratta da [2]):

L' $\alpha_{max}$  indicato in figura 1.3 rappresenta il massimo angolo di accettazione [2]. Questo angolo definisce il range entro il quale la luce può essere immessa all'interno del

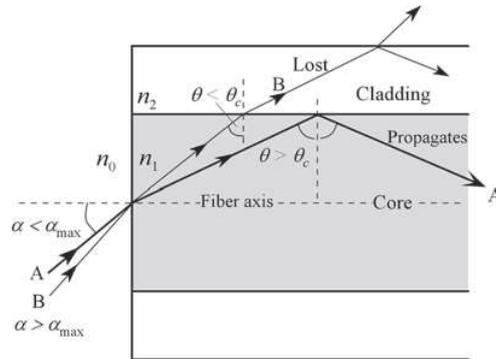


Figura 1.3. Principali angoli di una fibra ottica. [2]

core della fibra per poter sfruttare il principio della TIR (*Total Internal Reflection*-Riflessione Totale Interna). Al di fuori di questo range non si instaura il fenomeno della Riflessione Totale Interna. È possibile andare a ricavare  $\alpha_{max}$  seguendo i seguenti passi.

All'interfaccia tra il core ed il mezzo esterno (in genere l'aria) si può scrivere:

$$n_0 \cdot \sin(\alpha) = n_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) \quad (1.5)$$

Inoltre:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_c) = n_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (1.6)$$

Si ottiene:

$$\sin(\alpha_{max}) = \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_0} \quad (1.7)$$

Dove:

- $n_1$ =indice di rifrazione del core
- $n_2$ =indice di rifrazione del cladding
- $n_0$ =indice di rifrazione del mezzo esterno (solitamente aria)

Il numeratore della 1.7 rappresenta la NA (*Numerical Aperture*):

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.8)$$

## 1.4 Vantaggi e Svantaggi nell'utilizzo delle Fibre Ottiche

I vantaggi principali delle fibre ottiche possono essere riassunti in questi punti:

- Il primo vantaggio delle fibre ottiche è la bassa attenuazione del segnale. Questo aspetto è particolarmente importante soprattutto nei sistemi di comunicazione in quanto una bassa attenuazione consente di trasmettere i segnali su distanze molto importanti senza utilizzare ripetitori di segnale sulla linea.
- Le fibre ottiche sono trasparenti alle radiazioni elettromagnetiche e sono immuni ai fulmini in quanto il vetro è un buon materiale dielettrico come viene riportato nel testo di [6]. Questi aspetti sono molto importanti in quei campi dove vi è un impiego massiccio di apparecchiature elettroniche, come quello Aerospaziale e quello Spaziale.
- Nel caso in cui la fibra ottica sia realizzata in vetro si avrà una ottima resistenza alle alte temperature, grazie all'elevatissima temperatura di fusione della silice stessa.
- Le fibre ottiche in generale sono realizzate in materiali vetrosi. Queste tipologie di materiale, a differenza dei materiali metallici, sono chimicamente stabili, sono esenti dalla corrosione e non vengono intaccati dai processi di ossidazione (come ad esempio la ruggine) [6]. Grazie a queste caratteristiche, le fibre ottiche possono essere utilizzate in ambienti con condizioni ambientali molto severe ed inoltre, non utilizzando corrente elettrica per funzionare, possono essere installate anche negli ambienti a rischio di incendio dal momento che non possono generare scintille [6].
- Il materiale utilizzato per la produzione è la silice che è presente in abbondanza sulla Terra, al contrario del rame che invece è più raro [6]
- Le fibre ottiche sono più leggere e più piccole di qualsiasi altro mezzo di comunicazione fisico disponibile in commercio. Grazie a queste qualità è possibile installare facilmente una rete in fibra ottica all'interno di una struttura. Considerando infatti una fibra con il suo rivestimento polimerico si ha un diametro esterno di circa 1 mm; i cavi di comunicazione utilizzati tradizionalmente invece hanno spessori variabili tra 1 mm e 10 mm [6].

Questo vantaggio consente anche di rispettare i vincoli in peso che possono essere imposti per particolari tipologie di applicazioni.

- Le fibre ottiche sono a banda larga e consentono di inviare e ricevere molte informazioni con un rateo di trasmissione molto elevato.
- La fibra ottica non è costosa in quanto il materiale con cui viene prodotta è molto economico.

I principali svantaggi della fibra ottica sono i seguenti:

- L'utilizzo e la manutenzione di un sistema di misura in fibra ottica non sono economici in quanto il sistema stesso per funzionare richiede l'utilizzo di strumentazioni costose. Un semplice sistema di misura infatti richiede l'utilizzo di almeno un interrogatore ottico, una *splicer* e di almeno una fibra ottica con un sensore.
- Le fibre ottiche devono essere installate evitando raggi di curvatura molto piccoli in quanto questi sono causa di perdite ottiche.
- Durante l'installazione la fibra ottica rischia di danneggiarsi per via della sua scarsa resistenza ai danni meccanici.

# Capitolo 2

## Sensori in fibra ottica

I sensori, indipendentemente dalla tecnologia su cui vengono sviluppati, interpretano un ruolo molto importante per la regolazione ed il monitoraggio dei sistemi. Nei sistemi più semplici i sensori permettono di tradurre una variabile fisica in un qualcosa leggibile da parte di un operatore; un pressostato ad esempio permette di avere una conoscenza di quello che sta accadendo all'interno di un condotto chiuso. Con l'aumentare della complessità del sistema, i sensori sono stati integrati all'interno di opportune logiche di regolazione per far sì che le informazioni misurate sia in uscita, sia in altri loop di controllo, potessero essere sfruttate dalla logica di controllo dell'organo motore.

Per quasi ogni grandezza fisica è possibile impiegare un particolare tipo di sensore e, dato il gran numero, è stato necessario organizzare in modo preciso questa grande famiglia. La prima grossa divisione può essere fatta mettendo da una parte i sensori estrinseci (quando i sensori sono collegati tra loro da un canale di collegamento dedicato) e dall'altra quelli intrinseci (quando il canale di collegamento riesce già da solo ad agire come sensore). È possibile anche categorizzare i sensori basati sulla fibra ottica in base alle grandezze fisiche che andranno a misurare. Si avranno quindi sensori di tipo:

- *geometrico* per misure quali posizione, spostamenti, distanze, spessori, profondità;
- *meccanico* per misure di deformazioni, pressioni, carichi;
- *dinamico* per misure di velocità, accelerazioni, velocità angolari, velocità di fluidi, flussi, frequenze ed ampiezze di vibrazione;
- *fisico* per misure di temperatura, correnti elettriche, voltaggio, campi magnetici, suoni, parametri ultrasonici e acustici;
- *chimico/biochimico* per valutazioni sull'inflammabilità di gas, sulla tossicità dei gas, per analisi di provini;

[9]

I sensori in fibra ottica (*Optical Fiber Sensors*) hanno fatto la loro comparsa appena dopo la realizzazione pratica della prima fibra ottica con perdita inferiore ai  $20\text{dB/km}$  ad opera di quella che oggi è la *Corning Incorporated* nel 1970. Lo sviluppo

e la diffusione di questa nuova tecnologia però, come spesso accade, ha subito dei forti rallentamenti per via degli elevati costi. Negli anni in cui è stata realizzata la prima fibra ottica le sorgenti laser e le componentistiche ottiche erano molto costose e di conseguenza l'intero sistema di rilevazione, monitoraggio e misura. Con lo sviluppo tecnologico e con la produzione su scala industriale dei componenti ottici ed elettronici, è stato possibile abbassare i costi e si è potuto quindi assistere ad una grande diffusione di questa tecnologia. I sensori in fibra ottica infatti trovano la loro applicazione in moltissimi settori industriali diversi, da quello civile/edile a quello energetico, elettrico, meccanico, fino ad arrivare al settore biomedico. L'istituto superiore Mario Boella, a cui vorrei porre i miei ringraziamenti per la disponibilità dimostrata per questo progetto di tesi, lavora su fibre ottiche bio-riassorbibili per il rilascio puntuale di farmaci. Per quanto riguarda le applicazioni più affini al campo meccanico/aeronautico, i sensori in fibra ottica possono essere impiegati per misurare e monitorare parametri fisici come ad esempio:

- lo strain
- le vibrazioni
- la temperatura
- la pressione

Esistono tuttavia anche sensori per il monitoraggio dei parametri elettrici come ad esempio la corrente elettrica, il voltaggio l'impedenza ecc. Uno dei grossi vantaggi dei sistemi in fibra ottica risiede nel fatto che sono immuni dai disturbi elettrici ed elettromagnetici; la fibra stessa infatti è realizzata in silice che è un materiale dielettrico. Inoltre si deve anche considerare che questa tecnologia non necessita di un cablaggio elettrico per la fornitura di energia ai vari sensori. Questi sensori infatti sono di tipo passivo. Rispetto ai sensori tradizionali quelli in fibra ottica presentano i seguenti vantaggi:

- immunità ai disturbi dati dai campi elettrici e magnetici
- isolamento elettrico
- non hanno parti in movimento e non hanno nemmeno componenti metalliche al loro interno
- non richiedono alcun tipo di energia elettrica per funzionare
- non richiedono particolare manutenzione e la manutenzione richiesta non necessita di personale qualificato
- sono inerti dal punto di vista chimico anche nei confronti di sostanze aggressive e corrosive
- hanno una bassa perdita di potenza anche su grandi distanze
- sono molto compatti e leggeri

- possono essere multiplexati più sensori sulla stessa fibra ottica.

[9] Va fatto tuttavia un appunto alle ultime considerazioni. Il cablaggio di una rete in fibra ottica, con i relativi sensori, è più complicato rispetto ad una rete basata sulle tecnologie tradizionali. Si deve infatti prestare molta attenzione sia per quanto riguarda la posa della fibra stessa per via della fragilità intrinseca della fibra, sia per il percorso delle varie linee. Quest'ultimo problema infatti è tanto più sentito quanto maggiore sarà la lunghezza della rete perché, oltre ad una perdita di potenza intrinseca della fibra, è presente una perdita legata ai raggi di curvatura che vengono creati durante la stesura della linea. La leggerezza e la compattezza quindi possono anche rappresentare un lato negativo di questa tecnologia. Se la leggerezza infatti da una parte consente un enorme risparmio in peso, dall'altro è indice di fragilità della linea stessa soprattutto a sforzi di taglio, urti o sollecitazioni cicliche. Durante la realizzazione del banco prova e, soprattutto in fase di acquisizione dei dati, si è dovuto tenere in considerazione questo aspetto per poter studiare dei sistemi che consentissero di fissare la fibra al provino. Un'ultima considerazione infine va fatta sulla possibilità di multiplexare vari sensori sulla stessa fibra. Come già stato detto la fibra presenta un *core*, un *cladding* ed infine un rivestimento esterno che può avere varia natura. Per poter inserire un sensore sulla fibra, è necessario andare a rimuovere il *coating* esterno ad entrambe le porzioni di fibra che debbono essere unite (fibra principale e sensore), effettuare uno *splicing* per avere due superfici perfettamente ortogonali all'asse della fibra stessa ed infine saldare le due estremità. Questa fase implica quindi la presenza di una certa porzione di fibra che dovrà essere inserita all'interno del macchinario utilizzato per la saldatura ed in conseguenza di ciò vi sarà una distanza minima tra un sensore e l'altro di circa 50 millimetri. Questo aspetto è da tenere in considerazione durante la fase di progettazione del sistema di monitoraggio dei parametri fisici. Inoltre, la fibra a cui è stato rimosso il *coating* esterno sarà molto più fragile e necessiterà quindi di un rivestimento superficiale; questo può essere realizzato in due modi differenti:

- Tramite *Chemical Vapour Deposition*: consente di ottenere dei risultati ottimi ma necessita di attrezzature particolari ed è la via più costosa; il comportamento della fibra risulta analogo a quello della fibra vergine.
- Tramite un termorestringente: consente di ottenere dei risultati immediati e "sul campo"; non è necessario infatti avere particolari attrezzature ma basta una semplice sorgente di calore. Il termorestringente tuttavia non consente un comportamento paragonabile a quello della fibra vergine.

È possibile anche andare a fotoscrivere in modo personalizzato una fibra vergine evitando quindi problemi di giunzioni e saldature. Questa soluzione è tuttavia la più dispendiosa in termini di tempo e costo.

## 2.1 Teoria e modelli dei sensori a reticolo di Bragg

La scoperta della fotosensibilità della fibra ottica viene attribuita a *K.O.Hill* che nel 1978 riuscì a generare un reticolo all'interno del *core* di una fibra drogata con il

Germanio. Il reticolo creato aveva un periodo pari a quello del fascio laser utilizzato per la foto-scrittura. La variazione dell'indice di rifrazione della porzione di fibra è stata la prova che ha confermato la fotosensibilità della fibra ottica.

Successivamente, a partire dal 1989, venne utilizzata anche la semplice esposizione ai raggi UV per indurre una variazione locale nell'indice di rifrazione della fibra. Questo nuovo metodo di produrre reticoli con periodi differenti grazie all'olografia, consentì la produzione di reticoli con una lunghezza d'onda di picco personalizzabile. Dopo qualche anno vennero impiegate per la scrittura dei reticoli, le *phase masks* sfruttando una unica sorgente laser omogenea, consentendo così una produzione di massa di questi nuovi tipi di sensori.[9]

Negli anni, le ricerche che si sono susseguite hanno avuto come obiettivo quello di aumentare la fotosensibilità, in particolare aumentando la percentuale di Germanio. È apparso tuttavia che è possibile ottenere un risultato analogo a quello che si ottiene aumentando la percentuale di Germanio, semplicemente immergendo, per un certo periodo di tempo, la fibra in una vasca pressurizzata contenente idrogeno. Questo metodo, consentendo un risparmio di materiale drogante e per via della maggior facilità costruttiva, è stato ampiamente utilizzato e viene chiamato *hydrogen-loading sensitization*. [9]

I reticoli di Bragg (*FBG*) sfruttano, come già detto il meccanismo della diffrazione osservato nei cristalli. I sensori sono quindi delle porzioni di fibra ottica che vengono fotoscritti; il risultato è un reticolo fotoindotto all'interno del core della fibra. Se si osserva infatti la struttura del reticolo si nota una variazione periodica nell'indice di rifrazione del *core* lungo l'asse della fibra.

La misura della grandezza avviene quindi non per via diretta ma per via indiretta, andando a valutare la differenza fra le diverse lunghezze d'onda sentite dal sensore. L'equazione di Bragg per la diffrazione dei raggi X risulta essere:

$$\lambda = 2n_{co}\Delta \quad (2.1)$$

dove  $\lambda$  rappresenta la lunghezza d'onda mentre  $n_{co}$  è l'effettivo indice di rifrazione del *core*. [9]

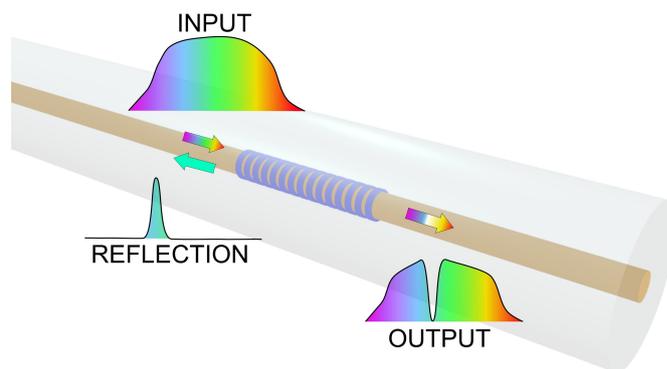


Figura 2.1. Funzionamento di un sensore a reticolo di Bragg

# Capitolo 3

## Codice di calcolo

In questo capitolo verranno trattati gli aspetti principali del codice di calcolo che è stato scritto per manipolare i dati grezzi provenienti dall'interrogatore. All'interno del *software* fornito con l'interrogatore, come verrà anche trattato nel corso del capitolo, è possibile ottenere dei dati non di lunghezza d'onda, bensì una misura diretta di alcune delle grandezze fisiche esposte nei capitoli precedenti. Le formule implementate tuttavia non consentono di ottenere dei valori corretti per via della fisica del problema. Per correggere questi errori si è reso necessario quindi sviluppare uno *script Matlab* per poter trattare i dati e per poter effettuare delle verifiche sulla bontà dei dati acquisiti.

### 3.1 Struttura del codice di calcolo

Possiamo suddividere lo script in tre grosse parti principali:

- *Pre-Processing*;
- *Processing*;
- *Post-Processing*.

Nella fase di *Pre-Processing* viene richiesto all'utente di inserire da tastiera sia il nome del file da cui si desidera importare i dati, sia di settare i parametri fondamentali che serviranno poi nella fase di *post processing* per il calcolo dello sforzo meccanico e della temperatura. La fase di *Processing* risulta trasparente all'utente ed è visibile solamente al calcolatore. In questa fase i dati vengono importati dal file *.log* generato dall'interrogatore e vengono categorizzati in strutture di dati che consentono quindi di identificare per ogni sensore tutte le informazioni che lo caratterizzano. L'ultima fase è quella di *Post-Processing* vera e propria. L'utente potrà gestire direttamente la parte di plot andando a scegliere quali canali plottare o quale tipologia di sensori plottare. Nel caso in cui si optato per una analisi di tipo personalizzato è possibile graficare un confronto tra lo sforzo meccanico e lo sforzo meccanico corretto in funzione della temperatura. Le fasi visibili all'utente sono tuttavia soltanto la prima e l'ultima in quanto il *processing* rappresenta la fase di calcolo e viene vista soltanto dal calcolatore.

## 3.2 Principi fisici di base

La logica del codice di calcolo è stata ideata per poter essere, seppur in piccola parte, di spunto per la gestione della sensoristica di grandi dimensioni. L'unico limite è stato imposto dalla capacità fisiche dell'interrogatore che è in grado di gestire solamente 4 linee con 16 sensori ciascuna. All'interno del codice tuttavia non vi sono limitazioni di questo genere e teoricamente sarebbe possibile gestire  $n$  canali di ingresso contenenti  $n$  sensori ciascuno. Il grosso problema che è stato riscontrato in fase di progettazione è la non possibilità della gestione dei dati in *real-time*. L'utilizzo di questa tecnologia è limitato quindi ad una fase di analisi a posteriori della salute della porzione di struttura analizzata dal sensore. Per un controllo *real-time* delle deformazioni locali e per sfruttare queste informazioni in una logica di controllo ad un più alto livello si rende necessario modificare la parte relativa alla gestione del file di *input*. Questa parte purtroppo è possibile modificarla solamente dal codice sorgente dell'interrogatore stesso. In via teorica è possibile ricreare un controllore che vada ad interfacciarsi con l'interrogatore per effettuare questo tipo di acquisizione dati. Per via della natura dei nostri esperimenti si è ritenuto non necessario gestire i dati in *real-time*, dovendo andare ad effettuare solamente delle prove statiche dei sensori e una analisi statistica sui dati importati. Per ottenere la misura della deformazione meccanica si sono andati ad elaborare i dati di lunghezza d'onda provenienti dall'interrogatore e, tramite le formule presenti nel *paper* di Kreuzer [10], si sono potuti ottenere dei valori di *strain* dato puramente da uno stress meccanico e anche dei valori di *strain* comprensivi sia del contributo di deformazione dato da uno stress meccanico, sia di quello dato da uno stress termico.

$$\varepsilon_m = \frac{1}{k} \left( \frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_{0m}} - \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_{0c}} \right), \quad (3.1)$$

dove  $\varepsilon_m$  rappresenta lo sforzo meccanico,  $k$  il *gauge factor*,  $\Delta\lambda_m$  la variazione della lunghezza d'onda del sensore designato per la misura dello sforzo meccanico,  $\Delta\lambda_c$  la variazione della lunghezza d'onda del sensore designato per la misura della compensazione termica e  $\lambda_{0c}$  e  $\lambda_{0m}$  rappresentano rispettivamente la lunghezza d'onda a riposo del sensore utilizzato per la compensazione termica e la lunghezza d'onda a riposo del sensore di deformazione meccanica.

I sensori FBG infatti rilevano sia la temperatura, sia la deformazione meccanica. L'FBG potrà restituire quindi una lunghezza d'onda differente da quella a riposo (che è quella lunghezza propria ottenuta in fase di stampa del reticolo, indicata sui *datasheet* come la lunghezza d'onda di riferimento) a seguito di una sollecitazione e, in base a questa variazione si potrà andare a ricavare la misura della deformazione. Le informazioni che si ricavano non sono quindi direttamente leggibili dal calcolatore ma devono essere trattate. Le varie grandezze fisiche sono ricavate indirettamente a partire dalla misura della lunghezza d'onda. L'interrogatore è in grado inoltre di fornire direttamente dei valori di deformazione, temperatura o pressione sfruttando formule già implementate al suo interno. Le formule implementate sono state richieste direttamente alla azienda produttrice e sono state gentilmente fornite in via confidenziale ma, non verranno riportate esplicitamente per l'assenza di una autorizzazione scritta da parte dell'azienda stessa.

### 3.3 Descrizione funzioni

Dal momento che lo *script* non è suddiviso in sezioni stagne, responsabili ognuna di una parte precisa del programma, la suddivisione che segue è stata creata appositamente per descrivere le strategie adottate, spiegare la logica di programmazione adottata e i controlli che sono stati inseriti a livello di progettazione.

#### 3.3.1 Verifica presenza dei file necessari

All'interno di questa sezione il codice va automaticamente a verificare che nella *directory* siano presenti tutti i file con estensione *.m* che verranno richiamati all'interno dello *script*. Nel caso in cui manchino dei file viene mostrato a video un messaggio di errore e viene stampato l'elenco dei file che sono richiesti dallo *script* per poter funzionare e viene lasciato all'utente il compito di provvedere alla verifica dei file presenti nella *directory* e l'inserimento di quelli mancanti.

#### 3.3.2 Verifica esistenza file di import dati

Questa porzione di codice si occupa di chiedere all'utente di inserire il nome del file che desidera analizzare e verifica che sia presente all'interno della *directory* dello *script* stesso.

Il nome del file che viene digitato deve essere completo di estensione e deve rispettare fedelmente i caratteri del file originale altrimenti il codice segnalerà un errore e chiederà all'utente un nuovo inserimento. Dopo aver verificato l'esistenza del file viene chiesto all'utente se desidera inserire una nota da allegare al file di uscita le cui funzioni verranno spiegate nella sezione dedicata.

#### 3.3.3 Scelta della tipologia di analisi

```

1
2         %vado a chiedere all'utente se vuole fare una
           analisi di tipo
3         %classico ovvero plottando semplicemente i dati
4         %dall'interrogatore o se vuole andare a calcolare
           i valori
5         %desiderati secondo le formule
6
7     while y==0
8         fprintf('\nPremere [1] se si desidera eseguire
           una analisi standard\nPremere [2] se si
           desidera eseguire una analisi
           personalizzata\n\n');
9         analisi=(input('-->', 's'));
10        if sum(isspace(analisi))==0 & (str2num(
           analisi)==1 | str2num(analisi)==2)
11            y=1;
12        else

```

```

13         fprintf('Il valore inserito non è
14             end
15             end
16         clear y

```

È possibile scegliere una analisi di tipo pre-impostato oppure andare a personalizzare l'analisi dei dati importati. Scegliendo una analisi di tipo standard non verrà più richiesto alcun intervento all'utente ma si procederà direttamente al *plot* dei dati che sono stati letti. Si faccia attenzione che questa analisi è fortemente correlata al modo in cui sono stati settati i vari sensori nel programma *SmartSoft* relativo all'interrogatore. Nel caso si scelga invece una analisi di tipo personalizzato si potranno andare a settare manualmente, sia i parametri fisici che serviranno poi per il calcolo dello strain per via analitica, che anche l'eventuale correlazione dei sensori al rispettivo sensore di temperatura. Ancora in questa sezione viene proposto all'utente un riepilogo dei dati importati e vengono elencati i sensori divisi per categoria come ulteriore analisi visiva lasciata all'utente.

