

**POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica



*Monitoraggio di componenti strutturali  
aeronautici con sensori in fibra ottica*

Relatore: Prof. GIUSEPPE SALA

Co-relatore: Ing. PAOLO BETTINI

Tesi di Laurea di:  
PATRICK BOGOTTO  
Matr. 800716

Anno Accademico 2014/2015





## Sommario

Il monitoraggio strutturale è un campo in continua e rapida evoluzione. Controllare lo stato di salute reale di una struttura è fondamentale al fine di prevedere eventuali cedimenti.

In ambito aeronautico, grazie al progetto di ricerca europeo SARISTU, è stato possibile indagare tecniche di monitoraggio strutturale tramite sensori ottici a reticolo di Bragg.

Tali sensori risultano affidabili e, grazie alle limitate dimensioni, possono essere inglobate facilmente nei materiali ospiti limitando l'intrusività.

Il progetto di tesi presentato pone come obiettivo principale la dimostrazione delle reali capacità dei sensori FBG nel rilevare eventuali delaminazioni attraverso la ricostruzione della deformazione longitudinale applicata sulla fibra ottica.

Il lavoro ha portato alla realizzazione di un longerone in composito carbonio-epossidica, presso il laboratorio compositi del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali, utilizzato come dimostratore durante la prova sperimentale finale, progettando e mettendo a punto tecnologie che permettessero di ottenere un manufatto soddisfacente.

Inoltre si presenteranno gli sviluppi apportati agli algoritmi implementati per la risoluzione del *Problema Inverso*, i quali saranno utilizzati durante le analisi dei dati al fine di trasdurre lo spettro luminoso acquisito, riflesso dal sensore, in deformazione applicata sulla zona sensibile.

PAROLE CHIAVE : *SHM, FBG, inglobamento di sensori, array DTG, delaminazione, problema inverso, ricostruzione deformazioni*



## Abstract

The Structural Health Monitoring is a continuous evolving research field. In the Aerospace field, first and foremost, monitoring the health of a structure is essential to prevent failure.

Thanks to the European Research Project SARISTU, we have been able to study and analyze new monitoring techniques using optical fiber and sensors, like Bragg gratings. Due to their small cross size section, these sensors prove to be reliable and capable of limiting embedding issues in the host material.

The aim of this work is to prove the FBG sensors capability to detect defectiveness. The object of the study is a composite spar made of carbon-epoxy, manufactured at the Composite Laboratory of the Department of Aerospace Science and Technologies and sensorized with FBGs. After experimental tests, the strain field applied over the optical fiber is analyzed in order to prove the FBG sensors capability to detect delaminations.

Furthermore, the work presents new issues of algorithms used to solve the so called *Inverse Problem*. During the test data reduction these algorithms are exploited to transduce the optical light spectrum, reflected from the sensors, into deformation over the longitudinal fiber axis.

KEYWORDS : *SHM, FBG, embedded sensors, array DTG, delamination, inverse problem, strain reconstruction*



# Indice

Elenco delle figure	iii
Elenco delle tabelle	vii
Introduzione	1
<b>1 Monitoraggio strutturale per applicazioni aeronautiche</b>	<b>3</b>
1.1 Danneggiamenti . . . . .	10
1.2 Tipologie di sensori . . . . .	11
1.3 Progetto SARISTU . . . . .	13
<b>2 Fiber Bragg Gratings : Generalità e Modellazione</b>	<b>15</b>
2.1 Principio di funzionamento delle fibre ottiche . . . . .	16
2.1.1 Legge di Snell . . . . .	18
2.2 Sensori FBG . . . . .	20
2.2.1 Reticoli di diffrazione . . . . .	22
2.2.2 Legame foto-termo-elastico . . . . .	23
2.2.3 Tipologie di sensori FBG . . . . .	24
2.2.3.1 <i>Reticoli uniformi</i> . . . . .	25
2.2.3.2 <i>Reticolo chirped</i> . . . . .	25
2.2.3.3 <i>Reticolo tilted</i> . . . . .	26
2.2.3.4 <i>Array DTG</i> . . . . .	26
2.2.4 Tecnologie di produzione . . . . .	29
2.3 Modellazione matematica . . . . .	32
2.3.1 Coupled mode theory . . . . .	32
2.4 Transfer matrix method . . . . .	34
<b>3 Problema Inverso</b>	<b>37</b>
3.1 Attività precedenti . . . . .	37
3.1.1 Processi di ottimizzazione . . . . .	39
3.2 Algoritmo FBGCenter ed apodizzazione . . . . .	42
3.2.1 Ricostruzione dello spettro iniziale, apodizzazione . . . . .	43
3.2.2 Determinazione della deformazione, algoritmo FBGCenter . . . . .	46
3.2.3 Risultati . . . . .	51
3.2.3.1 Spettro iniziale, apodizzazione . . . . .	51
3.2.3.2 Risoluzione del problema inverso . . . . .	53
3.3 Conclusioni e sviluppi futuri . . . . .	61

<b>4</b>	<b>Realizzazione del longherone di prova</b>	<b>63</b>
4.1	Identificazione sensori tramite filo caldo . . . . .	63
4.1.1	Analisi dati . . . . .	67
4.1.2	Conclusioni e possibili sviluppi . . . . .	74
4.2	Tecnologia di protezione FO . . . . .	75
4.3	Sviluppo della tecnologia di produzione del longherone . . . . .	83
4.3.1	Finitura superficiale e drop off . . . . .	83
4.3.2	Inglobamento delle fibre ottiche . . . . .	84
4.4	Attrezzatura di prova definitiva . . . . .	88
4.4.1	Laminazione solette ed inglobamento dei sensori in FO . . . . .	88
4.4.2	Assemblaggio finale . . . . .	91
<b>5</b>	<b>Prove sperimentali</b>	<b>97</b>
5.1	Procedura di prova . . . . .	97
5.2	Analisi dati . . . . .	101
	Deformazione soletta superiore . . . . .	103
	Deformazione soletta inferiore . . . . .	106
5.3	Conclusioni . . . . .	110
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>110</b>
	<b>A Principi ottici</b>	<b>113</b>
	<b>B Script MATLAB<sup>®</sup></b>	<b>117</b>
	<b>C Disegni di produzione dei componenti</b>	<b>131</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>141</b>

# Elenco delle figure

1.1	Confronto tra intervento umano ed intervento strutturale [SMARTEC] . . . . .	3
1.2	Antica e nuova filosofia di monitoraggio strutturale . . . . .	4
1.3	Schema organizzativo di sistemi SMH aeronautici . . . . .	6
1.4	Boeing 787, esempio di struttura aeronautica moderna . . . . .	6
1.5	Statistica Boeing degli incidenti occorsi (aeronautica civile) nel periodo '59-'13 . . . . .	7
1.6	Statistica Boeing, decolli ed ore di volo per anno . . . . .	8
1.7	Metodi per la determinazione delle laminazioni in strutture aeronautiche [1] . . . . .	11
1.8	Classificazione delle tecnologie di monitoraggio con fibre ottiche [2] . . . . .	12
1.9	Esempio di delaminazione nei materiali compositi . . . . .	12
2.1	Struttura della fibra ottica . . . . .	15
2.2	Indice di rifrazione: 1 ) step index multimodale, 2 ) graded index multimodale, 3 ) monomodale . . . . .	16
2.3	Finestre di trasmissione . . . . .	18
2.4	Legge di Snell, angoli caratteristici . . . . .	18
2.5	Cono di accettazione . . . . .	19
2.6	Reticolo di Bragg . . . . .	21
2.7	Frange di rifrazione interne . . . . .	21
2.8	Modellazione dei sensori . . . . .	22
2.9	Dielectric mirror . . . . .	22
2.10	Interferenza tra frange . . . . .	22
2.11	Tipologie di reticoli . . . . .	25
2.12	Risposta spettrale di un reticolo chirped sottoposto ad una deformazione nota, in blu il profilo indeformato. . . . .	26
2.13	Riflettività per le varie configurazioni di array . . . . .	27
2.14	Iscrizione di FBG mediante <i>transverse holographic method</i> . . . . .	29
2.15	Tecnologie di fotoincisione . . . . .	30
2.16	Iscrizione di FBG mediante <i>phase mask</i> . . . . .	30
2.17	Processo di produzione DTG <sup>®</sup> . . . . .	31
2.18	Discretizzazione del reticolo nel metodo TMM . . . . .	34
3.1	Diagramma di flusso del software di identificazione deformazione (Sala [3]) . . . . .	38
3.2	Diagramma di flusso del software di apodizzazione (Sala [3]) . . . . .	38
3.3	Meccanismo base di riproduzione nell'algoritmo genetico . . . . .	39
3.4	Esempio di mossa esplorativa per funzione in due variabili $x_1, x_2$ . . . . .	40
3.5	Esempio del metodo implementato in FBGStrain, Cuneo [4] . . . . .	41
3.6	Esempio di ricostruzione con differenti punti di controllo e diverso profilo interpolante . . . . .	42

3.7	Diagramma a blocchi della logica applicata al programma di ricerca del profilo apodizzato . . . . .	44
3.8	Profilo di apodizzazione ideale, 10 FBG array . . . . .	44
3.9	Schema di suddivisione degli spettri per la determinazione dell'errore . . . . .	45
3.10	Schema di suddivisione dell'area per il calcolo dei baricentri . . . . .	47
3.11	Esempio di profilo di apodizzazione finale . . . . .	49
3.12	<i>Problema inverso</i> : schema di funzionamento del programma per la ricostruzione della deformazione . . . . .	50
3.13	Schema di correlazione tra $\Lambda_m$ e punti di deformazione (p.d.) . . . . .	51
3.14	Caso 1: comparazione pre-post elaborazione . . . . .	52
3.15	Caso 2: comparazione pre-post elaborazione . . . . .	53
3.16	Confronto deformazione ricostruita a deformata teorica nulla . . . . .	54
3.17	Confronto delle deformazioni lineari ricostruite . . . . .	55
3.18	Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo lineare . . . . .	55
3.19	Confronto delle deformazioni paraboliche ricostruite . . . . .	56
3.20	Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo parabolico . . . . .	56
3.21	Confronto della ricostruzione tramite PS . . . . .	57
3.22	Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo atteso . . . . .	57
3.23	Confronto della deformazione ottenuta al variare dei punti di controllo . . . . .	59
3.24	Risultati del problema inverso, mediante FBGCenter, con punti di deformazione collocati e non . . . . .	59
4.1	Schema base della prova con il filo caldo . . . . .	63
4.2	Attrezzatura di prova . . . . .	64
4.3	Layout sperimentale identificazione con filo caldo . . . . .	65
4.4	Schema dell'irraggiamento su piastra modificata . . . . .	66
4.5	Esempio di risultati delle prove di identificazione sensori con coating ormoceramico, FBG2 . . . . .	68
4.6	Esempio di risultati delle prove di identificazione sensori con coating in acrilato . . . . .	69
4.7	Schema dell'irraggiamento sul sensore FBG . . . . .	70
4.8	Effetto del rialzo di 1 mm sullo spettro dei sensori, $V_{scan} = 4$ mm/s . . . . .	71
4.9	Identificazione centro sensore, $V_{scan} = 8$ mm/s . . . . .	72
4.10	Forme generali delle curve di temperature acquisite . . . . .	73
4.11	Andamento della temperatura lungo il sensore FBG . . . . .	74
4.12	Longherone semilavorato . . . . .	76
4.13	Esempio di percorso delle fibre ottiche . . . . .	77
4.14	Rappresentazione del concetto di inserto conico . . . . .	77
4.15	Geometria definitiva degli inserti per la protezione delle FO . . . . .	78
4.16	Foto inserti e tecnica di protezione delle FO . . . . .	79
4.17	Attrezzatura di laminazione completa . . . . .	80
4.18	Analisi dello stato di sforzo sullo spessore in gomma compresso . . . . .	80
4.19	Box di protezione . . . . .	82
4.20	Analisi FEM del box di protezione . . . . .	82
4.21	Stampo e semilavorato di prova . . . . .	83
4.22	Sequenze di drop off delle lamine . . . . .	84
4.23	Prove di laminazione delle solette . . . . .	85
4.24	Quote dei cammini ottici . . . . .	85
4.25	Attrezzatura di laminazione . . . . .	86



4.26	Inglobamento delle fibre ottiche nel laminato . . . . .	87
4.27	Posizionamento dei difetti e delle FO nel laminato . . . . .	88
4.34	Ciclo di cura eseguito per il manufatto . . . . .	90
4.35	Assieme del longherone di prova . . . . .	91
4.28	Particolare di inglobamento dei difetti e dei sensori . . . . .	93
4.29	Particolare di inglobamento delle fibre ottiche . . . . .	94
4.30	Inserimento del difetto di laminazione, doppio lembo di teflon, nella soletta superiore (56 mm x 48 mm) . . . . .	94
4.31	Laminazione completa e particolare del drop-off, antecedente il ciclo di cura . . .	95
4.32	Cartelletta in gomma . . . . .	95
4.33	Precompattazione con sacco da vuoto . . . . .	96
4.36	Vista d'assieme del longherone . . . . .	96
5.1	Schema sistema di acquisizione con analizzatore laser a scansione Micron Optics (MO) . . . . .	98
5.2	Schema sistema di acquisizione con analizzatore di spettro OSA . . . . .	98
5.3	Struttura e strumentazione per la prova a flessione . . . . .	99
5.4	Differenza del sensore prima e dopo l'inglobamento nel laminato, 10 FBG (up) .	101
5.5	Differenza del sensore prima e dopo l'inglobamento nel laminato, 20 FBG (low) .	101
5.6	Effetto della sollecitazione di taglio nella sezione del sensore FBG . . . . .	102
5.7	Ricostruzione della deformazione lungo la soletta superiore, array DTG 10 FBG	104
5.8	Ricostruzione dello spettro dell'array DTG 10 FBG . . . . .	105
5.9	Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo classico . . . . .	106
5.10	Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo offset . . . . .	107
5.11	Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo offset . . . . .	108
5.12	Ricostruzione numerica della deformazione agente sul cammino del sensore nella soletta inferiore. $F = 2500$ kg . . . . .	109
5.13	Confronto tra deformazione sperimentale e numerica nella zona di delaminazione	109



# Elenco delle tabelle

1.1	Risparmio di tempo manutentivo per velivolo militare supportato da tecnologia SHM [5]. . . . .	9
1.2	Sensori a fibra ottica . . . . .	12
2.1	Parametri optoelastici tipici . . . . .	24
3.1	Comparazione dei tempi di calcolo per la risoluzione del problema inverso . . . .	54
4.1	Configurazione di acquisizione dei sensori per prova di identificazione con filo caldo	64
4.2	Impostazione parametri per prova filo caldo . . . . .	67
4.3	Dati geometrici delle fibre ottiche analizzate . . . . .	67
4.4	Misure centri dei sensori per le quattro combinazioni selezionate . . . . .	72
4.5	Confronto posizione sensori tra rilevazione sperimentale (C) e media tra marker (c) . . . . .	73
4.6	Sequenza di laminazione del profilato a C . . . . .	76
4.7	Posizionamento difetti e FO, le quote sono riferite all'inizio della soletta . . . . .	89
4.8	sequenza e larghezza lamine solette . . . . .	90
5.1	Punti prova . . . . .	99
A.1	Materiali e sostanze dopanti per FO . . . . .	115



# Introduzione

Il mondo aeronautico è da sempre in evoluzione, disponibile alle ricerche più avanzate ed allo sviluppo di materiali e tecnologie innovative.

L'esigenza delle industrie aeronautiche spinge ad un'evoluzione verso macchine sempre più affidabili, migliorando la manutenibilità e diminuendo i costi operativi agendo sulla riduzione dei consumi e tempi di fermo macchina.

Lo sviluppo incessante del traffico aereo ha portato gli organismi preposti alla gestione del traffico verso nuove ricerche, al fine di fronteggiare i problemi causati da un numero sempre più elevato di aerei sulle tratte civili, come l'abbattimento delle emissioni inquinanti, la riduzione dell'impronta a terra del rumore, l'incremento della sicurezza e la riduzione dei costi.

Il progetto sviluppato nel lavoro di tesi trae origine dalle attività svolte nell'ambito del progetto europeo SARISTU (SmARt Itelligent aircraft STRUctures).

Il progetto prevede lo sviluppo di tecnologie e materiali al fine di ottenere soluzioni innovative per le future aerodine quali riduzione del peso, diminuzione della resistenza aerodinamica, diminuzione dei consumi e della rumorosità, miglioramento della manutenzione ed identificazione preventiva di danni.

Gli obiettivi sono stati perseguiti sviluppando strutture intelligenti (*smart structure*) in grado di ottenere informazioni dall'ambiente circostante ed attuando opportuni controlli, utilizzando ad esempio sensori ottici, ultrasuoni, leghe a memoria di forma, nanomateriali, strutture adattative.

La tesi sviluppata si colloca nel campo del rilevamento di danni strutturali SHM (*Structural Health Monitoring*) mediante sensori in fibra ottica inglobati in materiali compositi, al fine di dimostrare la capacità dei sensori a reticolo di Bragg (FBG) di rilevare delaminazioni e difetti interni, difficilmente riscontrabili con le comuni operazioni di indagine.

Il progetto prevede la realizzazione di un longherone in composito carbonio-epossidica all'interno del quale sono state inglobate particolari tipologie di sensori ottici con l'intento di ricostruire il campo di deformazione locale ed intuire l'insorgere di difettosità. I difetti o delaminazioni sono introdotte artificialmente interponendo, tra due lamine del composito, un film di teflon.

Si è inoltre studiata ed ottimizzata una procedura numerica in grado di trasdurre il segnale luminoso, riflesso dai sensori, in deformazione agente su di essi.

L'attività finale ha riguardato la realizzazione di un test per la verifica sperimentale delle ipotesi di rilevamento del danno, sollecitando staticamente il longherone tramite flessione a tre punti, al fine di validare il metodo dimostrandone le reali capacità.

Il lavoro di tesi, descritto di seguito, è suddiviso in cinque capitoli principali.

**Capitoli 1 :** Nel primo capitolo verranno introdotti i concetti di monitoraggio strutturale applicato a casi aeronautici ma non solo. Si descriveranno le tecniche moderne per l'identificazione dei danni ed i sensori utilizzati nella realizzazione di materiali intelligenti per il monitoraggio dello stato delle strutture.

**Capitoli 2 :** Si presenteranno i sensori ottici, tipologie, materiali, tecnologie di produzione con particolare attenzione per sensori a reticolo di Bragg FBG, analizzando le equazioni usate per descrivere lo spettro di luce riflessa e la correlazione termo-elastica tra deformazione applicata al sensore e risposta luminosa.

**Capitolo 3 :** Nel capitolo verranno descritti gli algoritmi sviluppati per la risoluzione dei problemi di trasduzione tra spettro ottico e deformazione generante. Si analizzeranno i metodi precedentemente utilizzati e le cause che hanno portato al loro sviluppo, discutendo le procedure numeriche studiate ed implementate al fine di risolvere il *problema inverso* con maggior precisione e velocità computazionale, cercando una strada possibile per futuri sviluppi di applicazioni real time.

**Capitolo 4 :** Vengono descritte le attività tecnologiche e le attrezzature progettate per la realizzazione del laminato finale. Si analizzeranno problematiche tecnologiche specifiche come l'inglobamento delle fibre ottiche, la loro protezione, l'identificazione precisa del sensore iscritto e la gestione del manufatto dalle fasi di messa a punto tecnologica fino all'assemblaggio finale. Inoltre viene presentato uno studio preliminare per la corretta identificazione della posizione dei sensori FBG iscritti nella fibra, attraverso l'utilizzo di una sorgente di calore puntiforme.

**Capitolo 5:** Il lavoro si conclude descrivendo la prova a flessione compiuta sul longherone. Si le analisi dei dati, fornendo indicazioni sulla bontà del metodo, presentando i risultati finali ottenuti analizzando le deformazioni ricostruite e dimostrando l'affidabilità del metodo nel rilevare delaminazioni interne alla struttura.

# Capitolo 1

## Monitoraggio strutturale per applicazioni aeronautiche

A partire dagli anni '80 si è fatta più stringente la necessità di controllare, lungo tutto l'arco di vita, lo stato di salute di materiali e strutture. Le aree ingegneristiche maggiormente interessate da tali progetti risultano principalmente due

- Strutture aerospaziali (aerei, lanciatori, sonde...)
- Strutture civili (ponti, dighe, palazzi...)

Valutare lo stato di salute di una struttura significa monitorare, dalla nascita fino alla dismissione, determinate caratteristiche fisiche al fine di identificare malfunzionamenti o stati pericolosi, migliorando la durata della struttura e la sicurezza dell'intero sistema in cui essa viene installata.

Il monitoraggio strutturale o *structural health monitoring* SHM è l'insieme delle tecnologie in grado di fornire informazioni sullo stato del componente analizzato; SHM è parte integrante delle strutture intelligenti in quanto tale sistema fornisce le informazioni necessarie per l'attuazione delle azioni di controllo successive, come evidenziato in figura 1.2, inoltre è possibile classificare i sistemi di monitoraggio nella categoria dei controlli non distruttivi.

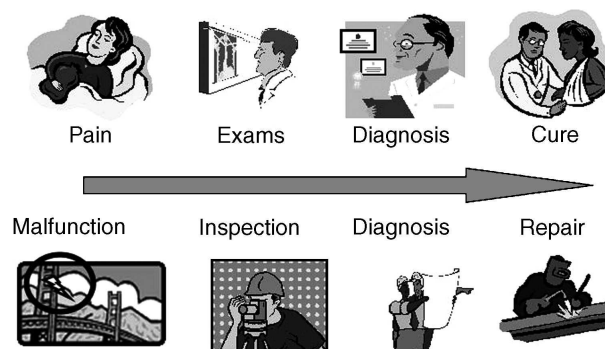


Figura 1.1: Confronto tra intervento umano ed intervento strutturale [SMARTEC]

Come schematizzato in figura 1.1 l'analisi dello stato di salute è solamente la prima azione di un sistema complesso che prende spunto dal sistema nervoso umano. Lo sviluppo di un sistema di monitoraggio implica la gestione di diversi aspetti. Dalla descrizione proposta in [2] è possibile individuare quattro processi principali :

1. Studio della corretta strategia di monitoraggio
2. Installazione dei sistemi
3. Gestione dei sistemi e loro manutenzione
4. Gestione dati

Alla luce di quanto sopra descritto, i principali componenti di un sistema SHM sono:

- Sensori
- Sistema di acquisizione dati
- Data link
- Registratori e Database
- Tecniche di analisi dati (software)
- Sistemi di allerta ed interfacce con utenti finali

Il processo principale per un sistema SHM risultano essere le *strategie di monitoraggio* le quali influenzeranno il resto dei processi, è quindi fondamentale stabilire correttamente i seguenti aspetti

1. Definizione dell'obiettivo del monitoraggio
2. Identificazione dei parametri da monitorare
3. Definizione della tecnica adatta all'identificazione dei parametri proposti
4. Progettazione del sistema
5. Programmazione del piano di monitoraggio
6. Analisi preventiva dei costi di sistema

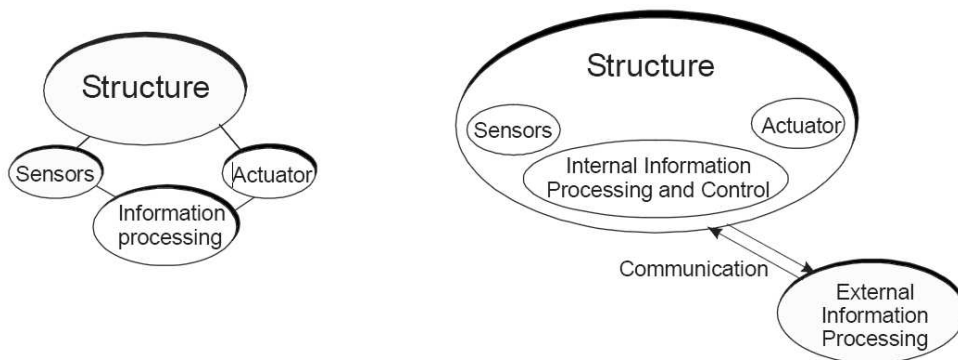


Figura 1.2: Antica e nuova filosofia di monitoraggio strutturale

Non esiste un'unica soluzione ottima al problema del monitoraggio di strutture ma risulta necessaria una progettazione ad hoc per ogni sistema monitorato.



---

Ad esempio è possibile stabilire l'andamento delle deformazioni e valutare eventuali danni attraverso la misura diretta del sensore oppure risalire ad un possibile danno grazie alla conoscenza di un modello numerico i cui input sono i valori provenienti dai sensori, un esempio di quest'ultima applicazione è l'analisi dei modi di vibrare di una struttura i quali variano in funzione delle caratteristiche strutturali, sarà possibile identificare un danneggiamento misurando variazioni delle caratteristiche strutturali come frequenze proprie o modi. Queste due differenti metodologie di indagine sono denominate *signal-base* ed *model-base*.

E' altresì importante lo studio del posizionamento di sensori ed attuatori in funzione della loro natura, delle zone di interesse, di eventuali disturbi esterni, problematiche di inglobamento/incollaggio, trasferimento di carico, limiti di rottura dei sensori, manutenibilità (si pensi alla problematica sostituzione di sensori inglobati); ad esempio incollaggi esterni con quick pack possono facilitare la manutenzione e l'installazione.

Il sistema di monitoraggio deve essere progettato con criterio, ossia sfruttando la conoscenza pregressa per esperienza da prove o modelli numerici delle zone maggiormente sollecitate in cui ci si aspetta l'insorgere di cricche o difettosità. Inoltre è necessario affiancare ai dati relativi al monitoraggio, modelli di propagazione dei danni così da attuare un controllo immediato sull'evoluzione dei difetti ed intervenire adeguatamente.

Un sistema SHM dovrà fornire le corrette informazioni con frequenze di campionamento adatte allo studio della grandezza in esame.

Ulteriore classificazione delle tecniche SHM può essere effettuata sulla base dell'estensione della zona sensibile, ottenendo così due categorie

1. Monitoraggio locale: Insieme di sensori aventi accuratezza e sensibilità elevate con dimensioni ridotte, al fine di indagare precisamente un'area limitata in cui ci si aspetta avvenga un evento, cogliendone l'andamento e le più piccole variazioni. Tale tecnica viene implementata, ad esempio, in prossimità di giunzioni, forature e raccordi; tecniche ad ultrasuoni o sensori ottici chirped sono esempi di monitoraggio locale. Lo svantaggio risulta essere la difficoltà di ridondanze dovute sia ai costi che alla criticità intrinseca delle zone monitorate.
2. Monitoraggio globale : La tecnica consiste nel monitorare una struttura attraverso l'analisi di più sensori dislocati lungo una regione estesa. Tali sensori non necessitano di precisioni elevate ma richiedono la disponibilità di un modello matematico o della conoscenza dello stato della struttura in condizione operativa. Ad esempio la tecnica sfrutta le variazioni di rigidità e smorzamento dovute ad un cedimento strutturale oppure la variazione di una grandezza come la deformazione in un determinato punto la quale influenzerà lo stato dell'intero pezzo. Tale metodologia può richiedere la conoscenza di un modello numerico della struttura esaminata ma ha il vantaggio di monitorare una maggiore porzione, al limite l'intera struttura. La sensibilità della misurazione risulterà meno elevata rispetto al caso locale, con la possibilità di usare sensori meno accurati (più economici). Uno svantaggio di tale metodo è la bassa precisione nel rilevare la posizione precisa e l'estensione del danno con il vantaggio però, di poter avere ridondanze di misure in caso di failure di uno o più sensori. Esempi di tali tecniche possono essere l'analisi dei modi e frequenze di una struttura oppure il monitoraggio puntiforme delle deformazioni, lungo un cammino predefinito, attraverso sensori FBG (tecnologie usate principalmente in ambito civile per il monitoraggio di ponti)

La Figura1.3 mostra lo schema generale alla base del concetto di *structural health monitoring* dove sono chiaramente distinguibili le fasi principali di diagnosi, prognosi e cura del sistema. La progettazione di componenti aeronautici è volta all'ottenimento prodotti sempre più leggeri,

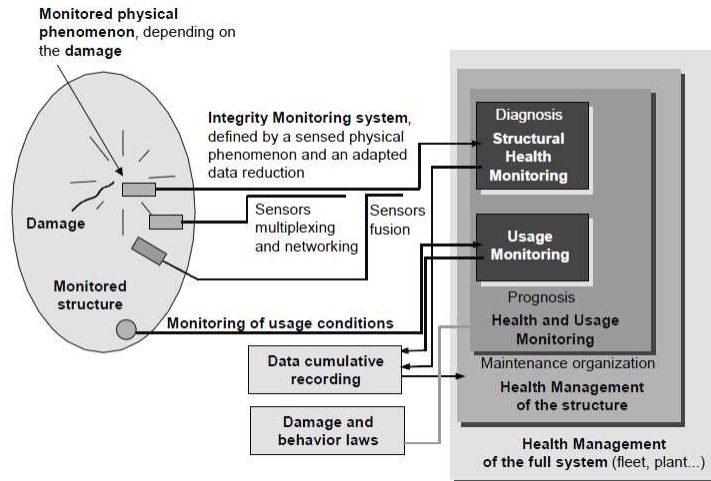


Figura 1.3: Schema organizzativo di sistemi SMH aeronautici

performanti e sicuri, riducendo dove possibile i costi per produzione e gestione della macchina lungo l'intero ciclo di vita del velivolo.

Per ottenere riduzioni di peso ed incremento di sicurezza è fondamentale la ricerca di nuovi materiali e processi di produzione. Le strutture aeronautiche stanno attualmente subendo un processo di ammodernamento, passando dalle classiche strutture in lega d'alluminio verso strutture in materiale composito, come mostrato dalla Figura 1.4.

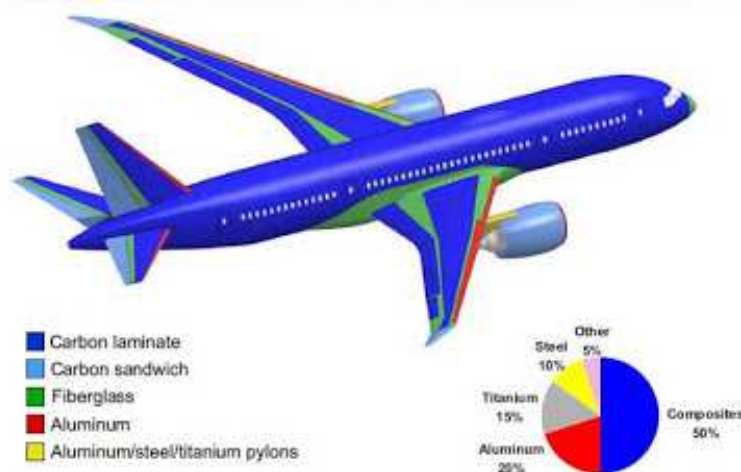


Figura 1.4: Boeing 787, esempio di struttura aeronautica moderna

I materiali compositi sono costituiti da due fasi, una fase matrice composta da resina ed una fase rinforzo composta da fibre. Il vantaggio nell'utilizzo di tali materiali risulta essere la possibilità di sfruttare l'anisotropia, gestendo nella maniera più opportuna l'orientamento delle fibre di rinforzo, gli spessori ed i materiali delle singole lamine al fine di progettare un componente adatto a sopportare efficientemente lo stato di sforzo agente su di esso.

La diversa natura tra materiali metallici e compositi genera diversi modi di cedimento, sviluppo e propagazione delle cricche le quali possono portare alla perdita della macchina. Per fronteggiare al meglio tale rischio si sono sviluppate tre principali filosofie progettuali quali *safe life*, *fail safe*, *tamage tollerance*.

La progettazione *safe life* consiste nel dimensionamento del pezzo in moto tale che un eventuale

sviluppo di cricche non comportino rottura completa del pezzo. Il componente progettato dovrà essere in grado di sostenere la propria funzione lungo l'intero ciclo di vita programmato, senza cedimenti. Tale filosofia comporta la progettazione di pezzi sovradimensionati con conseguente aumento del peso e viene applicata solamente per parti difficilmente sostituibili o nei casi in cui non siano possibili ridondanze. Un esempio sono le cerniere mobili (ala a freccia variabile) all'attacco semiala fusoliera del velivolo Tornado.

La filosofia *fail safe* prevede, qualora avvenga un cedimento, ridondanze di componenti o differenti percorsi di carico al fine di assolvere all'integrità della struttura per il tempo necessario alla riparazione. Fu adottata per la prima volta alla fine degli anni '50, dopo gli incidenti accaduti al Comet. Lo svantaggio risiede nella maggior complessità strutturale ma l'aumento di peso risulta inferiore rispetto ad una struttura *safe life*.

La più moderna filosofia, evoluzione del concetto *safe life* è l'approccio *damage tolerance*. Il criterio di progettazione consiste nel dimensionamento del componente considerando, a priori, la possibile presenza di difettosità e la propagazione di cricche lungo la vita operativa del componente. Per la progettazione risulta fondamentale la conoscenza del comportamento a fatica del materiale nonché le modalità di propagazione del danno. Differentemente dal criterio *safe life*, il componente viene studiato per assolvere le proprie funzioni lungo un preciso arco temporale o numero di cicli di carico, superati i quali è necessario provvedere al controllo dello stato o sostituzione del pezzo.

Prendendo come esempio la filosofia *damage tolerance* si capisce come la conoscenza della nucleazione e propagazione dei danni e la determinazione della vita residua di un componente siano alla base della pianificazione della manutenzione e corretta gestione delle flotte, evitando inconvenienti gravi od incidenti. Oltre ai costi per il fermo macchina durante la manutenzione, risulta evidente come un monitoraggio costante possa controllare con maggior accuratezza lo stato del sistema, migliorando il ciclo di vita del prodotto e gestendo in maniera intelligente gli interventi mantenuti, inoltre i dati raccolti durante il funzionamento permettono ai progettisti di realizzare componenti con durate ottimizzate alle tempistiche manutentive.

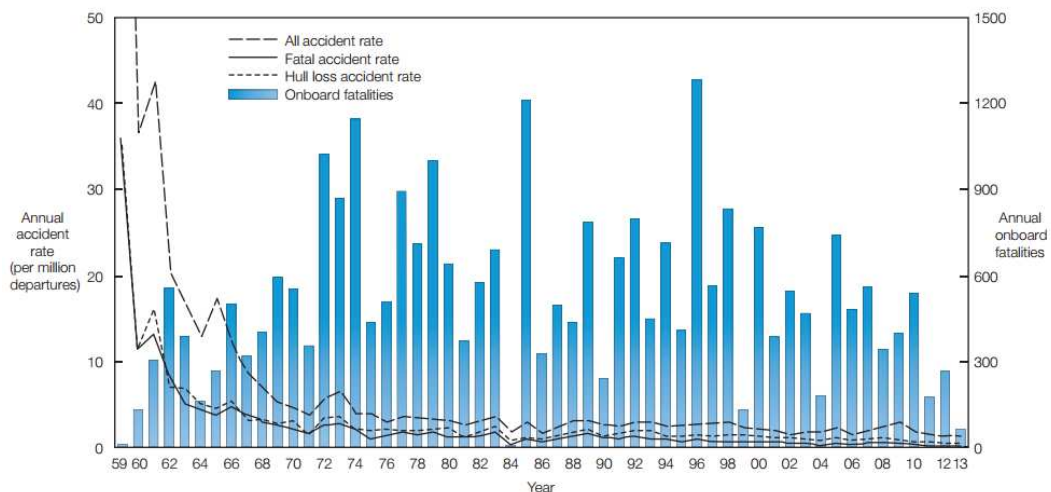


Figura 1.5: Statistica Boeing degli incidenti occorsi (aeronautica civile) nel periodo '59-'13

La figura 1.5 mostra una diminuzione drastica degli incidenti dagli anni '60 ad oggi. Non tutto il miglioramento è imputabile alla gestione scrupolosa delle condizioni strutturali delle macchine, infatti le attuali statistiche mostrano come meno del 6% degli incidenti occorsi negli ultimi anni, in ambito aviazione commerciale, sono imputabili a cattive gestioni della manutenzione.

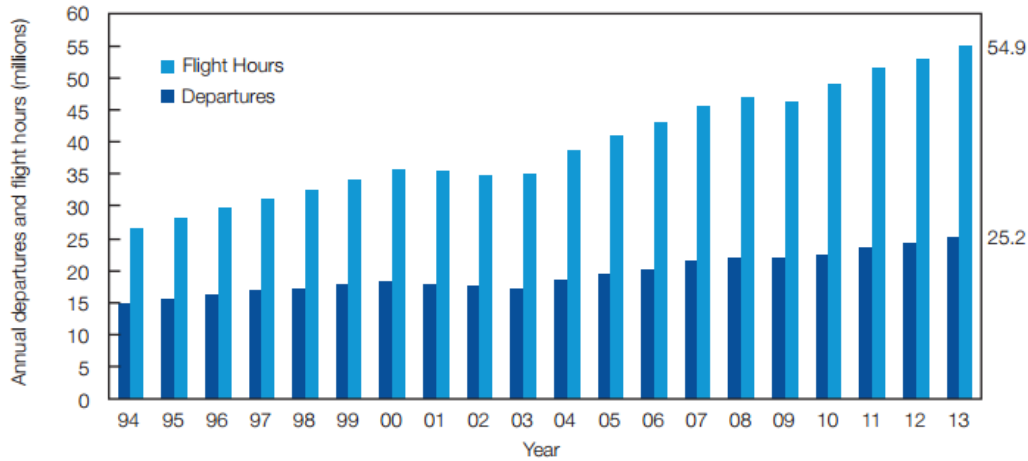


Figura 1.6: Statistica Boeing, decolli ed ore di volo per anno

Ciò significa che lo sviluppo della gestione delle flotte non è attualmente il fattore di rischio dominante, ma trascurare tali aspetti può avere conseguenze gravi (la manutenzione buona è quella che non si vede).

Le considerazioni sopra riportate hanno spinto allo sviluppo di sistemi per il monitoraggio strutturale, attraverso reti di sensori dislocati lungo punti precisi delle strutture aeronautiche in funzioni delle grandezze da controllare.

Riassumendo quanto detto fin ora, le principali motivazioni alla base dell'adozione di sistemi SHM sono:

- ottimizzazione delle strutture e loro durata, evitando incidenti.
- disponibilità di dati per l'ottimizzazione del progetto
- cambiamento della gestione manutentiva al fine di ridurre i tempi morti e fermi macchina, passando da una manutenzione pianificata ad una manutenzione effettuata alla necessità.
- supportare gli operatori nell'identificazione di difetti o danni, diminuendo la possibilità di errori umani
- riduzione dei costi migliorando sia la progettazione sia la gestione in opera della struttura

I benefici economici, relativi all'introduzione di tecniche di monitoraggio in campo aeronautico, sono di difficile determinazione poiché insorgono diversi fattori determinanti come i costi di sensori ed apparecchiature e le modifiche a cicli di produzione per poter allestire la sensoristica necessaria. L'investimento iniziale per l'adozione di sistemi SHM dovrà essere ripagato lungo la vita utile della macchina. A tale proposito diversi studi sono stati condotti a riguardo come analizzato in [5], ottenendo che per velivoli militari le riduzioni di tempo durante la manutenzione sono i seguenti:

Come mostrato in tabella 1.1 la riduzione del tempo impiegato per interventi manutentivi risulta di circa 44%.

I benefici manutentivi non sono gli unici, infatti avendo la possibilità di costanti controlli dello stato della struttura è possibile diminuire i margini di sicurezza, con conseguente sgravio di peso strutturale ed aumento di carico pagante o range del velivolo.

I sensori offrono l'opportunità di monitorare il prodotto sin dalle prime fasi di produzione valutando da subito la presenza di difetti, di notevole importanza risulta anche il monitoraggio

---

ispezione	senza SHM (% tempo totale)	miglioramento stimato	con SHM (% tempo totale)
linea volo	16	0.4	9.5
programmato	31	0.45	17
non programmato	16	0.1	14.5
revisioni periodiche	37	0.6	15
totale	100		56

---

Tabella 1.1: Risparmio di tempo manutentivo per velivolo militare supportato da tecnologia SHM [5].

dei subcomponenti durante il trasporto verso gli scali di assemblaggio finale o verso le rampe di lancio. A tale proposito si ricorda l'incidente occorso al lanciatore Delta II nel 1997, quando subito dopo il lancio uno dei razzi esplose. L'analisi dell'incidente identificò le cause in un cedimento della struttura in carbonio dell'ugello di scarico, dovuta al carico eccessivo introdotto in essa durante le fasi di trasporto a terra.

La figura 1.6 mostra un trend di crescita maggiore nel numero di ore volate rispetto all'aumento dei decolli. Analizzando tale grafico è possibile affermare che, mediamente, il numero di ore volate per aereo è in continuo aumento grazie anche all'apertura di nuove e più lunghe rotte. I velivoli delle flotte commerciali operanti a livello mondiale, secondo dati Boeing, ammontano a circa 23000 unità, dividendo il numero di ore annue volate per il numero di aeroplani si ottiene una media di 6.6 ore volate per giorno per macchina. Ovviamente tale dato è una pura media, velivoli long-range svolgono un maggior numero di ore di volo, velivoli point to point hanno maggior numero di movimenti (decolli, atterraggi) ma con voli di durata inferiore. Tali considerazioni influenzano la pianificazione della manutenzione, ricordando come il numero di cicli a fatica che la struttura deve sopportare dipenda dalla specifica missione (si pensi alle fasi di decollo, atterraggio, taxi, pressurizzazione cabina), lo studio di sistemi di monitoraggio ed analisi dei dati raccolti dovrà tenere in considerazione tali aspetti.

I dati raccolti dai vari sistemi integrati nel velivolo devono essere registrati ed analizzati, l'analisi può essere effettuata secondo due modalità *Online*, *Offline*.

Sistemi *Online* consistono in architetture hardware e software che permettono l'analisi dei dati in real time durante le varie fasi di volo. In via di sviluppo sono sistemi di trasmissione *remote*, in cui i dati sono inviati via satellite dall'aereo alle basi di manutenzione dei costruttori. La disponibilità quasi immediata di dati permette agli operatori a terra di gestire efficientemente eventuali criticità intervenendo tempestivamente così da ridurre i tempi di fermo a terra del velivolo.

Nei sistemi *Offline* i dati sono registrati e mantenuti a bordo, vengono scaricati ed analizzati dopo l'atterraggio, una volta a terra. Sfruttando le potenzialità dei sistemi *remote* il DoD ha effettuato studi sul miglioramento della manutenibilità arrivando a definire, come descritto da Derriso in [6] un nuovo processo denominato *Integrated vehicel health monitoring* IVHM.

### 1.1 Danneggiamenti

L'esperienza accumulata dai costruttori indica come possibili difetti presenti nei laminati per strutture aeronautiche siano principalmente:

- Inclusioni
- Eccessi di resina
- Vuoti
- Sbandamenti o rotture di fibre
- Delaminazioni (figura 1.9)
- Cedimenti della fase matrice
- Cedimento dell'interfaccia fibra-matrice(debonding)
- Degrado di incollaggi
- Danni da impatto
- Corrosione

Gli operatori finali richiedono monitoraggi per identificare delaminazioni e rotture della fase matrice essendo i primi e più comuni difetti che si sviluppano. Inoltre la mancanza di adesione e supporto delle fibre velocizza l'instabilizzarsi di esse facilitandone le rotture.

Ulteriore aspetto da considerare risulta la difficoltà di rilevamento visivo delle delaminazioni da impatto, le quali si manifestano a partire dagli strati più interni del laminato.

Le cause della presenza di difetti sono da ricercarsi durante le varie fasi di vita, da aspetti relativi esclusivamente alle fasi di manufacturing fino a cause legate all'utilizzo. Bisogna ricordare come ogni sistema impiegato abbia delle sensibilità e quindi non è possibile individuare difetti di dimensioni ridotte. Le prime fase di nucleazione possono non essere rilevate sin da subito, la strategia di monitoraggio e la conseguente manutenzione dovrà tenere conto delle dimensioni e velocità di propagazione dei difetti.

Nel caso specifico di utilizzatori aeronautici sono interessati principalmente a sistemi di monitoraggio per

- Zone difficilmente accessibili
- Aree soggette ad impatti
- Giunzioni ed incollaggi
- Aree maggiormente sollecitate
- Deformazioni globali e forme modali

## 1.2 Tipologie di sensori

Nel corso degli anni si sono sviluppate differenti tecniche di indagine e tipologie di sensori, ognuno dei quali adatto ad applicazioni specifiche. I sensori sono scelti in base alla natura del materiale componente la struttura, zona di monitoraggio (superficie o sensore inglobato), tipologia di danno, gestione della manutenzione del sistema e costi di installazione, le principali categorie sono raggruppabili in:

- Sensori a fibra ottica
- Estensimetri
- Sensori ad onde acustiche, ultrasuoni
- Sensori piezoelettrici
- Eddy current
- Comparative Vacuum
- Interferometria

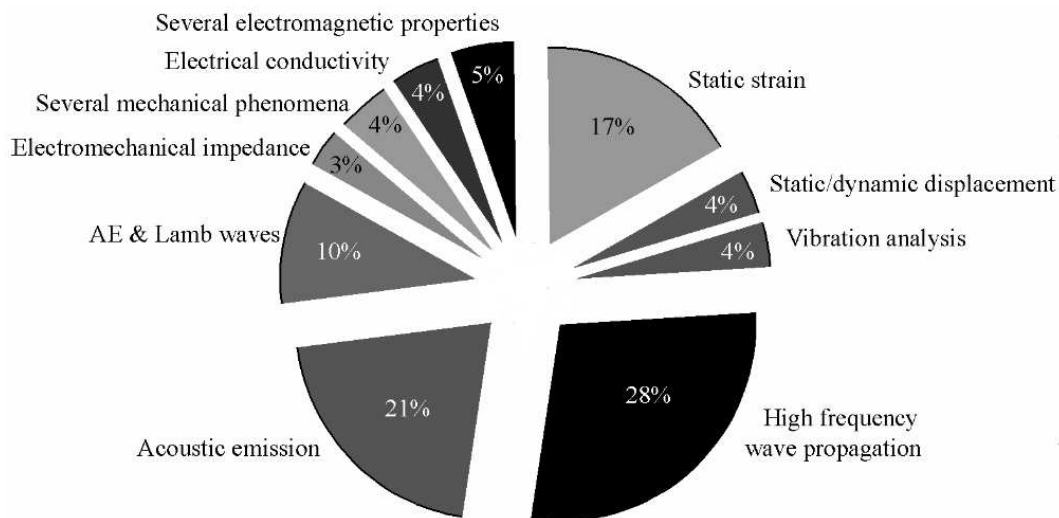


Figura 1.7: Metodi per la determinazione delle laminazioni in strutture aeronautiche [1]

Come indica una ricerca pubblicata in [5] i sensori maggiormente impiegati su velivoli sono sensori piezoelettrici (60%) mentre sensori a fibra ottica sono utilizzati per il 25% del totale, infatti i sensori piezoelettrici e la tecnologia utilizzando le onde di Lamb garantiscono un'affidabile rilevamento di danni da impatto, cricche e delaminazioni, l'utilizzo di sensori a fibra ottica trova largo impiego per il monitoraggio di strutture civili.

Il lavoro di tesi presentato si focalizza sull'utilizzo di sensori ottici, la figura 1.8 mostra le attuali tecnologie disponibili per impieghi di monitoraggio con fibre ottiche.

Nel capitolo 2 verranno descritti dettagliatamente i sensori a reticolo di Bragg, usati come sensori di deformazione, inglobati nel laminato, durante l'attività di tesi descritta.

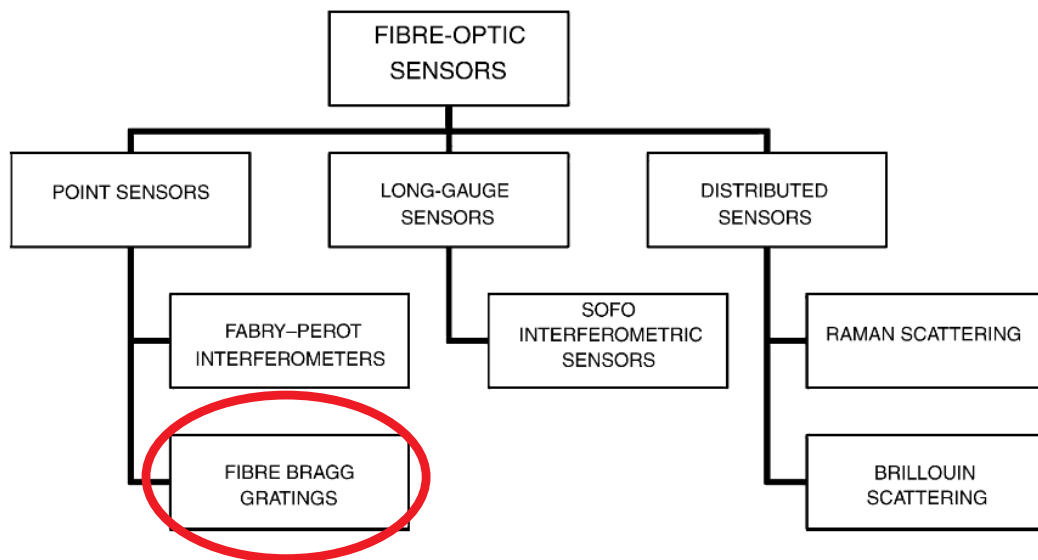


Figura 1.8: Classificazione delle tecnologie di monitoraggio con fibre ottiche [2]

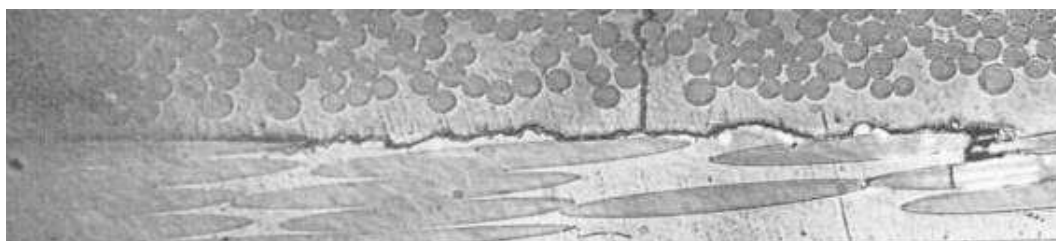


Figura 1.9: Esempio di delaminazione nei materiali compositi

tecnologia ottica	SOFO	Fabry-Perot	FBG	Raman scattering	Brillouin scattering
tipo di misura	integrale	puntuale	puntuale	distribuita	distribuita
parametri misurabili	allungamento	deformazione temperatura	deformazione temperatura	temperatura	deformazione temperatura
modi ottici	monomodale	multimodale	monomodale	multimodale	monomodale

Tabella 1.2: Sensori a fibra ottica



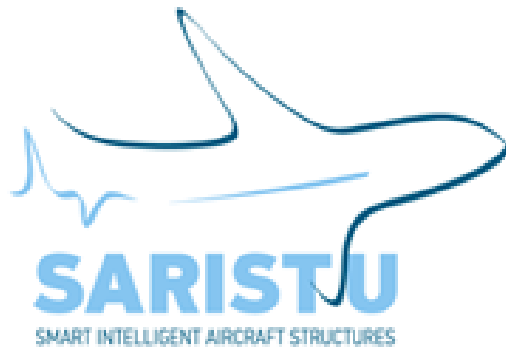
## 1.3 Progetto SARISTU

L'attività di tesi svolta presso i laboratori DIA prende spunto dal progetto europeo SARISTU (Smart Intelligent Aircraft Structure). Il progetto SARISTU raccoglie 64 partner europei, atenei, poli di ricerca ed aziende capeggiate da Airbus e prevede come principale scopo lo studio di nuove tecnologie atte al miglioramento del trasporto aereo futuro. In particolare il progetto prevede la riduzione dei costi del trasporto aereo e della rumorosità dei velivoli di nuova generazione. Gli obiettivi principali del progetto sono [7]

- Riduzione del 6% della resistenza aerodinamica
- Miglioramento delle tecnologie SHM al fine di rendere vantaggiosa tale tecnologia su aerei civili, con conseguente riduzione dei costi per la manutenzione di servizio, spostando il processo di inglobamento prima possibile nella sequenza tecnologica
- Miglioramento delle strutture aeronautiche grazie all'adozione di nanotecnologie

Il progetto prevede lo studio per tecniche di morphing alare variando la forma dei bordi d'attacco ed uscita, così da adattare al meglio l'assetto del velivolo in relazione alle varie fasi di volo migliorando le performance aerodinamiche e riducendo i consumi.

La riduzione del peso è stata oltretutto perseguita migliorando la struttura della fusoliera, utilizzando nuove tecnologie per gli incollaggi di correnti e pannelli ed adottando nanotecnologie al fine di migliorare la resistenza dei materiali compositi. Il Politecnico di Milano ha avuto in carico attività riguardante il corretto posizionamento di sensori ottici e la determinazione dei carichi dalle informazioni ricevute inoltre si è occupato dei problemi e tecniche di inglobamento, protezione e gestione delle FO durante le attività di manufacturing sviluppando tecniche di installazione e protezione dei sensori ottici.





## Capitolo 2

# Fiber Bragg Gratings : Generalità e Modellazione

I sensori Fiber Bragg Gratings sono riflettori di Bragg costituiti da più specchi dielettrici appositamente realizzati ed iscritti nelle fibre ottiche, al fine di riflettere la radiazione luminosa solamente in determinate lunghezze d'onda di interesse, trasmettendo la restante parte del segnale luminoso lungo la fibra.

Nel presente capitolo si analizzerà una particolare tipologia di sensori ottici, i sensori a reticolo di Bragg FBG.

Tale tipologia di sensori, grazie alla loro affidabilità, viene utilizzata in differenti campi applicativi per trasdurre la deformazione agente sul sensore in variazione di lunghezza d'onda del picco di Bragg, come verrà mostrato nei successivi paragrafi.

Le fibre ottiche sono un veicolo di informazione luminosa la quale sfrutta le proprietà fisiche di trasmissione e riflessione del materiale al fine di confinare ed indirizzare nella maniera opportuna il fascio luminoso propagante al suo interno.

La fibra caratterizzata da differenti strati concentrici (come mostrato in Figura 2.1) i quali hanno lo scopo di riflettere il fascio luminoso e proteggere la fibra, avente una struttura molto fragile, da agenti esterni che potrebbero causarne la rottura.

La struttura è costituita da uno strato centrale (*core*) il quale si interfaccia con il secondo strato (*cladding*) componendo la struttura principale per la trasmissione come verrà descritto in 2.1, gli strati esterni di rivestimento e protezione da agenti dannosi sono denominati *coating* e *jacket*.

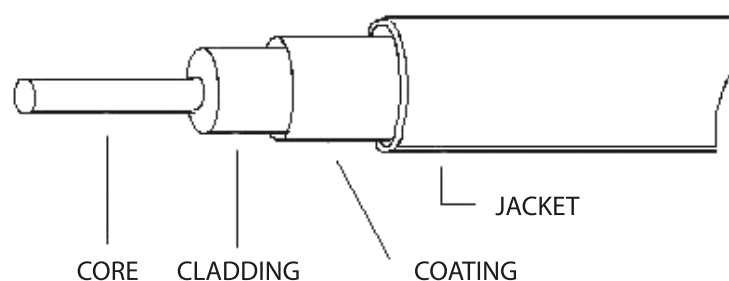


Figura 2.1: Struttura della fibra ottica

## 2.1 Principio di funzionamento delle fibre ottiche

Il segnale luminoso usato per la trasmissione dell'informazione si propaga nel mezzo ottico sfruttando la riflessione all'interfaccia tra core e cladding grazie ai differenti valori di indice di riflessione dei due strati. La fibra ottica è costituita da filamenti di materiale polimerico o vetroso (silicio) opportunamente drogato per garantirne le proprietà di riflettività e migliorare la trasmissione del segnale.

Nelle FO in silicio, maggiormente usate, il filo viene drogato con atomi di germanio(Ge), Zirconia ( $ZrO_2$ ) o Boro(Br) congiuntamente ad altri metalli e semiconduttori, variando i componenti e di conseguenza le strutture delle molecole è possibile modulare indici di rifrazione all'interfaccia tra core e cladding Figura 2.2, variare la velocità di propagazione della luce e la sensibilità alle perturbazioni esterne(sensori) mentre nell'interno del core, dove il segnale maggiormente propaga, è necessario avere una purezza elevata tale da evitare pericolose rifrazioni; un approfondimento su tali aspetti è possibile in [8].

Per la trasmissione luminosa esistono diverse tipologie di fibre ottiche, una prima divisione può essere effettuata sulla base dei differenti modi luminosi che il dispositivo può trasmettere, rappresentate nelle 3 classi in figura 2.2.