### 3.4 Input manuale dei dati

Vengono proposti i dati fisici relativi alla fibra ottica e viene permesso all'utente di modificare, entro alcuni limiti pre-fissati, i valori che compaiono a video.

```

1 %% SECTION 2 - INPUT MANUALE DEI DATI
2
3 %Questa sezione permette all'utente di settare manualmente
4   tutti i
5   %parametri che saranno poi implementati nelle formule per
6   ricavare
7   %temperatura e strain per via analitica.
8
9   if str2num(analisi)==2           %ho scelto di fare una analisi
10      personalizzata
11
12      fprintf('Si prega di inserire i valori necessari al fine
13      del calcolo dello strain e della temperatura.\n\n');
14      fprintf('I parametri attualmente impostati sono i seguenti
15      :\n\n');
16      fprintf('\t\t[-] coefficiente foto-elastico = 0.22\n');
17      fprintf('\t\t[-] gauge factor = 0.78\n');
18      fprintf('\t\t[-] variazione dell indice di rifrazione =
19      0.5*10^-6 [1/K]\n');
20      fprintf('\t\t[-] coefficiente di espansione termica del
21      vetro = 0.55*10^-6 [1/K]\n');
22      fprintf('\t\t[-] coefficiente di espansione termica del
23      provino (alluminio) = 22*10^-6 [1/K]\n\n');
24      i=0;
25      while i==0

```

```

18     fprintf('Premere [1] se si desidera lasciare i
        parametri con i valori pre-impostati\nPremere [2]
        per impostare manualmente tutti i parametri\n\n');
19     scelta=str2num(input('-->', 's'));
20     if scelta==1 %entro qua se l'utente
        desidera lasciare i parametri uguali a quelli
        mostrati a video
21         i=1;
22         photo=0.22; %coefficiente fotoelastico
23         gaugefactor=0.78; % gauge factor
24         refglass=0.55*10^(-6); %indice di rifrazione
        vetro
25         cet_pro=22*10^(-6); %coefficiente di
        espansione termico del provino
26         alfa_delta=5*10^(-6); %variazione dell'indice di
        rifrazione
27     elseif scelta==2 %entro qua se l'utente
        desidera settare manualmente tutti i parametri
28         i=1;
29         e=0;
30
31         while e==0
32             photo=str2num(input('Digitare il valore del
                coefficiente foto-elastico: ', 's'));
33             if photo>0
34                 e=1;
35             else
36                 fprintf('Il valore inserito non è
                    consentito. Riprovare.\n');
37             end
38         end
39         e=0;
40         while e==0
41             gaugefactor=str2num(input('Digitare il valore
                del gauge factor: ', 's'));
42             if gaugefactor>0
43                 e=1;
44             else
45                 fprintf('Il valore inserito non è
                    consentito. Riprovare.\n');
46             end
47         end
48         e=0;
49         while e==0
50             refglass=str2num(input('Digitare il valore
                dell indice di rifrazione del vetro: ', 's')
                );
51             if refglass>0
52                 e=1;

```

```

53         else
54             fprintf('Il valore inserito non è
                    consentito. Riprovare.\n');
55         end
56     end
57     e=0;
58     while e==0
59         alfa_delta=str2num(input('Digitare il valore
                                   della variazione del coefficiente dell
                                   indice di rifrazione: ','s'));
60         if alfa_delta>=5*10^(-6)&&alfa_delta
                                   <=8*10^(-6) %questo è il range di valori
                                   permessi a questa variabile; sono presi dal
                                   paper Optical Strain Gauges- Fiber Braggs
                                   Gratings_788
61             e=1;
62         else
63             fprintf('Il valore inserito non è
                    consentito. Riprovare.\n');
64         end
65     end
66     e=0;
67     while e==0
68         cet_pro=str2num(input('Digitare il valore del
                                   coefficiente di espansione termica del
                                   provino: ','s'));
69         if cet_pro>0
70             e=1;
71         else
72             fprintf('Il valore inserito non è
                    consentito. Riprovare.\n');
73         end
74     end
75 else
76     fprintf('Errore di battitura. Riprovare\n');
77 end
78 end

```

### 3.5 Settaggio sensori

Questa sezione appare solamente nel caso in cui si sia optato per una analisi di tipo personalizzato. Il codice analizza ciascun sensore di tipo “*Wavelength*” e chiede all’utente di definire se il sensore considerato è un sensore di tipo “*Strain*” o di tipo “*Temperature*”. La correlazione del sensore di temperatura ad uno di strain si rende necessaria per correggere l’errore che si verrebbe a creare nel caso in cui il solo sensore di tipo strain sentisse una variazione della temperatura. La correlazione tuttavia può anche essere *bypassata* dall’utente se sceglie di non tenere in conto degli effetti

termici sulla misura. Per separare l'effetto della temperatura da quello di deformazione meccanica pura si vanno quindi a inserire due sensori in parallelo e si va a sottrarre alla misura globale quella che è la deformazione causata dalla variazione di temperatura. La correlazione tra i due (o più) sensori scelti avviene collegando al sensore di strain la lunghezza d'onda del sensore di temperatura. Durante l'esecuzione del codice verrà richiesto all'utente se desidera inserire manualmente i valori delle lunghezze d'onda o se lascerà al codice stesso il compito. Questa scelta è stata implementata sia per accorciare i tempi relativi all'analisi di ogni file di *log*, sia per via delle difficoltà nell'individuare la frequenza d'onda del sensore a riposo. Nel caso in cui quindi si voglia valutare la condizione di pre-carico del sensore bisognerà inserire manualmente il valore di  $\lambda_0$  presente nel *datasheet* della fibra stessa; in caso contrario il codice andrà a rilevare automaticamente il primo valore di  $\lambda_0$  registrato dall'interrogatore. La logica del codice di calcolo è pensata per gestire un cablaggio su una superficie di considerevoli dimensioni in quanto è possibile andare a correlare ciascun sensore ad un particolare tipo di sensore di temperatura. Così facendo si va a correggere l'errore che si potrebbe generare nel momento in cui la temperatura nell'intorno di ciascun sensore non ha un valore costante. È possibile inoltre associare un sensore di temperatura ad una intera famiglia di sensori o, ancora più in generale, andare ad identificare un unico sensore di temperatura come sensore di riferimento per tutti gli altri. La correlazione dei sensori va fatta scegliendo tra i sensori disponibili ad essere correlati semplicemente digitando il numero corrispondente al nome del sensore stesso. Per correlare un solo sensore a più sensori differenti è sufficiente scrivere i nomi dei sensori che si desiderano correlare seguiti da uno spazio. Per correlare invece il sensore di temperatura a tutti gli altri è sufficiente digitare il numero corrispondente alla voce "Tutti". Durante questa fase le informazioni raccolte dalle scelte dell'utente e quelle ricevute in ingresso dal file di input vengono combinate assieme per creare una struttura dati contenente in ogni campo un sensore e tutte le informazioni che lo caratterizzano.

```

1  %%SECTION 3 - SETTAGGIO SENSORI
2
3      %In questa sezione vado ad analizzare tutti i vari sensori
        di tipo
4      %"wavelength" andando a chiedere di volta in volta se si
        desidera
5      %settare il sensore considerato come sensore di strain o
        di
6      %temperatura. Nel caso in cui si scelga di impostarlo come
        sensore di
7      %temperatura verrà richiesto di indicare il sensore di
        tipo strain a
8      %cui si desidera associarlo. Per maggiori dettagli
        riguardo a questa
9      %sezione vedere il tutorial
10     auto=0; %la variabile auto serve per l'inserimento
        automatico di lambda_0
11     lambda01='';
12     all=0;

```

```

13     mec_strain=0;
14     mec_strain_temp=0;
15     wh=0; %Controllo errore sull'input qui sotto
16     while wh==0
17         fprintf('Digitare il numero corrispondente alla
18             tipologia di analisi desiderata:\n')
19         fprintf('\t\t[1] AUTOMATICA : il valore di lambda di
20             riferimento viene assegnato automaticamente\n')
21         fprintf('\t\t[2] MANUALE : il valore di lambda di
22             riferimento viene assegnato manualmente\n')
23         auto=str2num(input('-->', 's'))
24         if auto==1|auto==2
25             wh=1;
26         else
27             fprintf('ERRORE di battitura, digitare [1] o [2]\n
28                 ')
29         end
30     end
31     clear wh
32     for stamp=1:length(titolo)
33         if strcmp(char(sottotitolo(stamp)), 'Wavelength')==1
34             resto(stamp).nome=titolo(stamp);
35             resto(stamp).num=stamp;
36         else
37             resto(stamp).nome=[];
38             resto(stamp).num=[];
39         end
40     end
41     fprintf('\n\n')
42     s(1).caratterizzazione=[]; %Inizializzo la struttura
43     per l'item caratterizzazione
44     s(1).mec_strain=[];
45     s(1).mec_strain_t=[];
46     s(1).ch_corr=[];
47     s(1).lambda_rif=[];
48     s(1).lambda_t=[];
49
50     for i=1:length(titolo)
51         e=0;
52         if strcmp(sottotitolo(i), 'Wavelength')==1 %
53             Faccio questo tipo di analisi solo se il sensore è
54             di tipo "wavelength"
55             while e==0
56                 if auto==2
57                     fprintf('Inserire la frequenza di
58                         riferimento per il sensore %s\n', titolo
59                             {i}');
60                     lambda01=(input('-->', 's'));

```

```
53         else
54             lambda01=A(1,i);
55             fprintf('La frequenza di tiferimento per
                    il sensore %s è: %.2f\n',titolo{i}',
                    lambda01)
56         end
57         if isletter(lambda01)==0 & isspace(lambda01)
                    ==0 & lambda01>=0 %ho verificato che non
                    sia preso in ingresso ne un carattere di
                    spazio ne una lettera
58             s(i).lambda0=lambda01;
59             e=1;
60         else
61             fprintf('Errore. Si prega di inserire il
                    valore numerico senza spazi.\n');
62         end
63     end
64     e=0;
65     if strcmp(s(i).caratterizzazione,'S')==1
66         fprintf('%s è già stato definito in
                    precedenza come sensore di strain.\n\n',
                    titolo{i}')
67     else
68         while e==0 & all==0
69             fprintf('Digitare: [1] se la lunghezza d
                    onda a riposo caratterizza lo strain\n\
                    t\t [2] se la lunghezza d onda a
                    riposo caratterizza la temperatura\n');
70             n=str2num(input('-->','s'));
71             if n==1 %la
                    lunghezza a riposo si riferisce allo
                    strain
72                 s(i).caratterizzazione='S';
73                 e=1;
74             elseif n==2 %La
                    lunghezza a riposo si riferisce alla
                    temperatura
75                 p=0;
76                 s(i).caratterizzazione='T';
77                 %Vado a togliere il canale che è già
                    stato assegnato come
78                 %riferimento e tolgo anche il canale
                    stesso per non permettere
79                 %all'utente di correlare a se stesso
                    il sensore
80
81                 while p==0
82                     resto(i).nome=[];
83                     resto(i).num=[];
```

```

84         fprintf('Digitare il numero del
           sensore a cui si desidera
           correlare la misurazione della
           temperatura\nI sensori
           disponibili sono:\n')
85     yy=1;
86     for stamp=1:length(resto)
87         if isempty(resto(stamp).nome)
           ==0
88             fprintf('[%d] <%s>\n',yy,
                       char(resto(stamp).nome)
                       );
           resto(stamp).num=yy;
           yy=yy+1;
           sc(stamp).num=yy;
92         else
93             sc(stamp).num=[];
94         end
95     end
96     if yy==1
97         fprintf('\nATTENZIONE:Il
           canale non può
           caratterizzare la
           temperatura. Sarà
           automaticamente definito
           come canale di Strain.\n\n'
           )
           s(i).caratterizzazione='S';
           p=1;
100        else
101            fprintf('[%d] <Tutti>\n',yy);
102            fprintf('\n');
103            h=input('-->', 's');
104        end
105        %Vado a creare una struttura a
           celle per poter
106        %raccogliere al suo interno quelli
           che sono i
107        %sensori che possono essere
           correlati
108        if yy>1
109            if str2num(h)==yy
110                %Avendo decretato che a
                   tutti i sensori venga
                   correlato un
                   particolare sensore
                   definito come di

```

```
111         %temperatura,devo
           assegnare a tutti i
           sensori di tipo "
           wavelength" la
           lunghezza
112         %d'onda di base del
           suddetto sensore e
           devo impedire che l'
           utente possa scegliere
           un
113         %altro sensore di
           temperatura. Se si
           verificasse questa
           situazione andrei
           praticamente a
114         %sovrascrivere le vecchie
           informazioni sul
           precedente sensore e
           avrei solamente le
           ultime.char(s(i).canale
           )
115         fprintf('Si è scelto di
           correlare lunghezza d
           onda del sensore %s a
           tutti gli altri sensori
           .\n\n',char(titolo(i)))
           ;
116         p=1;
117         all=1;
118         s(i).ch_corr=-1;
119         break;
120     else
121         for pp=1:length(h) %
           Controllo errori
122             if str2num(char(h(pp))
           )<0|str2num(char(h(
           pp)))>yy
123                 p=0;
124                 fprintf('Errore di
           battitura. Il
           valore immesso
           non è
           disponibile.\n'
           );
125                 break
126             else
127                 p=1;
128             end
129         end
           end
```

```

130         if p==1
131             h=strsplit(h);
132             h=unique(h);
133             xx=1;
134             for pp=1:length(h)
135                 for ppp=1:length(
titolo)
136                     if str2num(
char(h(pp))
) == resto(
ppp).num
137                         resto(ppp)
. nome
= [];
138                         resto(ppp)
. num
= [];
139                         vec(xx)=
ppp;
140                         xx=xx+1;
141                     end
142                 end
143             end
144         end
145     end
146     if p==1
147         for r=1:length(titolo)
148             for rr=1:length(h)
149                 if vec(rr)==r
150                     s(r).
caratterizzazione
='S';
151                     s(r).ch_corr=i
;
152                     s(r).
lambda_rif=
s(i).
lambda0;
153                 end
154             end
155         end
156     end
157     end
158     end
159     e=1;
160     end
161     end
162     end
163     end

```

```

164     %Ordino i vettori che ho importato in precedenza in
        una struttura
165     %caratterizzata da vari campi
166     s(i).canale=titolo(i);
167     s(i).tipo=sottotitolo(i);
168     s(i).misure=A(:,i);
169     end
170
171     if all==1                                     %Entro in questa sezione
        solamente se ho deciso di correlare un sensore di
172     for i=1:length(s)                             %temperatura a tutti gli
        altri sensori di strain
173         s(i).canale=titolo(i);
174         s(i).tipo=sottotitolo(i);
175         s(i).misure=A(:,i);
176         if strcmp(s(i).caratterizzazione,'T')==1 & s(i).
            ch_corr==-1;
177             for m=1:length(s)
178                 if strcmp(s(m).tipo,'Wavelength')==1 & m
                    ~=i & strcmp(s(m).caratterizzazione,'T'
                    )==0 & isempty(s(m).ch_corr)==1
179                     s(m).caratterizzazione='S';
180                     s(m).lambda_rif=s(i).lambda0 ;
181                     s(m).lambda_t=s(i).misure;
182                 end
183             end
184         end
185     end
186
187     end
188     for yy=1:length(s)
189         if isempty(s(yy).ch_corr)==0 & s(yy).ch_corr~-1
190             s(yy).lambda_t=s(s(yy).ch_corr).misure;
191         end
192     end
193
194
195     if all==0                                     %Questa sezione serve per andare a
        fare le correlazioni di lambda con i rispettivi fbg ma
        non serve nel caso in cui si correli tutto quanto
        perche lo facciamo gia separatamente in tutti
196
197         %Sezione per forzare la correlazione dei sensori di
            strain non
198         %correlati
199
200         o=1;
201         %Creo una stringa contenente solo i canali di T, in
            modo da stamparla

```

```

202     %per poi associare gli strain alle temperature
203     for i=1:length(s)
204         if strcmp(s(i).caratterizzazione,'T')==1
205             corr(o).canale=s(i).canale;
206             corr(o).lambda0=s(i).lambda0;
207             corr(o).num=i;
208             o=o+1;
209         end
210     end
211
212     %Vado a forzare l'inserimento di un sensore di
213     %temperatura di
214     %riferimento per quei sensori di strain a cui non è
215     %stato inserito
216     %precedentemente
217     flag=0;
218     for i=1:length(s)
219         if strcmp(s(i).caratterizzazione,'S')==1 & isempty(
220             s(i).ch_corr)==1 & isempty(s(i).lambda_rif)==1
221             flag=1;
222         end
223     end
224
225     if o>1 & flag==1
226         jk=0;
227         while jk==0
228             fprintf('Dalla analisi è emerso che ci sono
229                 sensori per la misura dello strain che non
230                 correlazione ad alcun sensore di
231                 temperatura.\n');
232             fprintf('Digitare: [1] se si desidera
233                 continuare la simulazione senza associare
234                 obbligatoriamente ciascun sensore di strain
235                 con uno di temperatura\n\t\t [2] se si
236                 desidera forzare la correlazione dei
237                 sensori di strain con quelli di temperatura
238                 \n');
239             n=str2num(input('-->', 's'));
240             if n==1
241                 %Entro qua se
242                 voglio continuare la simulazione senza
243                 forzare la correlazione
244                 jk=1;
245                 o=0;
246             elseif n==2
247                 %Entro qua se
248                 voglio forzare la correlazione
249                 jk=1;
250                 o=2;
251             else

```

```

235         fprintf('Errore di battitura. Il valore
                immesso non è disponibile')
236     end
237 end
238
239 end
240
241
242
243
244 if o>1 % Non entro qua se non ho trovato nemmeno un
        sensore di temperatura; se ne ho trovato almeno uno
        vado a chiedere se la cosa è voluta o se devo
        forzare l'inserimento
245 for i=1:length(s)
246     check=s(i).ch_corr;
247     if isempty(check)==1&strcmp(s(i).caratterizzazione
        , 'S')==1 %Verifico se il sensore di strain è
        associato o meno a uno di temperatura
248         fprintf('\nIl sensore %s è di tipo strain, ma
                non è associato a un sensore di Temperatura
                .\n',char(s(i).canale))
249         p=0;
250         while p==0 %while per controllo errori di
                battitura
251             fprintf('\nElenco sensori di temperatura
                    disponibili per compensazione:\n')
252             for o=1:length(corr) %Stampo l'elenco dei
                    sensori di temperatura disponibili
253                 fprintf('--[%d] sensore <%s> con
                        frequenza di riferimento %.0f \n',
                        o, char(corr(o).canale), str2num(
                        corr(o).lambda0))
254             end
255             fprintf('\nDigitare il numero da 1 a %d
                    corrispondente al canale desiderato: \n
                    ',length(corr))
256             n=str2num(input('-->', 's'));
257             if n>=1&n<=length(corr)&n~=' ' %Condizione
                    che permette di procedere se il valore
                    numerico inserito è corretto
258                 p=1;
259                 s(i).ch_corr=corr(n).num;
260             else
261                 fprintf('\n-Errore di battitura. Si
                    prega di inserire un numero
                    corretto.\n')
262             end
263         end

```

```

264         %Riporto nella struttura generale (s) la
                frequenza di
265         %riferimento del canale di temperatura
                associandola al
266         %sensore di strain a cui mancava
267         s(i).lambda_rif=corr(n).lambda0;
268     end
269     if length(s(i).ch_corr)~=0
270         %Vuol dire che dentro a ch_corr ho un numero,
                quindi prendo
271         %un canale di strain che sia associato a uno
                di temperaturatura e gli associo
272         %tramite la struttura generale (s) le misure
                del relativo sensore di temperatura
273         s(i).lambda_t=s(s(i).ch_corr).misure;
274     end
275 end
276 end
277 end

```

### 3.5.1 Verifica correlazioni

Questa porzione di codice analizza la struttura dati creata in precedenza per chiedere una conferma ulteriore all'utente circa le correlazioni effettuate. Questo ulteriore controllo si è reso necessario per permettere anche una misura di *strain* senza correlazione. La formula utilizzata per la correlazione infatti richiede espressamente la coesistenza di due differenti sensori, l'uno per lo *strain* e l'altro per la temperatura. Nel caso in cui un sensore non risultasse correlato, i dati per il plot del valore dello strain corretto in funzione della temperatura non saranno disponibili, ma verranno memorizzati comunque i dati della deformazione registrata e dopo aver informato l'utente, verranno plottati i grafici. Nel caso in cui l'utente invece si sia sbagliato e si fosse dimenticato un sensore il codice glielo farà presente e chiederà forzatamente l'inserimento di un sensore di temperatura per la correlazione.

## 3.6 Salvataggio dati

Questa sezione crea in maniera automatica una cartella all'interno della *directory* di lavoro con all'interno i *plot* generati dalla simulazione e un file *.txt* di riepilogo di quanto avvenuto durante la simulazione. Il file di riepilogo conterrà al suo interno tutte le informazioni raccolte durante la simulazione e le eventuali note che l'utente ha desiderato inserire. Il nome della cartella sarà analogo al nome del file di *input* che si è immesso, seguito ancora dalle informazioni relative alla data e all'ora per evitare di sovrascrivere i dati nel caso di simulazioni multiple sullo stesso file.

```

1 %% SECTION X.X - SALVATAGGIO DATI
2 % In questa sezione viene creata una cartella con un nome
    uguale a quello

```

```

3 % del file che si è inserito all'inizio per eseguire l'import
  dei dati (il
4 % file di output dell'interrogatore); viene creato un piccolo
  file .txt di
5 % riepilogo della analisi e viene chiesto all'utente se
  desidera salvare i
6 % grafici.
7
8
9 format shortg
10 te=clock;
11 nf=strsplit(nomefile, '.');
12 nomecartella=[char(nf(1)), '_', num2str(te(4)), '.', num2str(te(5)
  ), '.', num2str(te(6), '%.0f')];
13 mkdir(nomecartella);
14 messaggio=['riepilogo_', char(nf(1)), '.txt'];
15 fp=fopen(messaggio, 'w');
16 fprintf(fp, 'IL PRESENTE FILE .TXT E STATO GENERATO IN MANIERA
  AUTOMATICA DALLO SCRIPT "Post_processing_2_0"\n');
17 fprintf(fp, 'E CONTIENE AL SUO INTERNO UN REPORT DEI DATI
  UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE, DEI SENSORI INTERROGATI E
  ALTRE CARATTERISTICHE\n');
18 fprintf(fp, 'DELLA SIMULAZIONE.\n\n\n');
19 if appunti==1
20     fprintf(fp, 'NOTE: %s\n\n', nota);
21 end
22 fprintf(fp, 'SONO STATI IMPORTATI UN TOTALE DI %d SENSORI\n\n\t
  \t [-] %d SENSORI CATEGORIZZATI COME "WAVELEGNTH"\n\t\t [-]
  %d SENSORI CATEGORIZZATI COME "PRESSURE"\n', length(s),
  contatore_wave, contatore_pressure);
23 fprintf(fp, '\t\t [-] %d SENSORI CATEGORIZZATI COME "STRAIN"\n\t
  \t [-] %d SENSORI CATEGORIZZATI COME "TEMPERATURE"\n\n',
  contatore_strain, contatore_temperature);
24
25 if str2num(analisi)==2      %Ho scelto una analisi
  personalizzata quindi riporto i dati relativi alle formule
  utilizzate
26     fprintf(fp, 'L ANALISI EFFETTUATA E DI TIPO PERSONALIZZATO\
  n\n');
27     fprintf(fp, 'DATI FISICI RELATIVI ALLA FIBRA E AL PROVINO:\
  n\n');
28     fprintf(fp, '\t\t [-] coefficiente foto-elastico = %d\n',
  photo);
29     fprintf(fp, '\t\t [-] gauge factor = %d\n', gaugefactor);
30     fprintf(fp, '\t\t [-] variazione dell indice di rifrazione =
  %d [1/K]\n', alfa_delta);
31     fprintf(fp, '\t\t [-] coefficiente di espansione termica del
  vetro = 0.55*10^-6 [1/K]\n');

```

```

32     fprintf(fp, '\t\t[-] coefficiente di espansione termica del
        provino (alluminio) = %d [1/K]\n\n\n', cet_pro);
33     fprintf(fp, 'DATI RELATIVI AI SENSORI:\n\n');
34     for i=1:length(s)
35
36
37         if strcmp(s(i).tipo, 'Wavelength')==1
38             fprintf(fp, 'NOME SENSORE: %s\n', char(s(i).canale))
39                 ;
40             fprintf(fp, 'TIPO DI SENSORE: %s\n', char(s(i).tipo)
41                 );
42             fprintf(fp, 'FREQUENZA A RIPOSO DEL SENSORE: %.3f\n
43                 ', (s(i).lambda0));
44             for j=1:length(s)
45                 if strcmp(s(i).lambda_rif, s(j).lambda0)==1
46                     fprintf(fp, 'CORRELATO AL SENSORE: %s\n',
47                         char(s(j).canale));
48                     fprintf(fp, 'FREQUENZA A RIPOSO DEL SENSORE
49                         CORRELATO: %.3f\n', str2num(s(j).
50                             lambda0));
51                     break
52                 end
53             end
54         else
55             fprintf(fp, '\nNOME SENSORE: %s\n', char(s(i).canale
56                 ));
57             fprintf(fp, 'TIPO DI SENSORE: %s\n\n', char(s(i).
58                 tipo));
59         end
60     end
61 end
62
63 if str2num(analisi)==1
64     fprintf(fp, 'L ANALISI EFFETTUATA E DI TIPO STANDARD\n\n');
65     for i=1:length(s)
66         fprintf(fp, 'NOME SENSORE: %s\n', char(s(i).canale));
67         fprintf(fp, 'TIPO DI SENSORE: %s\n\n', char(s(i).tipo));
68     end
69 end
70
71 stat=fopen(fp);
72 movefile(messaggio, nomecartella);
73 copyfile(nomefile, nomecartella);

```

## 3.7 Plot Dati

Questa sezione si occupa di individuare quali dati sono disponibili per generare i grafici, ovvero tutte le grandezze fisiche e i canali presenti. Questi vengono mostrati all'utente che, mediante un elenco numerato, può scegliere le combinazioni di grafici desiderati. Ogni grandezza viene plottata in funzione del tempo (asse *time*), che è comune a tutte le misure. Mediante la funzione *subplot* i grafici delle diverse tipologie (*strain*, *pressure*, *temperature* e *wavelength*) verranno mostrati tutti nella stessa finestra, uno sotto l'altro, in modo tale da permettere il confronto, essendo l'asse *time* quello comune a tutte. L'unico caso in cui viene generata una finestra a parte per il grafico è quello in cui si scelga di effettuare un confronto tra *strain* con e senza compensazione. È implementata, inoltre, la possibilità di plottare più grafici appartenenti alla stessa tipologia sugli stessi assi in modo tale da effettuare un confronto tra essi. Questo sarà dunque un confronto tra canali diversi che misurano la stessa grandezza fisica. Dunque la logica seguita dal codice per generare i grafici risulta la seguente:

1. Scelta del tipo di grandezza fisica da plottare: bisogna selezionare tutte le grandezze fisiche che si desidera visualizzare sui grafici, una volta confermata la scelta non se ne possono aggiungere altre;
2. Scelta dei canali da plottare: bisogna selezionare tutti i canali relativi alla grandezza fisica a cui si riferiscono. Prima di generare il *plot*, per ogni grandezza fisica selezionata allo *step* precedente, vengono chiesti i canali di interesse.

L'unico caso in cui il codice lavorerà in automatico senza lasciare alcuna possibilità di scelta all'utente, sarà quello in cui è presente una sola grandezza fisica e un solo canale. Al termine della sezione il codice provvede in maniera automatica al salvataggio dei *plot* sia in formato *.png* che in formato *.fig* all'interno della cartella creata nella sezione "Salvataggio Dati".

## 3.8 Logica di calcolo

Di seguito viene riportato un diagramma di flusso ad alto livello che permette di capire la logica di progettazione adottata.

## 3.9 Analisi Statistica

Per la trattazione dei dati ottenuti si sono utilizzate delle funzioni già implementate all'interno di Matlab per poter effettuare una breve analisi statistica. Per non affidare i risultati alla pura casualità, è necessario infatti effettuare una analisi statistica in modo da valutare la bontà dei dati ottenuti ed elaborati.

Come già anticipato in precedenza, questo compito è stato affidato alle funzioni già implementate all'interno di Matlab. Nello specifico lo *script* sviluppato viene eseguito dopo aver effettuato il *run* del codice principale, che fornisce la struttura dati da analizzare.

In particolare la struttura dati immagazzinata precedentemente è stata scomposta in una serie di intervalli corrispondenti a quelli utilizzati per la micromovimentazione e per la misura. In seguito gli intervalli relativi al

```

1 num_ch = 1
2 abcd = 1;
3 l0 = [53.59 77.86 151.19 228.94]*10^-3; % Old = c 129.8
4 rip0 = 0;
5 rip1 = 0.1;
6 gaugefactor = 0.78;
7 disp('Verificare nome cartella di output')
8 %pause
9 folder = 'Analisi_HR_150518_log2'
10 analisi=1; %1 per step, 2 per ripetitività
11 %% Lunghezza analisi
12
13 lungh1=(length(s(1).misure));
14 lungh=round(lungh1,-2);
15 if lungh>lungh1
16     lungh=lungh-100;
17 end
18 if mod(lungh,200)==0
19     lungh=lungh-100;
20 end
21 clear lungh1
22 lungh=1100
23 %% Creo una struttura con i dati necessari a partire dal post-
    processing
24
25 a = 0;
26 b = 0;
27 c = 0;
28 d = 0;
29 k = 1;
30
31 for i = 1:length(s)
32     if isempty(s(i).mec_strain)==0
33         if a==0
34             str(k).nome = s(i).canale;
35             str(k).strain = s(i).mec_strain(1:lungh);
36             str(k).de_lambda = s(i).misure(1:lungh)-str2num(
                char(s(i).lambda0));
37             str(k).lambda = s(i).misure(1:lungh);
38             str(k).lam0 = str2num(char(s(i).lambda0));
39             a = 1;
40             k = k+1;
41         elseif b==0
42             str(k).nome = s(i).canale;
43             str(k).strain = s(i).mec_strain(1:lungh);

```

```

44         str(k).de_lambda = s(i).misure(1:lungh)-str2num(
           char(s(i).lambda0));
45         str(k).lambda = s(i).misure(1:lungh);
46         str(k).lam0 = str2num(char(s(i).lambda0));
47         b = 1;
48         k = k+1;
49     elseif c==0
50         str(k).nome = s(i).canale;
51         str(k).strain = s(i).mec_strain(1:lungh);
52         str(k).de_lambda = s(i).misure(1:lungh)-str2num(
           char(s(i).lambda0));
53         str(k).lambda = s(i).misure(1:lungh);
54         str(k).lam0 = str2num(char(s(i).lambda0));
55         c = 1;
56         k = k+1;
57     elseif d==0
58         str(k).nome = s(i).canale;
59         str(k).strain = s(i).mec_strain(1:lungh);
60         str(k).de_lambda = s(i).misure(1:lungh)-str2num(
           char(s(i).lambda0));
61         str(k).lambda = s(i).misure(1:lungh);
62         str(k).lam0 = str2num(char(s(i).lambda0));
63         d = 1;
64         k = k+1;
65     end
66 end
67 end
68 clear a b c d k
69
70
71 %% Vettori necessari ai plot
72
73 %Genero un vettore tempo totale e uno dedicato all'analisi
    degli step
74 %statici. Stessa cosa per le misure
75 time_step = reshape(time(1:lungh),100,[]);
76 strain_step = reshape(str(num_ch).strain(1:lungh),100,[]);
77 de_lam_step = reshape(str(num_ch).de_lambda(1:lungh),100,[]);
78 lam_step = reshape(str(num_ch).lambda(1:lungh),100,[]);
79 lam0 = str(num_ch).lam0;
80 time_tot = time(1:lungh);
81 %Vettori per lo strain teorico (intero e a step)
82 teor_step = [zeros(100,1)];
83 teor_rip = [rip0*ones(100,1)];
84 for i = 1:(lungh-100)/200
85     if length(teor_step)<lungh
86         teor_step = [teor_step, i*ones(100,1)/10, i*ones
           (100,1)/10];
87         if mod(i,2)~=0

```

```

88         teor_rip = [teor_rip, rip1*ones(100,1), rip1*ones
                    (100,1)];
89     else
90         teor_rip = [teor_rip, rip0*ones(100,1), rip0*ones
                    (100,1)];
91     end
92 end
93 end
94
95 %Dimensionalizzo lo strain
96 strain_dim = str(num_ch).strain*10(abcd)/10^6*10^3;
97
98 mkdir (folder)
99
100 %% ANALISI STEP CRESCENTI - plot step e confronto
101
102 if analisi==1
103     figure(1)
104     hold all
105     plot(time_tot(1:100,1), lam_step(1:100,1), 'r')
106     for i=3:2:length(time_tot)/100
107         plot(time_step(1:100,i), lam_step(1:100,i), 'r')
108     end
109     grid on
110     ylabel('Wavelength [nm]')
111     xlabel('Time [s]')
112     hold off
113
114     nomefile=sprintf('step_%s',folder)
115     saveas(figure(1),nomefile,'fig')
116     saveas(figure(1),nomefile,'png')
117     movefile(strcat(nomefile,'.fig'),folder)
118     movefile(strcat(nomefile,'.png'),folder)
119
120     figure(2)
121     hold all
122     plot(time_tot, strain_dim, time_tot, reshape(teor_step
            ,1,[]))
123     %plot(time_step(1:100,1), strain_dim(1:100))
124     grid on
125     hold off
126     legend('Ch01', 'Andamento teorico', 'Location', 'best')
127     xlabel('Time [s]')
128     ylabel('\DeltaL [mm]')
129
130     nomefile=sprintf('confr_%s',folder)
131     saveas(figure(2),nomefile,'fig')
132     saveas(figure(2),nomefile,'png')
133     movefile(strcat(nomefile,'.fig'),folder)

```

```

134     movefile(strcat(nomefile, '.png'), folder)
135
136 end
137
138 %% ANALISI STEP CRESCENTI - plot fit lineare
139 %Ricavo i valori comandati di strain, lambda e delta lambda
140 strain_teor = teor_step/10(abcd)*10^(3);
141 de_lam_teor = gaugefactor*lam0*strain_teor/10^6;
142 lam_teor = de_lam_teor+lam0;
143 k=1;
144 if analisi==1
145     siz=size(strain_step);
146     for i=1:2:siz(2)
147         delamean(k) = mean(de_lam_step(:,i));
148         lamean(k) = mean(lam_step(:,i));
149         stmean(k) = mean(strain_step(:,i));
150         stmean_teor(k) = mean(strain_teor(:,i));
151         k=k+1;
152     end
153     clear k
154     figure(3)
155     clear strain_teor
156     strain_teor = reshape(teor_step,1,[])/10(abcd)*10^(3);
157
158     P=polyfit(stmean_teor,delamean,1)
159     yfit= polyval(P,stmean_teor);
160     plot(stmean_teor,yfit, strain_teor, reshape(de_lam_teor
161         ,1,[]))
162     grid on
163     ylabel('\Delta\lambda')
164     xlabel('\epsilon')
165     legend('Fit lineare','Andamento comandato')
166     nomefile=sprintf('fit_%s',folder)
167     saveas(figure(3),nomefile,'fig')
168     saveas(figure(3),nomefile,'png')
169     movefile(strcat(nomefile, '.fig'), folder)
170     movefile(strcat(nomefile, '.png'), folder)
171 end
172 %% ANALISI STEP CRESCENTI - costante correttiva
173 if analisi==1
174     %Fit dati teorici per coeff angolare comandato
175     F=polyfit(strain_teor, reshape(de_lam_teor,1,[]),1)
176     %Confronto il fit teorico e quello comandato per trovare
177     la costante
178     %correttiva:
179     cost = F(1)/P(1)
180     figure(4)

```

```

180     plot(stmean_teor, cost*yfit, strain_teor, reshape(
        de_lam_teor, 1, []))
181     grid on
182     ylabel('\Delta\lambda')
183     xlabel('\epsilon')
184     legend(strcat('Fit lineare corretto con costante=',
        num2str(cost)), 'Andamento comandato')
185
186     nomefile=sprintf('fit_corr_%s', folder)
187     saveas(figure(4), nomefile, 'fig')
188     saveas(figure(4), nomefile, 'png')
189     movefile(strcat(nomefile, '.fig'), folder)
190     movefile(strcat(nomefile, '.png'), folder)
191
192     figure(5)
193     plot(time_tot, cost*strain_dim, time_tot, reshape(
        teor_step, 1, []))
194     grid on
195     legend(strcat('Ch01 corretto con costante=', num2str(cost)
        ), 'Andamento teorico', 'Location', 'best')
196     xlabel('Time [s]')
197     ylabel('\DeltaL [mm]')
198
199     nomefile=sprintf('step_corr_%s', folder)
200     saveas(figure(5), nomefile, 'fig')
201     saveas(figure(5), nomefile, 'png')
202     movefile(strcat(nomefile, '.fig'), folder)
203     movefile(strcat(nomefile, '.png'), folder)
204
205
206     end
207     %% ANALISI STEP CRESCENTI - Gaussiane
208
209
210     k = 1;
211     for i = 1:2:siz(2)
212         figure(6)
213         histfit(lam_step(:, i), 40, 'normal');
214         xlabel('Wavelength [nm]')
215         ylabel('f')
216
217         nomefile=sprintf('gauss%d_%s', k, folder)
218         saveas(figure(6), nomefile, 'fig')
219         saveas(figure(6), nomefile, 'png')
220         movefile(strcat(nomefile, '.fig'), folder)
221         movefile(strcat(nomefile, '.png'), folder)
222         close(figure(6))
223         dev_st(k) = std(lam_step(:, i));
224         media(k) = mean(lam_step(:, i));

```

```
225     k = k+1;
226 end
227 clear k
228
229
230 %% ANALISI RIPETITIVITA' - Plot confronto
231
232 if analisi==2
233     plot(time_tot, strain_dim, time_tot, reshape(teor_rip
234         ,1,[]))
235     grid on
236 end
237 %% ANALISI RIPETITIVITA' - Plot gaussiane complessive
238
239 if analisi==2
240 strain_teor_dim = reshape(teor_rip,1,[]);
241 v0 = [];
242 v1 = [];
243 for i = 1:2:length(strain_teor_dim)
244     if strain_teor_dim(i)==rip0
245         v0 = [v0, strain_step(i)'];
246     else
247         v1 = [v1, strain_step(i)'];
248     end
249 end
250 figure(4)
251 histfit(v0,40,'normal');
252 title('Gaussiana complessiva dei valori inferiori')
253 xlabel('Strain [\mu\epsilon]')
254 ylabel('f')
255
256 figure(5)
257 histfit(v1,40,'normal');
258 title('Gaussiana complessiva dei valori superiori')
259 xlabel('Strain [\mu\epsilon]')
260 ylabel('f')
261 end
262
263 [media' dev_st']
264 %clear dev_st media
265 % clear delamean lamean stmean stmean_teor abcd analisi
266     de_lam_step yfit
267 % clear de_lam_teor F folder i l0 lam0 lam_step lam_teor lungh
268 % clear nomefile num_ch P rip0 rip1 siz str strain_dim
269     strain_step time_tot
270 % clear time_step teor_step teor_rip strain_teor cost
```

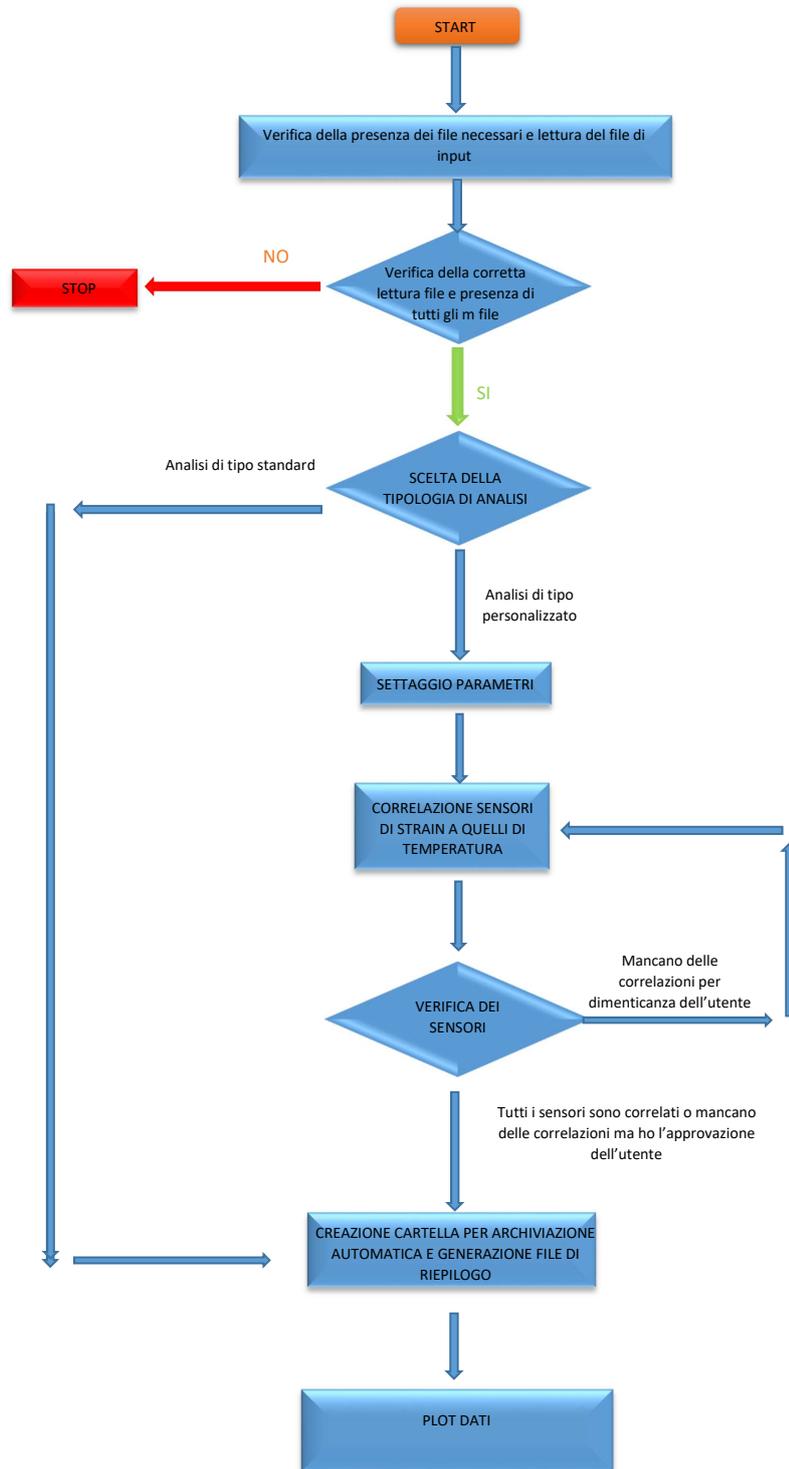


Figura 3.1. Diagramma di flusso implementato nel codice

# Capitolo 4

## Realizzazione del Banco Prova

Al fine di testare e validare i sensori FBG, si è realizzato un banco apposito per effettuare le misure. Per fare ciò si è partiti dalla progettazione dei sistemi di bloccaggio che fossero in grado di vincolare saldamente la fibra ottica su due estremità per permettere le misure.

Per i modelli tridimensionali e per le messe in tavola si è utilizzato il software di modellazione 3D Solidworks. Nelle varie sezioni di questo capitolo verranno spiegate le strategie sviluppate e le accortezze che sono state introdotte durante la progettazione.

### 4.1 Base

Il banco prova realizzato si compone di vari sistemi di bloccaggio, micromovimentatori ad un singolo asse, un interrogatore, varie fibre ottiche dotate di un reticolo FBG scritto direttamente sulla fibra stessa e due *breadboard* sulle quali sono stati montati i vari componenti. In una prima fase di acquisizione dei dati, il banco era installato sopra ad una piattaforma in legno ma analizzando i primi risultati ci si è accorti di un disturbo costante in tutte le misurazioni causato dalle vibrazioni. La presenza di questo segnale di disturbo non consentiva quindi di assumere una particolare lunghezza d'onda come lunghezza d'onda di riferimento e di conseguenza non era possibile ricavare una misura precisa della grandezza desiderata. Per porre rimedio a questo problema ci si è serviti di un tavolo anti vibrante. La *breadboard* è stata quindi installata al di sopra del tavolo anti vibrante e in aggiunta sono stati montati su di essa degli smorzatori in gomma (figura 4.1) per raggiungere il grado di isolamento desiderato. Data l'estrema sensibilità dei sensori FBG è importante isolare la zona di misura dai possibili spostamenti d'aria provenienti dall'ambiente e, per questo motivo, alla *breadboard* è stata applicata una struttura formata da profilati in alluminio e Plexiglass. Anche i rumori, essendo onde di pressione, influiscono sulla qualità delle misure.

Questa copertura non è presente sulla *breadboard* utilizzata per le misure di temperatura in quanto il sistema di bloccaggio stesso è sufficiente a permettere il corretto isolamento del sensore dai disturbi esterni.

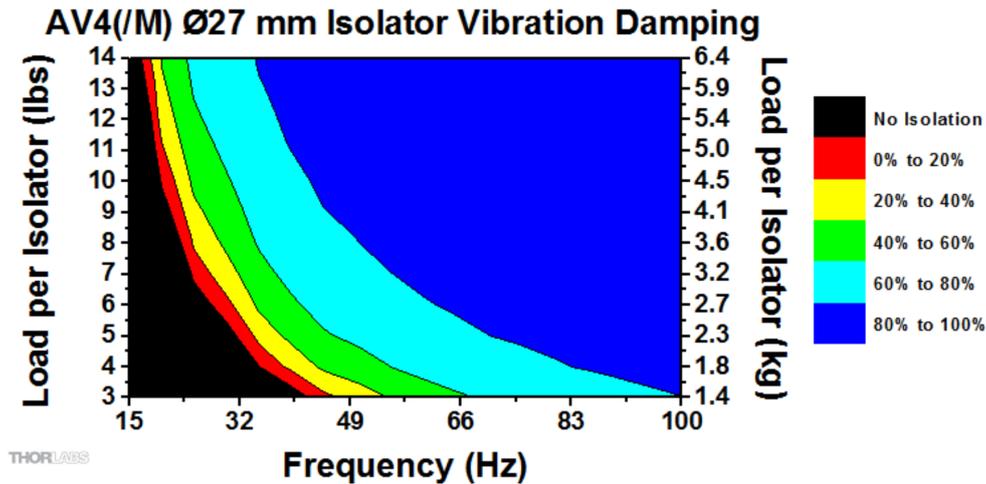


Figura 4.1. Carico-Frequenza per ciascuno smorzatore passivo (Copyright 1999-2018 Thorlabs, Inc.)

## 4.2 Sistemi di Bloccaggio per Test Meccanici

### 4.2.1 Sistema di Bloccaggio in Alluminio

I sistemi di bloccaggio utilizzati per effettuare la calibrazione dei sensori sono tutti costituiti da tre parti; una base inferiore in alluminio, uno strato intermedio di gomma ed infine una copertura superiore anch'essa in alluminio come si può vedere in figura 4.2. Questa configurazione in particolare sfrutta la pressione della copertura superiore esercitata dalle 6 viti M3 ed inoltre permette di cambiare lo strato di materiale interposto tra la base inferiore e la copertura in alluminio.

È molto importante evitare di serrare la fibra ottica tra i due blocchi in alluminio senza uno strato di materiale che faccia da cuscinetto, in quanto si andrebbe ad applicare sulla fibra una pressione eccessiva con conseguente rottura della stessa. A questa conclusione si è giunti a seguito di due test effettuati in laboratorio utilizzando una volta un nastro biadesivo e una volta non frapponendo alcun materiale tra la fibra e l'alluminio. In entrambi i casi il test ha portato alla rottura della fibra.

Sono state utilizzate due differenti tipologie di gomma; una gomma dura ed una più morbida. In entrambi i casi si è dovuto valutare attentamente la tipologia di gomma da utilizzare in quanto la deformazione della gomma stessa va ad influire in modo più o meno marcato sulla misura.

Il primo sistema è mostrato in figura 4.2; in particolare è riportata una vista esplosa del sistema di bloccaggio destinato ad essere fissato al micromovimentatore. Si notano la base inferiore con la scanalatura per ospitare la fibra ottica, lo strato di gomma e la base superiore che, tramite le 6 viti M3 garantirà il bloccaggio della fibra ottica.

Lo strato di gomma che deve essere modellato per consentire il passaggio delle viti. La forma indicata in figura 4.2 è quindi puramente indicativa.

Il secondo sistema di bloccaggio invece è dotato di due fori lamati che permettono di vincolarlo direttamente alla *breadboard* tramite due viti M6. Anche in questo caso il sistema lavora in modo analogo a quanto già spiegato in precedenza per il sistema

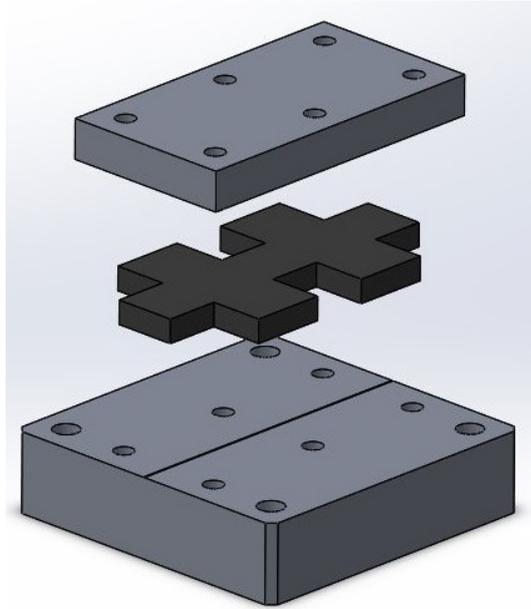


Figura 4.2. Sistema di bloccaggio da montare sul micromovimentatore (CAD)

di bloccaggio destinato ad essere montato sopra al micromovimentatore.

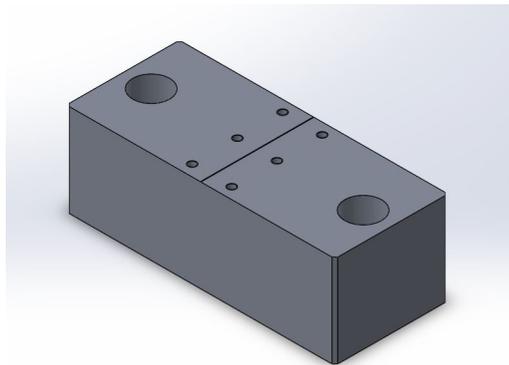


Figura 4.3. Base inferiore montata sulla breadboard (CAD)

In figura 4.4 e 4.5 è possibile osservare il sistema di bloccaggio completamente assemblato.

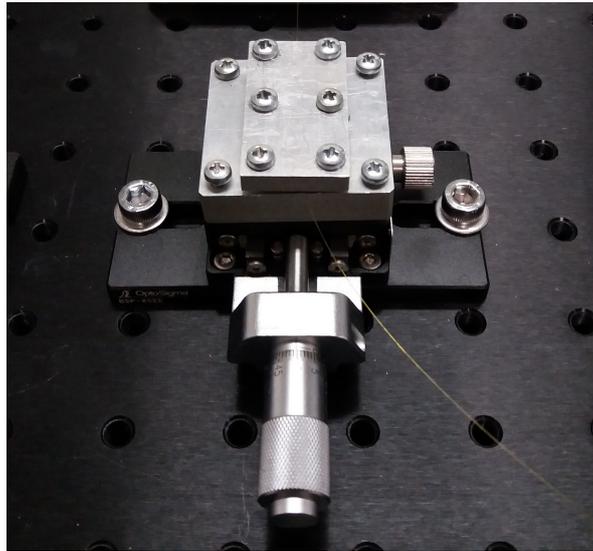


Figura 4.4. Primo sistema di bloccaggio

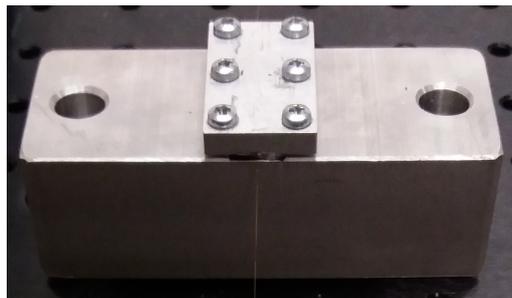


Figura 4.5. Secondo sistema di bloccaggio

Come si può vedere in figura 4.4 il micromovimentatore non è fissato direttamente alla *breadboard* ma si è dovuto ricorrere ad un adattatore per via della incompatibilità con gli interassi dei fori della *breadboard*.