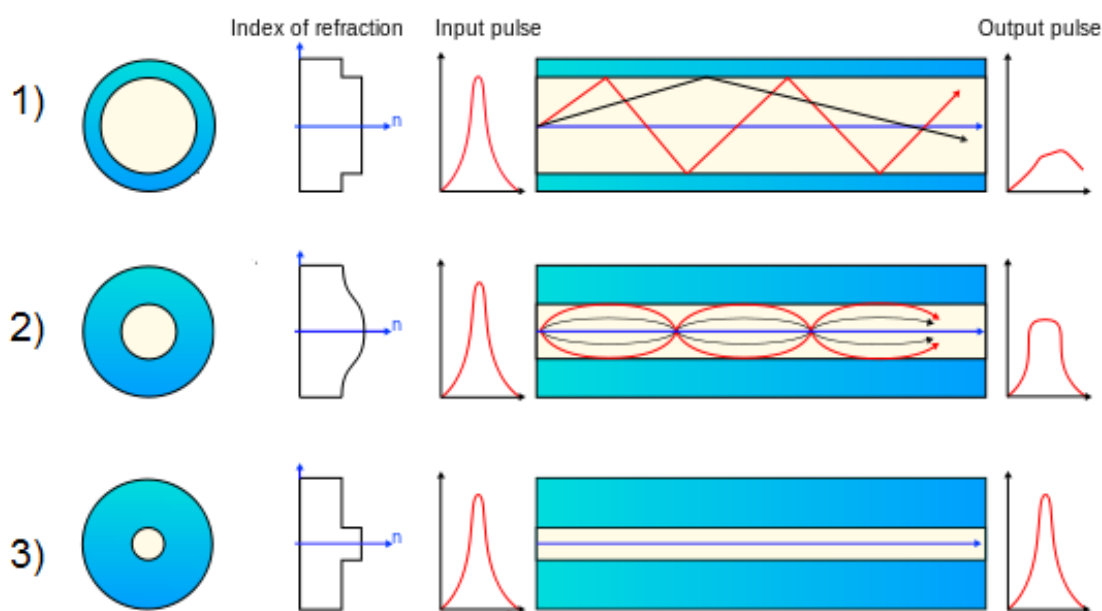


Figura 2.2: Indice di rifrazione: 1 ) step index multimodale, 2 ) graded index multimodale, 3 ) monomodale

1. Multimodali step index: sono caratterizzate da un diametro del core elevato, così da permettere angoli di riflessioni differenti corrispondenti a modi diversi, vengono impiegate nelle telecomunicazioni ma hanno lo svantaggio di attenuazioni più elevate e diametri maggiori.
2. Multimodali graded index: la modulazione di indice di rifrazione tra core e cladding non avviene repentinamente ma gradualmente, si ottiene il vantaggio di una trasmissione meno degradata ed un miglioramento delle perdite dovute alle curvature; il costo della fibra risulta superiore rispetto al caso 1.

3. Monomodale: La configurazione attuale risulta la più impiegata per la sensoristica grazie a bassissime attenuazioni di segnale, facilità di interrogazione e lettura del segnale ottico, inoltre si possono ottenere fibre di diametro inferiore, con intrusività limitate nel caso di sistemi integrati.

Una ulteriore suddivisione può essere ottenuta classificando le fibre in funzione del materiale di rivestimento del coating, ottenendo:

- coating in Poliacrilato: facilmente strippabile, facile da maneggiare e giuntare, con caratteristiche meccaniche non elevate. Avendo una temperatura di transizione vetrosa attorno a  $85^{\circ}\text{C}$  risente del degrado qualora la temperatura superi eccessivamente tale limite con problemi di deformazione della fibra ottica, indebolimento dell'interfaccia nel caso di sensori inglobati ed eventuale perdita del segnale.
- coating in Polyimide: rivestimento con caratteristiche meccaniche superiori all'acrilato, garantisce omogeneità di forma e protezione del core a temperature maggiori, necessità di maggior attenzione nelle operazioni di stripping.
- coating in Ormocer (organic modified ceramic): rivestimento adatto alle alte temperature, superiore a  $300^{\circ}\text{C}$ , dalle elevate caratteristiche meccaniche le quali garantiscono adeguata protezione al vetro e permettendo il trasferimento di elevate deformazioni tra il laminato e la zona sensibile dell'FBG. Rivestimenti in Ormocer sono utilizzati per la produzione di fibre ad alta apertura numerica, riducendo i problemi di *microbending loss*.

Un fattore importante per la scelta del tipo di segnale ottico è l'attenuazione per unità di lunghezza della fibra, l'attenuazione risulta funzione della lunghezza d'onda scelta. Le cause di tale perdita, come discusse in [8] sono riconducibili ad:

- Dispersione ottica, causata dall'interazione tra fascio luminoso ed atomi o molecole. Il contributo dispersivo è maggiore per basse lunghezze d'onda mentre risulta limitato per valori  $\lambda > 1200\text{ nm}$
- Assorbimento di infrarossi, rilevante per  $\lambda > 1600\text{ nm}$
- Assorbimento luminoso causato dagli ioni  $\text{OH}^-$ . Tale disturbo risulta predominante per valori di lunghezze d'onda pari a  $\lambda = 980\text{ nm}$ ,  $\lambda = 1250\text{ nm}$ ,  $\lambda = 1420\text{ nm}$ .

In figura 2.3 vengono definite tre finestre di trasmissione, corrispondenti alle perdite minime, la banda maggiormente utilizzata risulta la terza ( $1510 < \lambda < 1590$ ).

Durante il lavoro di tesi presentato l'interrogazione dei sensori ottici è stata effettuata con sorgenti della banda tre.

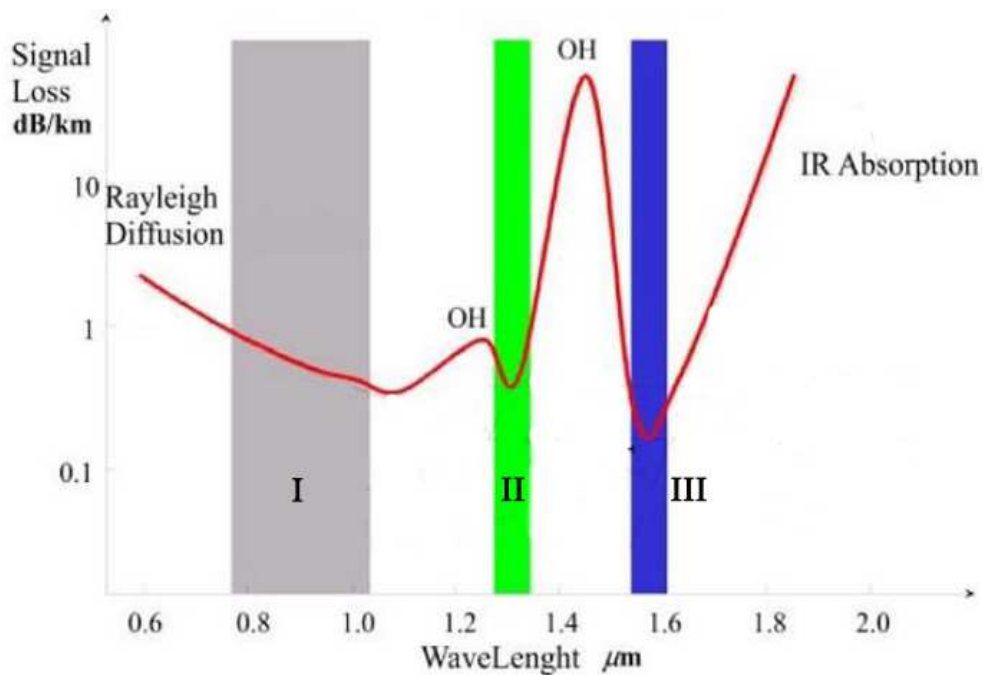


Figura 2.3: Finestre di trasmissione

### 2.1.1 Legge di Snell

Nell'ottica classica, la riflessione viene descritta geometricamente attraverso la legge di *Snell*:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)} \quad (2.1)$$

Con riferimento all'equazione 2.1 gli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$  sono rispettivamente le misure tra la direzione del fascio di luce riflesso e rifratto rispetto alla normale al piano di discontinuità ottica come mostrato dalla Figura 2.4.

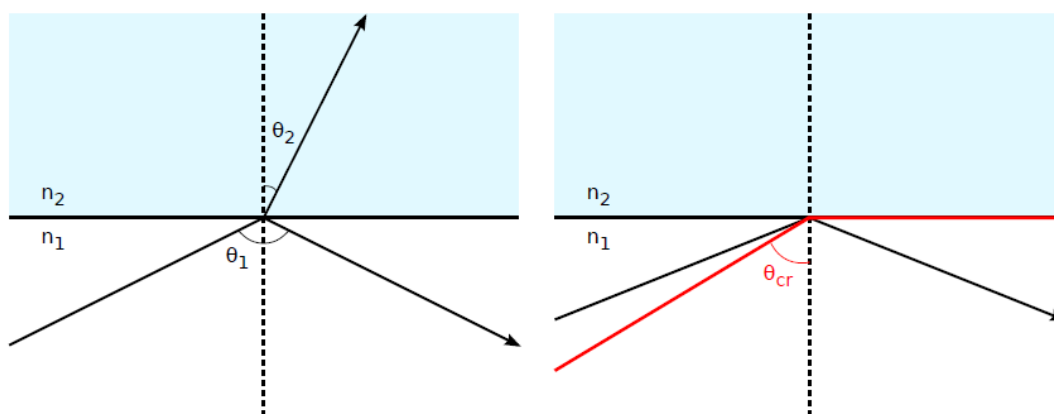


Figura 2.4: Legge di Snell, angoli caratteristici

Per ottenere la riflessione totale del segnale all'interno del *core* è necessario che venga rispettata la condizione seguente, avendo posto  $\theta_2 = 90^\circ$

$$\sin(\theta_1) \cdot n_{co} = \sin(\theta_2) \cdot n_{cl}$$

$$\theta_{cr} = \text{asin}\left(\frac{n_{cl}}{n_{co}}\right)$$

$$\theta_1 \geq \theta_{cr}$$

la quale influenza l'angolo di accettazione del cono di trasmissione ottico  $\theta_A$  così definito

$$\sin \theta_A \leq \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

un parametro ricorrente nella descrizione dei mezzi ottici e quindi valido per le fibre ottiche è l'apertura numerica NA, definita nel modo seguente:

$$NA = n \cdot \sin(\theta_{max})$$

dove  $\theta_{max}$  è la massima apertura del semicono ed  $n$  l'indice di rifrazione del mezzo considerato (*core*).

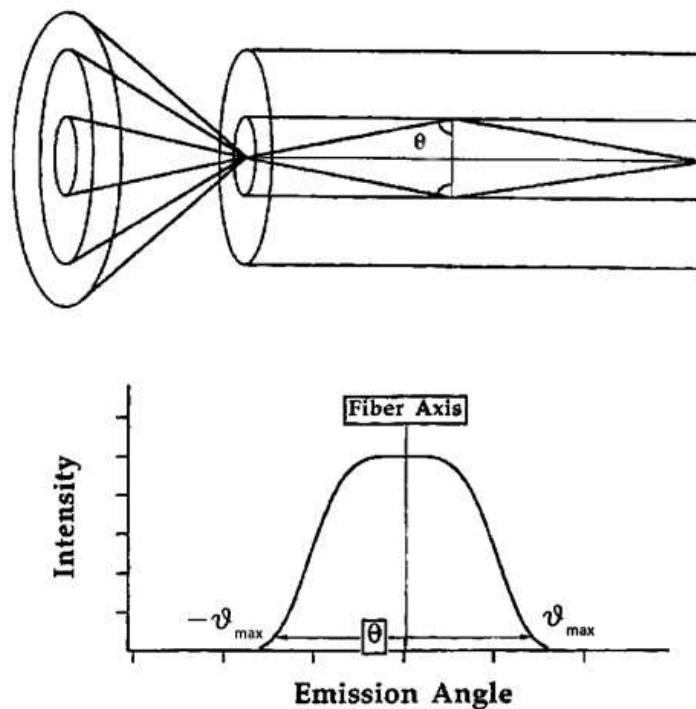


Figura 2.5: Cono di accettazione

Perché non ci siano perdite di segnale lungo la FO è necessario che l'angolo di riflessione non oltrepassi il valore critico, nel caso di fibre ottiche comuni tali perdite si possono verificare a causa dei piccoli raggi di curvatura assunti dalla fibra od a causa delle piccole distorsioni di forma dovute ad una qualsiasi causa esterna.

Per migliorare il problema del bending loss sono state sviluppate FO in grado di resistere ad elevati raggi di curvatura, le fibre ottiche ottenute hanno un elevato valore di apertura numerica, garantendo perdite limitate quando l'asse della fibra non risulti rettilineo.

## 2.2 Sensori FBG

L'utilizzo delle fibre ottiche come sensori si sta sempre più sviluppando grazie ad i notevoli vantaggi di trasmissione dati rispetto ad un comune cavo elettrico, quali:

- Flessibilità di installazione
- Insensibilità alle perturbazioni esterne, specialmente disturbi elettromagnetici
- Basse perdite di segnale
- Dimensioni ridotte ed intrusività limitate
- Elevate velocità di trasmissione
- Basse potenze di interrogazione
- Possibilità di multiplexing sulla singola fibra

Attuali svantaggi di una tecnologia ottica risultano essere:

- Fragilità dell'architettura, e conseguente perizia nell'installazione di FO integrate nei componenti
- Elevati costi di sensori e sistemi di interrogazione, in particolare per sistemi ad alta frequenza

La diminuzione dei costi risulta legata ai processi produttivi così che un futuro aumento delle richieste combinato a miglorie della tecnologia produttiva potrà portare ad un abbassamento dei prezzi di mercato.

Per migliorare la resistenza delle fibre ottiche si sono adottate differenti tecniche di protezione ed inglobamento che saranno discusse nei capitoli successivi.

I reticoli di Bragg, come mostrato in figura 2.6 sono fotoincisioni effettuate tramite UV le quali causano delle variazioni localizzate e periodiche di indice di rifrazione  $\delta n_{co}$  dell'ordine di  $10^{-4}$ . Il legame tra la lunghezza d'onda riflesse e la spaziatura dei reticoli è governata dall'equazione di Bragg, definiti nel modo seguente:

$$\lambda_b = 2 n_{eff} \Lambda \quad (2.2)$$

verrà descritta di seguito, in maniera semplificata, la derivazione dell'equazione di Bragg 2.2. Per un approfondimento dettagliato a partire dalla descrizione dei campi magnetici ed elettrici, secondo le equazioni di Maxwell, si rimanda ad [9].

Si pensi ad un reticolo di diffrazione come uno specchio dielettrico 2.9 che, come precedentemente detto, a causa del bassissimo valore di  $\delta n_{co}$ , ricordando la legge di Snell, è possibile pensare come la variazione di angolo dovuto al diverso indice di rifrazione sia nulla, approssimando il percorso blu( $L_b$ ) in un triangolo isoscele. Si otterrà interferenza costruttiva solo se la differenza tra i cammini ottici  $L_b - L_a$  risulta un multiplo  $m$  della lunghezza d'onda in esame  $L_b - L_a \simeq 2\Lambda \sin(\theta)$  e per onde propaganti in un mezzo ottico l'equazione assume la forma seguente

$$m\lambda = 2 n_{eff} \Lambda$$
$$n_{eff} = n \cdot \sin(\theta)$$



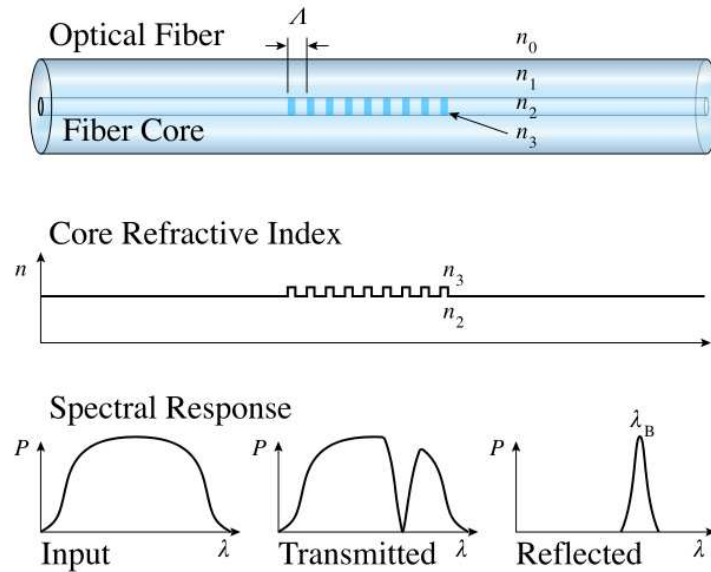


Figura 2.6: Reticolo di Bragg

Con riferimento a sensori monomodali, largamente utilizzati, l'ordine predominante è il primo che equivale a fissare  $|m| = 1$  il segno discriminerà il modo di trasmissione e di riflessione ottenendo l'equazione 2.2.

La luce viene riflessa gradualmente lungo tutto il reticolo, la potenza trasmessa e riflessa all'interno della zona sensibile è mostrata in Figura 2.7

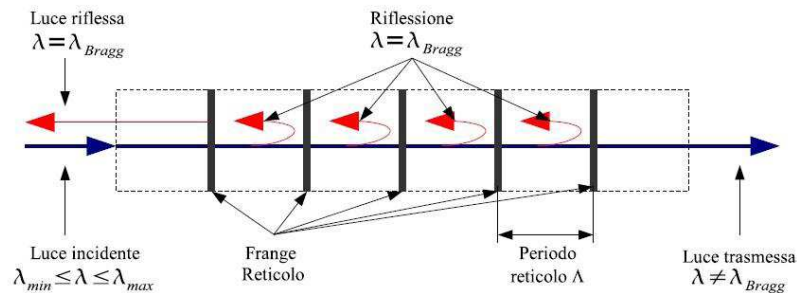


Figura 2.7: Frange di rifrazione interne

come già discusso,  $\lambda_b$  dipende dalla spaziatura tra i piani di riflessione mentre l'ampiezza del picco riflesso risulta in funzione della lunghezza del reticolo, maggiore la zona sensibile e minore dispersione presenterà il picco riflesso.

Ciò si comprende dalla figura 2.8(a) dove il sensore di lunghezza 10 mm risulta avere una campana con bassa dispersione e valore di riflettività elevato rispetto al sensore di 3 mm.

Nell'inscrivere il reticolo all'interno del core è possibile modulare l'indice di rifrazione, ottenendo il valore massimo gradualmente; questa tecnica viene detta apodizzazione e permette la soppressione dei lobi laterali del segnale riflesso, come mostrato nella figura 2.8(b), ottenendo una curva più pulita.

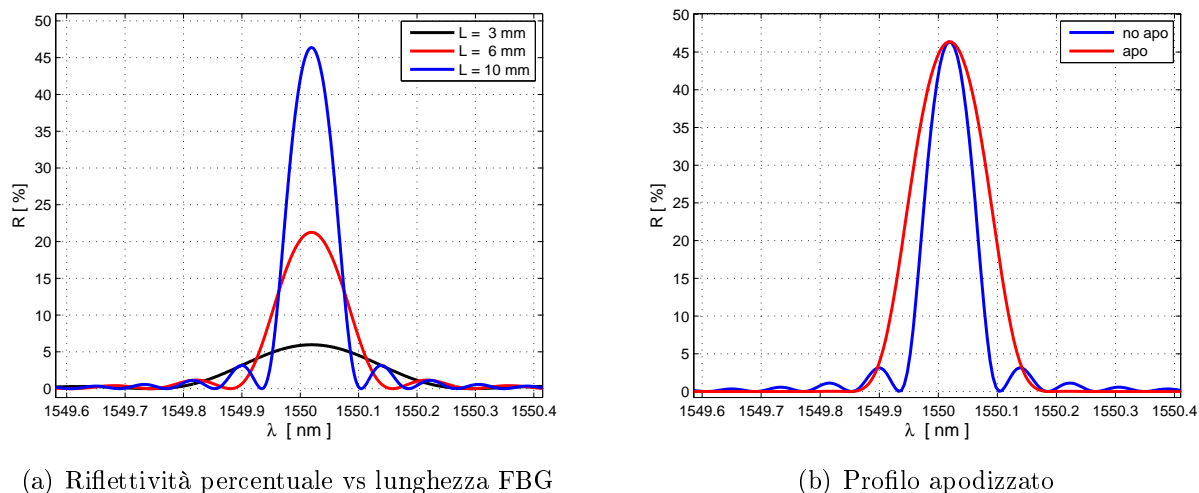


Figura 2.8: Modellazione dei sensori

### 2.2.1 Reticoli di diffrazione

Un reticolo di diffrazione è una discontinuità ottica (fessura, impurità, variazione di rifrazione) la quale causa una riflessione parziale del raggio incidente. Nei sensori ottici il raggio incidente viene riflesso in più frange a causa della presenza di discontinuità, comunemente i reticoli sono ottenuti grazie alla variazione di indice di rifrazione del *core*.

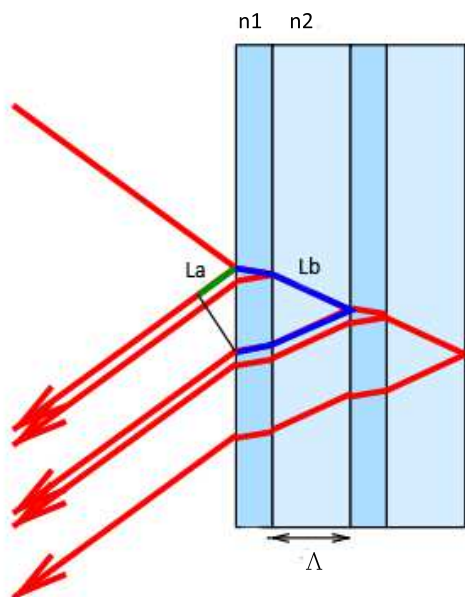


Figura 2.9: Dielectric mirror

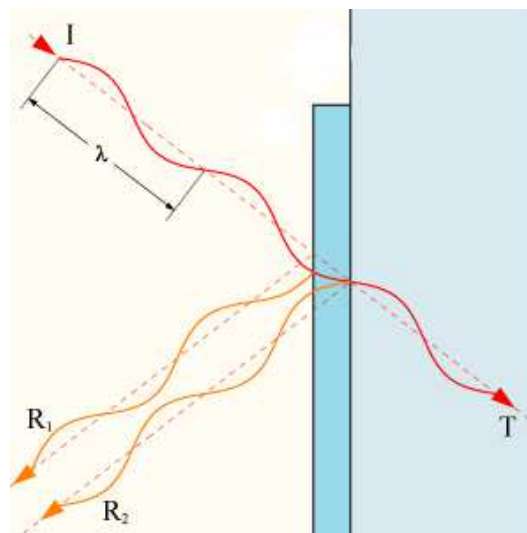


Figura 2.10: Interferenza tra frange

Come mostrano le figure 2.9,2.10 il raggio luminoso viene in parte riflesso ed in parte trasmesso, calibrando opportunamente la distanza  $\Lambda$  tra i piani è possibile ottenere interferenze costruttive o distruttive, come mostrato in appendice A. I sensori a reticolo di Bragg necessitano di riflessione costruttiva e tale condizione viene raggiunta quando i raggi riflessi dai vari piani, dette frange di interferenza, risultano in fase tra loro, diversamente nella figura 2.10 i raggi  $R_1$  ed  $R_2$  sono sfasati di  $180^\circ$  generando una forte attenuazione della riflessione.

Qualitativamente si può intuire come cambiando la distanza  $\Lambda$  si varia la differenza di cammino  $L_b - L_a$  tra le frange, così facendo è possibile sintonizzare il segnale di interferenza su una lunghezza d'onda prefissata.

### 2.2.2 Legame foto-termo-elastico

I sensori FBG hanno la caratteristica di trasdurre variazioni di diverse grandezze fisiche, avendo il limite di presentare lo stesso effetto (variazione di  $\lambda_b$ ) per differenti cause.

Nelle applicazioni di monitoraggio strutturale tramite FBG è necessario scorrelare l'effetto di deformazione meccanica dall'effetto di deformazione termico, le tecniche attualmente implementate per la risoluzione di tale problema sono principalmente due: sensori tilted o risoluzione del problema termo-elastico con almeno due o più sensori indipendenti.

Ricordando l'equazione di Bragg 2.2, differenziano termine per termine si ottiene

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2.3)$$

il termine  $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}$  equivale alla deformazione totale lungo il sensore descritta dall'equazione seguente

$$\epsilon_z = \epsilon_z^t + \epsilon_z^m = \alpha\Delta T + \epsilon_z^m \quad (2.4)$$

dove  $\alpha$  indica il coefficiente di dilatazione termica della FO, rimane da analizzare il termine  $\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}}$  come descritto in [3]

$$\Delta n_{eff} = -\frac{n_{eff}^3}{2} \cdot \left[ p_{12}\epsilon_z - (p_{11} + p_{12}) \cdot \nu\epsilon_z - \left( \frac{2}{n_{eff}^3} \cdot \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \right] \quad (2.5)$$

dove si è indicato:

$p_{ij}$  componenti del tensore opto elastico

$\nu$  coefficiente di Poisson

La relazione che lega la variazione di indice di rifrazione in funzione della deformazione è generalmente indicata dall'equazione

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} \cdot P_{ij}\epsilon_{j1} \quad (2.6)$$

dove il tensore  $P_{ij}$  per un mezzo omogeneo isotropico, è così definito [5]

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11} - p_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11} - p_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p_{11} - p_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

	$p_{11}$	$p_{12}$	$n_{eff}$	$\nu$	$P_e$
GUEMES [5]	0.113	0.252	1.45	0.16	0.21
LEE [10]	0.121	0.271	1.45	0.17	0.22

Tabella 2.1: Parametri optoelastici tipici

combinando le equazioni 2.3, 2.4, 2.5 ed utilizzando i coefficienti proposti, è possibile scrivere il legame foto-termo elastico nel modo seguente:

- costante foto-elastica:  $P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} \cdot [p_{12} - (p_{11} + p_{12}) \cdot \nu]$
- coefficiente termo-elastico:  $\gamma = \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{dn}{dT}$

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b[(1 - P_e)\epsilon_z^m + (\alpha + \gamma)\Delta T] \quad (2.8)$$

per sensori in silicio, valori comuni di  $\nu$ ,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $P_e$ , riportati in letteratura, sono indicate in tabella 2.1

L'equazione 2.8 mostra esplicitamente gli effetti dei contributi di temperatura e deformazione meccanica sulla variazione di  $\lambda_b$ , la relazione può essere riscritta in maniera più intuitiva e facilmente gestibile nel modo seguente

$$\Delta\lambda_b = K_\epsilon \cdot \epsilon_z^m + K_t \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

I coefficienti  $K$  vengono determinati sperimentalmente per ogni sensore, rendendo l'equazione 2.9 molto più pratica rispetto alla determinazione corretta di tutti i coefficienti in 2.8.

Il disaccoppiamento termo-elastico si ottiene risolvendo il sistema 2.10 nelle incognite  $\epsilon_z^m$ ,  $\Delta T$ , ricordando la necessità di inversione della matrice e le implicazioni numeriche che ne derivano.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{b1} \\ \Delta\lambda_{b2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon1} & K_{t1} \\ K_{\epsilon2} & K_{t2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_z^m \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Un tecnica utilizzata risulta quella di isolare un sensore in modo che risenti esclusivamente dell'effetto termico, annullando una delle due  $K_\epsilon$ .