Vale la pena osservare che su ciascuna base inferiore è presente una scanalatura a V (figura 4.6) profonda circa  $1/10\text{mm}$ . Questa quota è molto importante in quanto se fosse più profonda la gomma posizionata sopra di essa non riuscirebbe a garantire un adeguato bloccaggio mentre, se fosse meno profonda porterebbe a rottura la fibra nel caso di un serraggio eccessivo delle viti. La scanalatura consente inoltre un corretto centraggio della fibra sul sistema di bloccaggio.



Figura 4.6. Base inferiore con particolare sulla scanalatura a V

In figura è possibile vedere la *breadboard* completamente equipaggiata con i vari sistemi di bloccaggio 4.7.

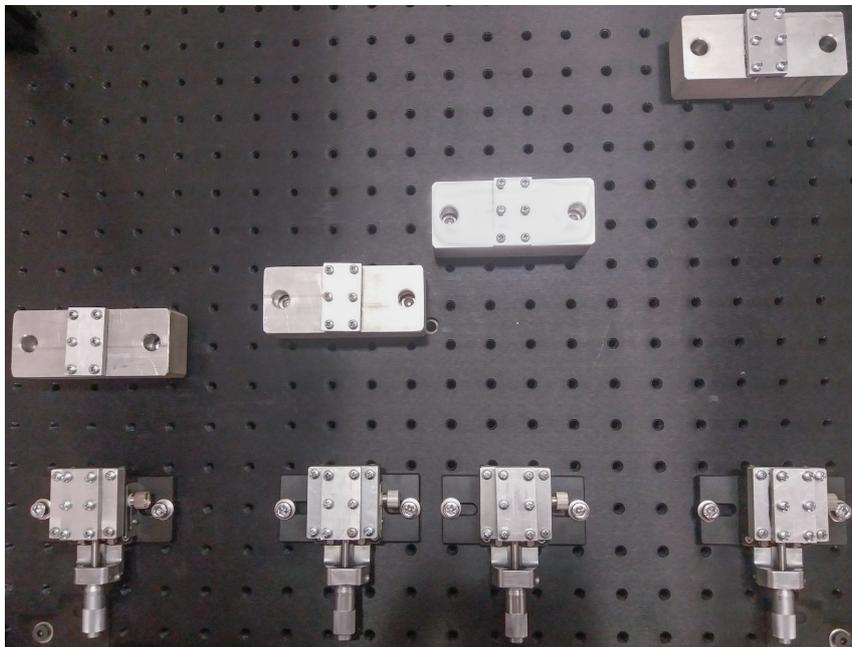


Figura 4.7. Allestimento completo breadboard per misure meccaniche

Queste diverse configurazioni ci permettono di studiare la risposta dei sensori FBG in conseguenza alle variazioni di sforzo meccanico comandate dall'interrogatore. I valori di deformazione meccanica misurati sono rapportati alla lunghezza a riposo della fibra ottica  $L_0$  montata sulla linea.

Per un corretto montaggio del sistema occorre fare particolare attenzione a due aspetti. Il primo accorgimento riguarda la preparazione della base superiore in quanto un pezzo di gomma incollato in modo scorretto potrebbe rompere la fibra, dopo il serraggio delle viti, per via di un effetto "ghigliottina" (come mostrato in figura 4.8). Si consiglia pertanto un montaggio con una porzione di gomma più piccola rispetto alle dimensioni della base superiore per poter garantire la non eccedenza della stessa durante il serraggio.

Il secondo accorgimento riguarda invece la fibra ottica stessa. Durante la fase di assemblaggio infatti è conveniente utilizzare dei gunti il gomma/lattice per non

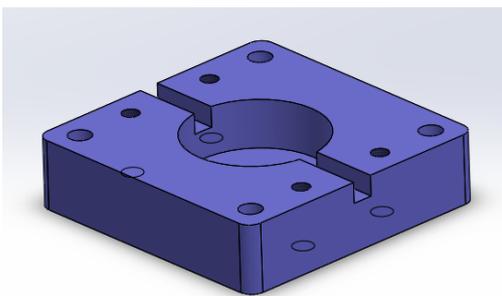
trasmettere alla fibra stessa l'umidità e il grasso naturalmente presenti sulla pelle umana; questi fattori infatti possono far decadere la tenuta del sistema di bloccaggio anche in modo molto marcato.



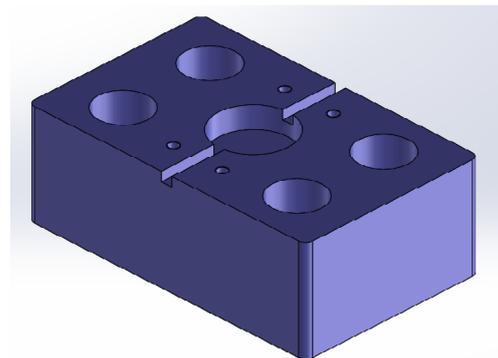
Figura 4.8. Effetto "ghigliottina"

#### 4.2.2 Sistema di bloccaggio ottenuto da stampante 3D

Oltre ai sistemi di bloccaggio in alluminio, sono stati sviluppati altri due sistemi sfruttando le potenzialità della stampante 3D. Questi sistemi sono stati realizzati per poter utilizzare la resina epossidica senza danneggiare il sistema di bloccaggio in alluminio. Questa nuova tecnologia infatti permette di ottenere una enorme quantità di geometrie differenti (anche complesse) in tempi molto più rapidi rispetto alle lavorazioni tradizionali e ad un prezzo notevolmente inferiore. Anche questo sistema di bloccaggio, come quelli realizzati in alluminio, si compone di due parti; una è quella montata sopra al micromovimentatore e l'altra è quella fissata alla *breadboard*.



(a) Base montata sopra al micromovimentatore (CAD)



(b) Base montata sulla breadboard (CAD)

Figura 4.9. Sistemi di bloccaggio in Acido Polilattico (PLA) (CAD)

L'idea di questo sistema è quella di creare una sorta di dischetto cilindrico di resina epossidica contenente al suo interno una fibra annegata. Questa soluzione, se il

sistema di bloccaggio fosse stato in alluminio, necessitava di uno stampo apposito rivestito con un opportuno distaccante per poter rimuovere il dischetto una volta solidificato e trasferirlo nel sistema di bloccaggio.

Utilizzando invece un materiale a basso costo si è pensato dunque di evitare questi passaggi aggiuntivi andando semplicemente a realizzare un cilindro cavo destinato ad ospitare la fibra e la resina 4.10. Questo andrà poi ad inserirsi direttamente all'interno degli alloggiamenti circolari ricavati sulle due basi. È importante notare che nell'accoppiamento meccanico tra i fori e i cilindri è presente un gioco meccanico per permettere l'estrazione del provino. Il gioco meccanico non influisce comunque nelle misurazioni in quanto una volta messa in trazione la linea il cilindro va in battuta sulla parete annullando il gioco. Per misure di vibrazioni o per valutare spostamenti e deformazioni in più direzioni il montaggio deve essere modificato per garantire gioco nullo. Il cilindro è inoltre  $1\text{mm}$  sporgente rispetto al piano della base per garantire che il sistema risulti bloccato dalla piattina avvitata sopra. Durante la fase di trazione infatti vi è il rischio di uno spostamento dato dalla rotazione del contenitore sottoposto alla forza trasmessa dalla fibra stessa.

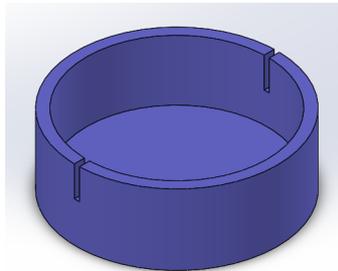


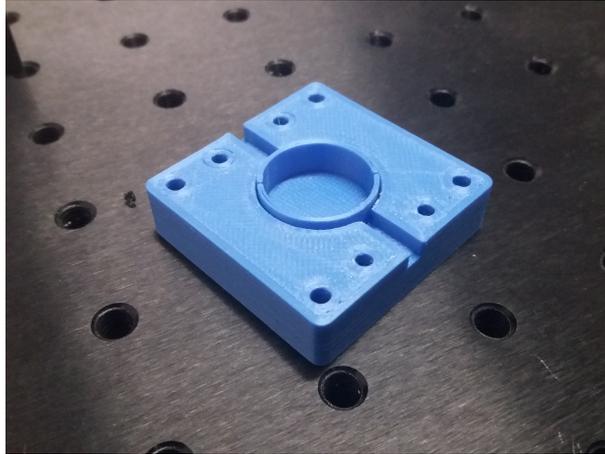
Figura 4.10. Cilindro contenitore per colata (CAD)

In figura è possibile vedere il montaggio completo del sistema.

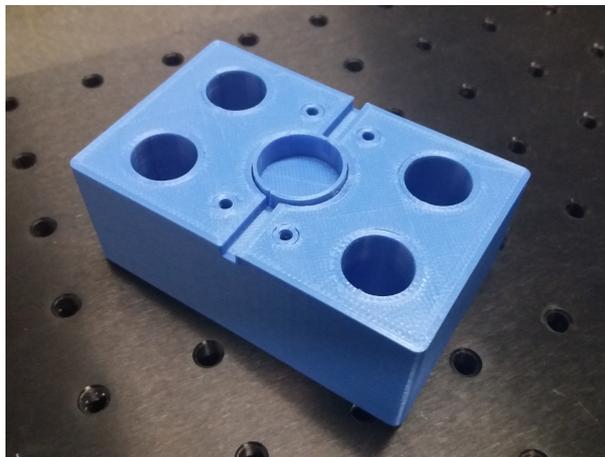
Questo sistema permette di sostituire molto velocemente una linea che può aver subito un danneggiamento oppure semplicemente cambiare la tipologia di fibra ottica senza andare ad intaccare in alcun modo il sistema di bloccaggio.

Il secondo sistema di bloccaggio si basa invece su due semplici piattine sulle quali verrà incollata la fibra ottica:

In questo caso, qualora si verifichi la rottura della fibra (o nel caso di sostituzione della stessa per altri motivi), bisogna rimuovere meccanicamente la resina e questo può portare ad un danneggiamento del supporto su cui si desidera effettuare la misura. In alternativa, sempre grazie ai bassi costi di produzione, è possibile pensare di rimuovere sia la fibra che la piattina e sostituire il tutto con una nuova. Vale la pena far notare che la produzione di una piattina richiede una maggiore quantità di materiale rispetto alla soluzione vista prima con il cilindro contenitore.



(a) Base da montare sul micromovimentatore



(b) Base da montare sulla breadboard

Figura 4.11. Assemblaggio finale del sistema



Figura 4.12. Cilindro contenitore per colata

In figura 4.14 è possibile vedere le due soluzioni montate sulla *breadboard*:

Sulla *breadboard* i sistemi di bloccaggio sono montati con una diversa lunghezza  $L_0$  per ogni linea. In questo modo è possibile andare a valutare le variazioni di risposta della fibra in funzione dello stress applicato dal micromovimentatore e studiare come variano i risultati in funzione della lunghezza della linea  $L_0$ . Sono anche state

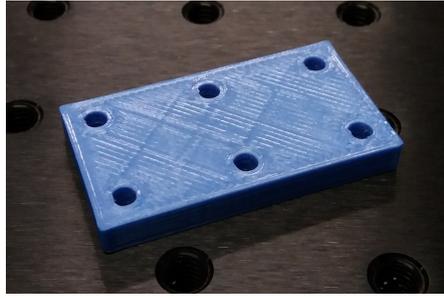
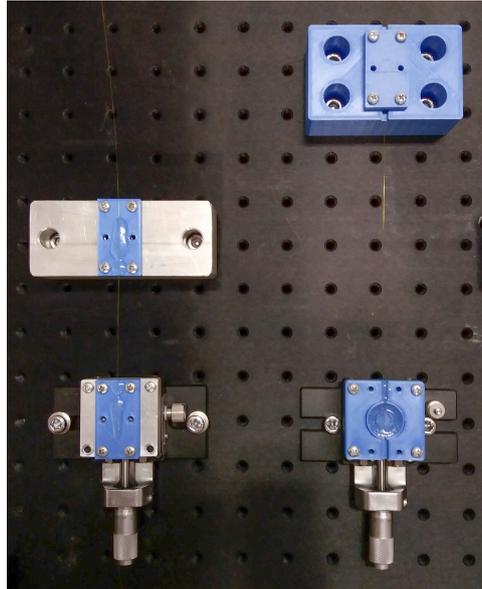


Figura 4.13. Piattina rettangolare

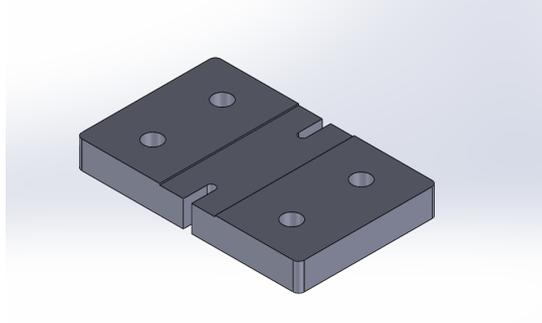
Figura 4.14. Montaggio dei sistemi sulla *breadboard*

montate due linee con la stessa lunghezza  $L_0$  ma con differente sistema di bloccaggio per andare a valutare la bontà del sistema di bloccaggio stesso a fissata  $L_0$ .

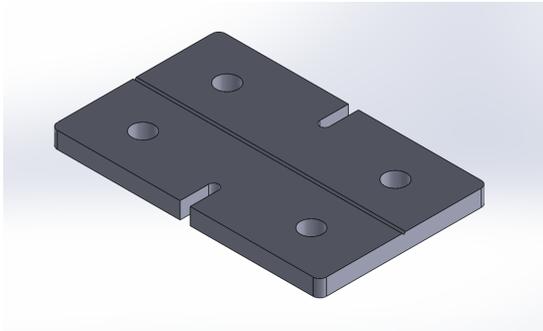
### 4.3 Sistema di Bloccaggio per Test Termico

Anche per le misure in campo termico si è deciso di progettare un sistema di bloccaggio riutilizzabile e costituito da 3 parti. A differenza del sistema di bloccaggio utilizzato per la misura della deformazione meccanica, questo sistema non poggia direttamente sulla *breadboard* ma poggia su dadi avvitati in 4 barre filettate. Questa soluzione è stata pensata per permettere un perfetto allineamento della fibra con gli altri pezzi già esistenti. Con questa filosofia sono stati disegnati due sistemi differenti. Come è possibile vedere dalla figura riportata sotto la base inferiore presenta una fresatura profonda pochi millimetri per consentire l'alloggiamento della cella *Peltier* e due fresature passanti per consentire il passaggio dei fili della cella. Sopra alla base inferiore, dopo aver inserito 4 rondelle in gomma per evitare di danneggiare la cella una volta serrato il tutto, trova posto una piattina anch'essa in alluminio con una scanalatura di circa  $1/10mm$  per ospitare la fibra ottica. L'ultimo componente

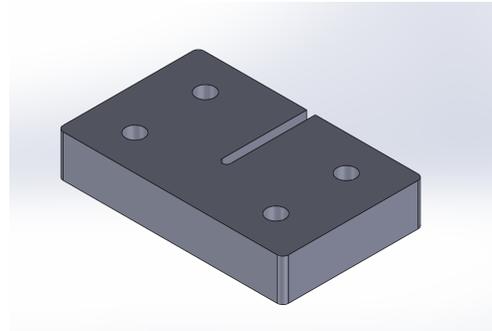
costituente il sistema di bloccaggio è la base superiore che presenta un alloggiamento per il sensore di temperatura. La scanalatura è presente da un solo lato e si protrae fino a qualche millimetro oltre l'interasse per consentire il corretto posizionamento del sensore a contatto con l'FBG ed anche per cercare di rendere il più uniforme possibile la diffusione del calore.



(a) Base per cella *Peltier* (CAD)



(b) Piattina per alloggiamento fibra ottica (CAD)



(c) Base per sensore di temperatura (CAD)

Il secondo sistema sviluppato invece è analogo al primo per quanto riguarda la piattina designata all'alloggio della fibra e per la base superiore ma cambia la geometria della base inferiore come si può vedere dall'immagine 4.15. La fresatura è stata sostituita da un foro centrale filettato (M20) nel quale si avvita un bullone che ospiterà sulla sua estremità la cella *Peltier*. Nel montaggio non sono presenti le rondelle in gomma, come invece si avevano nel sistema precedente, in quanto la regolazione in altezza della cella viene fatta sfruttando il passo del bullone stesso. Per via della non perfetta planarità dell'estremità del bullone, si è provveduto ad una lavorazione al tornio della faccia per eliminare le possibili imperfezioni.

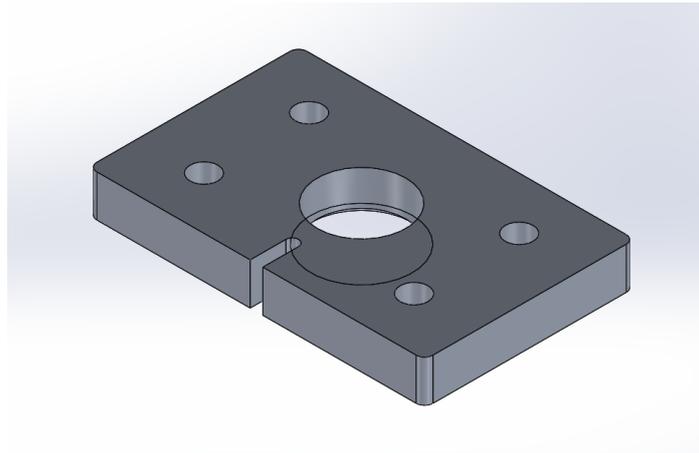


Figura 4.15. Base per cella *Peltier* con foro filettato M20 (CAD)

Il sistema completamente assemblato è il seguente:



Figura 4.16. Complessivo del sistema per test termico

Tutto il sistema è, come già accennato in precedenza, realizzato in alluminio per evitare di avere differenti coefficienti di espansione termica.

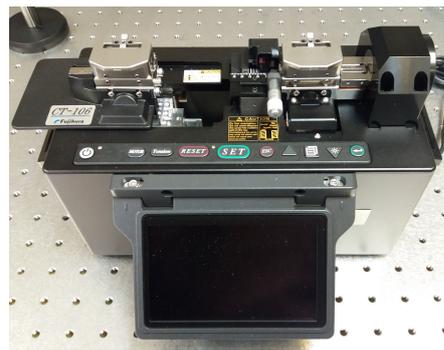
Il sistema è stato progettato pensando anche per accoppiarsi al sistema di bloccaggio per le misure di deformazione meccanica per andare a valutare l'effetto del riscaldamento dato dalla cella *Peltier* accoppiato con quello meccanico dato dal micromovimentatore. Per fare questo è sufficiente sostituire la piattina dove viene posizionata la fibra ottica con una di pari geometria ma con una scanalatura più marcata per consentire lo scorrimento libero della fibra stessa.

## 4.4 Splicing della Fibra Ottica

Durante la fase di test, è stato fondamentale poter collegare le fibre ottiche, perché le fibre ottiche con il reticolo di Bragg a nostra disposizione non erano dotate di *patchcord* per permettere il collegamento della fibra al dispositivo utilizzato per l'interrogazione dei sensori. Al giorno d'oggi, ci sono due metodi differenti per la giunzione delle fibre ottiche basate principalmente su splicing meccanico e fusione. Anche se la tecnica di splicing a fusione richiede alcune attrezzature particolari, consente di ottenere una elevata precisione ed un basso livello di perdite di potenza. Come prima cosa, è necessario rimuovere il rivestimento esterno nella porzione dotata di *patchcord* e questo, nel nostro caso è stato rimosso meccanicamente. Il rivestimento della fibra ottica dove è presente l'FBG, per via della sua natura poliimmidica, è stato rimosso invece grazie ad un agente chimico come l'alcool isopropilico e somministrando calore. Dopo aver pulito entrambe le estremità con un solvente, si è proceduto con un *cleaver* manuale o automatico. Questa fase è particolarmente critica perché se le estremità di ciascuna fibra non è perfettamente perpendicolare all'asse della fibra stessa, la giunzione risultante darà origine ad una perdita di potenza accentuata.



(a) Cleaver manuale



(b) Cleaver automatico

Figura 4.17. Cleavers

Una volta compiuta la pulizia ed il taglio delle fibre bisogna andare ad inserire un termorestringente per far sì che a seguito della saldatura si possa andare a ricoprire con un materiale protettivo la zona di saldatura. Una volta inserito il termorestringente si procede con il disporre le due estremità delle fibre all'interno della *splicer* in prossimità dei due elettrodi, come si vede in figura 4.18.

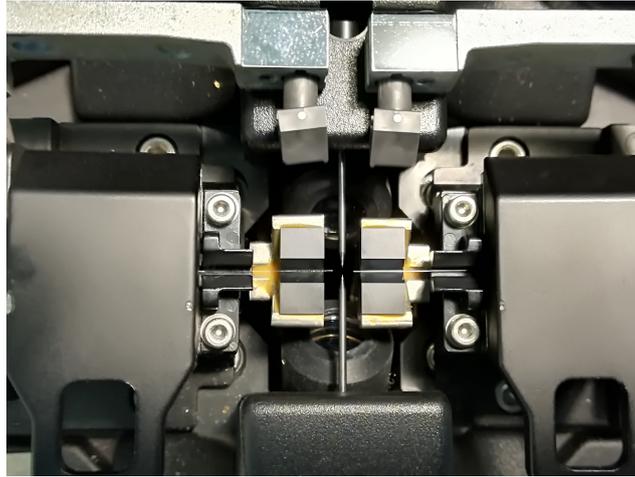
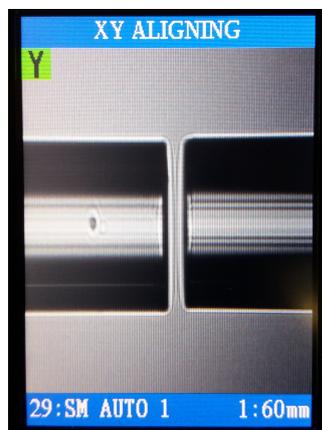


Figura 4.18. Posizionamento delle fibre

Durante la fase di *splicing* è possibile monitorare lo stato dell'intero processo utilizzando il display integrato nella macchina (4.19). È importante effettuare correttamente la fase di taglio in quanto se questo non consente di ottenere una superficie ortogonale all'asse della fibra, la procedura di saldatura non andrà a buon fine.

Alla fine del processo di saldatura la macchina fornisce una stima della perdita di potenza della saldatura stessa; una buona saldatura consente di ottenere delle perdite attorno agli 0 dB.



(a) Istante del processo di splicing



(b) Stima della perdita di potenza

Figura 4.19. Processo di splicing e stima della perdita di potenza

Una volta realizzata la saldatura si provvede a posizionare il termorestringente 4.20 sulla stessa e viene re-inserito il tutto nella macchina. Il termorestringente è importante per andare a proteggere la giunzione ottenuta in quanto in questa porzione di fibra è stato rimosso il rivestimento esterno alla fibra (che appunto ha il compito di proteggere la fibra dall'ambiente esterno) per poter permettere la saldatura delle due parti.

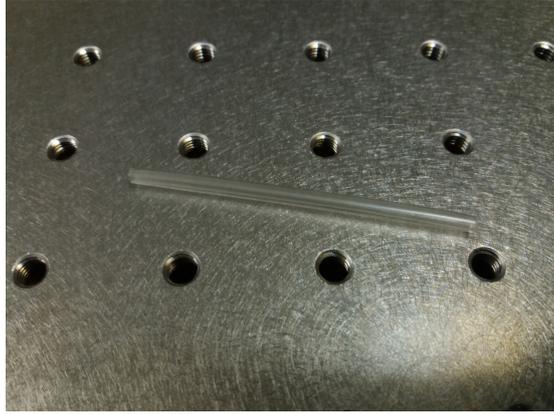


Figura 4.20. Termorestringente

## 4.5 Disposizione dell'Interrogatore

Per poter inviare e ricevere i segnali ai sensori è stato utilizzato un interrogatore. Questo dispositivo sfruttando la tecnologia laser è in grado di inviare all'interno della fibra una serie di impulsi equispaziati, attendere che questi percorrano l'intera lunghezza della fibra, riceverli, decodificarli e impacchettare i dati all'interno di un file con estensione *.log*. Assieme all'interrogatore viene fornito un *software* che permette di modificare una grande varietà di parametri per poter effettuare una analisi personalizzata. Nel caso di misure su linee molto lunghe o per misure molto rapide nel tempo (vibrazioni) è necessario prestare molta attenzione nel settaggio dei parametri dell'interrogatore in quanto un errore di impostazione può condurre ad una misura completamente priva di significato. Tramite il *software* fornito è possibile anche impostare le informazioni che si desiderano avere nel file di uscita; in particolare si può decidere se si vogliono i valori di lunghezza d'onda semplici oppure se si desidera avere una conversione automatica dei valori di lunghezza d'onda in valori di grandezze fisiche più leggibili come pressione temperatura e deformazione meccanica. Nonostante questa possibilità è preferibile utilizzare sempre i dati di lunghezza d'onda e procedere successivamente alla trattazione di questi con le opportune formule.