### 2.2.3 Tipologie di sensori FBG

Lo sviluppo delle tecnologie produttive ha permesso la realizzazione di differenti sensori FBG, modificando il passo o la riflettività durante l'incisione del sensore. Una distinzione può essere ottenuta analizzando il disegno dei reticoli fotoincisi nel *core*, suddividendo i sensori in quattro categorie principali:

1. FBG a reticolo uniforme
2. FBG chirped
3. FBG tilted
4. Array DTG

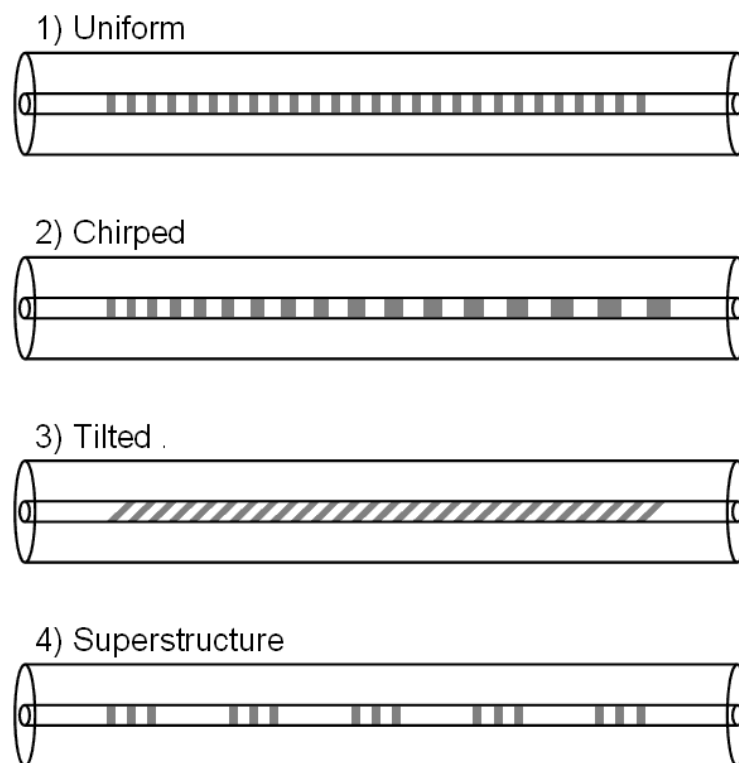


Figura 2.11: Tipologie di reticoli

### 2.2.3.1 Reticoli uniformi

La tipologia di reticolo uniforme è la più usata per le comuni applicazioni sensoristiche. Lo schema realizzativo risulta semplice con frange equidistanziate tra loro di un passo costante  $\Lambda$ . Lo spettro di riflessione ottenuto, come già discusso in precedenza, risulta essere un picco centrato attorno alla  $\lambda_b$  prefissata, con ampiezza tanto minore quanto più lunga risulta la zona sensibile (foto incisione).

Attraverso la seguente categoria di sensori, la tecnica di monitoraggio di più rapida implementazione risulta il *tracking* del picco, ossia l'inseguimento nel tempo dello spostamento della  $\lambda_b$  e la successiva estrapolazione della deformazione conoscendo i valori delle costanti  $K$ .

Con il metodo descritto si approssima la deformazione lungo il sensore come deformazione media sulla lunghezza  $L$  del reticolo, ottenendo un valore puntuale mediato. Tipicamente la lunghezza del singolo reticolo risulta compresa tra 3 e 10 mm.

Il vantaggio di tale soluzione risulterà la semplicità di interpretazione dello spettro riflesso e la possibilità di monitoraggio in real time.

La necessità di sentire non solo il valore medio ma anche l'andamento della deformazione lungo il reticolo ha portato allo sviluppo di una seconda tipologia di reticolo a passo non costante.

### 2.2.3.2 Reticolo chirped

I reticoli chirped sono sensori aventi una spaziatura tra i piani di riflessione non costante,  $\frac{d\Lambda}{dz} \neq 0$ . Per tale tipologia le lunghezze delle zone sensibili (reticolo) sono superiori rispetto a reticoli uniformi, ma con valori massimi limitati dalle tecnologie di produzione a 50-60 mm.

A causa della diversa spaziatura il reticolo non rifletterà più una singola lunghezza d'onda ma bensì un involuppo di picchi, la forma d'onda avrà la forma riportata in figura 2.12.

Con questa tecnica si ha una biunivocità tra la deformazione su un punto preciso del sensore

ed una variazione di riflettività associata ad una precisa lunghezza d'onda.

Risulta possibile ottenere l'informazione di deformazione puntuale ma altresì informazioni riguardanti la variazione di deformazione sulla lunghezza del sensore.

Con un reticolo chirped non risulta possibile la tecnica del tracking dei picchi, ma sarà necessario confrontare gli spettri di riflessione della configurazione indeformata e deformata, estrapolando indirettamente l'informazione di deformazione, si perde la possibilità di monitoraggio in tempo reale.

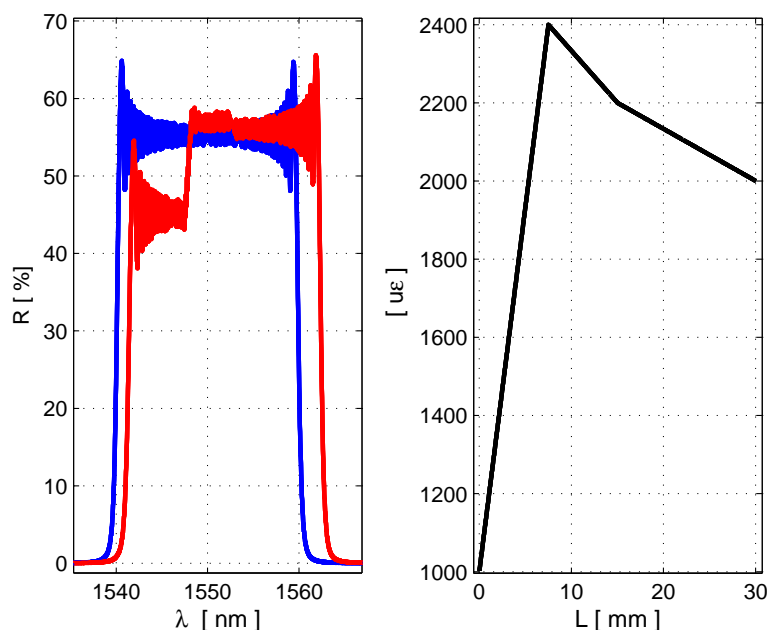


Figura 2.12: Risposta spettrale di un reticolo chirped sottoposto ad una deformazione nota, in blu il profilo indeformato.

### 2.2.3.3 *Reticolo tilted*

I reticoli inclinati o tilted, sono una particolare tipologia di sensori i quali causano maggiori riflessioni propaganti nel cladding.

Confrontando il segnale tra core e cladding è possibile scindere le informazioni tra deformazione meccanica e termica, non necessitando più del metodo di disaccoppiamento ed utilizzando un unico sensore.

### 2.2.3.4 *Array DTG*

L'informazione puntuale che un FBG uniforme garantisce non è sempre sufficiente alla determinazione corretta di una deformazione, avendo come limite la risoluzione spaziale del campo di misura.

Per ovviare al problema della risoluzione spaziale è possibile l'utilizzo di reticoli chirped i quali descrivono con continuità la zona di interesse.

Il limite di quest'ultima tecnologia però non permette l'iscrizione nella fibra di reticoli più lunghi di 60mm, nasce la necessità di attuare tecniche di indagine differenti.

Gli array di sensori o superstrutture, sono insiemi di sensori FBG iscritti sulla singola fibra allo scopo di ampliare il campo di misura con la possibilità di descrivere altresì l'andamento

della deformazione lungo una zona d'indagine maggiore.

Le caratteristiche dell'array possono essere impostate variando i parametri dei singoli FBG che compongono la struttura come distanza tra i singoli sensori,  $\lambda_b$  e larghezza del sensore.

Nascono quindi tre possibili configurazioni utilizzabili, studiate attentamente nei precedenti lavori di tesi [3, 4], definite come:

1. Configurazione continua spaziale, discontinua spettrale
2. Configurazione continua spaziale, continua spettrale
3. Configurazione discontinua spaziale, continua spettrale

Gli spettri di riflessione per le tre categorie sono rappresentate in figura 2.13

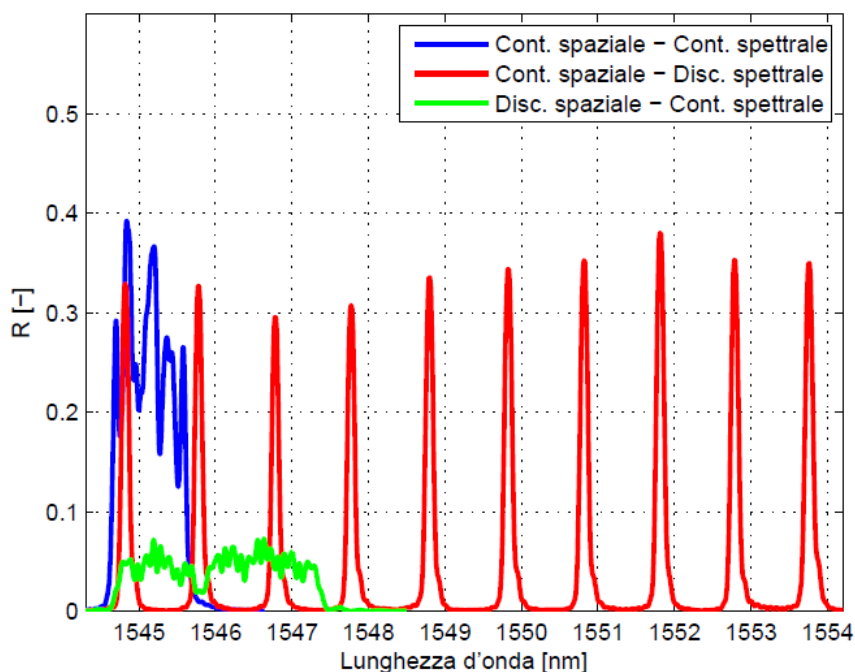


Figura 2.13: Riflettività per le varie configurazioni di array

**Continua spaziale, discontinua spettrale:** La configurazione proposta presenta uno spettro con molteplici picchi separati tra loro di una lunghezza d'onda prefissata tale da mantenere una chiara separazione tra le curve limitrofe. L'analisi della deformazione può essere facilmente condotta sfruttando la tecnica del monitoraggio dei picchi, mentre risulta non precisa la procedura numerica di ricostruzione del profilo di riflettività. Un problema di tale configurazione risulta la larghezza dello spettro risultante, la quale deve garantire una separazione tra picchi adiacenti, rimanendo distinguibili per qualsiasi valore di deformazione prevista; ciò implica che le campane dovranno essere tanto più separate quanto più elevate risulteranno le deformazioni, con limiti sulla finestra di trasmissione nel caso di elevato numero di sensori. Inoltre come descritto nel lavoro [3] risulta difficile ricostruire la deformazione replicando tale tipologia di sensore.

**Configurazione continua spaziale, continua spettrale:** La configurazione continua ha come obiettivo principale la riduzione dello spettro riflesso totale, affiancando tra di loro i picchi separati di una lunghezza d'onda inferiore alla FWHM, generando un profilo continuo. Con la tecnica attuale non risulta più possibile monitorare i picchi (difficilmente distinguibili) perdendo la possibilità di un monitoraggio real time.

Per risolvere il problema inverso e quindi conoscere la deformazione si deve ricorrere a strumenti numerici di simulazione dello spettro come FBGSim, programma di modellazione dei reticoli, sviluppato in MatLAB<sup>®</sup>, presso il dipartimento ed oggetto di passati studi. Dalle esperienze pregresse si riscontra la difficoltà nella ricostruzione ed interpretazione del segnale generato da un sensore come quello in esame (spettro blu in figura 2.13) a causa dello spettro troppo compatto il quale può causare errori all'algoritmo di interpretazione del segnale (FBGSim), viene meno la biunivocità tra spettro e deformazione.

Purtroppo la forma compatta dello spettro è implicita nella continuità del sensore, il quale per coprire una lunghezza  $L$  significativa, deve presentare dei reticoli, ognuno dei quali con un passo ed una  $\lambda_b$  differente, di lunghezza comprese tra 8-10mm, con la conseguenza di una serie di segnali aventi dispersione limitatissima attorno al picco (figura 2.8) che generano uno spettro molto compatto.

**Configurazione discontinua spaziale, continuità spettrale:** La possibile terza configurazione di array risulta essere la soluzione con sensori FBG distanziati tra loro ma con lunghezze d'onda riflesse dai singoli sensori ravvicinate, formando così uno spettro continuo. Per evitare le problematiche appena descritte di uno spettro troppo compatto, la soluzione adottata consiste in FBG di lunghezza pari a 3 mm. Tale soluzione genera spettri riflessi con 'campane più larghe', ciò permette FWHM maggiori ma riflettività minori rispetto alla configurazione doppio continua. Lo spettro risulta meglio interpretabile dal programma FBGSim, ora in grado di descrivere la deformazione in maniera precisa.

Con tale tecnica risulta impossibile il monitoraggio real time della struttura, ma è possibile apprezzare l'andamento della deformazione lungo la zona sensibile (100-200 mm) ricostruita tramite l'interpolazione della deformazione tra i vari FBG, non più contini spazialmente.

Per tutte le configurazioni descritte, in cui esiste la necessità di rielaborazione tramite FBGSim, si incorre al problema della mancanza di biunivocità qualora i picchi, non adeguatamente separati, dovessero sovrapporsi ed incrociarsi. Il problema risulta eliminabile attraverso una progettazione adeguata che tenga conto della differenza tra spettro indeformato e deformato in funzione delle deformazioni attese.

Alla luce dei risultati degli studi [3, 4] riassunti in precedenza, si è deciso di utilizzare array di sensori nella configurazione continua spettrale discontinua spaziale, grazie alla maggior affidabilità nella ricostruzione e gestione dei segnali.



### 2.2.4 Tecnologie di produzione

Nel paragrafo seguente si illustreranno brevemente le tecnologie maggiormente utilizzate per la produzione e l'iscrizione dei reticoli di Bragg nelle fibre ottiche.

La prima tecnica di iscrizione venne sperimentata nel 1978 dal team del Dott.Hill, il quale iscrisse un reticolo FBG irradiando una fibra fotosensibile con frange luminose proveniente da laser. La base per le attuali tecnologie di produzione fu attuata per la prima volta nel 1989 quando G.Meltz, nell'articolo *'Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method'*, illustrò l'iscrizione di reticoli grazie all'esposizione del core a raggi UV, sfruttando l'interferenza tra due cammini dello stesso raggio UV (olografia) focalizzati nella zona di iscrizione. Dalla figura 2.14 è facile intuire come le frange, sovrapponendosi tra loro,

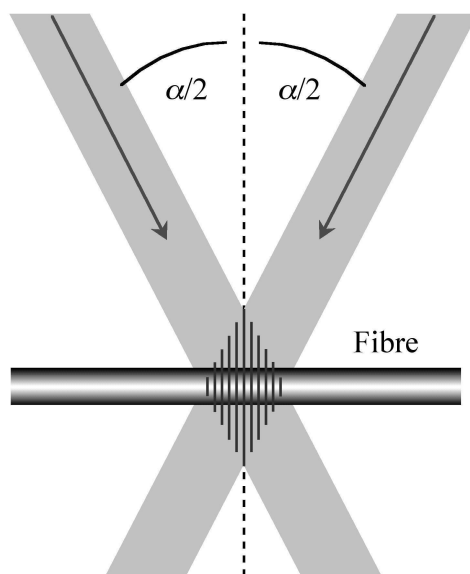


Figura 2.14: Iscrizione di FBG mediante *transverse holographic method*

generino fotoincisioni equamente spaziate. Per il calcolo approssimato del periodo tra le frange del reticolo viene proposta la relazione seguente:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (2.11)$$

La focalizzazione dei fasci UV e l'incisione dei reticoli lungo il core della fibra, viene principalmente sviluppata attraverso due tecniche

- beamsplitter interferometer
- phase mask interferometer

La tecnica *beamsplitter interferometer*, figura 2.15 (a), consiste nel dividere in due frange il fascio UV, le due frange sono poi convogliate sulla zona da fotoincidere mediante la riflessione con specchi. Il controllo del passo viene ottenuto variando l'angolazione degli specchi.

Durante l'iscrizione risulta fondamentale il controllo della camera ambientale inoltre nasce la necessità di regolare i due cammini così da avere sempre la condizione migliore di interferometria, aggiungendo un piatto compensatore, in uno dei due cammini si ottiene tale controllo.

Un progresso nella tecnologia di fotoincisione è stata ottenuta sostituendo lo splitter del fascio con una maschera. La maschera è un elemento ottenuto per stereolitografia od etching,

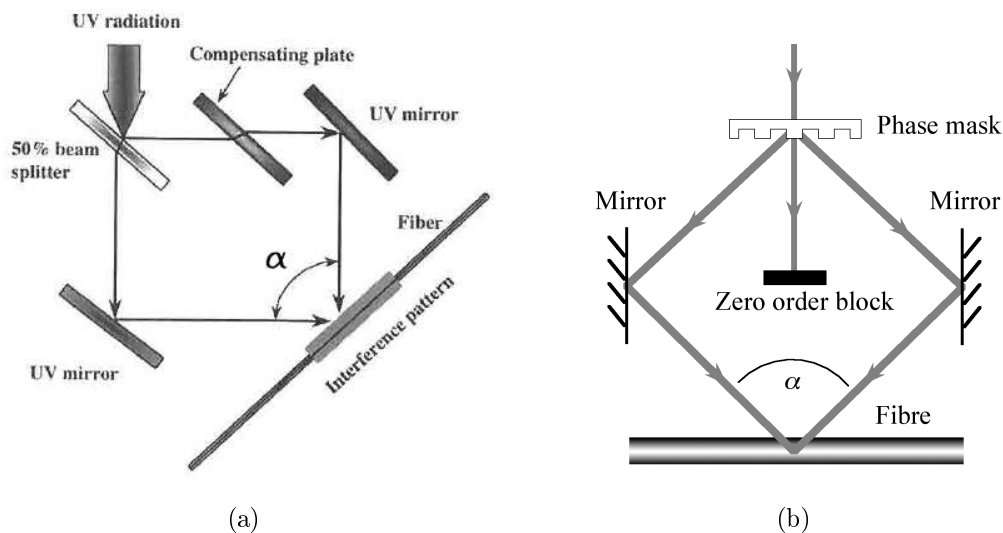
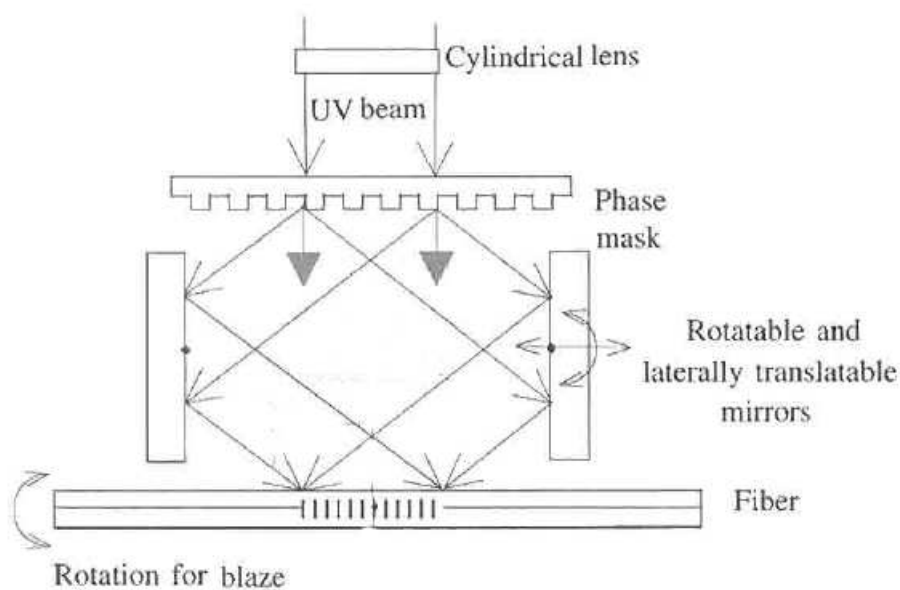


Figura 2.15: Tecnologie di fotoincisione

costituita da valli e creste opportunamente modellate per dividere il fascio UV in più modi di trasmissione. Le lenti laterali sono necessarie per la focalizzazione dei fasci e la loro variazione

Figura 2.16: Iscrizione di FBG mediante *phase mask*

di posizione od angolo  $\alpha/2$  genererà una variazione tra i fasci con conseguente variazione di distanza tra le frange dell'FBG.

Per la corretta esecuzione della tecnica è necessario realizzare la maschera in modo tale da garantire la soppressione del modo  $m = 0$  (zero order block) poiché non garantisce l'interferenza. Fino ad ora si è discusso dell'iscrizione del sensore nel core, la tecnologia viene implementata nel processo di produzione della fibra ottica. Le tecnologie attuali permettono di iscrivere il sensore prima del processo di deposizione del *coating*, evitando l'operazione di *stripping* e *re-coating*, procedura che causa indebolimento della fibra ed è di elevata criticità nel caso di array di sensori iscritti sulla singola fibra.

Il processo di produzione con cui sono stati prodotti i sensori utilizzati nel lavoro descritto, implementato dall'azienda FBGS, viene denominato *Draw Tower Grating DTG*<sup>®</sup> ed è descritto nella figura 2.17.

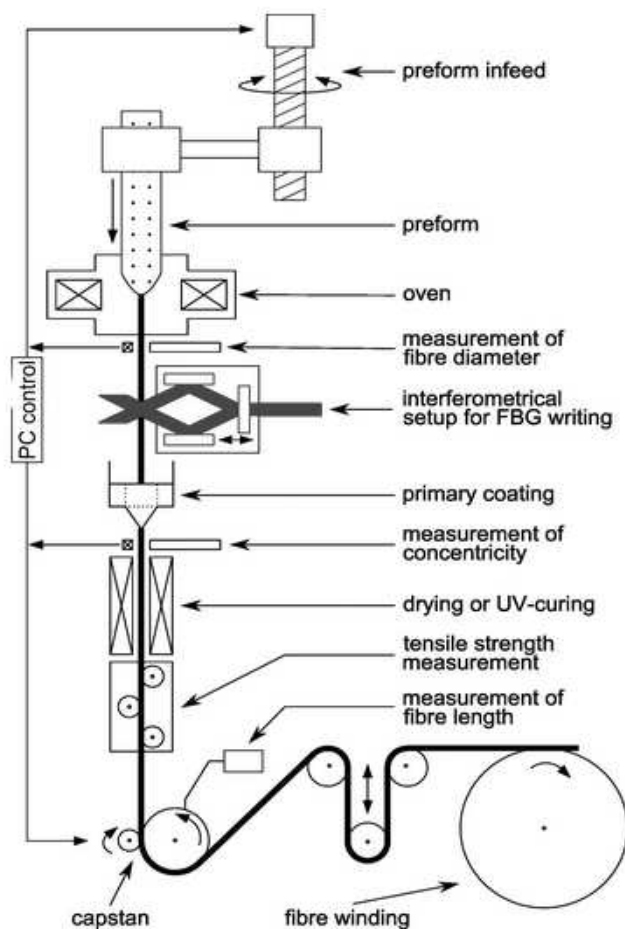


Figura 2.17: Processo di produzione DTG<sup>®</sup>.

La prima operazione del processo è la filata della fibra di vetro su cui viene successivamente inscritto il sensore, l'operazione di ricoprimento, con coating di varia natura, avviene in un secondo momento immergendo il filo in una vasca contenente il materiale, generando un rivestimento uniforme.

I vantaggi della tecnologia DTG sono riconducibili in :

Elevata resistenza meccanica e miglior resistenza a fatica.

Possibilità di iscrizione delle fibre con array di lunghezza elevata.

Costi ridotti in caso di iscrizione di un numero elevato di sensori.

## 2.3 Modellazione matematica

Per assolvere alla funzione di monitoraggio strutturale le informazioni provenienti dai sensori devono essere interpretate. Per descrivere la deformata è possibile correlare la differenza tra i picchi dei sensori deformati ed indeformati oppure risalire alle deformazioni paragonando gli spettri.

Per la risoluzione del problema di identificazione della deformazione è utile definire i seguenti scenari:

- *Problema diretto*: Il problema diretto consiste nell'identificazione dello spettro risultante generato da una deformazione nota lungo il sensore.
- *Problema inverso*: Viene definito problema inverso la ricostruzione della deformazione, lungo la zona sensibile, conoscendo la forma d'onda del reticolo in configurazione deformata ed indeformata.

Il problema del monitoraggio strutturale può essere risolto attraverso il problema inverso cercando di comprendere una variazione di deformazione, imputabile ad un danno, attraverso lo studio della forma d'onda. Il problema in esame necessita di uno strumento di modellazione matematica del sensore che descriva lo spettro riflesso e rifratto conoscendo le caratteristiche dell'FBG installato; la teoria alla base della modellazione viene definita *Coupled mode theory* ed è la base di tutti gli strumenti numerici utilizzati durante il presente lavoro di tesi.

### 2.3.1 Coupled mode theory

La CMT è uno strumento matematico per la descrizione delle onde elettromagnetiche propaganti in un mezzo ottico. Essa deriva direttamente dalle equazioni di Maxwell, le quali per un mezzo ottico assumono le seguenti espressioni :

$$\begin{aligned}\nabla \times E(r, t) &= -\frac{\partial B(r, t)}{\partial t} \\ \nabla \times H(r, t) &= J(r, t) + \frac{\partial D(r, t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot D(r, t) &= \rho(r, t) \\ \nabla \cdot B(r, t) &= 0\end{aligned}$$

dove si sono indicate le grandezze

E campo elettrico

B campo magnetico

D densità di flusso elettrico

H densità di flusso magnetico

J densità di corrente

$\rho$  carica elettrica

i flussi elettrici e magnetici sono descritti a loro volta dalle relazioni

$$\begin{aligned} D(r, t) &= \epsilon_0 E(r, t) + P(r, t) \\ B(r, t) &= \mu_0 H(r, t) + \mu_0 M(r, t) \end{aligned}$$

dove P ed M sono le polarizzazioni elettriche e magnetiche.

Nello specifico di un mezzo ottico le equazioni di Maxwell possono essere semplificate, essendo un mezzo non conduttore di corrente, considerando nulli i termini J, M e  $\rho$ .

Nella descrizione del campo elettrico è fondamentale la polarizzazione P lungo il mezzo ottico, tale grandezza subisce dei cambiamenti ogni volta che l'onda elettromagnetica incontra discontinuità, che per un sensore FBG risultano le differenze di indice di rifrazione tra piani di riflessione. Si rimanda a [9] per una descrizione dettagliata del fenomeno e derivazione completa delle equazioni per reticoli di Bragg, a partire dalle equazioni di Maxwell.

Si può pensare alla descrizione approssimata del campo elettrico agente nella fibra come una sovrapposizione di modi, ottenuta dalla risoluzione del sistema di equazioni differenziali. La descrizione del campo viene ottenuta dalla sovrapposizione dei modi

$$E(x, y, z, t) = \sum_j [A_j(z)e^{i\beta_j z} + B_j(z)e^{-i\beta_j z}] \cdot e_r(x, y)e^{-i\omega t} \quad (2.12)$$

Le fibre utilizzate nell'attività di prova sono, come già discusso, monomodali ( $j = 1$ ). I modi sono quindi due, uno in trasmissione (+z) ed uno in riflessione (-z), ciò permette di descrivere il campo con solo due modi, dove  $e_r$  è la descrizione del modo nel piano perpendicolare all'asse della fibra. Le ampiezze A e B sono calcolabili dalle equazioni seguenti:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + ikS(z) \\ \frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - ik^*R(z) \end{cases} \quad (2.13)$$

$$R(z) = A(z) \cdot e^{i\delta z - \varphi/2} \quad S(z) = B(z) \cdot e^{-i\delta z + \varphi/2} \quad (2.14)$$

Oltre ai coefficienti A, B, R, S, nelle equazioni 2.14 2.13 compaiono termini fondamentali per la corretta descrizione del reticolo che verranno descritti di seguito.

Il coefficiente di autoaccoppiamento  $\sigma$  viene definito nel seguente modo

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - 0.5 \frac{d\varphi}{dz} \quad (2.15)$$

lo sfasamento  $\delta$  descritto come

$$\delta = \beta - \beta_B = 2\pi n_{eff} \cdot \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_b} \right) \quad (2.16)$$

il parametro  $\beta$  viene denominato *detuning factor* e sarà meglio specificato in appendice A. Lo sfasamento risulta essenziale per la descrizione della riflessione in quanto il massimo dell'accoppiamento tra i modi si ottiene per  $\delta = 0$ , denominata *phase match condition*, con  $\delta n_{eff}$  variazione dell'indice di rifrazione del core generata da reticoli fotoincisi, mediato sulla lunghezza del singolo sottoreticolo.

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \overline{\delta n_{eff}} \quad (2.17)$$

Rimangono da definire i coefficienti di accoppiamento intermodali  $k$

$$k = k^* = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\nu \delta n_{eff}} \quad (2.18)$$

il termine  $\nu$  viene definito *fattore di vista del reticolo* e può variare tra  $0 < \nu < 1$ .

Analizzando il problema matematico si evince come il sistema 2.14 sia un sistema di equazioni differenziali a coefficienti variabili. Il termine  $\frac{d\varphi}{dz}$  indica l'eventuale chirp del sensore, qualora tale parametro sia nullo ed il reticolo sia approssimabile ad un reticolo uniforme ( $\frac{dk}{dz} = 0$ ) il sistema risulterà a coefficienti costanti ed ammetterà soluzione in forma chiusa.