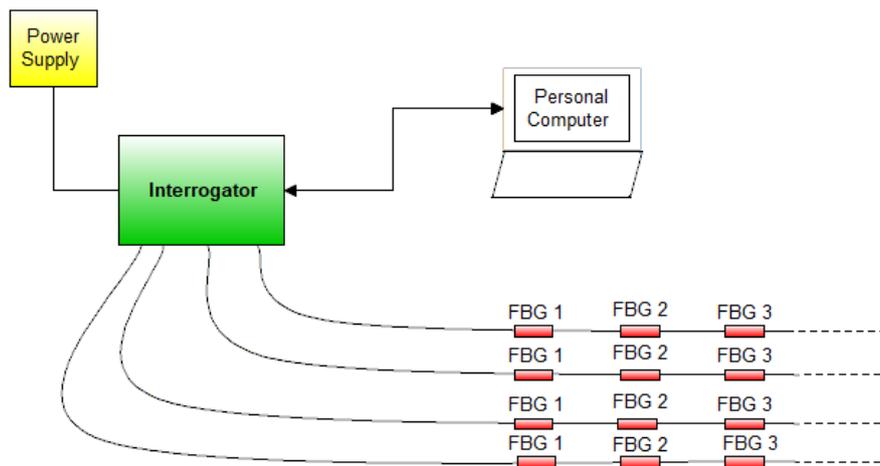


Figura 4.21. Schema di funzionamento dell'interrogatore

Le fibre ottiche installate sul banco prova sono *Single Mode* con un *core* di circa  $9\mu\text{m}$  ed un *cladding* di circa  $125\mu\text{m}$ , rivestite da un rivestimento Poliimmidico (PI). Le fibre ottiche rivestite con questo materiale hanno generalmente uno spessore inferiore a quelle in Acrilato e di conseguenza risultano essere più fragili; in compenso lavorano molto bene alle alte temperature e quindi sono preferibili quando si deve operare in ambienti severi.

# Capitolo 5

## Test e Misure

Utilizzando il sistema di acquisizione a nostra disposizione e sfruttando lo *script Matlab* per il *post-processing* trattato nel capitolo precedente, è stato possibile andare a misurare le variazioni dei picchi di lunghezza d'onda e da queste risalire alla corrispondente misura di deformazione. Tutte le misure sono state condotte secondo una precisa logica di misura. L'acquisizione dei dati infatti è stata svolta suddividendo l'intervallo di misura in blocchi da 10 secondi in modo da permettere di micromovimentare i sensori e garantire il corretto numero di misure. Così facendo si è potuto superare il limite fisico imposto dal sistema di acquisizione dei dati.

Le diverse campagne di misurazione hanno permesso di testare contemporaneamente sia il sensore che la qualità del sistema di bloccaggio progettato. Come già spiegato nel capitolo dedicato alla realizzazione del banco prova, si sono sviluppati 3 diversi sistemi di bloccaggio; uno che utilizza gomma dura o morbida e sfrutta delle viti per il serraggio, e due che sfruttano la resina epossidica. Nel corso de capitolo si parlerà di linea corta, media e lunga facendo riferimento alle diverse lunghezze a riposo di montaggio del sistema di bloccaggio.

Sui dati grezzi ottenuti si è operata anche una breve analisi statistica (come quella descritta nel capitolo sul codice di calcolo) per ricavare il coefficiente correttivo  $K$  necessario per correggere gli errori generati da fenomeni fisici che verranno descritti nel capitolo. In particolare verranno presentati, per mezzo di grafici e tabelle, i passaggi che hanno portato al calcolo dei coefficienti correttivi per i diversi sistemi di bloccaggio; in particolar modo per i sistemi di bloccaggio che utilizzano la resina epossidica.

## 5.1 Sistema di bloccaggio a viti con interposizione di gomma dura

In questa sezione verranno analizzati vari casi riguardanti il sistema di bloccaggio a viti con interposto uno strato di gomma dura. Verranno inoltre riportati i grafici più importanti e saranno discussi nel dettaglio tutti i fenomeni più critici riguardanti questo particolare sistema di bloccaggio.

### 5.1.1 Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea corta $L_0=53.59$ mm

I risultati che verranno proposti derivano da test effettuati utilizzando un sistema di bloccaggio a viti con interposto uno strato di gomma dura, un incremento del carico a step ed una distanza tra i due punti di ancoraggio della fibra di  $L_0=53.59$  mm. È importante osservare che per ogni tipologia di test, sia con questo sistema di bloccaggio che con tutti gli altri che verranno discussi, è presente un pre-carico iniziale della fibra. Il fatto di introdurre un carico iniziale è fondamentale per poter ottenere dei risultati corretti; il sensore infatti lavora a partire dal momento in cui misura una lunghezza d'onda superiore a quella base con cui è stato fotoscritto e, questa condizione si verifica solamente quando la fibra va in trazione. Quando la fibra è lasca infatti la lunghezza d'onda che misura il sensore è sempre uguale a quella della fibra a riposo e pertanto il sensore, anche se fosse sottoposto ad una trazione (e quindi dovrebbe misurare uno spostamento) non avvertirebbe alcuna variazione rispetto alla sua condizione di riposo. Nella seguente tabella 5.1.1 sono raccolte le proprietà principali di questa tipologia di test.

Test carichi a step incrementali		
Oggetto	Materiale	Valore dello Step [mm]
Step		0.15
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Gomma dura	
Materiale del sistema di bloccaggio	Alluminio	

Tabella 5.1. Step incrementali con gomma dura e lunghezza a riposo  $L_0=53.59$  mm

In figura 5.1 sono riportati i risultati ottenuti in termini di variazione di deformazione e di variazione di lunghezza d'onda. In particolare in legenda compare la dicitura *Ch01* seguita da *Gr01* che rappresenta una numerazione automatica e progressiva imposta dall'interrogatore. La prima parte indica il canale di acquisizione e risulta quindi limitato dal numero di canali fisici di acquisizione; la seconda parte indica invece il sensore utilizzato e di conseguenza questo numero sarà vincolato sia dal numero di sensori utilizzati, sia dal numero massimo di sensori che l'interrogatore è in grado di gestire. Pur essendo possibile modificare a piacere questa numerazione si è preferito lasciarla come suggerito dal *software* per una maggior chiarezza.

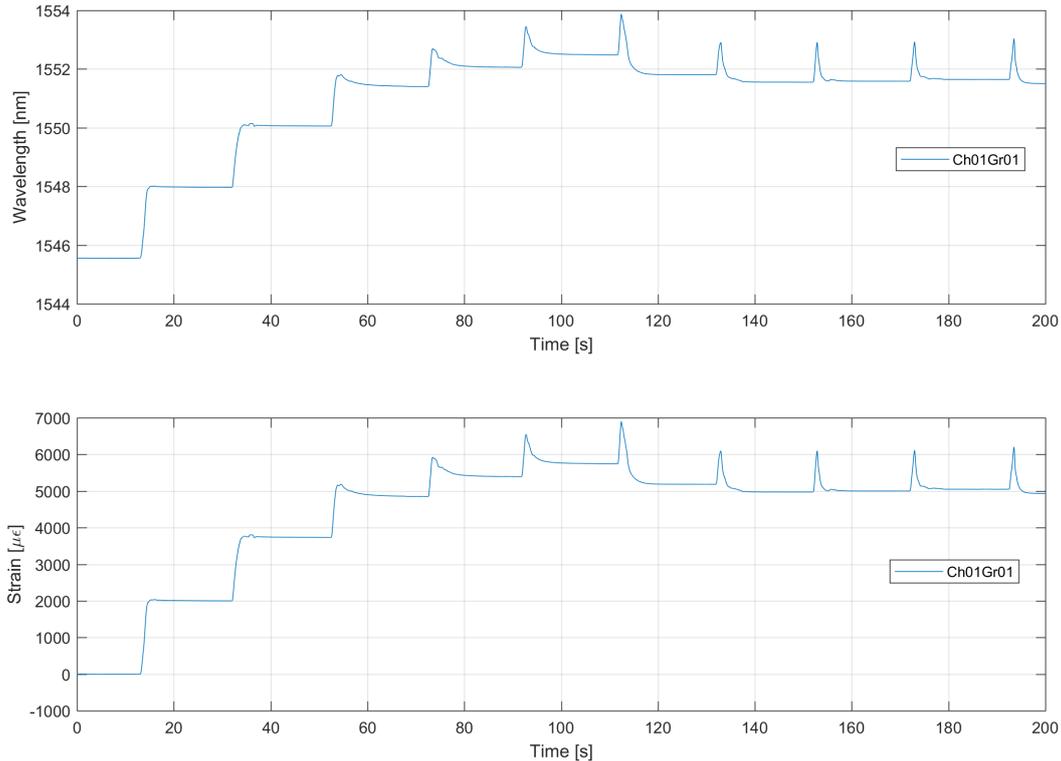


Figura 5.1. Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea corta.

Le linee verticali rappresentano la fase di transizione tra uno step comandato e l'altro; in questa fase è avvenuta la movimentazione del micromovimentatore da parte dell'operatore. In questa prova è possibile notare che nei primi 50 secondi della prova (primi 3 step) il sistema consente di ottenere una misura corretta del valore comandato in quanto il *plateau* che si forma mantiene lo stesso valore ricevuto in ingresso. Successivamente invece il sistema ha una risposta che va via via deteriorandosi ed il valore ricevuto in uscita si discosta sempre di più da quello comandato. Questa discrepanza tra il valore comandato e quello misurato deve essere ricercata all'interno del sistema di bloccaggio stesso in quanto, a seguito di altre prove con diversa lunghezza a riposo e diverso sistema di bloccaggio, l'errore sulla misura è andato via via attenuandosi fino a scomparire quasi completamente. Una prima causa di errore è stata attribuita allo scivolamento della fibra ottica sullo strato di gomma. Aumentando il valore di deformazione comandato infatti la fibra ottica viene chiaramente sottoposta ad una forza di trazione e, di conseguenza, si crea una certa forza di richiamo elastico che si oppone alla trazione e tende a mantenere la fibra alla lunghezza di riposo iniziale. Come si può vedere dal grafico, quando la forza elastica eguaglia o supera quella di attrito sviluppata all'interfaccia tra gomma e fibra, la fibra ottica scivola e non fa percepire quindi al sensore l'effettivo valore di tensione a cui è sottoposta. Per migliorare il più possibile l'aderenza tra la fibra ottica e la gomma sono stati applicati i seguenti accorgimenti:

- pulizia accurata della porzione di fibra a contatto con lo strato di gomma. La

pulizia della fibra è stata svolta utilizzando dell'Alcool Isopropilico.

- manipolazione della fibra esclusivamente con l'utilizzo di guanti. L'epidermide infatti, anche dopo una perfetta detersione, conserva una piccola quantità di grasso e umidità superficiale che vanno a deteriorare in modo importante l'aderenza all'interfaccia.
- aumento delle asperità superficiali della gomma tramite carta abrasiva.

Un altro problema riscontrato in questa tipologia di sistemi di bloccaggio è la deformazione a taglio dello strato di gomma. All'aumento del carico infatti, ipotizzando che non ci sia alcuno slittamento della fibra, la geometria della gomma passa da un parallelepipedo con le facce quadrate o rettangolari ad un parallelepipedo con facce romboidali e rettangolari.

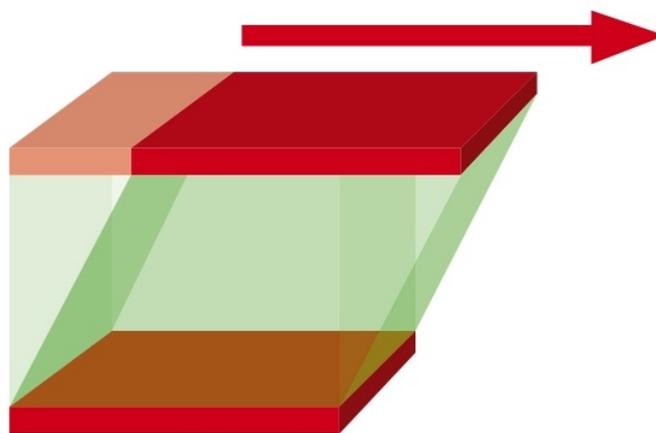


Figura 5.2. Deformazione a taglio dello strato di gomma.

Per attenuare questo effetto negativo è necessario diminuire lo spessore del materiale gommoso interposto.

L'altra causa di slittamento della fibra è da attribuire al fatto che durante la chiusura del sistema di bloccaggio la fibra ottica crea una cavità nella gomma che degrada la forza di bloccaggio applicata tramite le viti di serraggio.

Lo scivolamento della fibra ottica viene mostrato in dettaglio nella figura 5.3. Durante i dieci secondi in cui si acquisiscono i dati infatti si nota che la curva non si assesta attorno ad un ben preciso valore per poi rimanere costante ma al contrario, per tutta la durata dell'intervallo di misurazione continua ad assumere valori diversi con un andamento esponenziale decrescente.

Come già scritto in precedenza, per valutare il coefficiente correttivo per la misure effettuate ci si è appoggiati ad una analisi statistica dei dati in uscita. Da questa analisi è possibile ottenere un grafico che mostra sia la curva dell'andamento teorico, sia la curva ottenuta tramite *fitting* dei dati sperimentali ricavati.

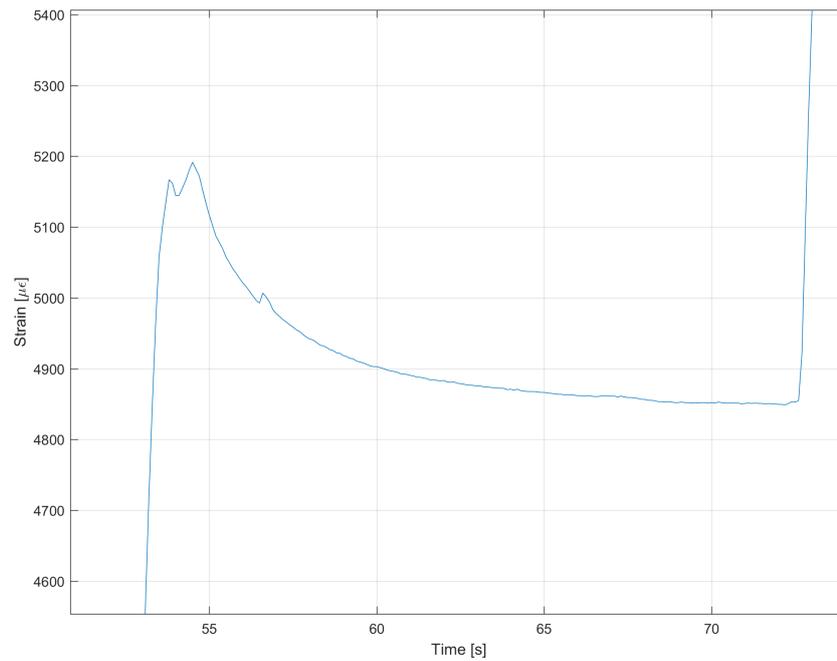


Figura 5.3. Dettaglio dello slittamento in termini di deformazione per la linea corta.

In questo grafico è possibile notare lo slittamento della fibra ed in particolare modo questo è visibile nel caso in cui si utilizzi il sistema di bloccaggio con l'inserto in gomma in quanto la curva sperimentale non passa per l'origine degli assi ma interseca l'asse Y in un punto variabile. Questo fenomeno, come si vedrà nei prossimi paragrafi, non accade nel caso in cui si utilizzi un sistema di bloccaggio basato sull'impiego della resina epossidica.

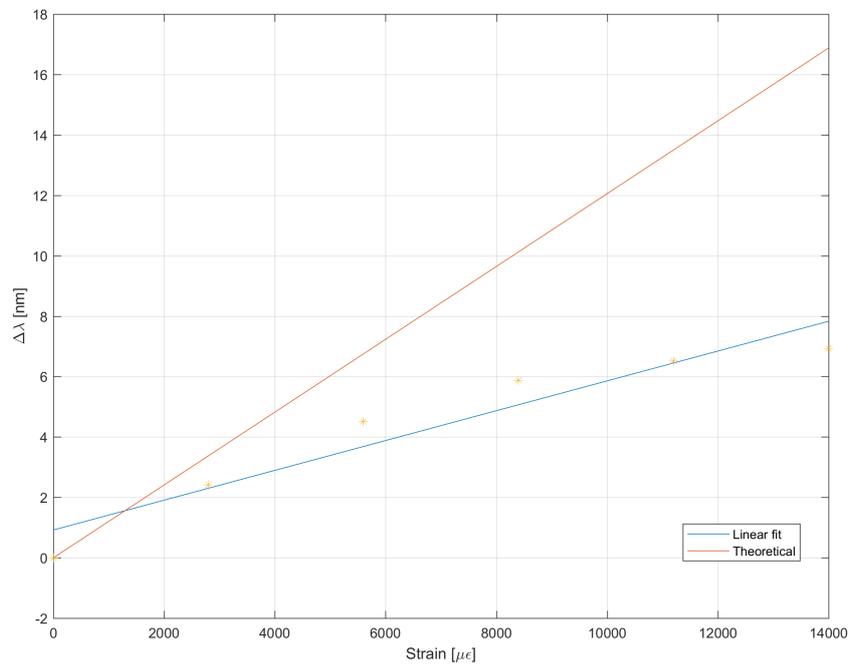


Figura 5.4. Curve teoriche e sperimentali per il sistema di bloccaggio con gomma dura e lunghezza della fibra a riposo  $L_0=53.59$  mm

### 5.1.2 Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea intermedia $L_0=128.80$ mm

Analizzando i risultati dei test condotti sulla linea intermedia si nota subito un aumento significativo della risposta del sensore allo sforzo applicato. Nella tabella sottostante 5.1.2 sono riportate le proprietà principali di questa tipologia di test:

Test carichi a step incrementali		
Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.15
Coating	Poliimmide	
Strato inteposto	Gomma dura	
Materiale del sistema di bloccaggio	Alluminio	

Tabella 5.2. Step incrementali con gomma dura e lunghezza a riposo  $L_0=128.80$  mm

Dal grafico mostrato in figura 5.5, è possibile osservare una attenuazione del fenomeno dello scivolamento della fibra ottica sulla gomma. La ragione di questo comportamento va ricercata nel fatto che, a parità di spostamento comandato, lo sforzo risulta più piccolo rispetto a quello misurato sulla linea corta. Dal grafico 5.5 sembra che il sensore riesca a seguire in maniera molto precisa la curva dei valori comandati, ma plottando sia la curva teorica che quella sperimentale in funzione del  $\Delta L$  si nota immediatamente la discrepanza tra i risultati ottenuti e quelli comandati 5.6.

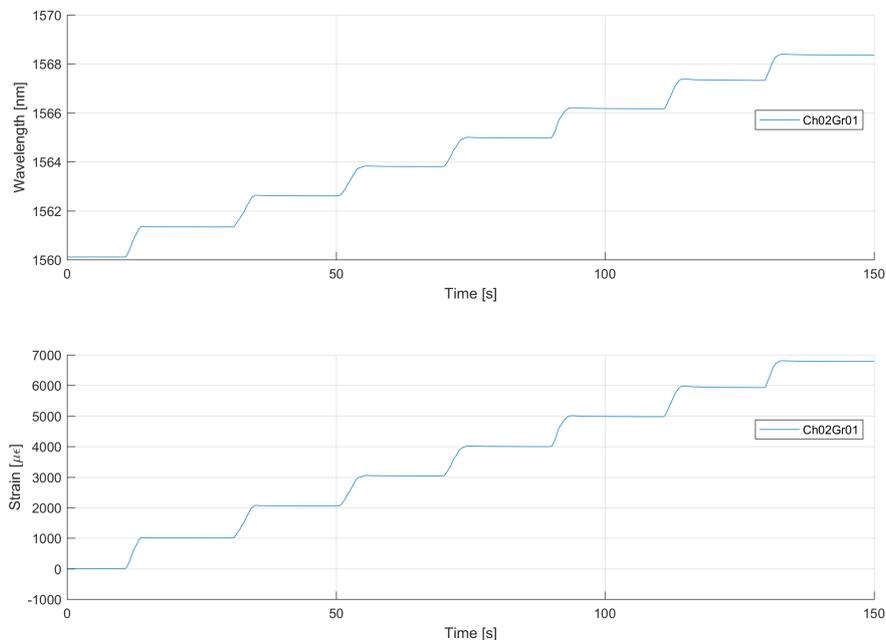


Figura 5.5. Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea intermedia.

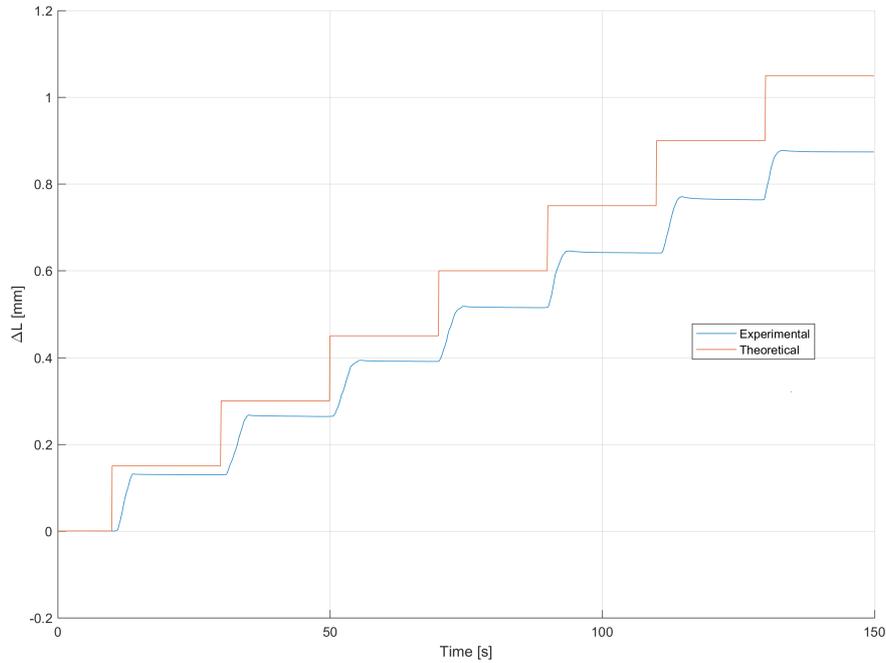


Figura 5.6. Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale sulla linea intermedia.

Il gap esistente in termini di  $\Delta L$  è probabilmente dovuto alla deformazione della gomma e allo scivolamento della fibra sulla gomma. Resta comunque il fatto che lo scivolamento risulta notevolmente attenuato. Quanto detto viene riportato in dettaglio nella figura sottostante 5.7, che mostra il comportamento del sensore con un comando a gradino:

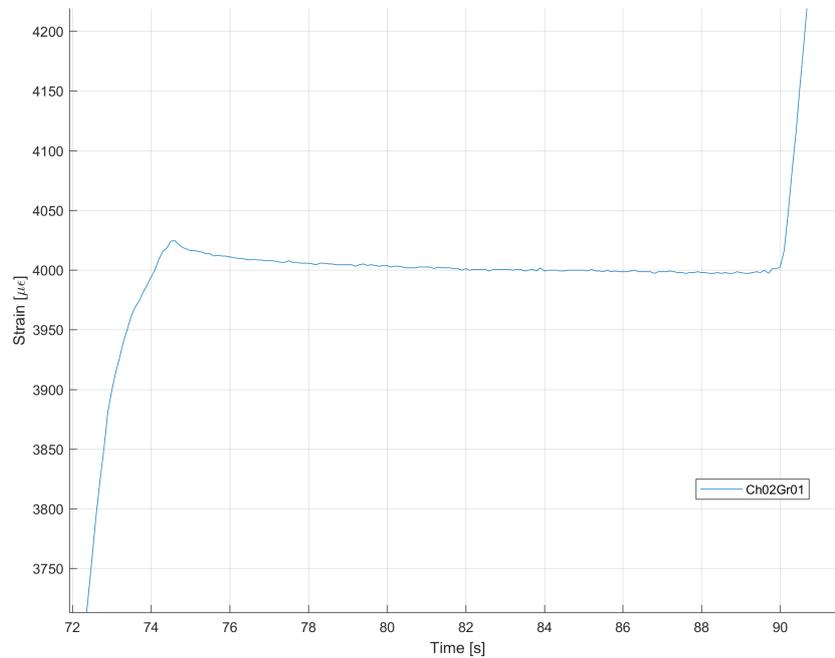


Figura 5.7. Dettaglio dello slittamento in termini di deformazione per la linea intermedia.

### 5.1.3 Risposta in termini di lunghezza d'onda e deformazione per la linea lunga $L_0=228.94$ mm

I risultati ottenuti per la linea lunga (con  $L_0=228.94$  mm), come si può vedere di seguito mostrano un andamento simile a quelli già ottenuti dalla linea intermedia. Le deformazioni sono però più piccole rispetto a quelle presenti sulla linea corta e su quella intermedia per via della lunghezza iniziale maggiore a parità di carico.