La riflessione e trasmissione del reticolo FBG per ogni valore di lunghezza d'onda, in funzione di  $z$ , è definito dalle equazioni seguenti:

$$\begin{cases} R(z) = \left[ (\cosh(\sigma z) - \frac{i\delta}{\sigma} \sinh(\sigma z)) \cdot R_0 - \frac{ik}{\sigma} e^{i\varphi} \sinh(\sigma z) \cdot S_0 \right] e^{i\delta z} \\ S(z) = \left[ \frac{ik}{\sigma} e^{-i\varphi} \sinh(\sigma z) \cdot R_0 + (\cosh(\sigma z) + \frac{i\delta}{\sigma} \sinh(\sigma z)) \cdot S_0 \right] e^{-i\delta z} \end{cases} \quad (2.19)$$

dove  $S_0 = S(0)$  ed  $R_0 = R(0)$ .

Per reticolo uniforme è possibile calcolare la soluzione direttamente dalle equazioni 2.19, diversamente nel caso di reticoli chirped, apodizzati od array di sensori in cui i coefficienti variano in funzione di  $z$ , è necessario risolvere le equazioni tramite metodi di approssimazione numerica. I due metodi prevalentemente citati in letteratura sono

- *Thin layer approach*
- *Transfer matrix method*

## 2.4 Transfer matrix method

Il metodo numerico più efficiente per la risoluzione della coupled mode theory, risulta essere il TMM. L'approccio, presentato per la prima volta nel 1987, risulta di facile implementazione e permette di descrivere con buona precisione tipologie di reticoli differenti. La base del metodo è la conoscenza esatta della soluzione di 2.19, approssimando il reticolo in un numero sufficientemente elevato di sottoreticoli a proprietà costanti, risulta possibile risolvere il problema esattamente per ogni singolo sottoreticolo  $\Delta z$ , ricostruendo poi la soluzione completa.

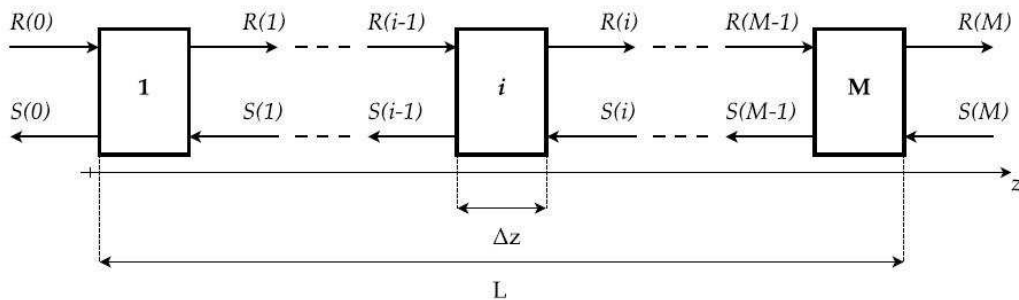


Figura 2.18: Discretizzazione del reticolo nel metodo TMM

Come mostrato in Figura 2.18 per ogni sottoreticolo  $i$  è possibile sfruttare la soluzione in forma chiusa, equazione 2.19, ottenendo per ogni discretizzazione il sistema risolutivo seguente:

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_b \Delta z) - \frac{j\hat{\sigma}}{\gamma_b} \sinh(\gamma_b \Delta z) & -j \frac{k}{\gamma_b} \sinh(\gamma_b \Delta z) \\ j \frac{k}{\gamma_b} \sinh(\gamma_b \Delta z) & \cosh(\gamma_b \Delta z) - \frac{j\hat{\sigma}}{\gamma_b} \sinh(\gamma_b \Delta z) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

con  $\mathbf{F}_i$  si è indicata la matrice di trasferimento che lega le soluzioni di due sottoreticoli adiacenti.

$$\begin{bmatrix} R_i \\ L_i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \cdot \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ L_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Il termine è definito  $\gamma_b = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}$ , per il calcolo della soluzione sulla singola discretizzazione si sono approssimati tutti i termini con i loro valori assunti al centro della suddivisione ( $\Delta z/2$ ).

Combinando tutti i contributi di riflessione e trasmissione provenienti dai sottoreticoli

$$\begin{bmatrix} R_M \\ L_M \end{bmatrix} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1 \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ L_1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{\text{TOT}} \cdot \begin{bmatrix} R_0 \\ L_0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

si ottiene la soluzione completa del problema, da cui ricavare la trasmissione e riflessione nel modo seguente.

$$t(\lambda) = \frac{A_M e^{-i\beta \Delta z}}{A_0} = \frac{R_M}{R_0} = \frac{1}{F_{11}} \quad (2.23)$$

$$r(\lambda) = \frac{B_0}{A_0} = \frac{S_0}{R_0} = \frac{F_{21}}{F_{11}} \quad (2.24)$$

La procedura TMM necessita di essere eseguita per tutte le lunghezze d'onda d'interesse così da descrivere trasmissione e riflessione sulla finestra di lunghezze d'onda necessarie. È importante notare come i valori  $r(\lambda), t(\lambda)$  rappresentino la percentuale tra il segnale in ingresso all'inizio del reticolo,  $R_0$ , ed i rispettivi segnali riflessi e trasmessi ( $0 < (r, t) < 1$ ).

L'algoritmo implementato in FBGSim, sviluppato in lavori di tesi precedente [3, 4], si basa sulla risoluzione della CMT attraverso il metodo TMM, utilizzato come base per la determinazione delle deformazioni agenti sulla struttura.





# Capitolo 3

## Problema Inverso

Nel monitoraggio strutturale lo scopo principale è la determinazione del campo di deformazione presente nel componente monitorato. Gli output dei sensori sono grandezze fisiche, i quali devono essere convertiti in deformazione mediante opportune trasformazioni.

Il *Problema Inverso* consiste nell'identificare il campo di deformazione agente sul sensore, avendo a disposizione l'informazione del solo spettro di riflessione.

I sensori ottici rispondono ad una sollecitazione attraverso la modifica del proprio spettro di riflessione (variazione di  $\lambda_b$ ), lo scopo principale è la trasduzione di tale spettro in deformazioni. La necessità di ottenere un metodo numerico per la determinazione della deformazione agente sulla zona sensibile nasce dall'impossibilità di risolvere in forma chiusa le equazioni 2.19, ma come descritto nel paragrafo 2.4 sono necessari metodi di approssimazione numerica (TMM, CMT) per la risoluzione delle equazioni, detto *Problema Diretto*.

Nel capitolo seguente si analizzerà il codice , scritto in linguaggio MATLAB, per la conversione dello spettro d'onda, generato dagli array di sensori, in deformazione applicata. La validità del codice è stata verificata esclusivamente per la tipologia di array in configurazione continua spettrale discontinua spaziale. Tale esclusività nasce da esigenze tecniche poiché i sensori inglobati nell'attrezzatura di prova appartengono a tale categoria, si è quindi deciso di sviluppare e verificare la procedura solamente per il caso in esame.

La logica alla base del codice è una evoluzione dei lavori precedentemente effettuati presso il DIA [3, 4], mantenendo invariato il cuore del sistema, ossia il TMM discusso in precedenza, ed agendo sulla modifica e sostituzione dei precedenti algoritmi di ottimizzazione.

### 3.1 Attività precedenti

In questa sezione verranno riassunti brevemente i lavori, sviluppati in passato, per la corretta risoluzione del problema inverso.

Il diagramma 3.1 mostra il flusso logico delle azioni che vanno intraprese al fine di ottenere la deformazione finale.

I blocchi di maggior importanza sono due:

- Identificazione profilo apodizzazione
- Algoritmo di ottimizzazione

L'identificazione del profilo di apodizzazione è effettuato andando a variare l'indice di rifrazione del core  $\overline{\delta n_{eff}}$  in funzione della posizione dei punti sul sensore ed ottimizzando tale profilo

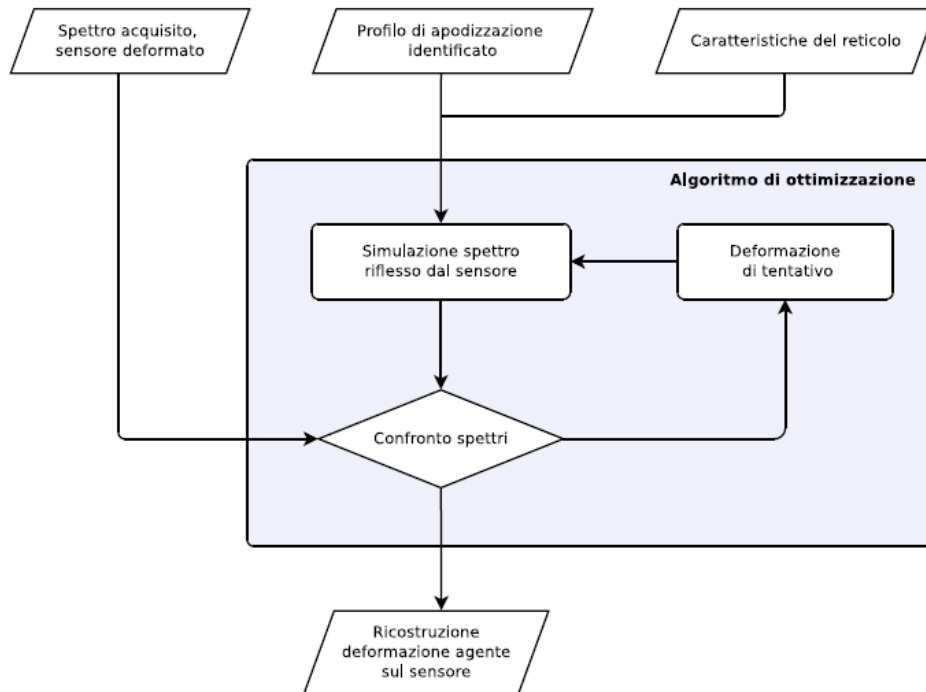


Figura 3.1: Diagramma di flusso del software di identificazione deformazione (Sala [3])

attraverso la comparazione dello spettro indeformato, rilevato sperimentalmente e ricostruito numericamente. La figura 3.2 mostra lo schema logico alla base dell'identificazione.

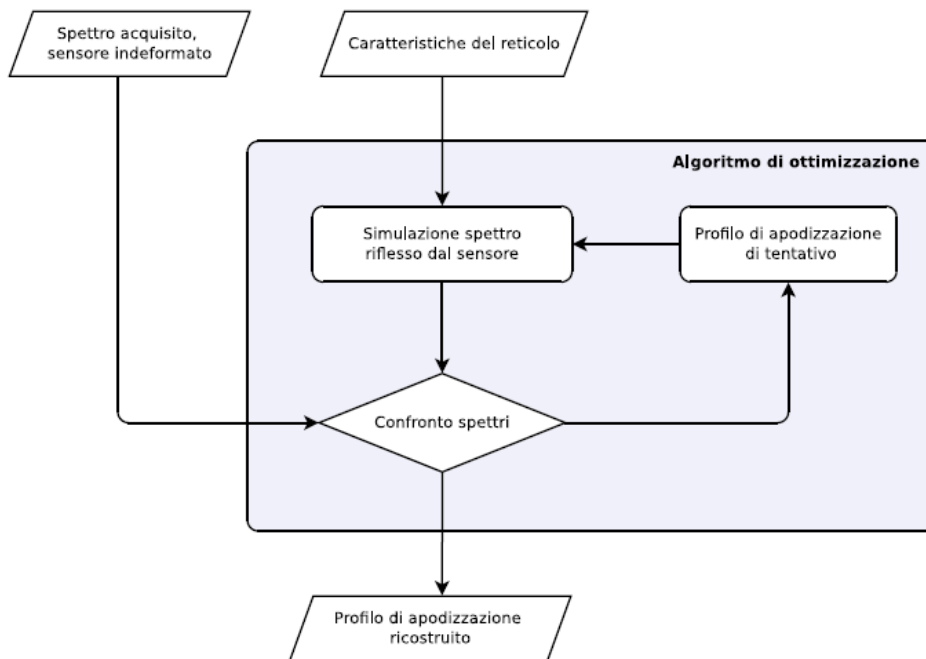


Figura 3.2: Diagramma di flusso del software di apodizzazione (Sala [3])

### 3.1.1 Processi di ottimizzazione

Il blocco denominato *algoritmo di ottimizzazione* è l'elemento principale per la corretta identificazione della deformazione. La logica alla base del processo richiede il paragone tra lo spettro d'onda rilevato sperimentalmente e lo spettro d'onda generato dal calcolatore conoscendo tutti i dati descrittivi il reticolo.

Dal confronto tra le due forme spettrali si calcola l'errore

$$f(\mathbf{r}, h, \lambda) = W_r \cdot \frac{\|\mathbf{r}_{ref} - \mathbf{r}_{sim}\|}{\|\mathbf{r}_{ref}\|} + W_{\lambda_b} \cdot \frac{|\lambda_{b_{ref}} - \lambda_{b_{sim}}|}{\lambda_{b_{ref}}} + W_h \cdot \frac{|h_{ref} - h_{sim}|}{h_{ref}} \quad (3.1)$$

dove i termini rappresentano rispettivamente

$\mathbf{r}$  vettore contenete le riflettività per i punti dallo spettro da paragonare

$\lambda_b$  lunghezza d'onda di Bragg

$h$  primo ed ultimo punto (estremi) della forma d'onda corrispondenti al superamento di un determinato valore di riflettività, solitamente la Full Width Half Maximum (FWHM)

$W$  pesi della misura di errore

L'errore definito in equazione 3.1 assume il termine di *Funzione costo* nel momento in cui verrà inserita all'interno del processo di ottimizzazione.

Lo scopo dell'algoritmo è quello di trovare la deformazione corretta, variando il valore di  $\epsilon$  in corrispondenza di determinati punti di controllo, minimizzando il valore della funzione costo.

I punti di controllo sono le variabili del problema di ottimizzazione, e rappresentano la deformazione di ben determinati punti del sensore. Variando i rispettivi valori ed interpolando tra essi si ottengono i profili di deformazione voluti.

Per ottenere la migliore soluzione al problema di ottimizzazione, sono state studiate diverse tecniche come *Algoritmo genetico*, *Pattern search*, *Metodo euristico*.

**Algoritmo genetico AG:** Il presente metodo di ottimizzazione, prende spunto dall'evoluzione biologica, consiste nel mutare e combinare possibili coppie di soluzioni del problema al fine di generare la soluzione ottima.

In maniera semplicizzata, il metodo genera inizialmente una popolazione (soluzioni di tentativo) casuali. Ogni individuo della popolazione ha un suo patrimonio genetico, formato dai geni che rappresentano i valori dei singoli elementi costituenti il vettore della soluzione, combinando tra di loro più elementi si ottengono nuove soluzioni *figli* i quali sono formati dalla combinazione dei geni dei *genitori*.

I metodi numerici alla base dei fenomeni di *riproduzione* e *mutazione* sono complessi ed esulano dalla presentazione qui fornita, la figura 3.3 aiuta a comprendere il concetto.

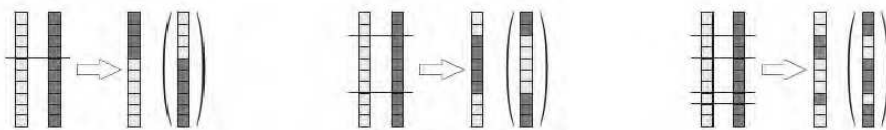


Figura 3.3: Meccanismo base di riproduzione nell'algoritmo genetico

L'algoritmo si arresta nel momento in cui il valore della funzione costo, denominata *fitness* dell'individuo, raggiunge la tolleranza desiderata.

**Pattern search PS:** Il presente algoritmo di ottimizzazione, deterministico, appartiene ai metodi *derivative free* poiché non richiede la conoscenza dell'espressione analitica di derivata per localizzare il minimo della funzione.

Data una funzione  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  il metodo consiste, partendo da una soluzione di primo tentativo, nell'analizzare l'intorno della soluzione alla ricerca di un valore della funzione costo  $f(\mathbf{x}_{k+1})$  migliore rispetto al valore precedente  $f(\mathbf{x}_k)$ . L'algoritmo dilata e restringe l'intorno di ricerca secondo le logiche applicate, procedendo iterativamente fino al raggiungimento del valore ottimo, come mostrato dalla figura 3.4

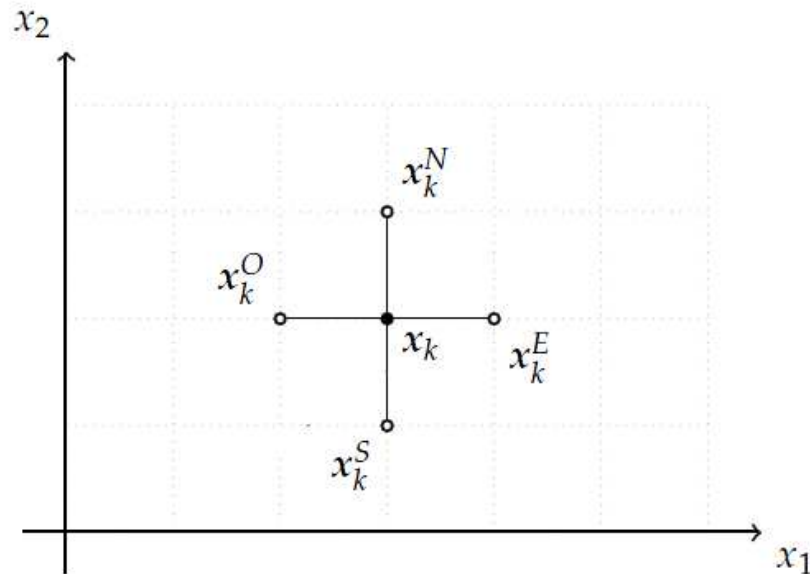


Figura 3.4: Esempio di mossa esplorativa per funzione in due variabili  $x_1, x_2$

**Metodo euristico :** L'algoritmo sviluppato nel lavoro di tesi [4], rappresenta un metodo empirico per la determinazione dell'andamento di deformazione lungo l'array di sensori.

Il metodo presentato si prefiggeva come obiettivo la determinazione di una soluzione, migliore possibile, da utilizzare come soluzione di primo tentativo per l'algoritmo Pattern search.

Dallo studio effettuato nel lavoro [4] è risultato evidente come l'algoritmo implementato fosse in grado di arrivare ad una soluzione accettabile, per molte deformazioni sperimentate, senza passare al successivo ottimizzatore PS, con evidenti vantaggi in termini di tempo computazionale.

L'algoritmo, implementato nel programma MATLAB denominato *FBGStrain*, confronta gli spettri d'onda acquisiti in configurazione deformata ed indeformata; se utilizzato senza l'accoppiamento al PS viene meno la necessità di risolvere il *problema diretto* e la determinazione del profilo di apodizzazione. La logica alla base del metodo, come indicato in figura 3.5, può essere descritta dai seguenti punti

1. Suddivisione dello spettro indeformato in  $n$  parti
2. Divisione dello spettro deformato in  $n$  fette in modo che ogni sottoparte abbia lo stesso valore di area normalizzata, sottesa al tratto di curva considerato
3. Calcolo della lunghezza delle basi per ogni suddivisione dello spettro deformato

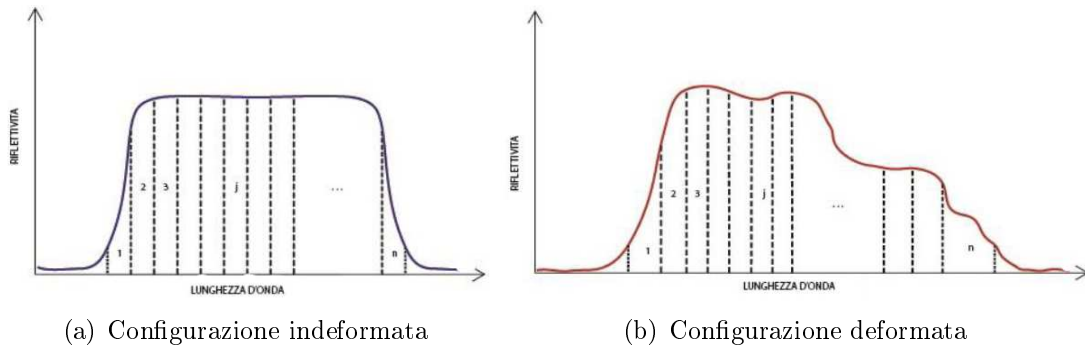


Figura 3.5: Esempio del metodo implementato in FBGStrain, Cuneo [4]

4. Confronto tra le lunghezze delle basi nei due casi  $\Delta\lambda_i$ .
5. Calcolo della deformazione, proporzionale a  $\Delta\lambda_i$ .

L'assunzione alla base del metodo è il mantenimento dell'area sottesa al grafico della riflettività. L'algoritmo segue la deformazione di ogni singola 'fettina' e basandosi sull'idea del tracking dei picchi sviluppa la soluzione della deformazione meccanica applicata, facendo il tracking delle  $n$  basi.

Nella versione più completa dell'algoritmo, la procedura presenta un'ulteriore una comparazione tra differenti gradienti di conversione  $\frac{\epsilon_i}{\Delta\lambda_i}$ , comunemente di valore pari ad  $800 \frac{\mu}{\epsilon}$ , generando per ogni combinazione di deformazione ottenuta un profilo di riflettività (*problema diretto*) e scegliendone il migliore, definito dal minimo valore della funzione costo, analogamente a quanto succede con PS e GA.

Gli studi passati hanno analizzato l'utilizzo di uno o più combinazioni degli algoritmi per la ricerca degli ottimi nel problema inverso, ottenendo buonissime precisioni ma tempi di calcolo elevati, ridotti solamente dall'utilizzo del metodo euristico.

## 3.2 Algoritmo FBGCenter ed apodizzazione

Nella sezione 3.1.1 sono stati brevemente analizzati i precedenti lavori numerici realizzati per la conversione tra spettro d'onda campionato e deformazione agente sui sensori.

Nel lavoro di tesi svolto si è deciso di implementare delle evoluzioni al lavoro fin qui svolto poiché si sono notate delle criticità e possibilità di miglioramento dei codici esistenti.

Le motivazioni che hanno spinto a rielaborare i codici MATLAB sono state le seguenti:

1. Eliminare la necessità di impostare, a priori, dei punti di controllo in posizioni spaziali precise, prendendo ora come riferimento la posizione dei singoli sensori componenti l'array
2. Eliminare la scelta del tipo di interpolazione da eseguire tra i valori di deformazione corrispondenti ai punti di controllo
3. Diminuzione dei tempi di calcolo, così da ottenere una tecnica di identificazione che possa agire quasi real-time
4. Evidenti problemi di convergenza alla soluzione corretta del metodo PS, per un numero elevato di punti di controllo
5. Miglioramento nell'approssimazione dei profili di deformazione complessi

I punti 1,2 costringono l'operatore ad impostare dei parametri che influenzeranno la forma del profili di deformazione. Tale scelta genera profili molto precisi qualora si conosca già la forma della deformata finale, ad esempio con 3 p.c è possibile approssimare un andamento parabolico od a cuspidi, ma perde di validità se non si hanno informazioni preliminari.

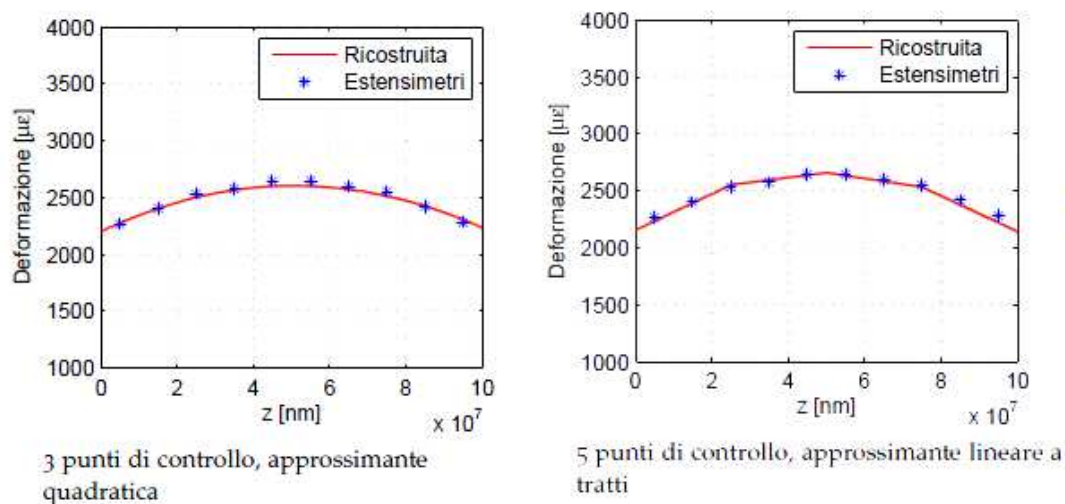


Figura 3.6: Esempio di ricostruzione con differenti punti di controllo e diverso profilo interpolante

Le figure 3.6 mostrano due profili simili ma non uguali, ottenuti dallo stesso spettro d'onda, variando il numero di punti di controllo e l'interpolazione.

Risulta intuibile come un sistema di monitoraggio non possa dipendere dalla conoscenza esatta della deformazione attesa (altrimenti sarebbe inutile). Inoltre per approssimare al meglio un profilo, attraverso polinomi di basso ordine (lineare, quadratica) è necessario aumentare il numero di punti di controllo.

Per deformazioni complesse valgono le medesime considerazioni fatte in precedenza inoltre all'aumentare delle discontinuità sul profilo di deformazione saranno necessari un numero maggiore di punti.

Ad ogni p.c. è abbinato un valore di deformazione, i quali sono le variabili di ottimizzazione utilizzate dagli algoritmi PS e GA per calcolare la soluzione ottima. Maggiore il numero delle variabili e maggiori saranno i tempi di calcolo, un'ulteriore problema legato all'aumento del numero di p.c. risulta essere la difficoltà nel convergere al minimo globale della funzione costo, come discusso in [3].

Alla luce delle considerazioni riportate, la procedura sviluppata si pone l'obiettivo di poter ricostruire, con buona precisione, deformazioni anche complesse limitando il tempo di calcolo. Ulteriore obiettivo è il miglioramento della procedura di determinazione dei profili di apodizzazione per array di sensori.

### 3.2.1 Ricostruzione dello spettro iniziale, apodizzazione

Con profilo di apodizzazione si intende l'andamento della variazione di indice di rifrazione, causata dall'esposizione agli UV, in funzione della posizione nella zona sensibile.

L'identificazione di  $\overline{\delta n_{eff}}$  è il primo e fondamentale passo per la corretta ricostruzione numerica dello spettro d'onda riflesso dai sensori.

Questa operazione è necessaria poiché lo spettro acquisito e quello ricostruito sperimentalmente non sono mai coincidenti. Tale discrepanza può portare ad un errato calcolo dell'area sottesa al grafico, introducendo un errore nell'algoritmo di determinazione della deformazione, come si vedrà nella sezione 3.2.2.

Alla base del metodo risiede l'ipotesi che ogni scostamento di ampiezza tra i due spettri sia imputabile a difetti di iscrizione degli FBG, quindi la differenza rimanga invariata anche nel caso si applichi una deformazione al sensore, essendo legato alla posizione del sottoreticolo; contrariamente un errore fisso, ad una determinata lunghezza d'onda  $\lambda$ , potrà generare discrepanza nella ricostruzione del profilo deformato poiché tale errore può presentarsi solamente in uno dei due spettri confrontati.

Il metodo è basato sul confronto tra gli spettri acquisito e ricostruito, in configurazione *indeformata*, generando un fattore di correzione  $\Delta\overline{\delta n_{eff}}$  che permetta di ricostruire uno spettro di riflessione il quale approssimi al meglio il profilo realmente campionato.

Come mostrato dallo schema a blocchi 3.7 il software esegue una comparazione (nodo *c*) tra i due spettri d'onda, generando un vettore di errore  $\mathbf{e}$  il quale agirà attraverso una matrice di controllo  $\mathbf{K}$  fornendo la correzione al termine  $\overline{\delta n_{eff}}$ . Il ciclo di ottimizzazione si arresta al verificarsi della condizione di arresto sulla tolleranza.

Di seguito, si analizzeranno nello specifico i principali blocchi.

**Dati :** I dati forniti al programma devono contenere tutte le informazioni per la corretta ricostruzione dello spettro, attraverso il codice MATLAB «FBGSolutore[3]».