#### Test con carichi incrementali a gradino

Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.10
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Gomma dura	
Materiale del sistema di bloccaggio	Alluminio	

Tabella 5.3. Step incrementali con gomma dura e lunghezza a riposo  $L_0=228.94$  mm

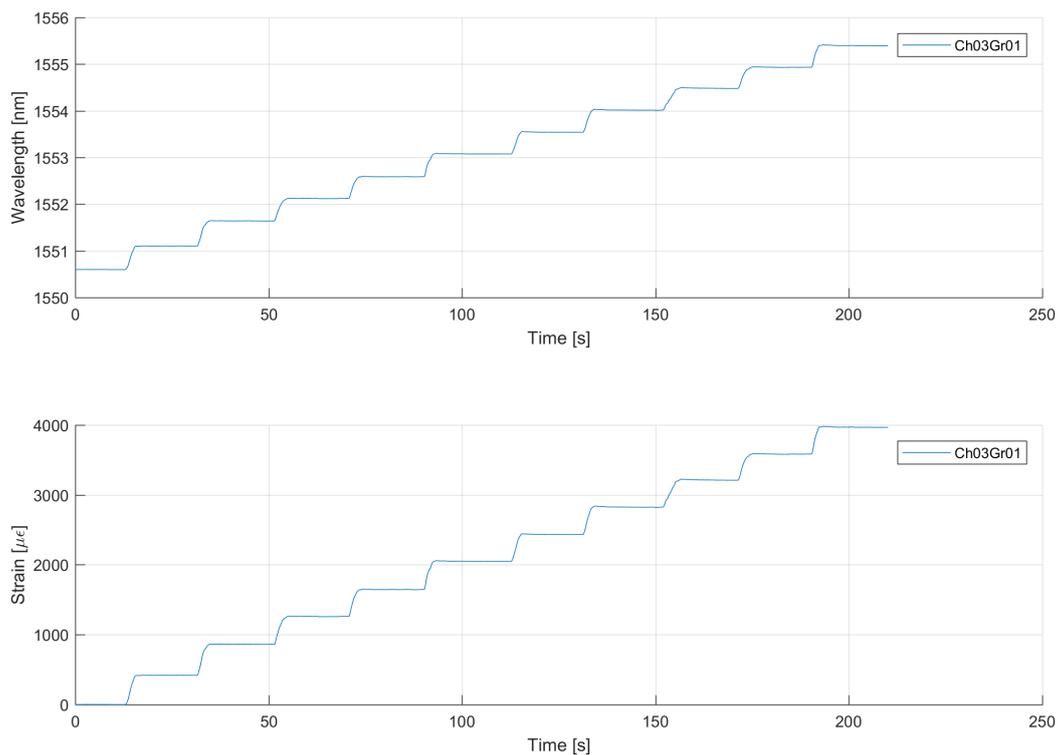


Figura 5.8. Risposta in termini di deformazione ( $\epsilon$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) per la linea corta.

Come già visto in precedenza, di seguito vengono riportati i grafici della curva teorica e di quella sperimentale 5.9:

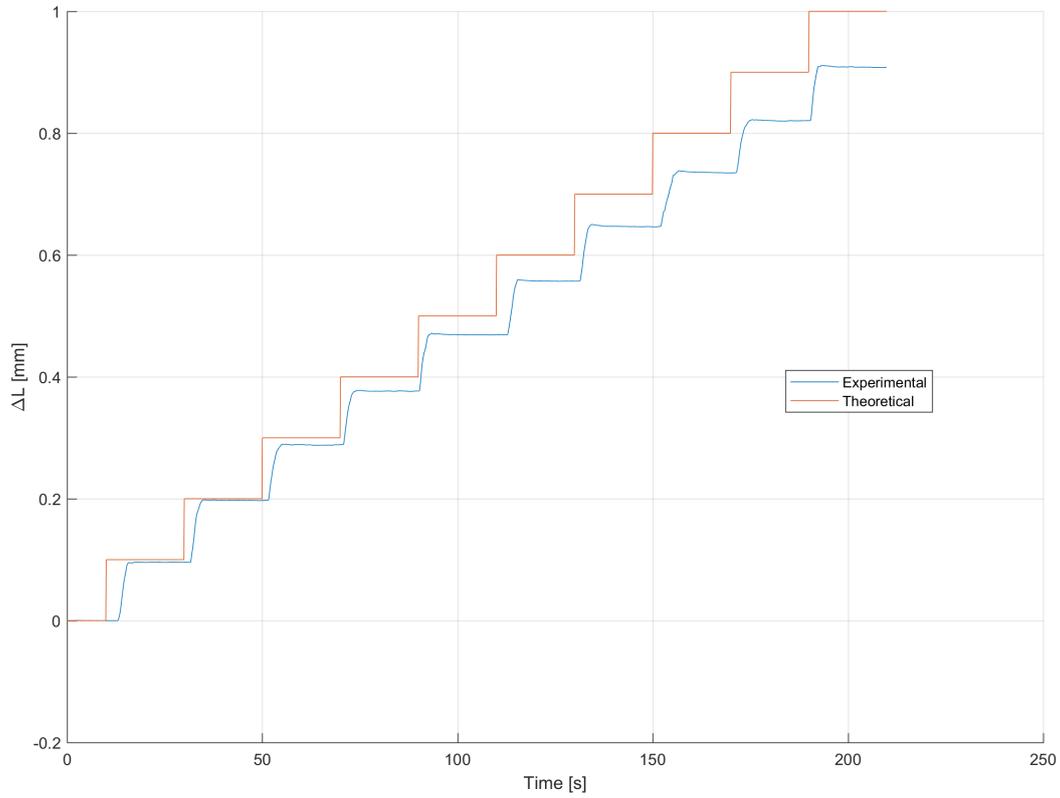


Figura 5.9. Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale sulla linea lunga.

Come precedentemente scritto, la risposta ottenuta è simile alla risposta della linea intermedia, anche se per i primi step, il sistema risponde bene e segue la curva teorica. Tuttavia, considerando l'intero test è possibile notare come il divario in termini di  $\Delta L$  continui a crescere.

Effettuando un test simultaneo sulle tre linee (breve, intermedia e lunga) è possibile graficare il valore di deformazione rispetto al tempo. In conclusione, notiamo come la linea corta è la linea più critica delle tre. Il confronto è mostrato nella figura 5.10. In particolare, la curva blu riguarda la linea corta, la curva rossa riguarda la linea intermedia e la curva gialla la linea lunga.

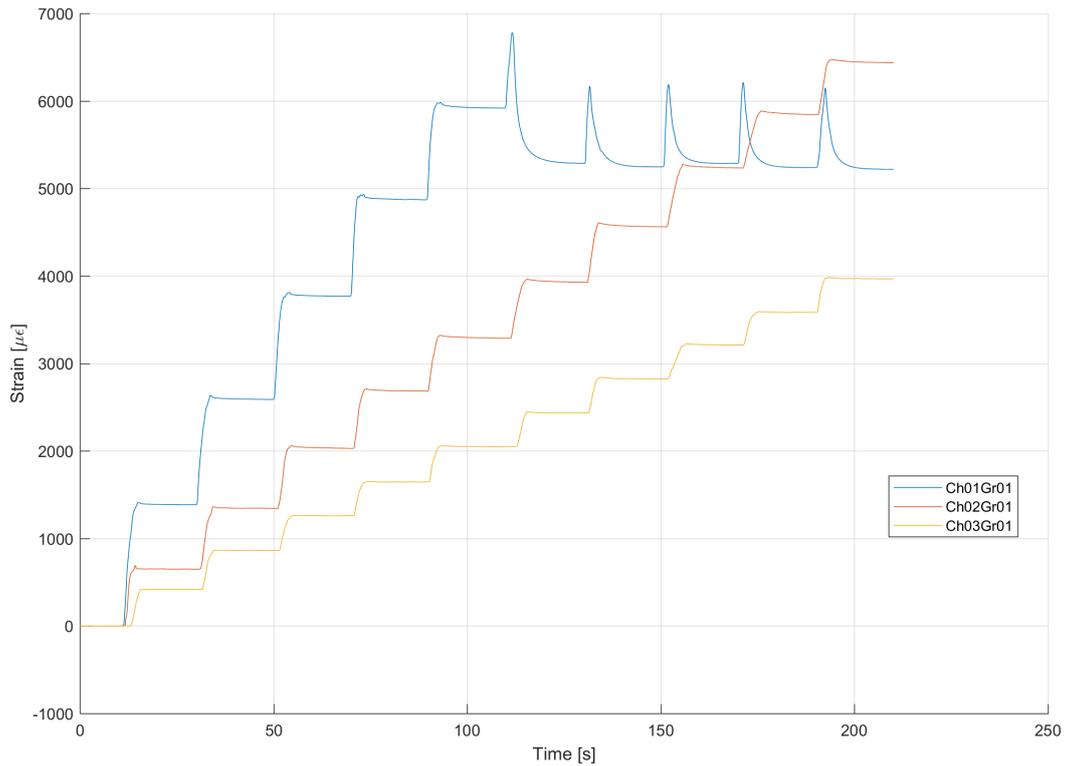


Figura 5.10. Confronto sulla risposta alla deformazione tra la linea corta, quella intermedia e quella lunga.

#### 5.1.4 Test di ripetibilità su sistema di bloccaggio a viti e gomma dura

Per i sistemi di bloccaggio con gomma dura, oltre all'esecuzione di test con step di carico incrementali, sono stati anche eseguiti dei test di ripetibilità. La tabella mostra le caratteristiche principali di quest'ultima tipologia di test:

Test di ripetibilità con carico a gradino		
Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.10
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Gomma dura	
Materiale del sistema di bloccaggio	Aluminio	

Tabella 5.4. Test di ripetibilità con carico a gradino e gomma dura. Lunghezza a riposo  $L_0=228.94$  mm

I risultati ottenuti vengono riportati di seguito 5.11:

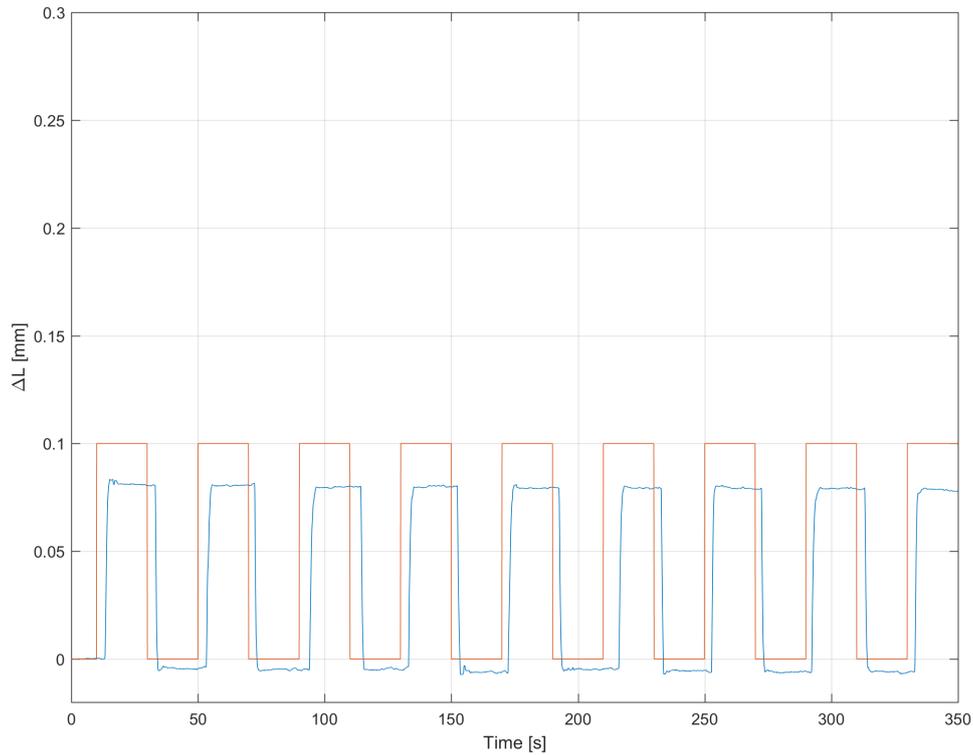


Figura 5.11. Test di ripetibilità con sistema di bloccaggio a viti con gomma dura

Questi test di ripetibilità sono stati effettuati utilizzando la linea lunga in quanto è quella che si è visto avere la migliore risposta al comando. Come si può vedere la misura di ripetibilità effettuata dimostra la ripetibilità della misura ma evidenzia anche dei *gap* non accettabili in termini di  $\Delta L$  rendendo il sistema di bloccaggio non affidabile. Inoltre questo test evidenzia chiaramente l'influenza dello scivolamento della fibra sulla misura. Quando infatti si ritorna alla posizione a riposo (0 mm sul micromovimentatore), invece di ottenere 0 dalla misura, si ottiene un valore di  $\Delta L$  negativo. L'unico motivo è da ricercare nello slittamento della fibra sulla gomma; avendo pre-caricato il sistema infatti, con un comando 0 si sarebbe dovuto ottenere 0 come risposta ma poiché la fibra scivola si va incontro ad una perdita progressiva del pre-carico e ad una misura negativa ( $\Delta\lambda$ ).

## 5.2 Sistema di bloccaggio con gomma morbida

I test condotti per questa tipologia di sistema di bloccaggio sono analoghi a quelli fatti per il sistema di bloccaggio con gomma dura. Anche in questo caso verranno mostrati i risultati più significativi ed in particolare, verranno discussi solamente quelli ottenuti per la linea corta e per quella lunga.

### 5.2.1 Risposta in termini di deformazione e lunghezza d'onda per la linea corta $L_0=58.59$ mm e per la linea lunga $L_0=228.94$ mm

Il primo test effettuato è quello dell'aumento del carico tramite step incrementali. Le proprietà principali di questo test sono riportate in tabella 5.2.1:

<b>Test con carichi incrementali a step</b>		
Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.10
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Gomma morbida	
Materiale del sistema di bloccaggio	Alluminio	

Tabella 5.5. Step di carico incrementali con gomma morbida e lunghezze a riposo di  $L_0=58.59$  mm e  $L_0=228.94$  mm

In figura 5.12 è possibile osservare il continuo scivolamento su gomma morbida.

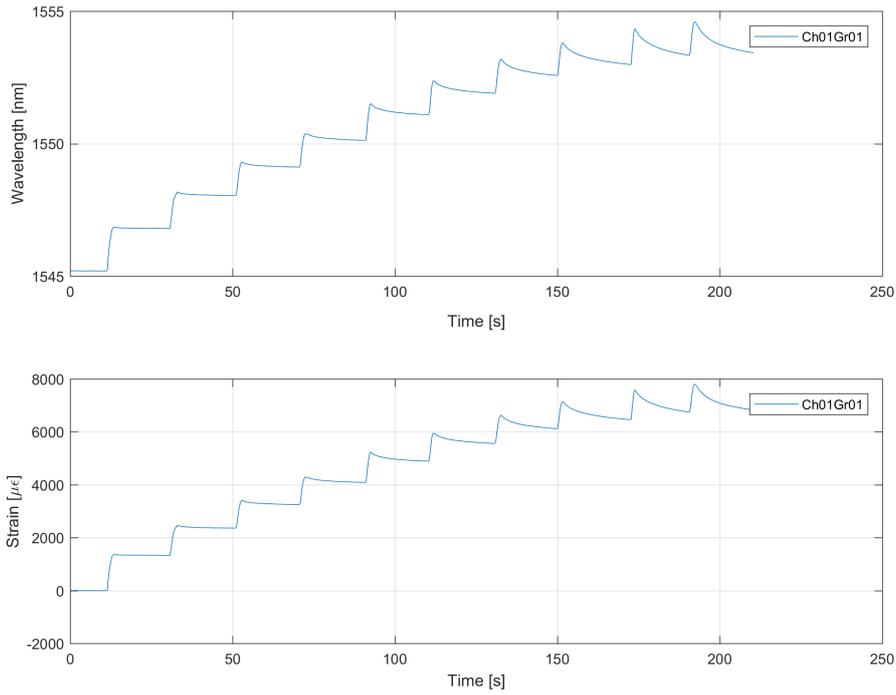


Figura 5.12. Test a step incrementali con sistema di bloccaggio con gomma morbida su linea corta  $L_0=58.59$  mm

Il seguente grafico 5.13, invece è relativo alla linea lunga:

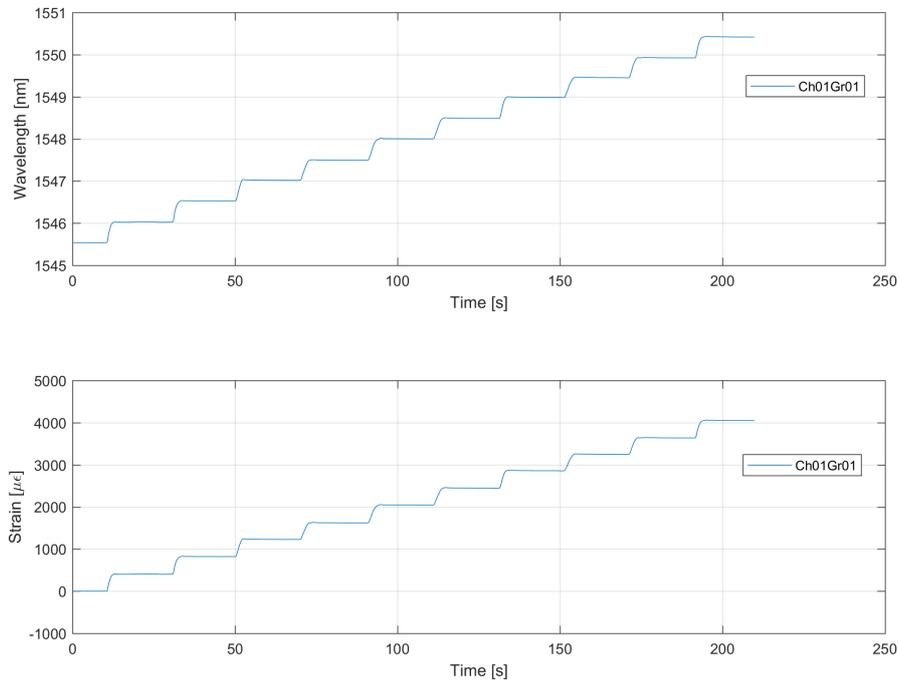


Figura 5.13. Test a step incrementali con sistema di bloccaggio con gomma morbida su linea lunga  $L_0=228.94$  mm

Come si può vedere dal grafico, il sistema di bloccaggio montato su linea lunga garantisce una risposta corretta agli step comandati. Lo scivolamento della fibra però si manifesta anche nelle misure di ripetibilità, come si può vedere dal grafico sottostante. Questa tipologia di grafici è stata ottenuta a seguito di prove di ripetibilità e, come per le altre prove, anche qua è stato applicato un pre-carico iniziale.

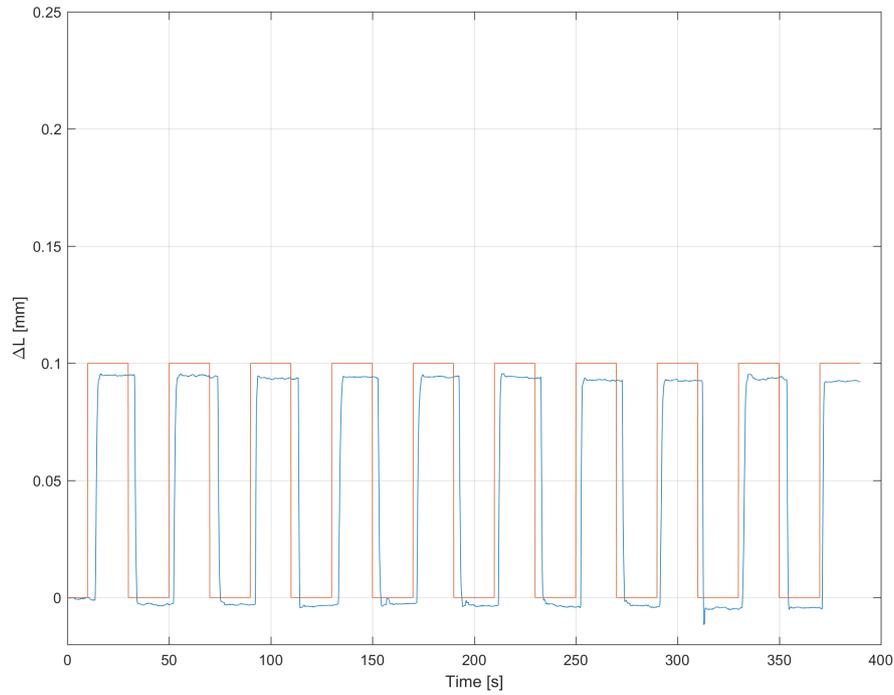


Figura 5.14. Test di ripetibilità su sistema di bloccaggio su linea lunga  $L_0=228.94$  mm e gomma morbida

## 5.3 Sistema di bloccaggio con resina epossidica

L'ultima parte di misurazioni è stata condotta utilizzando dei sistemi di bloccaggio ottenuti tramite stampa 3D. Per questi sistemi si sono condotti dei test di ripetibilità e dei test con carico a gradino incrementale. Questi test sono stati pensati per poter effettuare un confronto tra i due diversi tipi di sistemi di bloccaggio pensati e descritti nel capitolo dedicato all'assemblaggio del banco prova. Il banco prova è stato allestito con 4 linee ed in particolare due linee con lunghezza  $L_0$  di circa 53.59 mm e 228.94, ed altre due linee con lunghezza iniziale  $L_0$  di circa 151.16 mm.

È importante evidenziare che tutti i test sono stati condotti con un pre-carico iniziale in modo da avere la certezza della risposta del sensore.

### 5.3.1 Confronto tra due diversi concetti di sistemi di bloccaggio

Questa campagna di misurazioni inizia con lo studio della risposta in termini di variazione di deformazione nei vari sistemi di bloccaggio. Sono state infatti montate due differenti linee in parallelo con medesima lunghezza d'onda a riposo  $L_0$  di circa 151.16 mm ma i sistemi di bloccaggio utilizzati sono differenti pur impiegando entrambi resina epossidica. I primi test effettuati si sono concentrati sulla ripetibilità dei risultati ottenuti con le diverse tipologie di sistemi di bloccaggio; le principali proprietà sono indicate nella tabella sottostante 5.3.1:

Test di ripetibilità con carico a gradino		
Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.10
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Resina epossidica	
Materiale del sistema di bloccaggio	PLA	

Tabella 5.6. Test di ripetibilità con carico a gradino. Confronto tra due diversi sistemi di bloccaggio.

In figura 5.15 si possono osservare i risultati derivanti dai test di ripetibilità effettuati. La dicitura *Ch01Gr01* è relativa al primo canale, dove è installata la fibra con il sistema di bloccaggio con il "bottoncino" di resina mentre *Ch02Gr01* è relativa al secondo canale, dove la fibra è installata sulla piattina rettangolare.

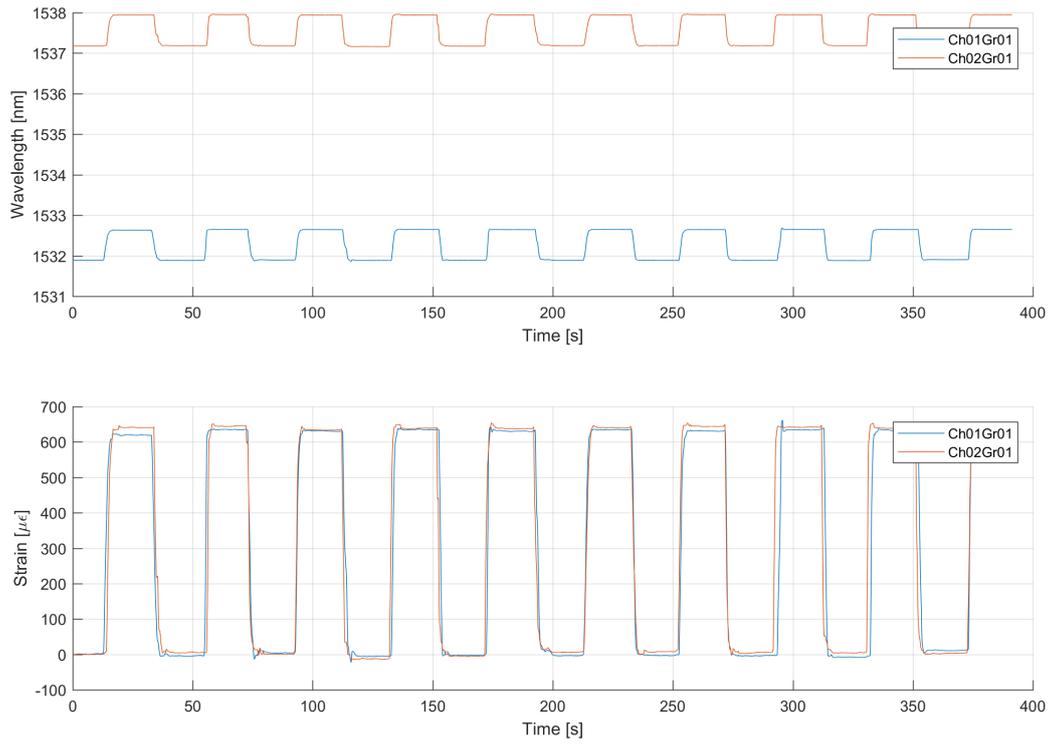


Figura 5.15. Confronto sulla risposta dei sensori utilizzando due differenti sistemi di bloccaggio.

Il grafico 5.16 che segue è relativo al primo canale; ovvero si riferisce al sistema di bloccaggio a "bottoncino".