Un parametro che si è mostrato notevolmente importante e sensibile è risultato essere il passo dei piani di riflessione  $\Lambda$  di ogni sottoreticolo (FBG) poiché tali valori governano le lunghezze di Bragg. E' assolutamente necessario, per la corretta convergenza della procedura di apodizzazione, la taratura dei valori  $\Lambda_1$  e  $\Lambda_{end}$  da effettuare 'manualmente'. L'ottimo si otterrà quando lo spettro generato numericamente, attraverso «FBGSim Solutore», presenterà le rampe di inizio e fine spettro coincidenti con il profilo di riferimento acquisito (variazioni  $\Lambda$  di 0.005 possono essere significative).

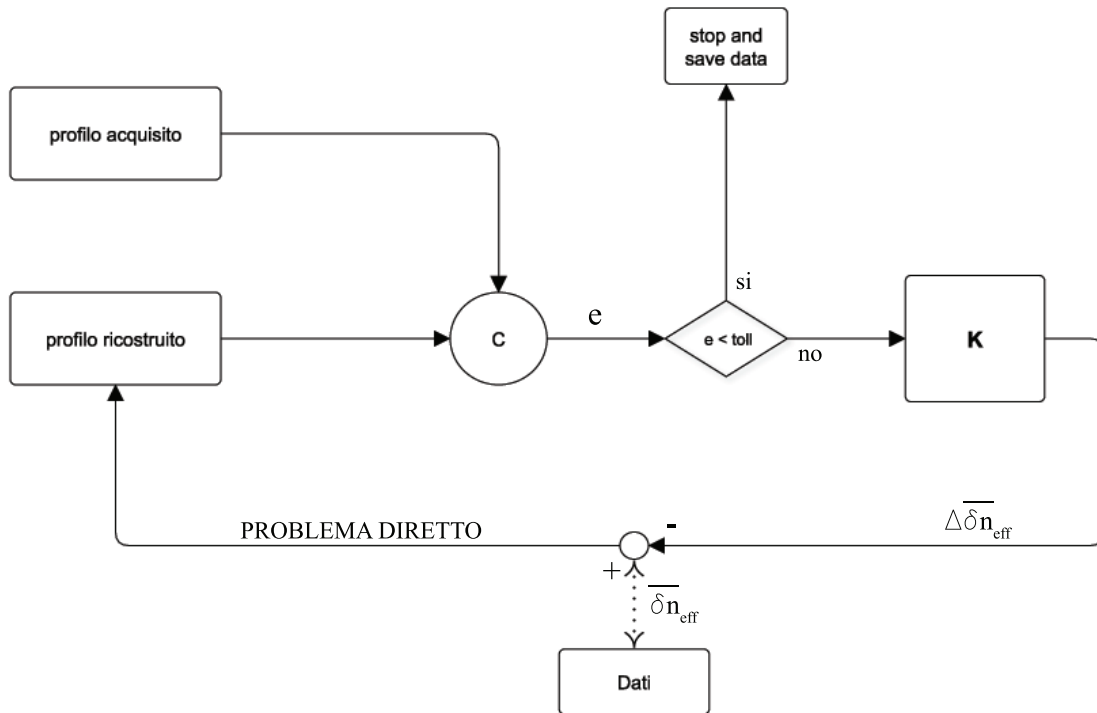


Figura 3.7: Diagramma a blocchi della logica applicata al programma di ricerca del profilo apodizzato

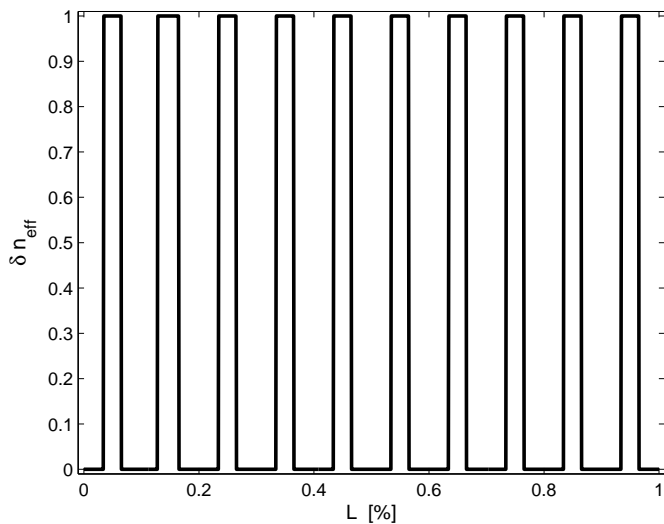


Figura 3.8: Profilo di apodizzazione ideale, 10 FBG array

Come mostrato dalla figura 3.8 il profilo di primo tentativo può essere scelto con valore uno nella zona dei sensori, annullando il valore e quindi il contributo alla riflessione in corrispondenza delle zone non sensibili. Il caso in esempio rappresenta un array di 10 sensori, lunghi 3 mm, di lunghezza totale  $L = 100$  mm; come si nota il valore in ascissa rappresenta la posizione percentuale ( $1 = L_{max}$ ).



**Comparazione ed errore :** Nel metodo descritto, l'errore è un vettore di lunghezza pari al numero di FBG od al massimo il doppio, poiché divisioni maggiori non permettono un'adeguata convergenza del metodo.

Come evidenziato dalla figura 3.9, il primo passo del metodo è la divisione degli spettri in  $k$  sottoparti, ognuna delle quali sarà caratterizzata da un proprio valore di errore calcolato dall'espressione seguente.

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ \dots \\ \dots \\ e_k \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3.2a)$$

$$e_k = \overline{R_{k_{ric}}} - \overline{R_{k_{ref}}} = \overline{\Delta R} \quad (3.2b)$$

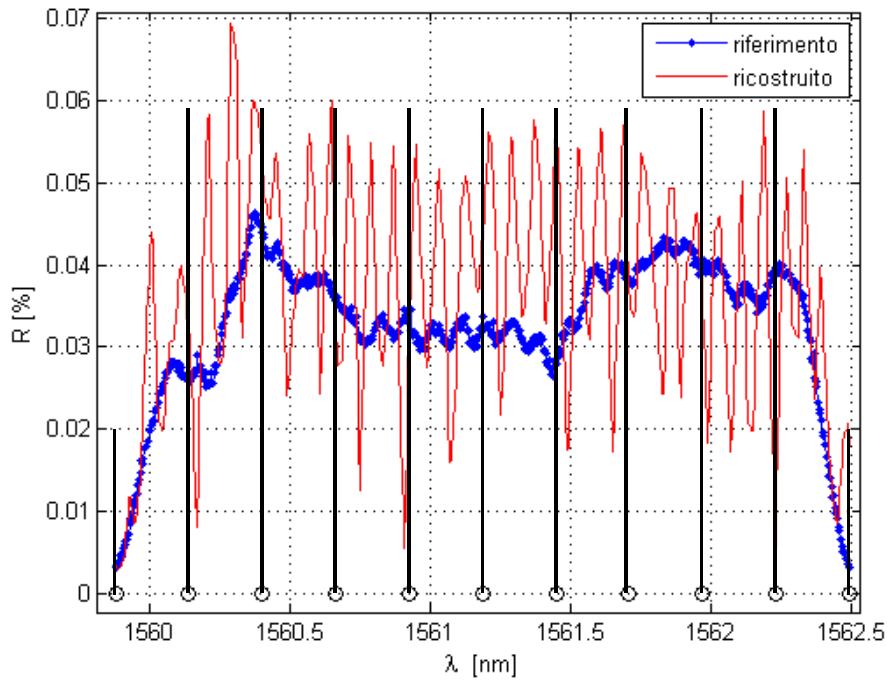


Figura 3.9: Schema di suddivisione degli spettri per la determinazione dell'errore

Il valore del  $k$ -imo errore risulta pari alla media delle differenze tra i valori di riflettività dei due spettri, calcolati nella  $k$ -ima suddivisione. Errori positivi indicheranno un andamento medio del valore di riflettività superiore per il profilo ricostruito rispetto al profilo acquisito.

Il criterio di arresto dell'algoritmo si basa sulla comparazione tra il minimo valore della componente di  $\mathbf{e}$  ed una tolleranza desiderata.

$$\min(|\mathbf{e}|) < toll \quad (3.3)$$

**Matrice di controllo :** Il blocco  $\mathbf{K}$  rappresenta la matrice di controllo, definita così perché molto simile alla tecnica proporzionale usata nel controllo automatico e contiene i coefficienti che permettono la conversione della misura di errore in differenza di indice di rifrazione.

L'assunzione empirica alla base del metodo, valida solo per l'identificazione del profilo di apodizzazione, risulta essere la seguente : ogni FBG dell'array contribuisce in ugual misura alla composizione dello spettro  $R$ , è quindi possibile suddividere la lunghezza d'onda  $\lambda$  in  $k$  parti di uguale ampiezza, come mostrato in figura 3.9. Inoltre in prima approssimazione si può affermare che ogni suddivisione spaziale dell'array (ogni FBG) contribuisca solamente alla variazione della rispettiva porzione di spettro.

La correlazione perfetta tra la  $k$ -ima 'fettina' di spettro ed il  $k$ -imo FBG risulta estremamente difficile, inoltre dalle prime prove si è evinto come le zone ai margini delle suddivisioni fossero sensibili anche alle variazioni  $\overline{\delta n_{eff}}$  dei sensori limitrofi.

Le considerazioni riportate hanno condotto ad una matrice avente tale struttura.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & & & & & \\ \dots & \dots & K_{p2} & & & & \\ & K_{p2} & K_{p1} & \dots & & & \\ & & \dots & \dots & \dots & & \\ & & & \dots & \dots & & \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dall'equazione 3.4 si nota la struttura tridiagonale della matrice, dove i valori  $K_p$  sono i simil-controlli proporzionali, con  $K_{p1} \gg K_{p2}$ . La matrice così composta permette alle variazioni di  $FBG_{k-1}$  e  $FBG_{k+1}$  di avere un peso, minimo, nel calcolo di  $\Delta \overline{\delta n_{effk}}$ .

Concludendo, l'equazione che governa il controllo risulta essere:

$$\Delta \overline{\delta n_{eff}} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{e} \quad (3.5)$$

Valori dei coefficienti che permettono una buona convergenza del metodo in poche iterazioni (5-6), per diversi spettri di riflessione provati, sono risultati essere  $K_{p1} = 15$ ,  $K_{p2} = K_{p1}/5$ .

Ad ogni passo viene calcolato  $\Delta \overline{\delta n_{effk}}$ , si aggiornano i dati e si ricostruisce lo spettro il quale verrà comparato per definire il successivo vettore d'errore  $\mathbf{e}$ .

Al termine della procedura l'algoritmo genera due file .txt denominati 'y pc mat' 'z pc mat', i quali contengono i valori di ampiezza  $\overline{\delta n_{eff}}$  e di posizione relativa dei sensori che compongono l'array.

Questi due file verranno richiamati ogni volta si debbano definire i dati che descrivono il sensore.

### 3.2.2 Determinazione della deformazione, algoritmo FBGCenter

Si descrive ora la procedura per la determinazione del profilo di deformazione.

Il metodo sviluppato prende esempio dal programma FBGStrain descritto in [4], eliminando gli algoritmi PS e GA, al fine di ottenere una procedura veloce e precisa.

L'algoritmo FBGCenter confronta gli spettri acquisiti in configurazione deformata ed indeformata. La procedura di comparazione avviene nella modalità seguente:

1. Campionamento della forma d'onda da analizzare, impostando i valori minimi di soglia di riflettività. Tutti i punti al di sopra di tale valore saranno considerati nei passi successivi.
2. Divisione dei due spettri in  $m$  fettine di uguale area normalizzata  $\hat{A} = \frac{A_m}{A_{tot}}$

3. Calcolo dei baricentri  $P_m$  di ogni singola areola  $\hat{A}_m$ , per entrambe i profili
4. Calcolo della deformazione  $\varepsilon_P$ , paragonando lo spostamento dei baricentri del profilo deformato ed indeformato, come descritto in equazione 2.4

$$\varepsilon_{P_m} = \frac{1}{K_\varepsilon} \cdot \Delta\lambda_P \quad (3.6)$$

5. Ricostruzione numerica dello spettro di riflessione R, in configurazione deformata, secondo il profilo di deformazione  $\varepsilon$
6. Comparazione dello spettro ricostruito numericamente e lo spettro deformato acquisito. Determinazione dell'errore  $E$  tra i due segnali. Calcolo della matrice di correlazione **CO**
7. Correzione del profilo di deformazione  $\varepsilon_{new} = \varepsilon_{old} + \Delta\varepsilon$  e ricomputo dello spettro numerico fino al raggiungimento di una soddisfacente similitudine tra i due spettri
8. Definizione del profilo di deformazione finale, agente sull'array di sensori

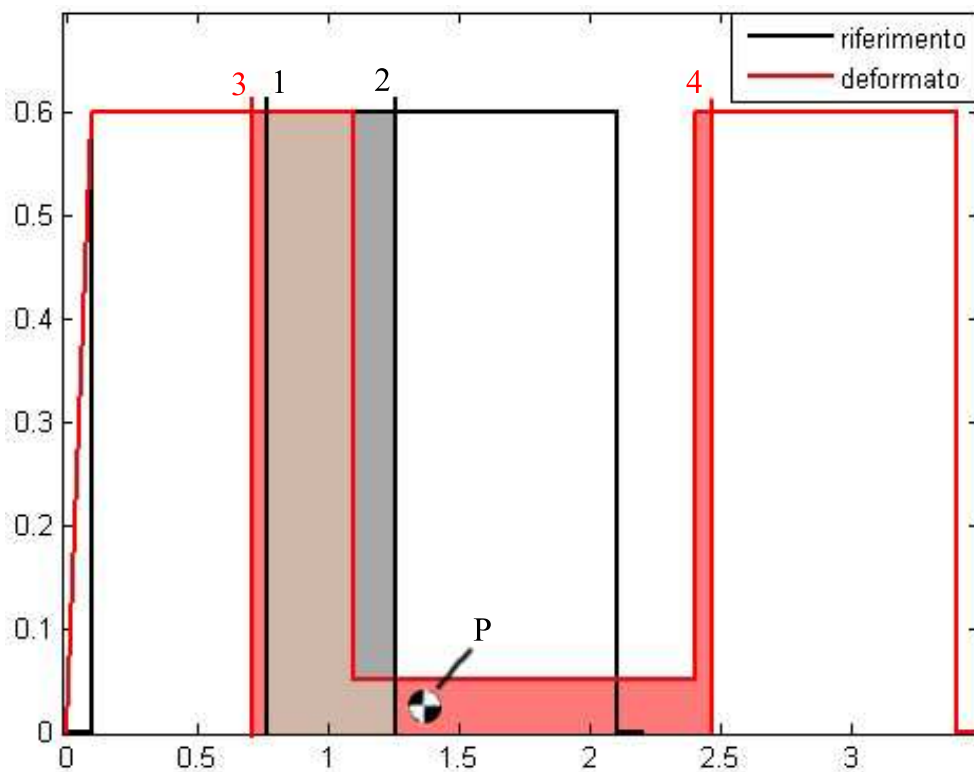


Figura 3.10: Schema di suddivisione dell'area per il calcolo dei baricentri

La principale differenza tra il metodo sviluppato e l'algoritmo euristico, precedentemente presentato, risiede nella procedura di ottimizzazione e calcolo della deformazione.

Il metodo studiato non valuterà più la deformazione proporzionalmente alla differenza di lunghezza della base di ogni singola fettina di spettro, bensì il nuovo metodo è fondato sul calcolo del baricentro di ogni areola, sia nel profilo indeformato che deformato, eseguendo la ricostruzione della deformazione attraverso un tracking dei baricentri  $P$ , in analogia a quanto avviene usualmente per i sensori a reticolo di Bragg.

Il numero  $m$  di suddivisioni dello spettro è pari al numero di sensori FBG presenti nell'array od un suo multiplo. Dalla pratica si evidenzia con un numero eccessivo di suddivisioni non generi un profilo corretto, si consiglia al massimo  $m_{max} = N_{FBG} \cdot 2$ .

Il programma permette di determinare la deformazione in  $m$  punti equispaziati lungo l'intero array.

Sotto l'ipotesi, quasi sempre verificata, di profili di deformazione regolari o con irregolarità rilevabili dalla spaziatura dei sensori, si ricostruisce la curva  $\epsilon = \epsilon(z)$  interpolando i punti attraverso un polinomio spline definito a tratti (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) eseguito dalla funzione Matlab «PCHIP».

Dallo schema 3.10 è possibile osservare due vantaggi del nuovo metodo. Nella figura si schematizzano due sensori (con spettro quadrato per facilità di comprensione) dove lo spettro rosso risulta deformato solo per il secondo tratto, mentre le zone colorate raffigurano le aree  $\hat{A}_m$ . Se per errori numerici il profilo ricostruito presenta un diverso valore d'area (lato sinistro dei grafici) che genera un'area sottesa diversa allora la successiva areola presenterà questo errore. Lo spettro, per come costruito, non deve presentare deformazione, si è assunta l'ipotesi che l'area compresa tra 1-2 si la stessa di 3-4. Invece calcolando la differenza di lunghezza tra le basi si otterrà un valore notevole di deformazione, contrariamente il calcolo del baricentro  $P$  della configurazione deformata, pesando la maggiore area del picco di sinistra, genererà uno scostamento decisamente minore (l'area ideale grigia ha il baricentro prossimo ad 1).

In linea teorica esiste un secondo vantaggio, ricordando l'idea alla base del metodo ossia il tracking dei picchi, risulta erroneo una comparazione delle lunghezze delle basi perché sovrastima la deformazione rispetto al tracking del valore baricentrale della fetta di area.

**Calcolo dell'area  $\hat{A}$  :** Per gli spettri, sia indeformato che deformato, si suddivide il range di lunghezza d'onda corrispondente al sensore in  $m$  parti, calcolando l'integrale del grafico in ogni sotto intervallo  $\hat{A}$ . La procedura scansiona la forma d'onda da sinistra a destra, ricercando progressivamente i valori di area  $\hat{A}_m^{RIC} = \hat{A}_m^{REF}$  ( $k = 1 : m$ ) e calcolando le posizioni dei rispettivi baricentri. I valori di area  $\hat{A}_m$  sono ottenuti dividendo l'area degli spettri in un valore pari alla percentuale di area del corrispondente profilo  $\overline{\delta n_{eff_m}}$ .

Ad esempio, prendendo come riferimento il profilo in figura 3.11, l'area associata alle fette 2 e 3 sarà in percentuale maggiore rispetto alla corrispondente fetta 4. Tale procedura permette di associare una quantità precisa di spettro riflesso ad ogni sensore FBG (o sottoreticolo) riducendo al minimo gli errori di determinazione della posizione del baricentro dovuta ad una scarsa approssimazione della 'fettina' m-ima.

**Errore e criteri di arresto :** Dal confronto tra lo spettro preso come riferimento e lo spettro ricostruito basandosi sulla deformazione calcolata viene determinato l'errore normalizzato  $E$ . La procedura consiste nel paragonare i valori di riflettività  $R = R(\lambda)$  di entrambe le configurazioni, valutando la correlazione tra le due forme. Dalla pregressa conoscenza dei baricentri di ogni singola fetta della configurazione deformata, si divide la lunghezza d'onda d'interesse in  $m$  parti scelte opportunamente in modo da avere ogni baricentro come punto medio dell'intervallo e successivamente viene valutato l'errore in ognuno degli intervalli.

Matematicamente l'errore è espresso dalla seguente formula:

$$E_m = M \left[ \text{abs} \left( \frac{R_m^{RIC}}{M(R_m^{RIC})} - \frac{R_m^{REF}}{M(R_m^{REF})} \right) \right] \quad (3.7)$$

dove si è indicato con  $M$  l'operatore di media, mentre RIC e REF rappresentano lo spettro ricostruito e di riferimento.

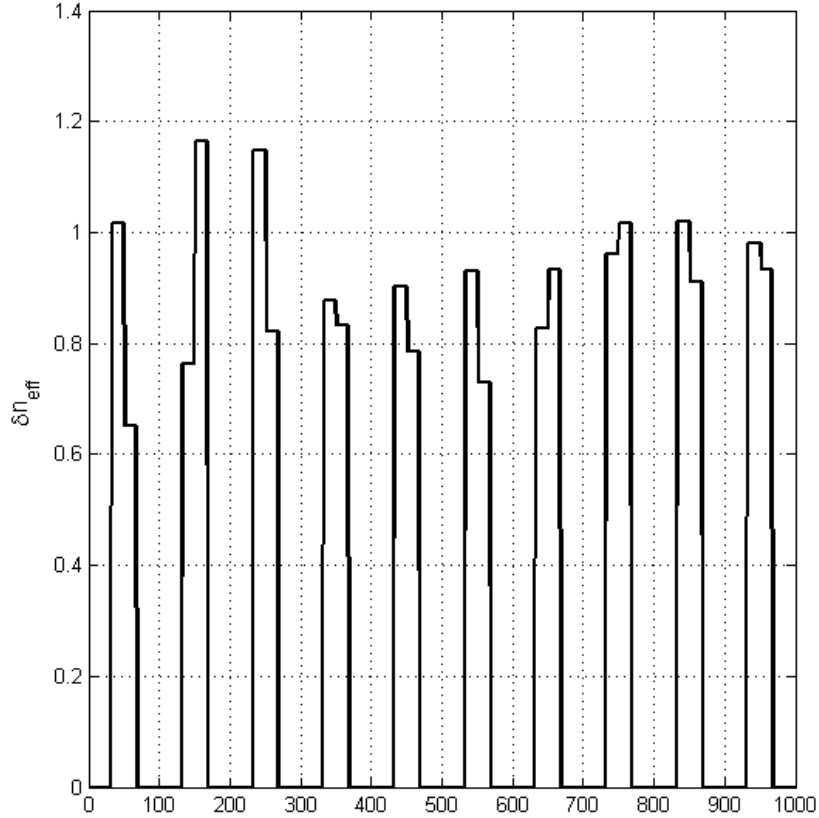


Figura 3.11: Esempio di profilo di apodizzazione finale

La divisione per la media locale dello spettro permette di paragonare forme d'onda con stessa  $\lambda_b$  ma differente valore massimo di riflettività, ottenendo una simil scalatura della forma. La procedura di calcolo descritta in figura 3.12 si arresterà al raggiungimento del massimo numero di iterazioni, impostate dall'utente od al raggiungimento dell'errore desiderato

$$\min(E) < \text{toll}$$

Si consiglia di impostare tolleranze sull'errore non superiori a 0.6, per garantire approssimazioni soddisfacenti, ma si sconsiglia valori inferiori ad 0.3 poiché tolleranze troppo stringenti sono difficilmente raggiungibili date le imprecisioni di ricostruzione dello spettro, intrinseche nel metodo.

**Controllo :** Il blocco denominato *controllo* è il cuore del processo iterativo in quanto regola le correzioni  $\Delta\varepsilon$  da apportare al profilo ricostruito. Con  $\varepsilon$  si intende un vettore lungo  $m$  contenete i valori di deformazione applicata in determinati punti del sensore (normalmente una suddivisione equispaziata sulla lunghezza totale), tali punti verranno denominati punti di deformazione p.d.

La procedura che regola il valore della deformazione viene descritta dai seguenti passaggi

$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \Delta\varepsilon \quad (3.8a)$$

$$\Delta\varepsilon = \mathbf{CO} \cdot \varepsilon_P \quad (3.8b)$$

dove il termine  $\varepsilon_P$  è ricavato partendo dal risultato in equazione 3.6 ponendo uguale a zero i termini corrispondenti ai valori dell'errore  $E_m < \text{toll}$ .

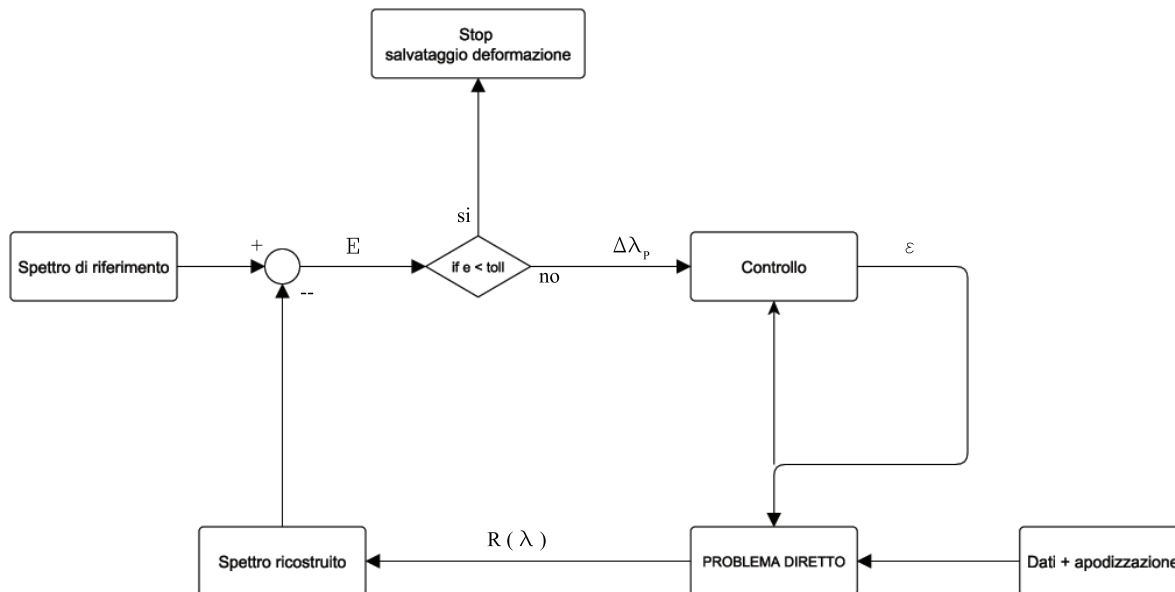


Figura 3.12: *Problema inverso*: schema di funzionamento del programma per la ricostruzione della deformazione

Così facendo, se lo spettro della m-ima fettina coincide tra riferimento e deformato, non si avrà deformazione corrispondente anche se i due baricentri non coincidono perfettamente.

La matrice di correlazione **CO** rappresenta il passaggio tra i valori delle deformazioni calcolate come differenza tra lunghezze d'onda dei baricentri ed i punti di deformazione p.d.

Normalmente la matrice, di dimensioni  $m \times m$ , si presenta in forma diagonale con termini di valore 1. Questo significa che ogni differenza tra baricentri corrisponde ad un unico p.d.

Nel caso di spettri complessi, o con un numero elevato di suddivisioni, non risulta sempre vera tale biunivocità che, se non corretta, può portare alla divergenza del metodo FBGCenter.

Alle righe di **CO** sono associati i punti di deformazione mentre alle colonne la deformazione  $\varepsilon_P$  corrispondente ad ogni scostamento tra gli m-imi baricentri.

Lo schema alla base del processo è riportato in figura 3.13. Il metodo consiste nel calcolare, per ogni lunghezza d'onda  $\Lambda$  del baricentro deformato, il corrispondente passo tra i piani di riflessione  $\Lambda$  invertendo la relazione di Bragg

$$\Lambda_m = \frac{\lambda_C}{2 \cdot n_{eff}}$$

Conoscendo i passi è possibile entrare nel grafico 3.13, descrivente l'andamento di  $\Lambda$  lungo tutto l'array, ed incrociando la rispettiva curva leggere in ascissa la posizione a cui sarà associata la correzione della deformazione.

Nell'esempio in figura alla prima freccia è associato il quinto FBG mentre alle altre due il nono, compreso tra 80-90 mm.

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \\ \Delta\varepsilon_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{C1} \\ \varepsilon_{C2} \\ \varepsilon_{C3} \\ \varepsilon_{C4} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

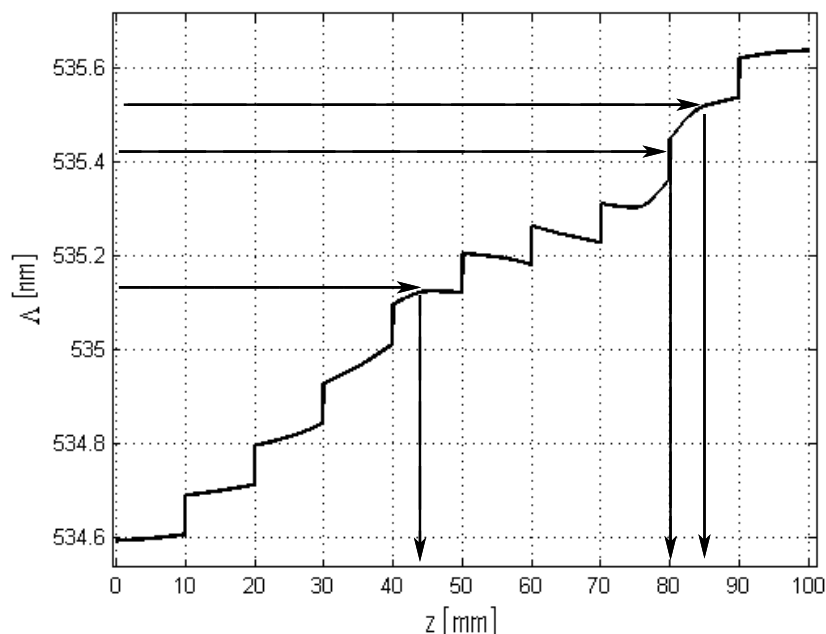


Figura 3.13: Schema di correlazione tra  $\Lambda_m$  e punti di deformazione (p.d.)