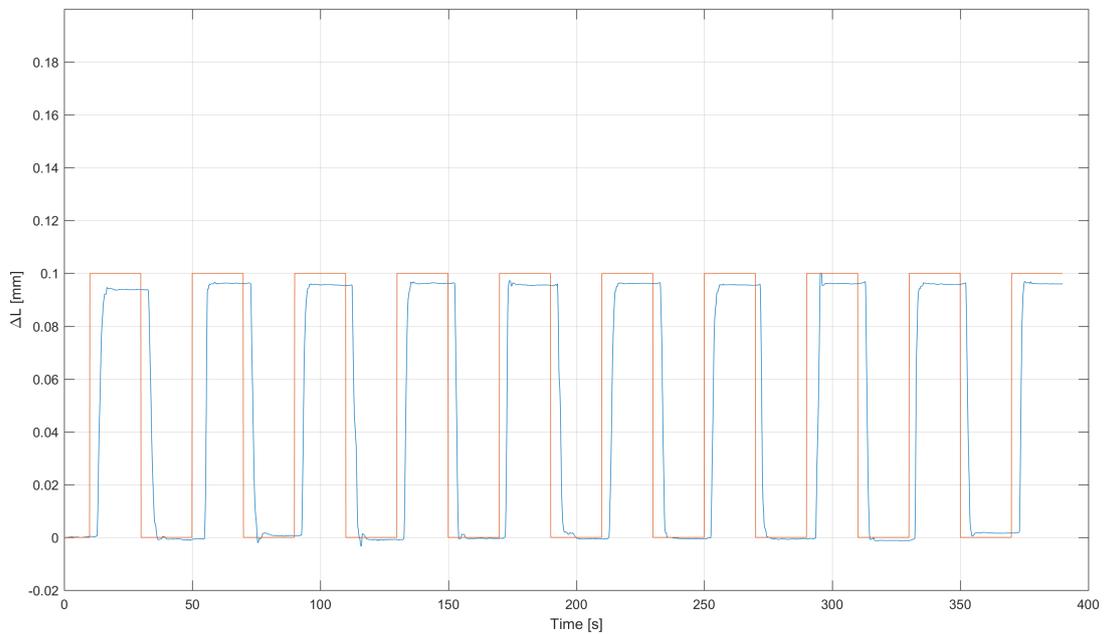


Figura 5.16. Risposta in termini di  $\Delta L$  [mm] del sistema di bloccaggio a "bottoncino"

In figura 5.17 è riportata la risposta del sistema di bloccaggio che utilizza le piattine rettangolari.

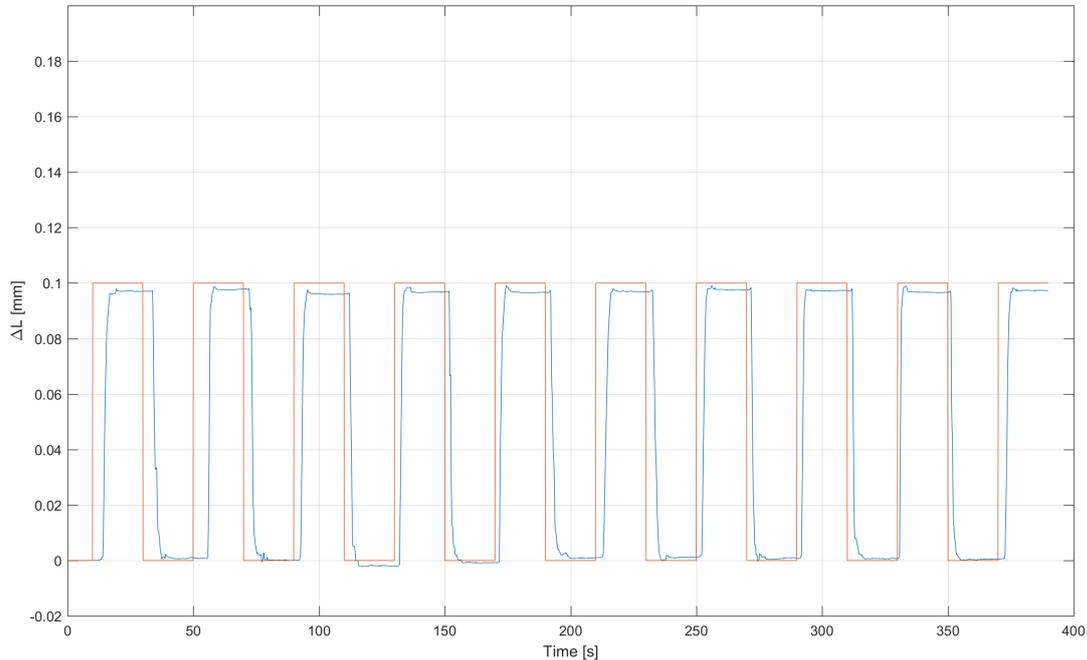


Figura 5.17. Risposta in termini di  $\Delta L$  [mm] del sistema di bloccaggio con piattine

Come si può vedere, il sensore garantisce una ottima risposta in 0 ma non in 0.1. Questo fatto è con tutta probabilità legato sia alla deformazione della resina utilizzata per l'incollaggio e sia alla deformazione del *coating* della fibra stessa. Questi fenomeni presentano però un carattere reversibile in quanto alla rimozione del carico corrisponde uno 0 sulla misura; cosa che non accadeva con i sistemi con gomma. Inoltre la non perfetta corrispondenza tra i segnali comandati e le misure è dovuta ai fenomeni elastici presenti sia nella stessa fibra ottica che nella resina. La non aderenza allo 0 invece è causata dagli errori di parallasse dell'operatore.

Al fine di ricavare un confronto tra i due diversi sistemi di bloccaggio e per ricavare dei valori numerici dei fenomeni negativi descritti in precedenza, si sono dovuti ricavare dei coefficienti correttivi ( $K$ ). Ovviamente i coefficienti correttivi sono necessari a correggere le misure effettuate.

Nonostante il relativo basso numero di test effettuati, si è riuscito a ricavare un valore di  $K_{medio}$  preliminare ed il relativo errore associato  $\Delta K$ . Come effettuato già per i sistemi di bloccaggio con gomma interposta, il coefficiente correttivo è stato valutato con un test a gradino con carico incrementale. Le proprietà principali di questo test sono riportate nella seguente tabella 5.3.1:

Di seguito vengono riportati dei grafici che mostrano sia le curve sperimentali e teoriche ottenute dalle misure effettuate, sia quelle corrette dal coefficiente di correzione  $K$ .

---

Test con carico a gradino incrementale		
Oggetto	Materiale	Valore dello step [mm]
Step		0.05
Coating	Poliimide	
Strato interposto	Resina epossidica	
Materiale del sistema di bloccaggio	PLA	

---

Tabella 5.7. Test con carico incrementale per il calcolo del coefficiente correttivo

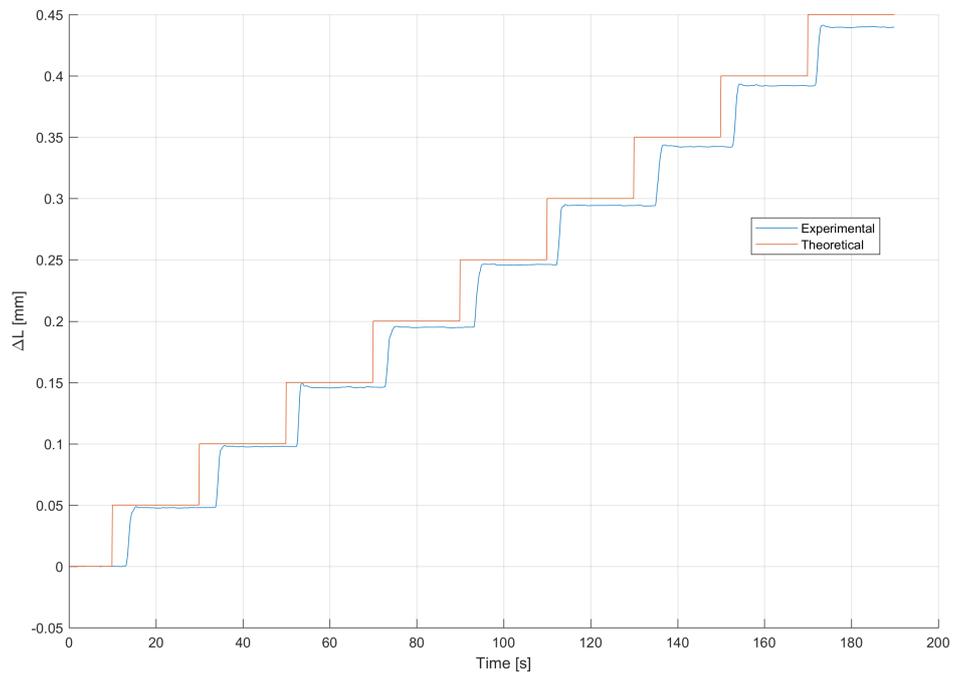


Figura 5.18. Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale (senza coefficiente correttivo).

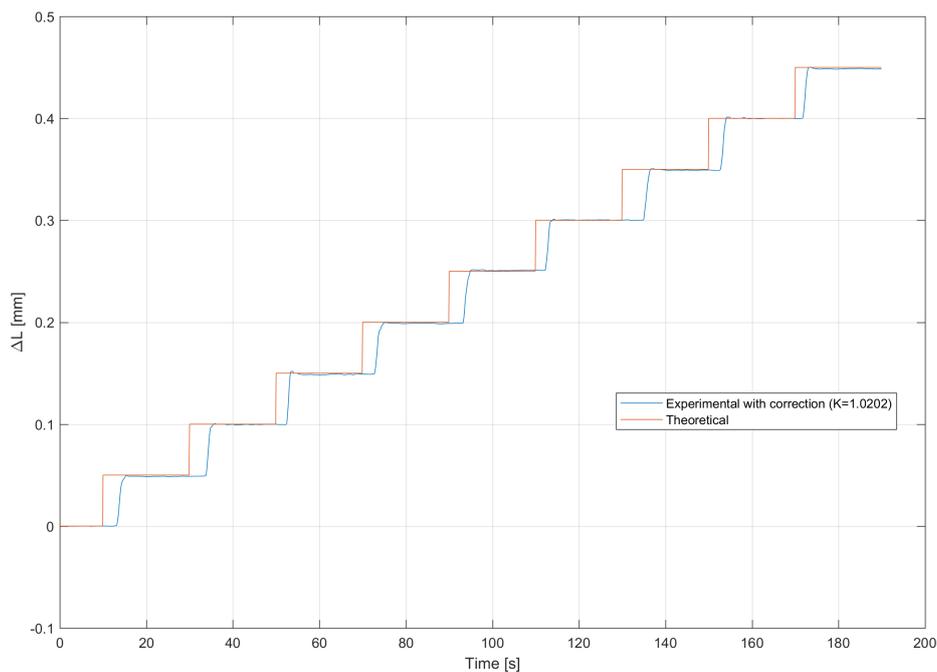


Figura 5.19. Confronto tra la curva teorica e quella sperimentale.

Per effettuare un confronto tra la curva teorica e quella del fit dei dati, sono stati eliminati per via analitica tutti i dati relativi alla fase transitoria di spostamento tra una posizione comandata e l'altra. Nei grafici che seguono si possono notare le correzioni introdotte sulle misure.

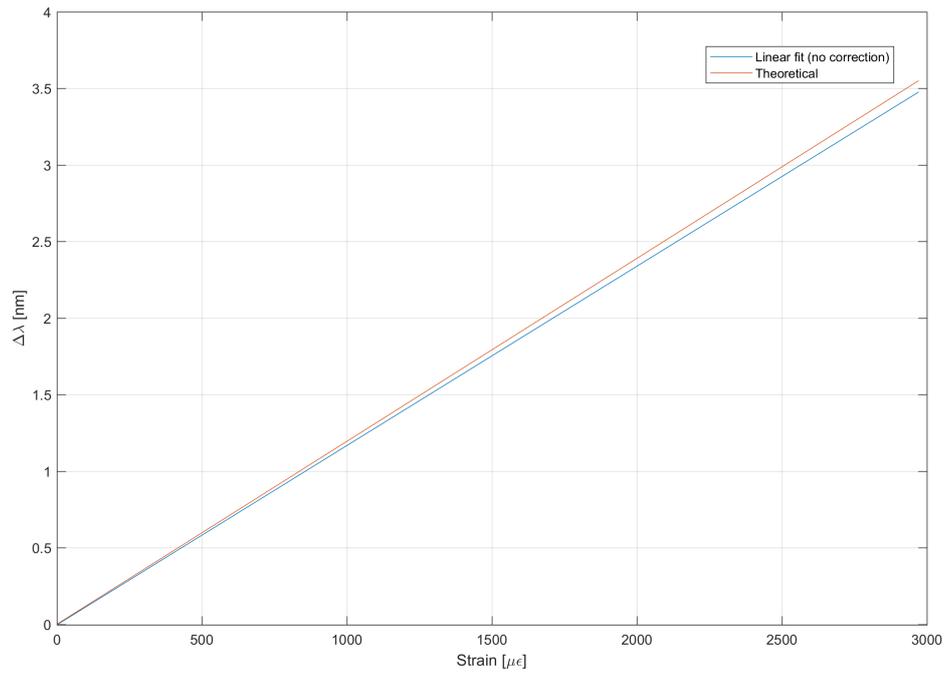


Figura 5.20. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale (senza coefficiente correttivo).

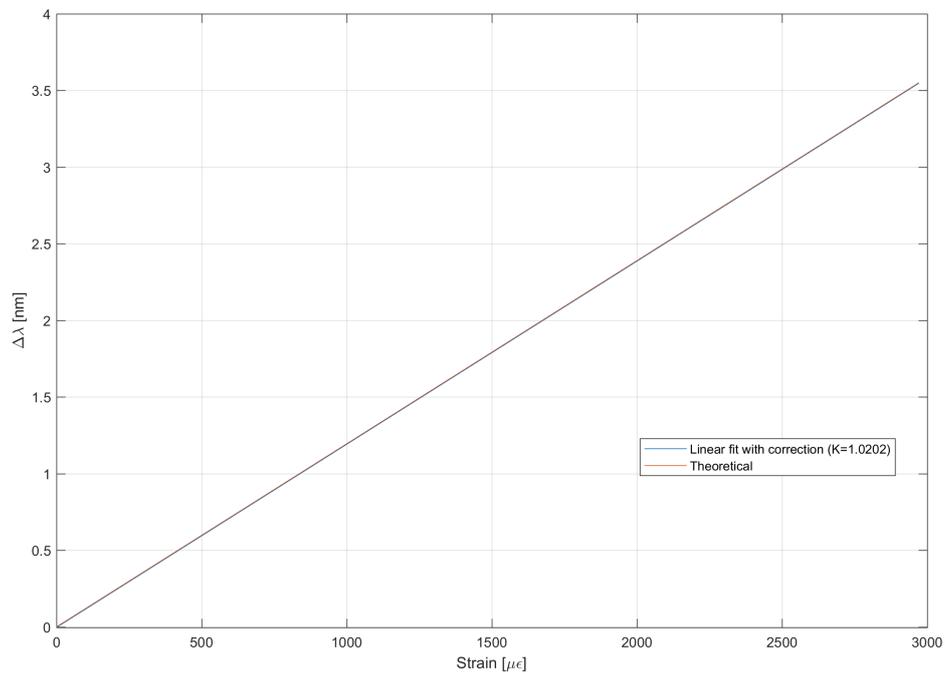


Figura 5.21. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale

Nelle seguenti tabelle sono riportati tutti i risultati ottenuti:

<b>Valori dei coefficienti correttivi</b>	
$K_{\text{correttivo}}$	$K_{\text{medio}} \pm \Delta K$
1.0263	4*1.0212 $\pm$ 0.0045
1.0202	
1.0173	
1.0209	

Tabella 5.8. Valore dei coefficienti correttivi per il primo tipo di sistema di bloccaggio

<b>Valori dei coefficienti correttivi</b>	
$K_{\text{correttivo}}$	$K_{\text{medio}} \pm \Delta K$
1.0347	4*1.0350 $\pm$ 0.0011
1.0359	
1.0357	
1.0337	

Tabella 5.9. Valore dei coefficienti correttivi per il secondo tipo di sistema di bloccaggio

All'interno del  $K_{\text{medio}}$  sono compresi tutti i fenomeni che riguardano la deformazione del *coating* della fibra e della resina epossidica. Il coefficiente  $\Delta K$  invece, è relativo al comando dato in ingresso dall'operatore ed in particolare tiene in considerazione l'errore di parallasse.

### 5.3.2 Conclusioni riguardo al confronto tra i due differenti sistemi di bloccaggio

Si può notare che esiste una leggera differenza tra i  $K_{\text{medio}}$  ricavati per i diversi sistemi di bloccaggio. In particolare il secondo tipo di sistema di bloccaggio presenta un valore più elevato di  $K_{\text{medio}}$ . Questa dissimilarità potrebbe essere imputata alla quantità di resina epossidica utilizzata per bloccare la fibra. Per questa tipologia di incollaggi bisogna prestare molta attenzione a evitare di avere bolle d'aria nella colatura; queste infatti, se a contatto con la fibra, diminuiscono la superficie esposta degradando la qualità e la tenuta dell'incollaggio. Per risolvere questo problema esistono sostanzialmente due soluzioni:

- sottoporre la superficie di colata ad un riscaldamento tramite fiamma ossidrica;
- utilizzare una pompa a vuoto o dopo aver colato la resina o in seguito alla fase di mescolamento della resina e dell'induritore.

Non disponendo di questi strumenti, si è cercato di evitare il più possibile la formazione di bolle d'aria, cercando di mescolare il composto senza incamerare aria e facendo una colata il più possibile vicino allo stampino. Pur seguendo tutte le accortezze è possibile che qualche particella d'aria sia rimasta intrappolata all'interno degradando l'incollaggio e giustificando la leggera discrepanza tra i due diversi  $K_{\text{medio}}$ .

### 5.3.3 Confronto tra due differenti linee: $L_0=53.59$ mm e $L_0=228.94$ mm

Per cercare di capire come la variazione di  $L_0$  possa influenzare la misura, si sono effettuate una serie di prove con due sistemi di bloccaggio analoghi ma con un diverso valore della lunghezza a riposo della fibra. È importante evidenziare che i valori di  $L_0$  non sono normati ma derivano dalla misura ottenuta a seguito del montaggio del sistema di bloccaggio sulla *breadboard*.

Test a gradino con carico incrementale		
Oggetto	Materiale	Valore [mm]
Step		0.05
Lunghezza $L_0$		53.59
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Resina epossidica	
Materiale del sistema di bloccaggio	PLA	

Tabella 5.10. Test di ripetibilità con carico a gradino per confronto

Di seguito vengono riportati alcuni dei grafici ottenuti per la linea corta 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25. Vengono inoltre riportati i test effettuati per ricavare i 4 coefficienti correttivi:

Valori dei coefficienti correttivi	
$K_{correttivo}$	$K_{medio} \pm \Delta K$
1.1403	$4 \cdot 1.1248 \pm 0.0132$
1.1140	
1.1180	
1.1270	

Tabella 5.11. Valore dei coefficienti correttivi per linea corta  $L_0=53.59$  mm

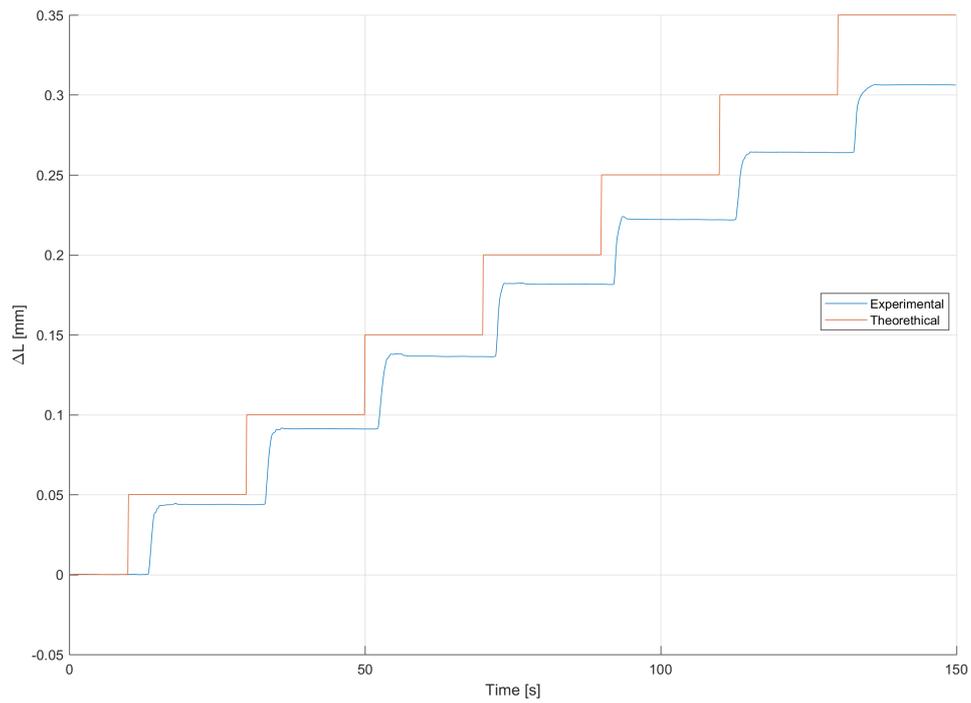


Figura 5.22. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con carichi a step crescenti

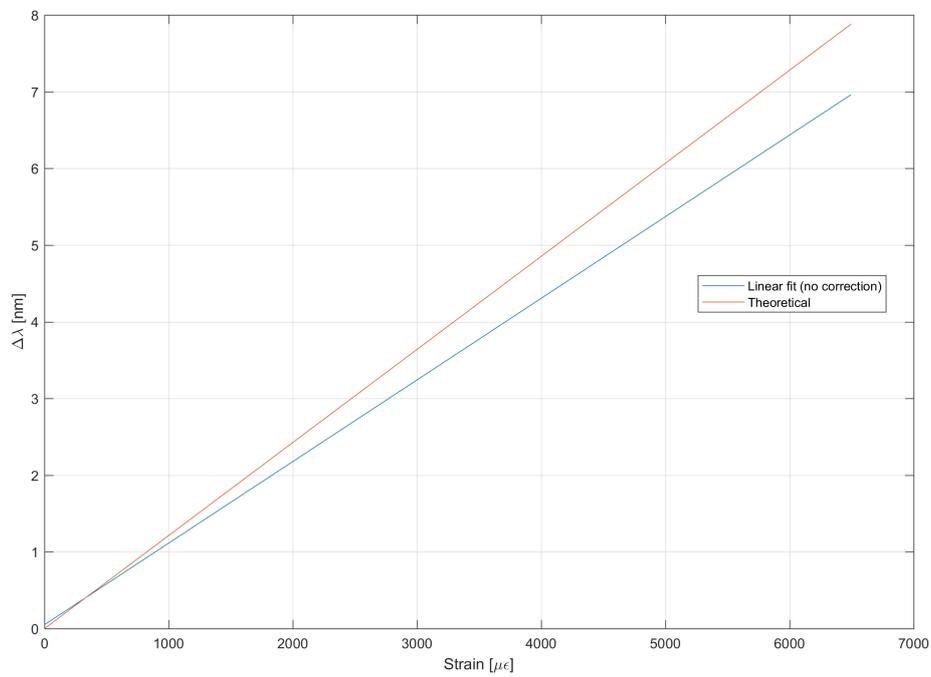


Figura 5.23. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare

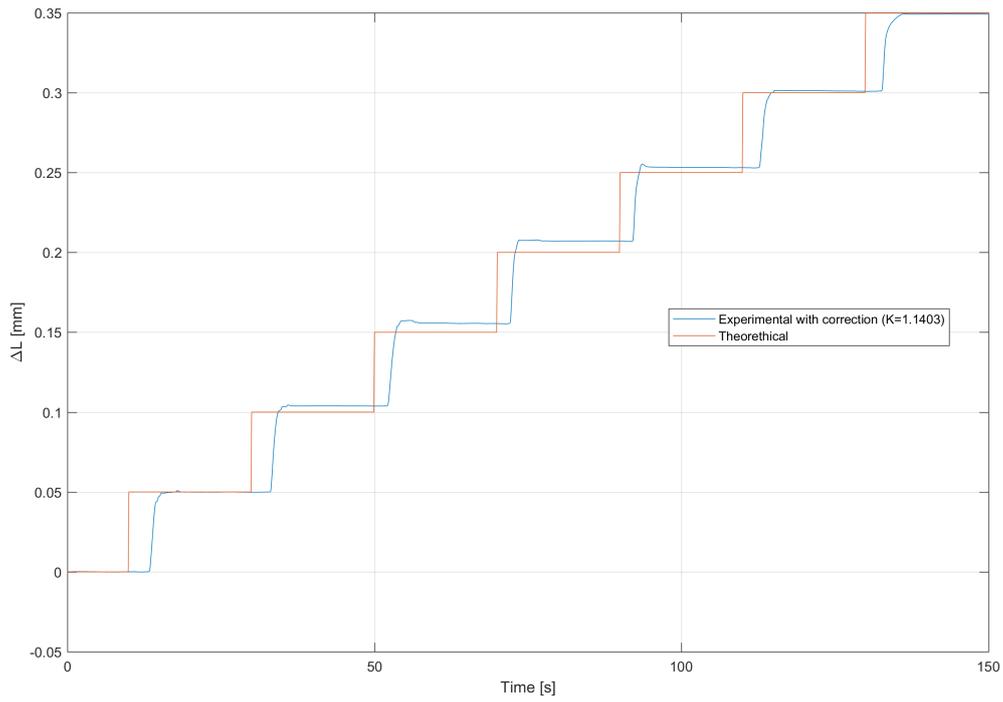


Figura 5.24. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con coefficiente correttivo

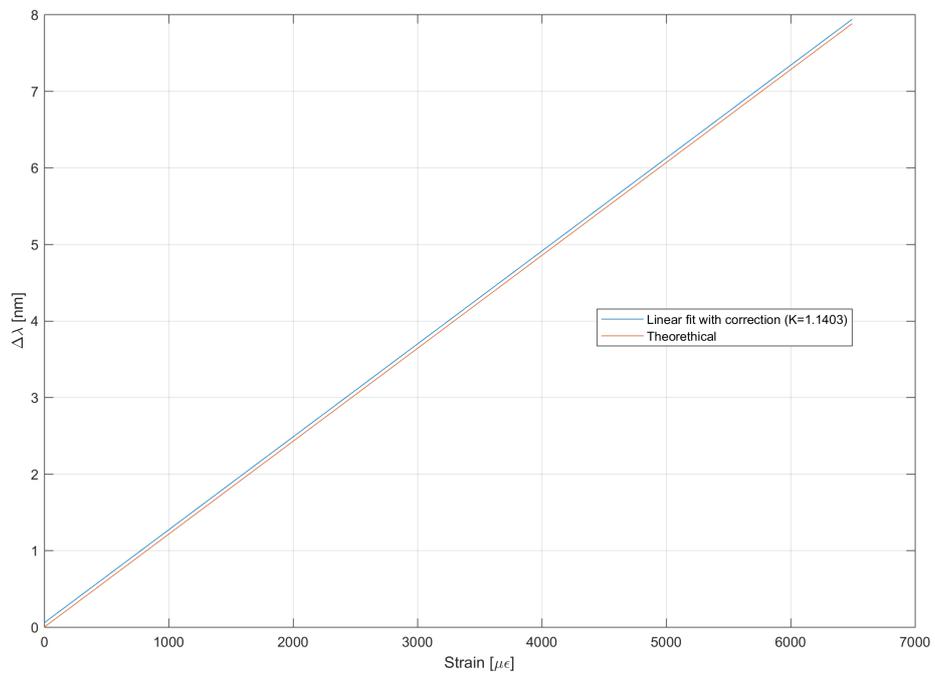


Figura 5.25. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare e coefficiente correttivo

Riguardo la linea lunga:

<b>Test a gradino con carico incrementale</b>		
Oggetto	Materiale	Valore [mm]
Step		0.05
Lunghezza $L_0$		228.94
Coating	Poliimmide	
Materiale interposto	Resina epossidica	
Materiale del sistema di bloccaggio	PLA	

Tabella 5.12. Test di ripetibilità con carico a gradino per confronto

Di seguito le 4 misure per ricavare i coefficienti correttivi:

<b>Valore dei coefficienti correttivi</b>	
$K_{correttivo}$	$K_{medio} \pm \Delta K$
1.0021	$4 * 1.0012 \pm 0.0013$
1.0026	
1.0002	
1.0000	

Tabella 5.13. Valore dei coefficienti correttivi per la linea lunga  $L_0=228.94$  mm

Vengono riportati di seguito 4 grafici relativi alla linea lunga 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29.