Nell'esempio in equazione 3.9, il terzo punto di deformazione non avrà alcuna variazione mentre le deformazioni corrispondenti al terzo e quarto punto agiranno entrambe sull'ultimo p.d.

Il programma per la risoluzione del problema inverso procede iterativamente fino ad una soluzione soddisfacente, contrariamente a quanto proposto nel metodo euristico.

Come input per il funzionamento del programma vanno forniti gli spettri così impostati

Spettro di riferimento : riflettività del sensore in condizione indeformata

Spettro ricostruito : riflettività del sensore deformato

La prima iterazione dell'algoritmo confronta le configurazioni a deformata nulla e deformata finale, generando un primo profilo deformato (abbastanza vicino a quello reale).

Dalla seconda iterazioni in poi come spettro di riferimento viene mantenuta fissa la riflettività acquisita in configurazione deformata, ricostruendo numericamente il nuovo spettro in funzione della deformata calcolata al passo considerato.

### 3.2.3 Risultati

Nei paragrafi precedenti si sono discussi i metodi e la logica alla base dei codici MATLAB<sup>®</sup> sviluppati nell'attività di tesi svolta. Verranno ora presentati esempi di risultati ottenuti, al fine di mostrare la validità del lavoro svolto e le potenzialità dei metodi.

#### 3.2.3.1 Spettro iniziale, apodizzazione

Le figure seguenti mostreranno due esempi di profili ricostruiti seguendo la procedura di variazione di  $\overline{\delta n_{eff}}$ . Si ricorda come gli spettri esaminati durante la ricerca del profilo di apodizzazione si riferiscano ad una deformazione nulla. Le figure 3.14 e 3.15 (a-c) mostrano la condizione iniziale di spettri, errori e, profilo  $\overline{\delta n_{eff}}$  mentre le figure (b-d) mostrano i risultati finali ottenuti.

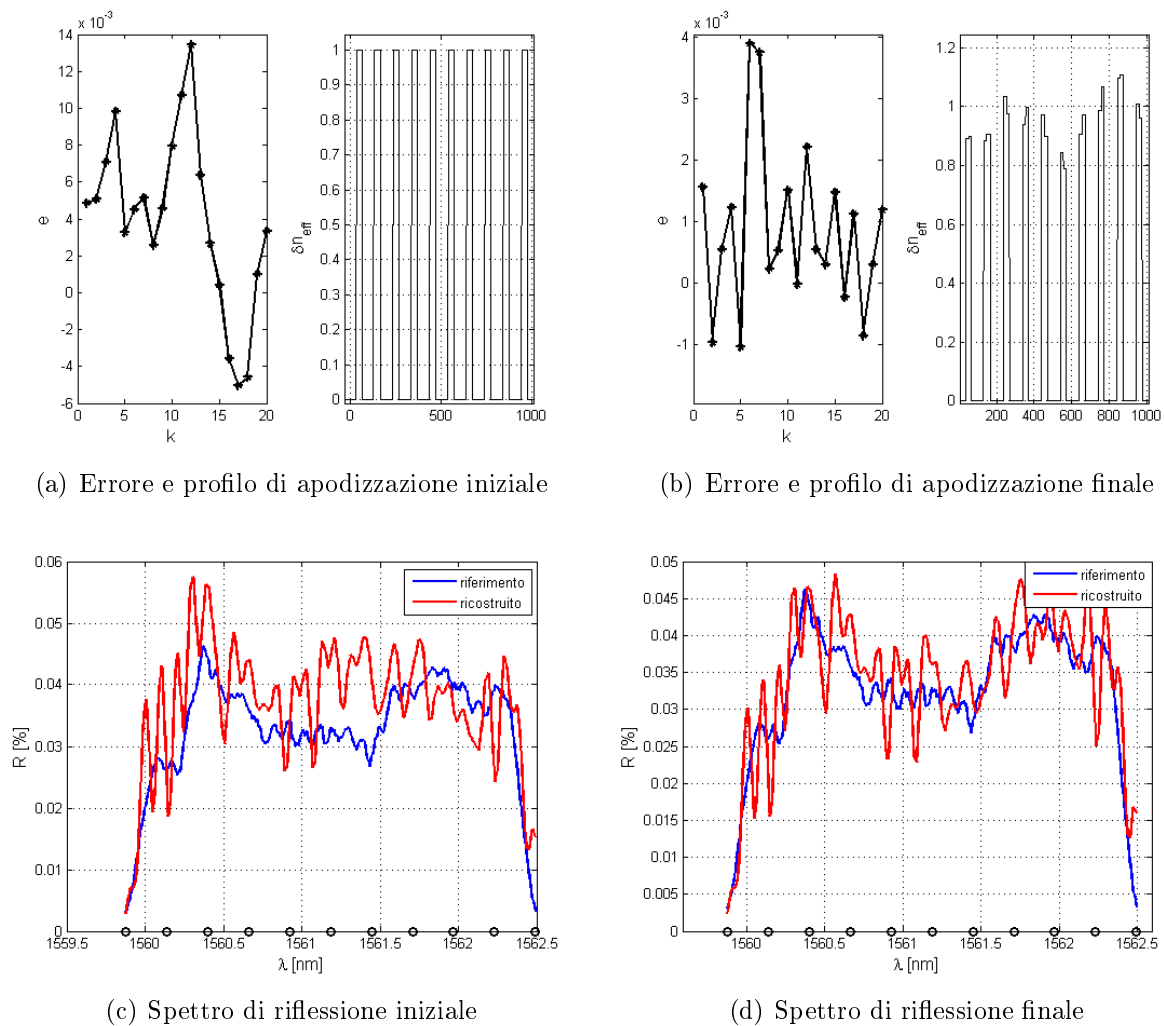


Figura 3.14: Caso 1: comparazione pre-post elaborazione

In entrambe gli esempi si sono utilizzati dati acquisiti da array di sensori composti da 10 sottoreticoli di lunghezza  $L_{FBG} = 3$  mm spaziate di 10 mm per una lunghezza totale dell'array di  $L = 90$  mm.

In entrambe i casi si nota una convergenza del profilo ricostruito ed una diminuzione dell'errore, il numero di punti  $k$  per il calcolo del profilo è stato scelto pari a 20 ossia ogni sensore FBG viene suddiviso in due parti.

Rispetto al metodo presentato nella tesi [3], la procedura risulta essere notevolmente più veloce. Il limite del precedente lavoro risiede nell'elevato numero di punti di controllo (p.c.) necessari a descrivere accuratamente l'andamento dell'indice di rifrazione efficace.

Per esempio con un numero pari a 10 p.c. l'ottimizzatore GA+PS impiega, su un comune computer portatile, un tempo nell'ordine dell'ora mentre, il nuovo programma sviluppato, solo pochi minuti (in funzione del numero di iterazioni).

L'importanza di descrivere accuratamente lo spettro ricostruito, in configurazione indeformata, è un passo chiave per la corretta riuscita dell'identificazione poiché spettri differenti, per una deformazione di entrambe nulla, porterà il successivo algoritmo di determinazione della deformazione basato sul calcolo dell'area sottesa, a rilevare una deformata non nulla, data dall'errore numerico introdotto. Tale fatto introdurrà, dalla prima iterazione, un errore intrinseco nella misura che può condurre a risultati sbagliati.



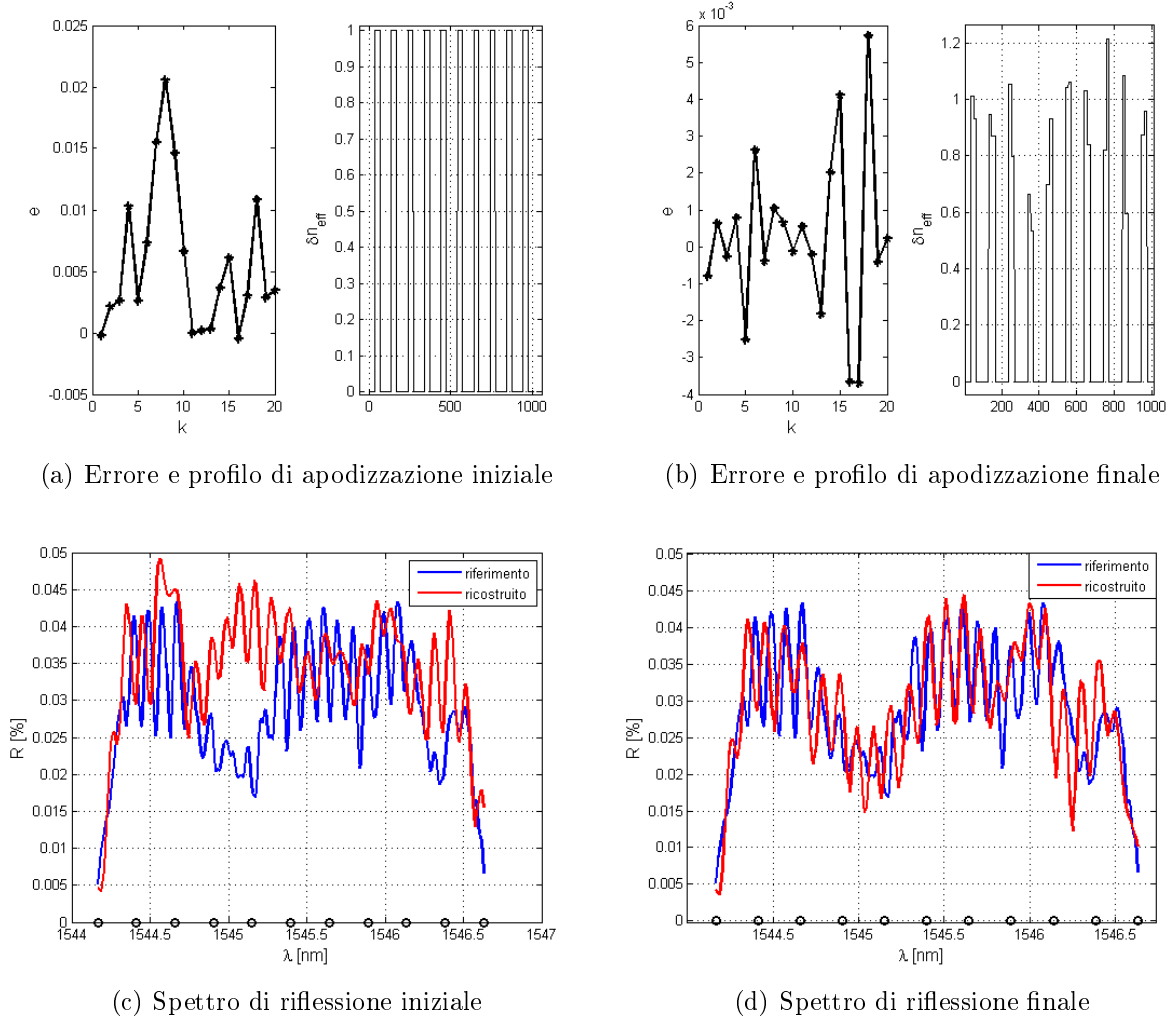


Figura 3.15: Caso 2: comparazione pre-post elaborazione

Il profilo di apodizzazione finale, figure 3.14(b) 3.15(b), dovrà essere un input fondamentale per il metodo FBGcenter, come mostrato dal diagramma 3.12.

L'errore è visibile nelle figure 3.16, dove viene rappresentata la deformata ottenuta valutando gli spettri con e senza profilo di apodizzazione.

Appare chiaro come l'algoritmo di ricostruzione, che discuteremo in seguito, generi un profilo di deformazione mediamente nullo per il caso con apodizzazione applicata, diversamente avviene per la figura (a) dove è presente uno scostamento di massimo di  $-80\mu\epsilon$ .

Nel caso specifico come numero di punti di deformazione (p.d.) è stato scelto  $m = N_{FBG} \cdot 2 = 20$ , equispaziati sulla lunghezza dell'array  $L = 100$  mm.

### 3.2.3.2 Risoluzione del problema inverso

Nella successione logica delle istruzioni da effettuare, dopo la corretta identificazione dello spettro indeformato, si eseguirà il programma FBGcenter capace di identificare la deformata agente sul reticolo attraverso la comparazione degli spettri.

Nel paragrafo seguente si mostreranno i risultati ottenuti, confrontando criticamente i dati alla luce di quanto già sviluppato in passato.

Per avere un'idea del miglioramento apportato con la nuova procedura, si sono analizzati tre

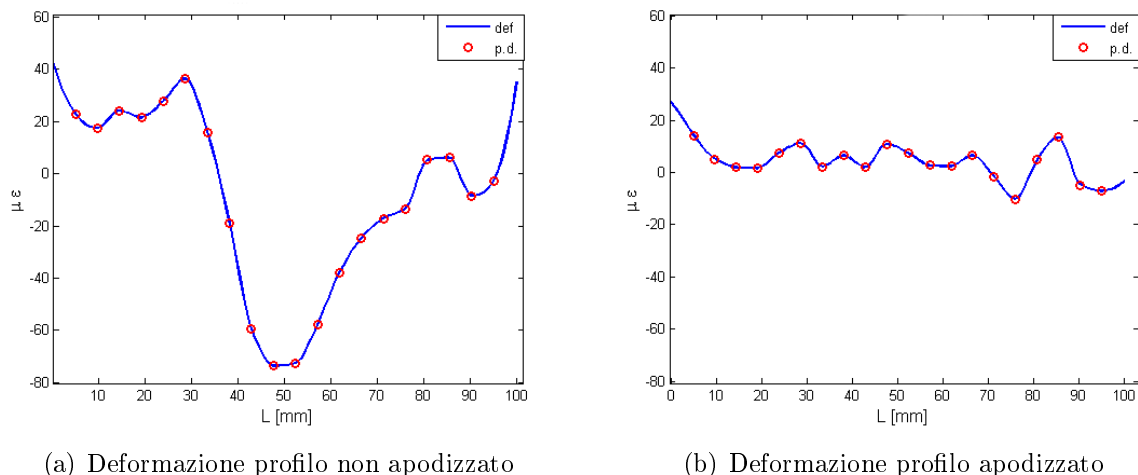


Figura 3.16: Confronto deformazione ricostruita a deformata teorica nulla

esempi di deformazione, applicando per ogni caso le procedure di Pattern Search (PS), FBG-Strain (metodo euristico) (FS), ed FBGCenter (FC).

I profili di deformazione scelti per verificare l'idoneità dei metodi, sono stati i seguenti:

- Andamento lineare
- Andamento parabolico
- Profilo di deformazione simile al caso reale di delaminazione, come mostrato nel lavoro di tesi [11]

Nei casi studio analizzati si sono utilizzati due set di dati differenti per simulare due sensori aventi diverse  $\lambda_b$  e differenti spettri di riflessione; il primo set di dati è stato applicato alla deformazione parabolica mentre il secondo set alle rimanenti due.

I grafici riportati rappresentano i risultati dei casi citati.

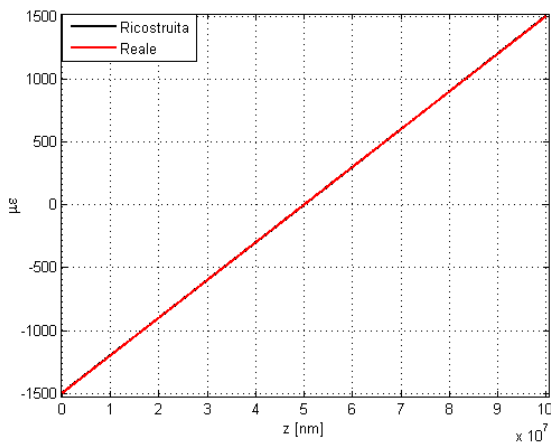
deformazione	FC	FS	PS
lineare	$t = 67$ s	$t = 130$ s	$t = 31.8$ min
parabolica	$t = 98$ s	$t = 144$ s	$t = 26$ min
attesa	$t = 114$ s	$t = 135$ s	$t = 205$ min

Tabella 3.1: Comparazione dei tempi di calcolo per la risoluzione del problema inverso

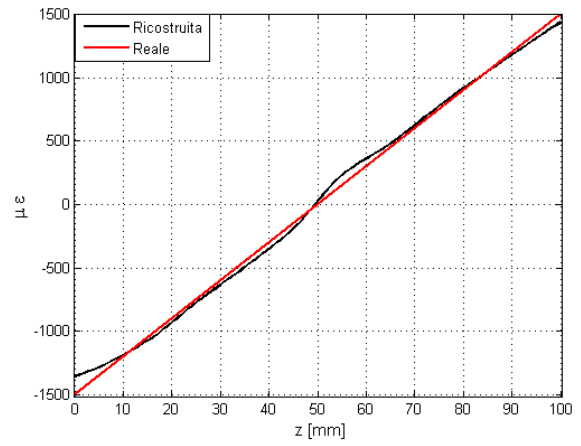
Le figure 3.17, 3.18, 3.19; 3.20, 3.21, 3.22 rappresentano i risultati del *problema inverso*, risolto con le tre metodologie. Il primo set di figure rappresenta la ricostruzione di una deformazione lineare, caso semplice.

Dall'analisi si nota come l'algoritmo pattern search (PS) approssimi perfettamente la deformazione imposta, ciò è possibile perché i tre punti di controllo della configurazione sono posizionati agli estremi ed in mezzera. L'algoritmo riesce ad identificare perfettamente tali punti ed interpolando linearmente non può altro che ottenere una retta.

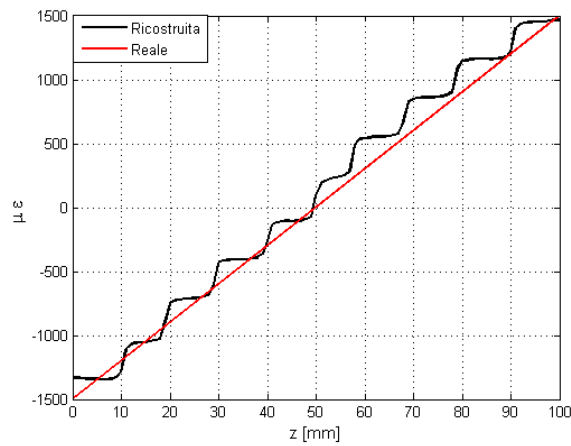
L'utilizzo del solo algoritmo FBGStrain (FS) produce un profilo seghettato poiché il metodo prevede di interpolare i vari tratti linearmente, la deformazione reale (rossa) attraversa mediamente quasi tutta la curva.



(a) Ricostruzione deformazione lineare con PS

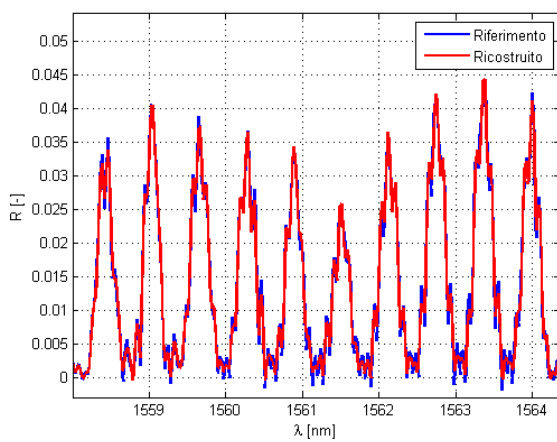


(b) Ricostruzione deformazione lineare con FC

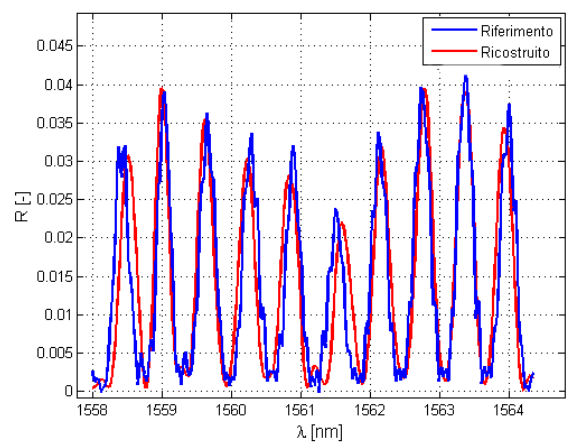


(c) Ricostruzione deformazione lineare con FS

Figura 3.17: Confronto delle deformazioni lineari ricostruite

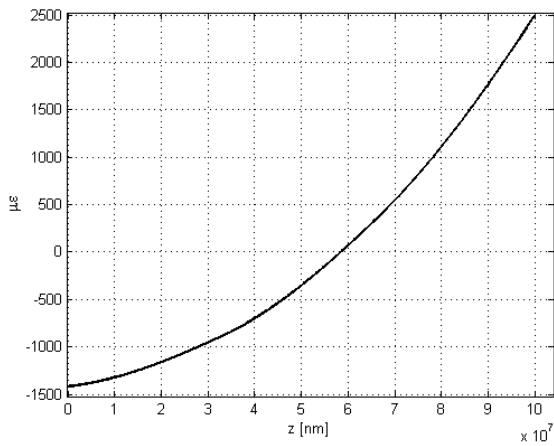


(a) Spettro della deformazione lineare con PS

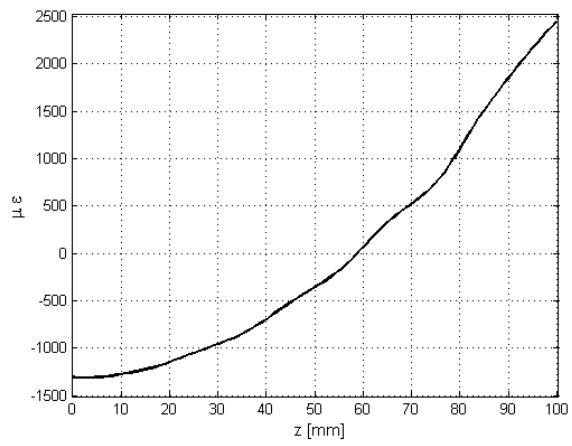


(b) Spettro per deformazione lineare con FC

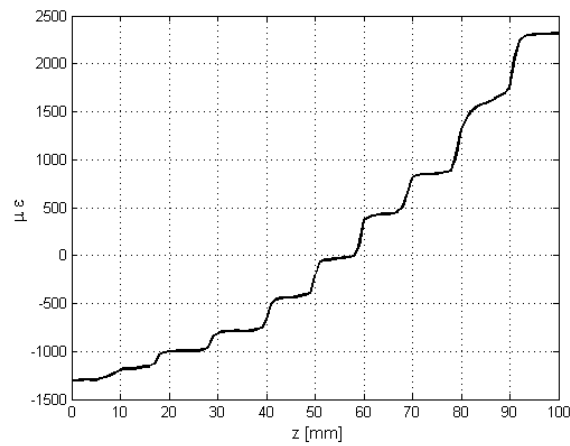
Figura 3.18: Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo lineare



(a) Ricostruzione deformazione parabolica con PS

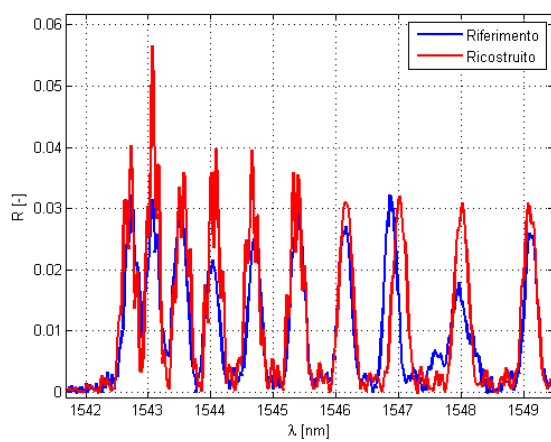


(b) Ricostruzione deformazione parabolica con FC

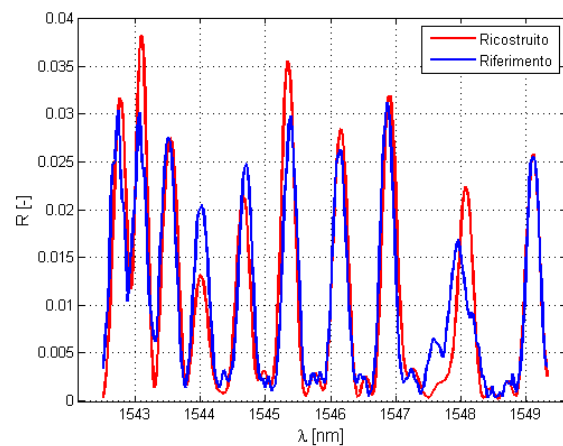


(c) Ricostruzione deformazione parabolica con FS

Figura 3.19: Confronto delle deformazioni paraboliche ricostruite

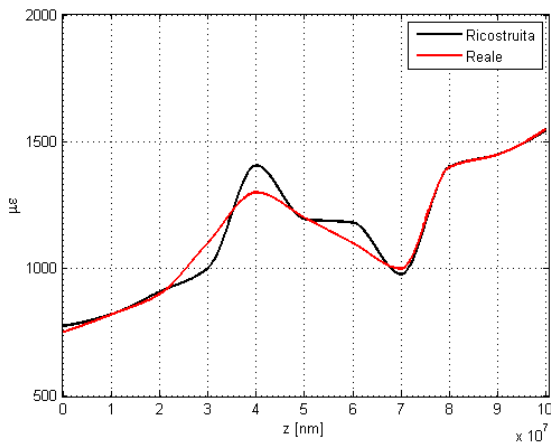


(a) Spettro della deformazione parabolica con PS

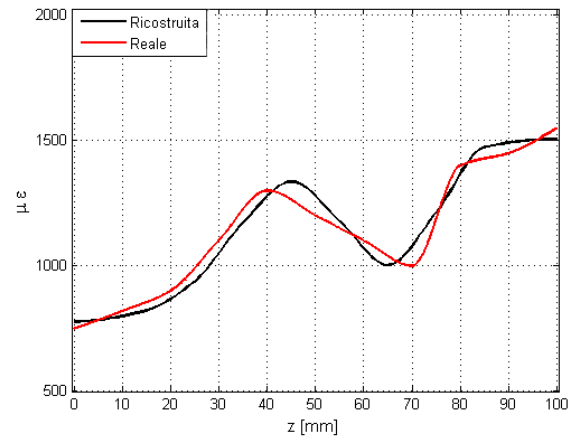


(b) Spettro per deformazione parabolica con FC

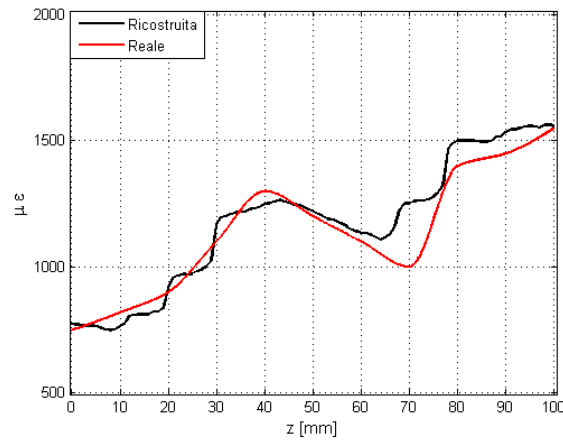
Figura 3.20: Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo parabolico



(a) Ricostruzione deformazione attesa con PS

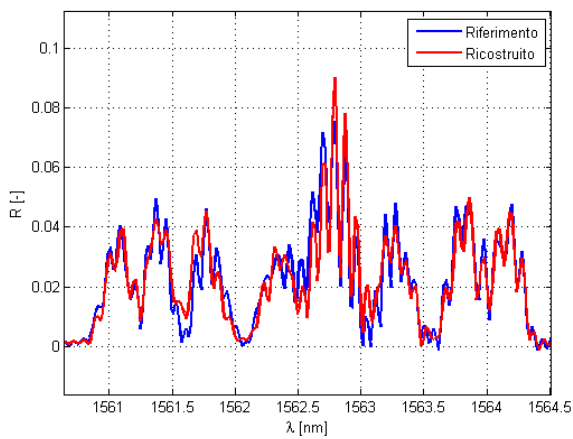


(b) Ricostruzione deformazione attesa con FC

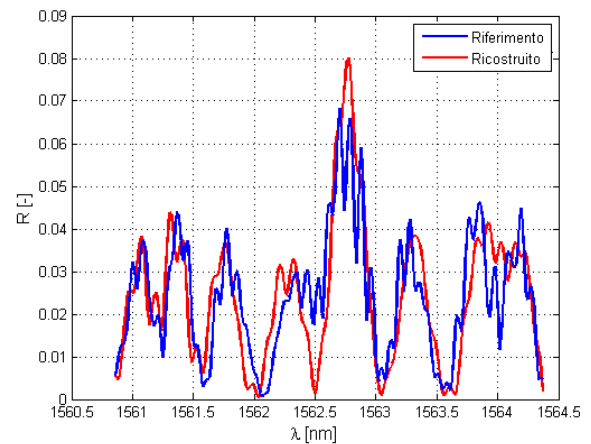


(c) Ricostruzione deformazione attesa con FS

Figura 3.21: Confronto della ricostruzione tramite PS



(a) Spettro della deformazione attesa con PS



(b) Spettro per deformazione attesa con FC

Figura 3.22: Confronto tra gli spettri ottenuti dalla ricostruzione del profilo atteso

La curva risultante dall'algoritmo sviluppato nell'ambito della tesi, ricostruisce molto bene questo semplice caso. Si nota un lieve scostamento in corrispondenza degli estremi, il difetto presente dipende da come viene scelto il primo punto per il calcolo dell'area ed è presente in tutti i profili.