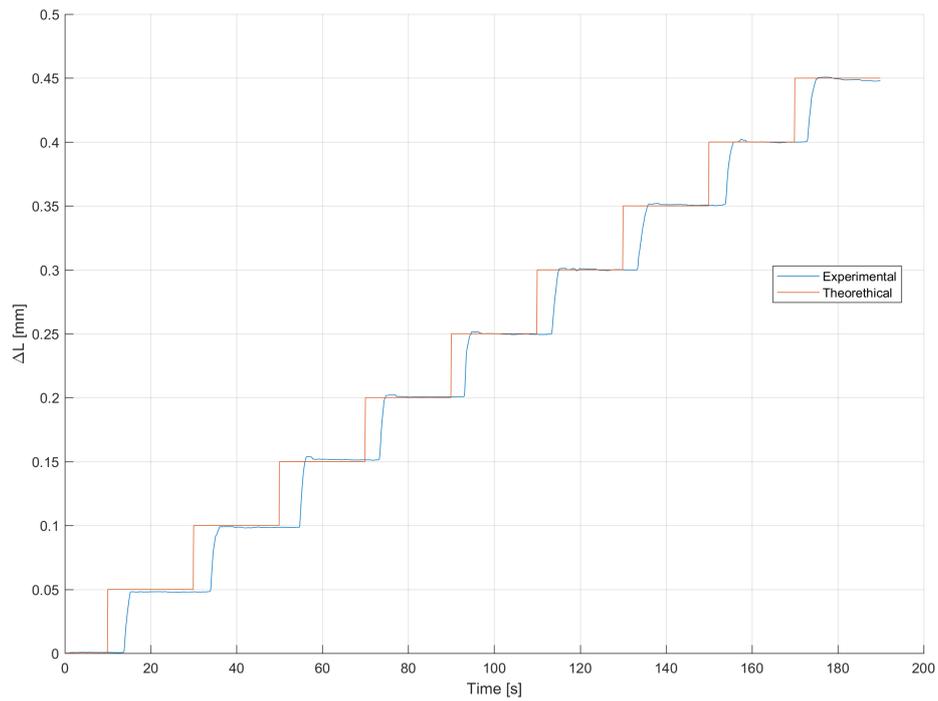


Figura 5.26. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con carico a step incrementale

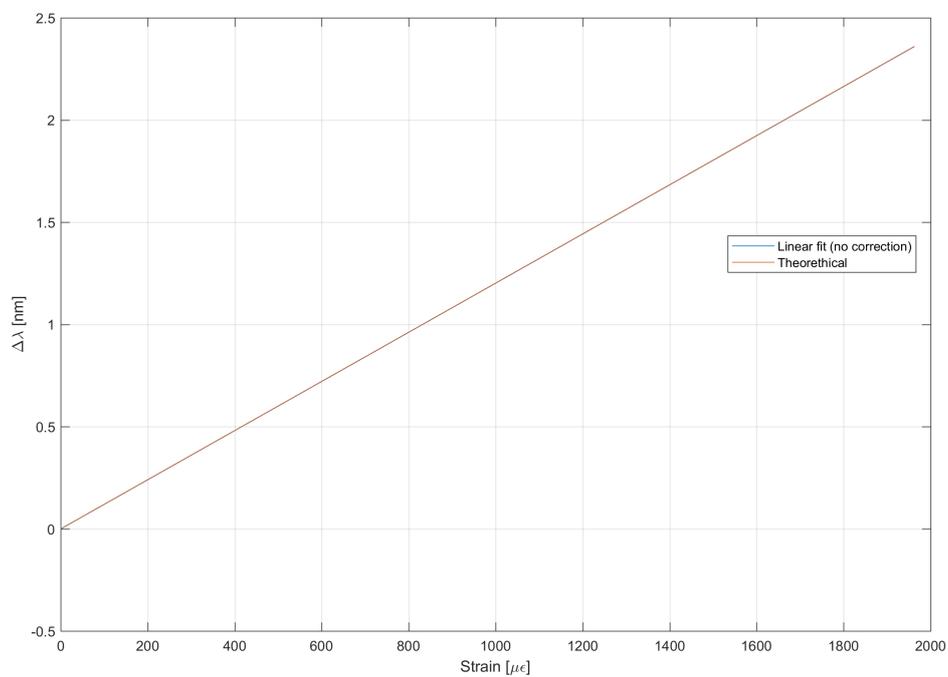


Figura 5.27. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare

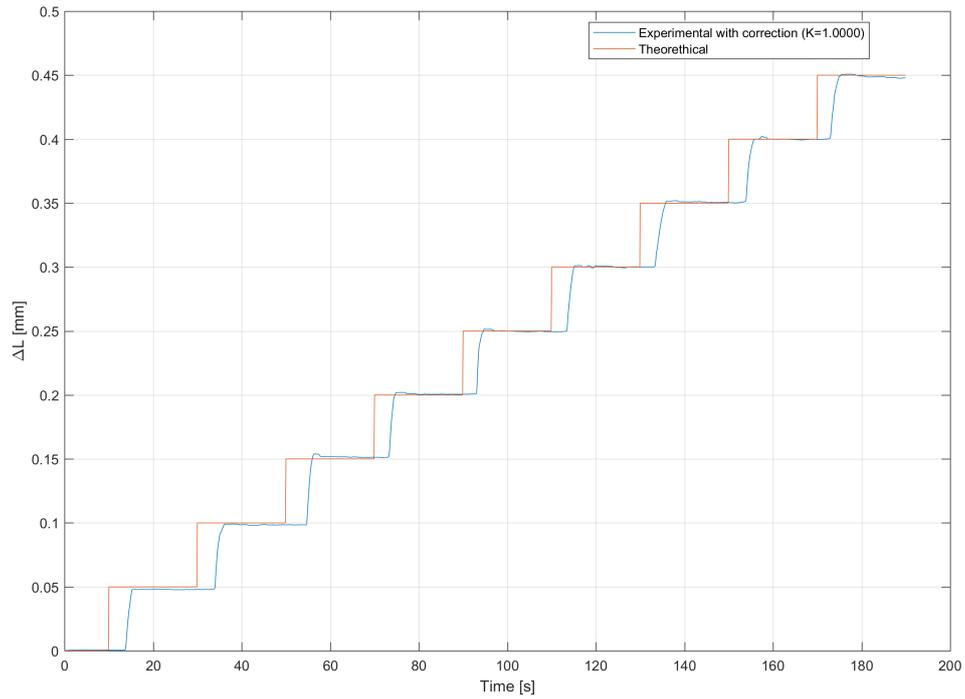


Figura 5.28. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con coefficiente correttivo

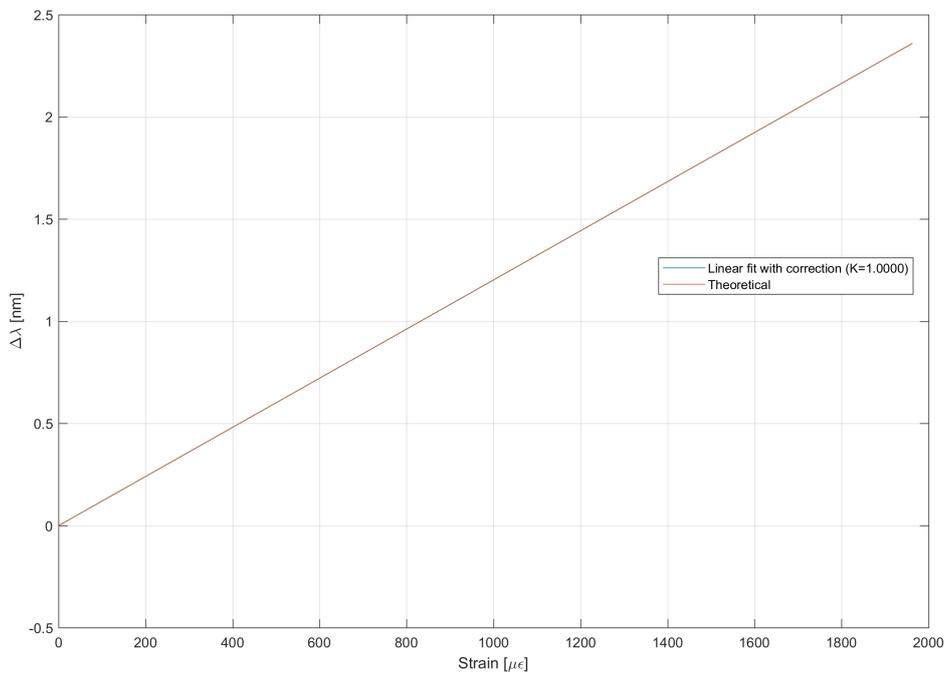


Figura 5.29. Confronto tra l'andamento teorico e quello sperimentale con fit lineare e coefficiente correttivo

### 5.3.4 Conclusioni sul confronto fra differenti lunghezze a riposo $L_0$

Dai risultati ottenuti nei vari test è emerso che i sensori montati su una linea corta non garantiscono un comportamento affidabile e presentano delle criticità. Questo è dovuto al fatto che parità di comando applicato, la minor lunghezza iniziale  $L_0$  genera una deformazione maggiore; è per questo motivo che il sistema in questione risulta più deformato. La soluzione migliore si è rivelata essere quella con il sistema montato ad una lunghezza a riposo iniziale pari a  $L_0 = 228.94$  mm ed in generale tutti i sistemi che presentano un  $L_0$  grande.

### 5.3.5 Test di ripetibilità con linea lunga $L_0=228.94$ mm al variare del pre-carico

Questi test sono stati eseguiti su sistemi analoghi ma con diversi valori di pre-carico ed in particolare ci si è concentrati sulla linea lunga. Le proprietà principali e comuni dei vari test sono riportate nella tabella sottostante 5.3.5:

Test di ripetibilità con carico a step		
Oggetto	Materiale	Valore [mm]
Step		0.10
Lunghezza $L_0$		228.94
Coating	Poliimmide	
Strato interposto	Resina Epossidica	
Materiale del sistema di bloccaggio	PLA	

Tabella 5.14. Test di ripetibilità con carico a gradino per linea lunga

Di seguito vengono riportati tre grafici e ciascuno di essi è relativo ad una particolare condizione di pre-carico 5.30, 5.31 e 5.32:

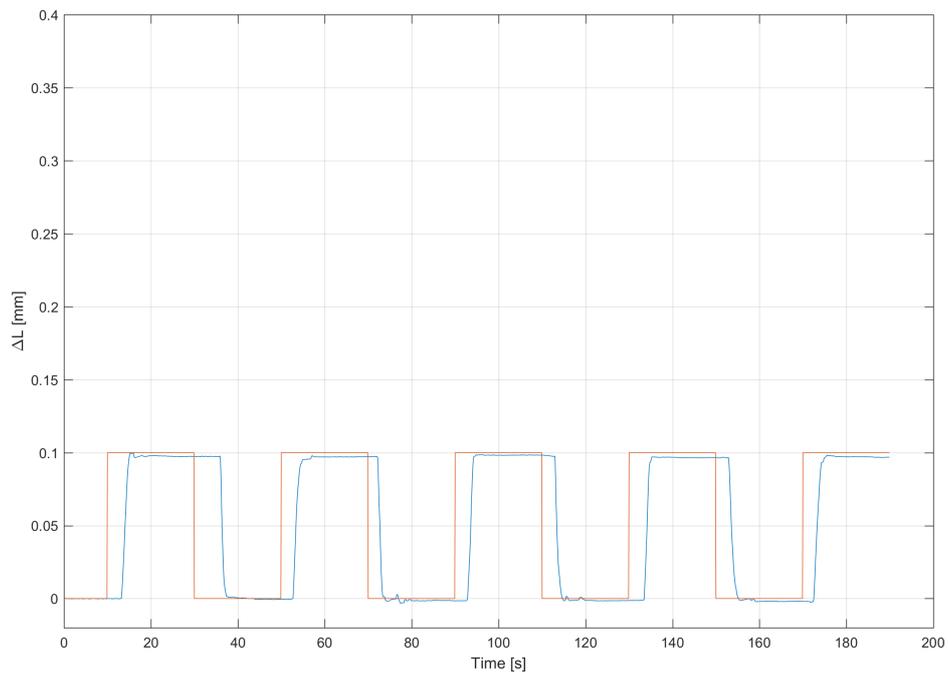


Figura 5.30. Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.30 mm

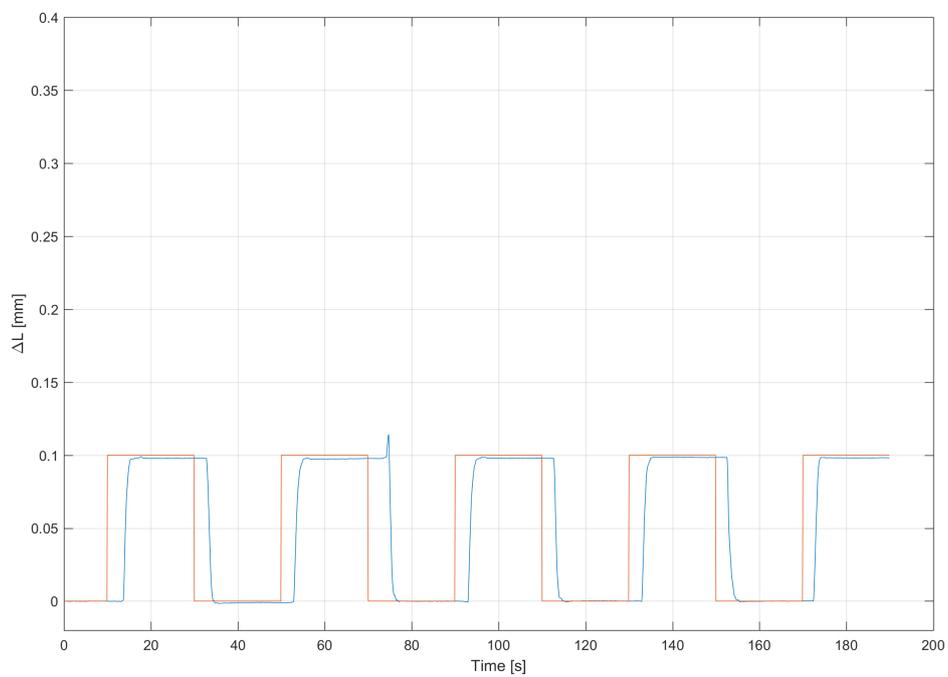


Figura 5.31. Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.20 mm

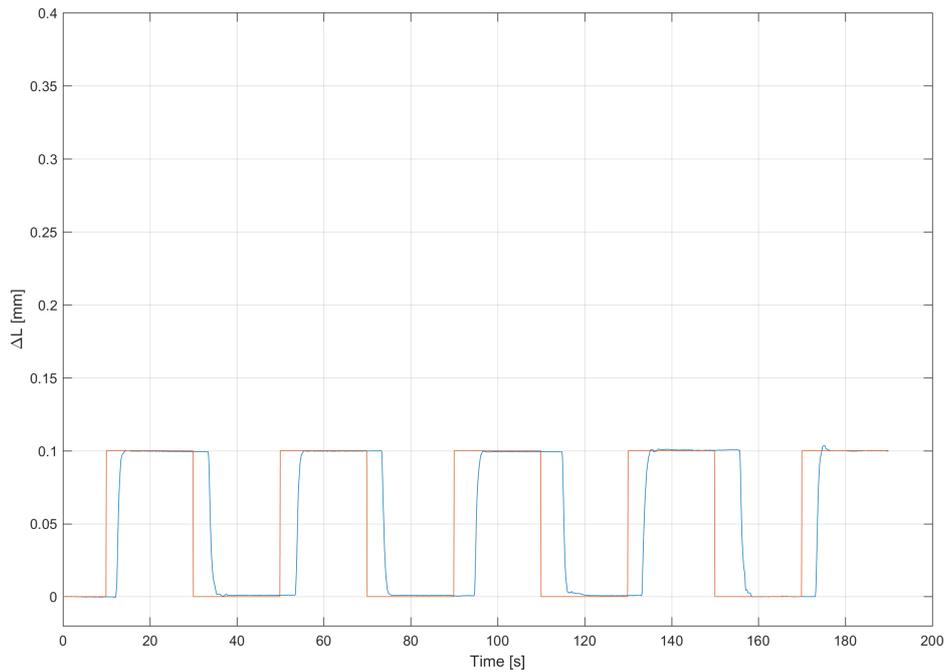


Figura 5.32. Test di ripetibilità con carico a step. Pre-carico di 0.10 mm

È possibile notare che riducendo il pre-carico iniziale, la risposta del sensore è migliore e la curva sperimentale che si genera segue in modo molto accurato la curva teorica.

### 5.3.6 Possibile soluzione per risolvere il problema dello slittamento

Come analizzato in precedenza, nel caso in cui i sensori debbano essere fissati molto vicini fra loro (ci si avvicina al caso di linea corta) il sistema diventa molto rigido e si ricade negli errori trattati in precedenza. Una possibile soluzione per evitare lo slittamento è stata individuata in un particolare sistema di bloccaggio ad ampia superficie di aderenza. Il sistema in questione è riportato in figura.

Il sistema in questione consente di aumentare notevolmente la superficie di aderenza mantenendo contenute le dimensioni e garantendo comunque una perdita di potenza dovuta al *bending* minima.

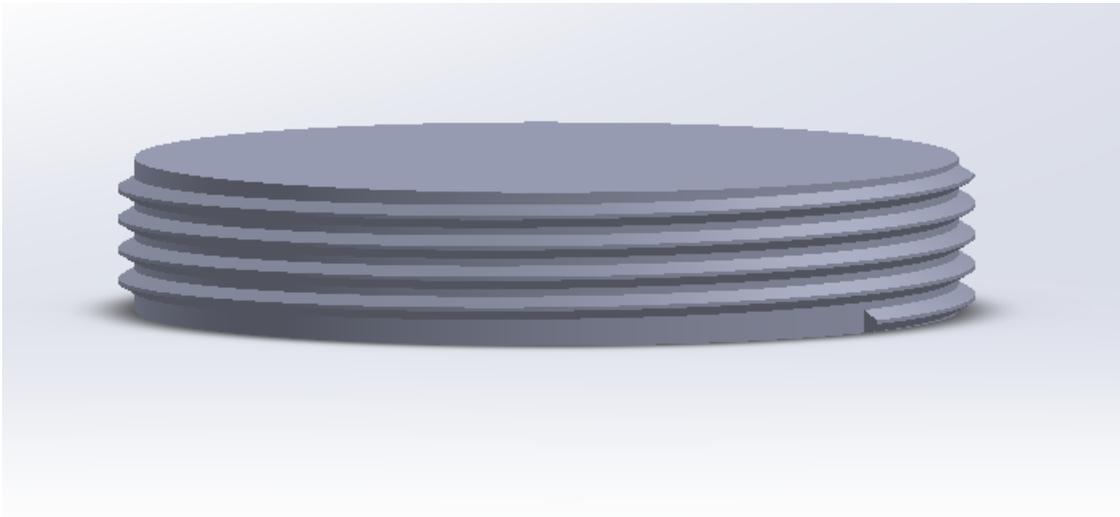


Figura 5.33. Realizzazione CAD di un possibile sistema di bloccaggio a superficie di aderenza maggiorata

# Capitolo 6

## Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il lavoro svolto durante il periodo di tesi ha messo in luce molti aspetti interessanti riguardo ad un possibile utilizzo dei sensori in fibra ottica per il monitoraggio di parametri fisici ma ne ha evidenziato anche alcune criticità.

Senza dubbio le prove effettuate mostrano come il risultato finale della misura sia estremamente dipendente dal sistema di bloccaggio scelto. Come si è visto infatti lo stesso sensore, con sistemi di bloccaggio diversi, rispondeva in maniera diversa. Per una applicazione pratica a livello industriale conviene infatti analizzare nel dettaglio il problema riguardante il posizionamento della sensoristica.

Questo aspetto non è per nulla banale in quanto condiziona in maniera molto importante sia la scelta del sensore che del tipo di sistema di bloccaggio che del posizionamento della linea stessa.

Per l'esperienza maturata durante questo lavoro di tesi, si ritiene sia importante valutare con molta cura la tipologia di misura richiesta al sensore. Nel caso in cui ad esempio, non sia richiesta una misura di una grandezza variabile ciclicamente si può pensare di installare un sistema meno affidabile dal punto di vista della ripetibilità della misura ma estremamente più facile da installare e mantenere.

Il sistema nel complesso è risultato particolarmente affidabile e robusto dal punto di vista delle interferenze e dei possibili disturbi esterni ma si sono riscontrate delle criticità riguardo il montaggio delle linee. Questo problema è in parte risolvibile con l'esperienza dell'operatore nel maneggiare la fibra stessa ed in parte può essere affrontato studiando delle procedure e dei sistemi di bloccaggio semplificati per consentire il montaggio anche a personale non esperto.

Per il sistema di bloccaggio che utilizza la resina epossidica i risultati si sono rivelati estremamente soddisfacenti. Una possibile strada per lo sviluppo di questa tipologia di sistemi di misura potrebbe trattare lo studio di un adesivo diverso dalla resina epossidica, magari di facile applicazione, resistente alle alte temperature e applicabile anche su superfici non perfettamente trattate. Un'altra via potrebbe invece analizzare un sistema di gestione delle informazioni ottiche in *real-time* per poter implementare questa tecnologia per il monitoraggio dei parametri in tempo reale, oppure ancora valutare la possibilità di integrare direttamente all'interno della struttura il cablaggio della rete ottica.

# Referenze

- [1] M. Yamane, Y. Asahara, *Glasses for photonics* published by the Press Syndicate of the University of Cambridge, 2000.
- [2] S. Kasap, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices* Pearson Education Limited, 2013.
- [3] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings, Second Edition (Optics and Photonics Series)* Academic Press, 2009.
- [4] D. Ahuja, D. Parande, “Optical sensors and their applications” in *Journal of Scientific Research and Reviews*, v. 1(5), pp. 060–068, November 2012.
- [5] S. Kumar, M. J. Deen, *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications* John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [6] Murata, *Handbook of Optical Fibers and Cables, Second Edition* New York, Marcel Dekker.
- [7] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition* John Wiley and Sons, 2002.
- [8] B. E. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics, Second Edition* John Wiley and Sons, 2007.
- [9] Z. F. Ken, K. C. Ronghui, Q. H. Cai(auth.), K. Chang(eds.), *Fundamentals of Optical Fiber Sensors* John Wiley Sons, 2012.
- [10] M. Kreuzer, “Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors” in *HBM*.