Le considerazioni fatte sono valide anche nel caso della ricostruzione del profilo parabolico. L'algoritmo PS è stato impostato per interpolare, con un'interpolazione del secondo ordine, quattro punti lungo la coordinata  $z$ ; essendo l'interpolazione quadratica come la deformata imposta il metodo converge ottimamente.

Una critica mossa a tale metodo è l'impossibilità di conoscere a priori la forma e la posizione dei punti di controllo tali che approssimino bene la deformazione agente sul sensore.

Gli spettri mostrati nelle figure 3.18 3.20, rispecchianti le configurazioni deformate finali, presentano una discreta separazione tra i picchi adiacenti, rendendo più semplice la comparazione tra gli spettri utilizzando metodi basati sul calcolo delle aree sottese, come FC ed FS.

I profili precedentemente analizzati sono casi semplici, difficilmente si otterranno zone danneggiate, rotture o delaminazioni aventi andamenti regolari.

Nel terzo caso si è considerata la deformazione prevista nella zona di delaminazione del longherone test da realizzare, come mostrato nel lavoro numerico della tesi [11]. La forma ottenuta presenta delle discontinuità e dei tratti a pendenza diversa.

Per la risoluzione del problema specifico l'algoritmo PS è stato impostato con 11 p.c. ed interpolazione lineare.

Analizzando le immagini è possibile evidenziare come il programma FBGStrain approssimi male la deformazione attesa (rossa), l'algoritmo PS descrive correttamente la parte terminale ed iniziale ma non la zona centrale.

La procedura FC ricostruisce in maniera soddisfacente la deformazione pur avendo un lieve scostamento lungo tutto il profilo. Si nota come la procedura sviluppata sia l'unica in grado di approssimare quasi esattamente i valori del massimo e minimo picco di riflettività  $R$ , sbagliando le posizioni  $z$  in cui sono applicate, tale problema verrà discusso successivamente.

Gli spettri finali presentano separazioni minori e parziali sovrapposizioni, non rendendo distinguibili i 10 sottoreticoli FBG come nei due casi precedenti. Nonostante ciò il metodo implementato in FBGCenter è in grado di risolvere efficacemente il problema inverso.

Gli obiettivi che hanno spinto al miglioramento dei precedenti algoritmi di risoluzione del problema inverso, sono state la necessità di riduzione dei tempi di calcolo e l'ottenimento di un metodo capace di descrivere con sufficiente accuratezza la deformazione agente sui DTG.

Come mostrato dalle figure precedentemente riportate, il secondo obiettivo è stato raggiunto. Dopo aver eseguito diverse prove, si può affermare che la ricostruzione effettuata con il programma FBGCenter ammetta scostamenti massimi non superiori ad  $\pm 100 \mu\epsilon$ .

Il Primo obiettivo, ossia la diminuzione dei tempi di calcolo è stata pienamente raggiunta. Il tempo totale dipenderà dal numero di iterazioni necessarie all'algoritmo per convergere alla soluzione impiegando generalmente non più di qualche minuto.

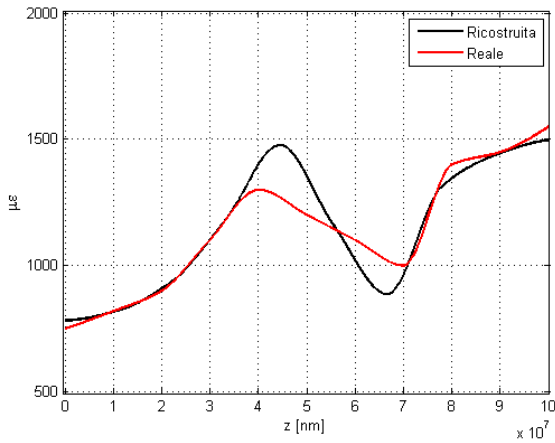
Il netto miglioramento ottenuto è visibile dai dati in tabella 3.1, in cui sono paragonati i tre metodi per ognuna delle tre deformazioni.

Analizzando i metodi PS e FC, che meglio riescono a cogliere l'andamento della deformata, si nota il passaggio dei tempi di calcolo dall'ordine dell'ora a quello del minuto, avendo così apportato un notevole incremento delle prestazioni.

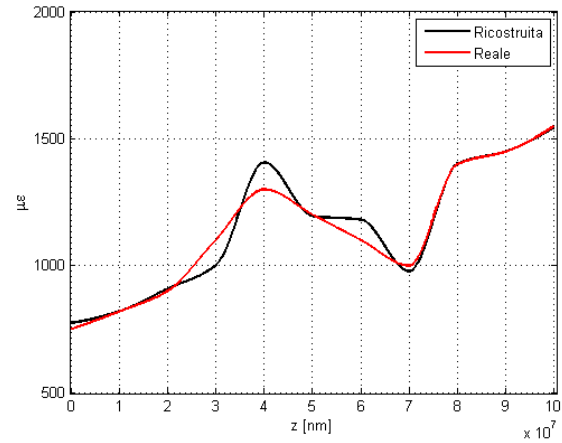
Un'ulteriore considerazione si trae dall'analisi delle figure 3.23 e 3.24.

Analizzando la coppia di immagini si nota una diversità di profilo ricostruito al variare del numero di punti di controllo.

Con 11 p.c i punti ricadono nella coordinata  $z = [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]$  mm,

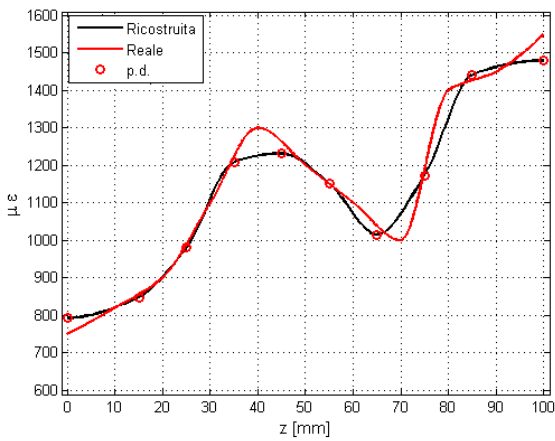


(a) deformazione ottenuta con PS 11 p.c.

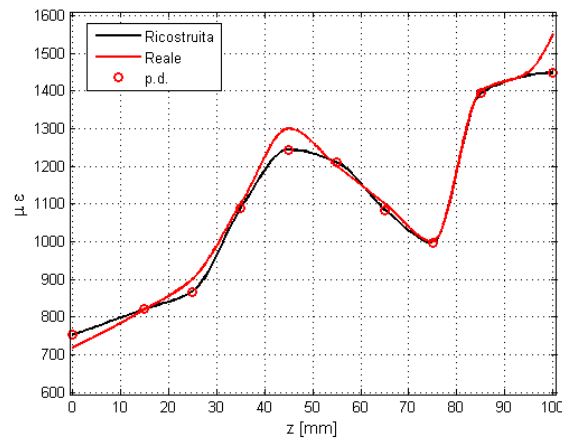


(b) deformazione ottenuta con PS 10 p.c.

Figura 3.23: Confronto della deformazione ottenuta al variare dei punti di controllo



(a) Punti di deformazione (p.d.) non collocati



(b) Punti di deformazione (p.d.) collocati

Figura 3.24: Risultati del problema inverso, mediante FBGCenter, con punti di deformazione collocati e non

questi punti sono gli stessi utilizzati per definire la deformata reale, infatti i cambi di pendenza avvengono nei suddetti punti. La coincidenza tra i punti permette una ricostruzione fedele del profilo e quindi uno spettro di riflessione, il quale governa la procedura di definizione dell'errore e di ottimizzazione, molto vicino allo spettro di riferimento.

Nel caso di 10 p.c. disposti in  $z = [5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95]$  mm non si ha una coincidenza. L'algoritmo cerca di descrivere le deformazioni nei punti indicati ma ciò provoca uno spettro di riflessione non ottimo ed il metodo converge a risultati non precisi.

Considerazioni analoghe possono essere fatte per le figure 3.24 ottenute dalla risoluzione del problema inverso tramite l'algoritmo FC. Nell'esempio riportato si è usato, per entrambe le configurazioni, lo stesso numero di punti di deformazione (p.d.) ossia quei punti in cui l'algoritmo definisce un valore di deformazione.

I punti sono disposti nella coordinata spaziale del sensore  $z$  coincidenti con la disposizione reale dei sensori FBG che formano l'array, alle stazioni  $z = [0, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 100]$  mm;

si è deciso di utilizzare un numero di p.c. pari al numero di FBG poiché risulta essere l'impostazione migliore.

Ciò che varia tra le immagini (a)(b) è il profilo reale rosso, nel caso (a) costruito interpolando linearmente i punti nelle coordinate multiple di dieci ( $z = 0, 10, 20\dots$ ), mentre nel secondo caso collocando i punti di variazione della pendenza con i p.c. del metodo.

Appare chiaro come nel caso collocato (b), del tutto ideale e costruito appositamente, l'algoritmo FBGCenter descrive quasi perfettamente la deformazione 'Reale' con l'eccezione degli estremi del campo di interesse.

Nelle applicazioni reali è sicuramente impossibile ottenere una situazione collocata ma, nonostante tale errore di posizionamento, il metodo riesce a soddisfare una buona precisione di ricostruzione della deformata prevista con errori limitati rispetto alla configurazione non collocata del PS (figura 3.23 (a)).

L'algoritmo FC possiede alcune criticità, la prima è l'impossibilità di ricostruire correttamente una deformazione nel momento in cui si ha uno scambio di posizione tra le 'campane di riflessione' di FBG adiacenti.

Un'ulteriore aspetto da migliorare risulta essere il calcolo delle aree di riferimento le quali dipendono troppo dalla precisione con cui si ricostruisce il segnale ad ogni iterazione. Ogni forma di errore introdotta negli spettri di riflessione si ripercuoterà sulla determinazione dei baricentri e quindi della deformata, è possibile pensare ad una nuova metodologia per la determinazione degli spettri oppure un nuovo indicatore diverso dal baricentro dell'areola.

Essendo lo spettro di riflessione un segnale molto rumoroso ed oscillante è fortemente sconsigliato suddividerlo in troppe fette per poi calcolarne l'area, infatti, così facendo si amplificano gli errori di computazione di ogni fetta ed il metodo perde di precisione. Si consiglia di suddividere in non più del doppio del numero di sottoreticoli (FBG) presenti.

Ovviamente il metodo non è in grado di cogliere delle discontinuità puntiformi, in quanto la risoluzione spaziale del metodo è pari alla distanza tra i p.d. i quali, come precedentemente discusso, non possono essere in numero troppo elevato.

Un'ulteriore migliorabile può essere la determinazione di un numero, a piacere, di punti di deformazione attualmente regolabili in multipli ( $1x$ ,  $2x$ ) del numero di FBG componenti l'array.

Concludendo si può affermare che il metodo risolve bene il *problema inverso*, ottenendo deformazioni fedeli in tempi limitati.



### 3.3 Conclusioni e sviluppi futuri

Nel capitolo si sono analizzati gli algoritmi per la risoluzione del *problema inverso*, sviluppati nel linguaggio di programmazione MATLAB, affrontando le logiche alla base dei metodi ed i risultati.

Gli algoritmi principali sono risultati essere due:

1. Algoritmo di ricostruzione del profilo riflesso secondo le condizioni iniziali agenti sul sensore
2. FBGCenter, algoritmo per la risoluzione del problema inverso, determinando la deformata agente lungo il sensore

Entrambe gli algoritmi hanno evidenziato un soddisfacente grado di precisione ed una notevole diminuzione dei tempi di calcolo, rispetto ai metodi precedentemente sviluppati.

La risoluzione del *problema inverso* attraverso FBGCenter risulta essere computazionalmente più efficiente mantenendo una precisione elevata in tutti i casi analizzati. L'algoritmo procede iterativamente calcolando ad ogni passo un incremento di deformazione, così da far avvicinare il più possibile il profilo ricostruito a quello reale. Il controllo del metodo avviene, però, comparando gli spettri perché nelle applicazioni non si conosce a priori la deformazione 'reale'.

E' di fondamentale importanza impostare correttamente i dati descrittivi l'array di sensori poiché essi sono la base per la ricostruzione numerica di tutti gli spettri, attraverso la CMT ed TTM.

La corretta definizione del profilo di apodizzazione è la chiave per la precisa ricostruzione della deformazione, attraverso FBGCenter, perché regola il controllo alla base della suddivisione delle 'fette' di area nonché influenzerà lo spettro numerico.

Si può pensare allo sviluppo di una procedura automatizzata che imposti determinati parametri appartenenti al set di dati, tale per cui lo spettro ricostruito con i dati impostati sia perfettamente uguale all'acquisito. Allo stato attuale, tale procedura deve essere condotta manualmente e preliminarmente dall'utente.

Dalle analisi svolte è risultato inutile e controproducente l'abbassamento eccessivo delle tolleranze sull'errore oltre a definire una griglia troppo fitta di punti di deformazione (p.d.), rischiando di avere delle divergenze sulla soluzione finale.

Sviluppi futuri potranno riguardare la determinazione di un nuovo parametro identificativo della deformazione non più basato sui baricentri, lo studio di algoritmi capaci di suddividere lo spettro con una maggiore risoluzione così da poter cogliere le più piccole discontinuità di  $\varepsilon$  ed il miglioramento numerico dei codici.

Un'ultima idea sviluppata, ma che non è stata indagata, riguarda la possibilità di eliminare la deficienza di tutti gli algoritmi proposti quando si hanno degli scambi nella posizione  $\lambda$  tra picchi d'onda di sensori adiacenti. Se ciò accade i metodi non sono più in grado di associare correttamente lo spettro al sensore.

Per ovviare a tale inconveniente e quindi poter utilizzare con maggior successo configurazioni di array continuo spaziale e spettrale, si è pensato all'utilizzo di sensori aventi picchi con valori di ampiezza massima differente, ad esempio alternando un picco 'alto' ed uno 'basso'.

L'algoritmo, scansionando lo spettro, potrebbe rilevare la posizione di tali picchi e con un metodo simile alla matrice di correlazione **CO**, proposta nella sezione 3.2.2, associare ogni zona dello spettro di riflettività  $R(\lambda)$  al corretto sensore FBG.



# Capitolo 4

## Realizzazione del longherone di prova

La necessità di avere a disposizione dati sperimentali ha portato alla costruzione del longherone, utilizzato come banco prova.

Avere a disposizione il laminato strumentato con fibre ottiche permette di verificare la validità dei sensori FBG, la loro capacità di rilevare le delaminazioni e la possibilità di correlazione con i risultati numerici descritti nel lavoro di tesi [11].

Inoltre, per la risoluzione del *Problema Inverso*, verranno utilizzate le procedure di calcolo descritte nel precedente capitolo, così da ottenere un primo riscontro sulla bontà dei metodi sviluppati.

Per la corretta realizzazione, strumentazione ed assemblaggio finale si sono dovute implementare tecnologie appositamente studiate, le quali verranno descritte nelle sezioni seguenti.

### 4.1 Identificazione sensori tramite filo caldo

La prima attività svolta nel lavoro di tesi è stato lo studio di fattibilità di un sistema per l'identificazione dei sensori FBG iscritti nella fibra. Lo studio consiste nell'identificare la posizione dei sensori attraverso una sorgente di calore, teoricamente puntiforme, rilevando la risposta termica della zona sensibile. La necessità di tale misurazione nasce poiché i costruttori di sensori non garantiscono la precisione di posizionamento del sensore lungo la fibra ottica, infatti per motivi legati al processo di produzione non si è in grado di ottenere una posizione ben definita del FBG rispetto all'inizio della fibra. I costruttori garantiscono il passo tra due sensori consecutivi ma rimane da determinare il primo sensore posizionato all'interno di due marker sulla fibra non esattamente in posizione centrale, come indicato in figura 4.3 .

L'idea alla base della prova è la determinazione del sensore, con precisione accettabile, monitorando lo spostamento del picco di Bragg  $\lambda_b$  in funzione della sorgente di calore agente sulla fibra, ci si aspetta una risposta in corrispondenza del sensore.

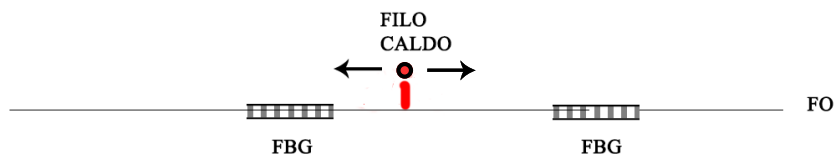


Figura 4.1: Schema base della prova con il filo caldo

#### 4.1. IDENTIFICAZIONE SENSORI TRAMITE FILO CALDO

Come raffigurato in Figura 4.1 la fibra ottica è fissata sulla piastra di alluminio mentre il filo caldo, comandato dall'utilizzatore, muovendosi da un estremo all'altro scansiona la fibra ottica fornendo calore.

Per la prova si sono utilizzate tre fibre con tipologie di coating differenti, così da verificare la compatibilità di acrilato, immide ed Ormocer alla sorgente di calore.

L'attrezzatura di prova, come mostrano le immagini 4.2 4.3 è composta da:

- Interrogatore ottico Micron Optics
- Pc per acquisizione dati
- Macchina di taglio a filo caldo
- Fibre ottiche: 4 fibre, tre analizzate (4 FBG) più una fibra come trigger
- Piastra di supporto in alluminio

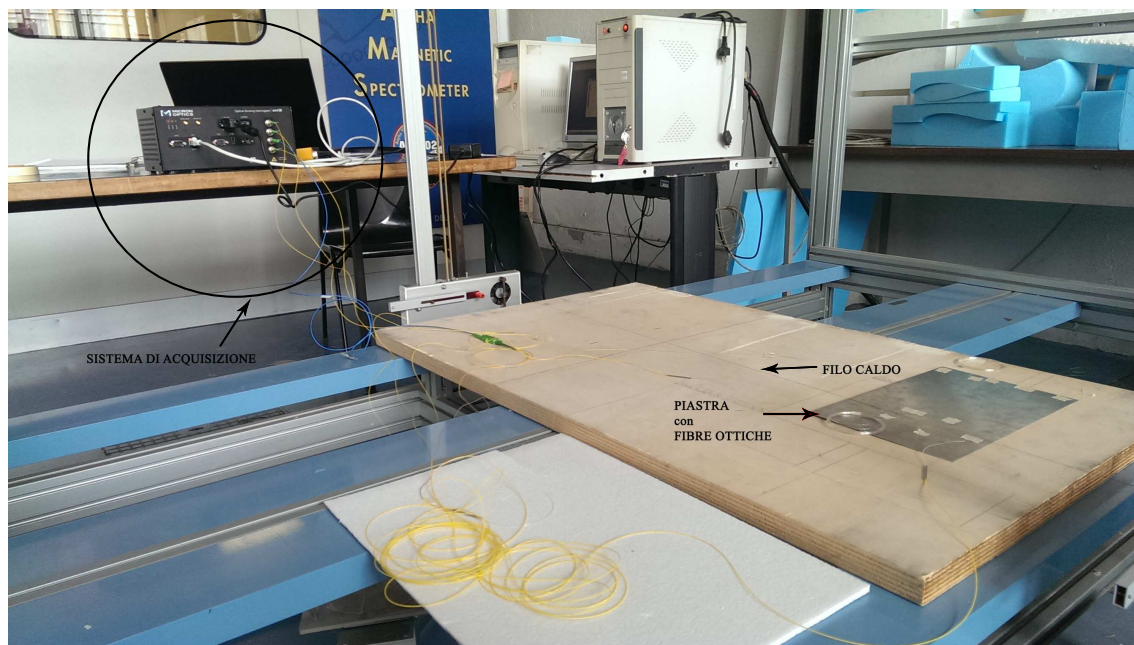


Figura 4.2: Attrezzatura di prova

Le quattro fibre sono state acquisite parallelamente su 4 canali indipendenti dello strumento Micron Optics. In tabella 4.1 vengono specificate le denominazioni fornite ai sensori FBG, rendendo riconoscibili i sensori durante l'analisi dei dati.

CH 1	Ormocer coating	$\lambda_{FBG1} = 1566 \text{ nm}$	$\lambda_{FBG2} = 1581.8 \text{ nm}$
CH 2	Acrilato coating	$\lambda_{FBG3} = 1564.9 \text{ nm}$	
CH 3	Immide coating	$\lambda_{FBG4} = 1579 \text{ nm}$	
CH 4		Trigger	

Tabella 4.1: Configurazione di acquisizione dei sensori per prova di identificazione con filo caldo

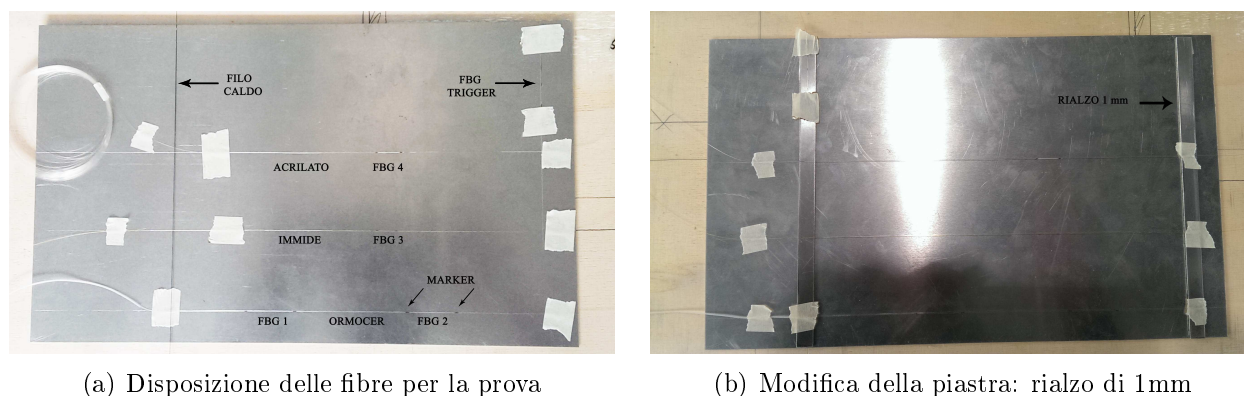


Figura 4.3: Layout sperimentale identificazione con filo caldo

La procedura di prova attuata è stata la seguente:

1. Fissaggio delle fibre ottiche sulla piastra di supporto, verifica del parallelismo tra esse
2. Posizionamento delle fibre ottiche perpendicolarmente al filo caldo di scansione così da avere un riscaldamento uguale per ogni punto delle fibre ottiche. Il sensore di start/-trigger è stato invece posizionato parallelamente al filo con l'intento di avere una misura quanto più istantanea e sensibile (così facendo il sensore è scaldato per tutta la sua intera lunghezza al momento del passaggio del filo al di sopra della fibra)
3. Regolazione dell'altezza tra sensori ottici e filo caldo, regolazione della velocità di avanzamento della macchina
4. Impostazione della soglia di temperatura del sensore starter, al superamento di tale valore l'acquisizione ha inizio con la medesima sincronizzazione su tutti i canali
5. Regolazione della potenza termica del filo ed avvio della macchina per la prova

Il sensore di starter/trigger è necessario per avere un riferimento temporale comune poiché risulta molto più preciso di un avvio dell'acquisizione fatto dall'operatore manualmente.

Avere un tempo di avvio preciso è fondamentale perché l'analisi della posizione del sensore sarà effettuata moltiplicando la storia temporale dei valori di  $\lambda_b$  per la velocità di scansione del filo, così da ottenere la posizione corrispondente. Per ottimizzare tale aspetto si è dovuto curare con perizia l'impostazione delle soglie di temperatura del sensore di avvio, regolandone il limite ad un valore  $\Delta\lambda$  che corrispondesse ad una variazione di temperatura di  $2^\circ\text{C}$ ; tale settaggio è risultato il migliore generando la minor differenza di tempo intercorsa tra l'avvio della registrazione ed il passaggio del filo caldo sopra il sensore di avvio.

Le prime prove sono state effettuate appoggiando le fibre ottiche sulla piastra di alluminio e fissandole con del nastro di carta.

Successivamente è stata apportata una modifica al sistema andando ad applicare due rialzi di 1 mm e fissando su di essi le fibre da scansionare. Tale modifica, come mostrano i grafici a riguardo (figura 4.8), ha migliorato l'ampiezza del picco di  $\lambda_b$  poiché la fibra subisce un surriscaldamento maggiore, evidenziando in modo più marcato la presenza di eventuali sensori.

La modifica è stata pensata analizzando il meccanismo di scambio termico agente sul sensore FBG.

Lo scambio termico tra filo caldo e fibra avviene prevalentemente per irraggiamento poiché la conduzione non può avvenire non essendoci contatto mentre la convezione risulta poco rilevante

a causa della velocità di avanzamento del filo nell'aria ed il limitato tempo di permanenza per unità di lunghezza che non garantisce un riscaldamento del fluido circostante.

Un'ulteriore fattore limitante risulta essere la perdita di calore per conduzione subita fibra ottica appoggiata all'alluminio (buon conduttore), con la conseguenza di un transitorio di riscaldamento rallentato ed una possibile differenza di temperature tra la zona del sensore a contatto con il metallo e la zona esposta all'irraggiamento.

Alla luce delle considerazioni riportate si è deciso di sospendere la fibra così da ottenere un doppio beneficio, limitare la perdita per conduzione e sfruttare la riflessione dell'alluminio per irraggiare la parte inferiore del sensore uniformando l'ingresso della potenza termica nella sezione della fibra, gli effetti della modifica sono visibili nelle figure 4.8.

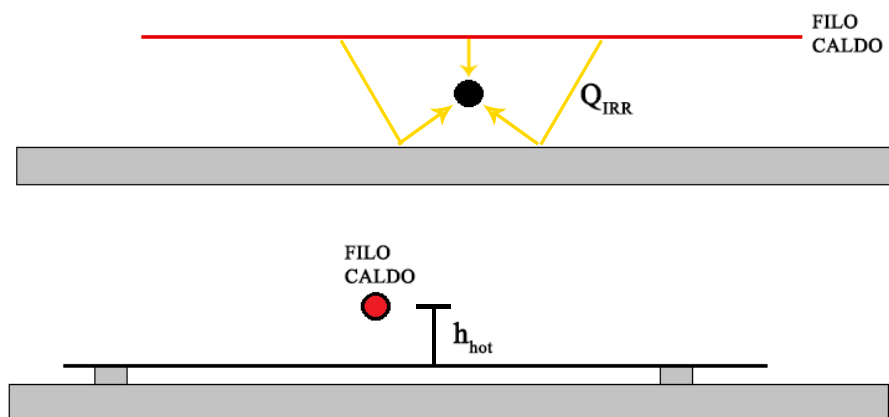


Figura 4.4: Schema dell'irraggiamento su piastra modificata

Le prime prove effettuate sono servite per verificare la bontà del sistema pensato e trovare i parametri migliori per l'effettuazione delle misure. I parametri controllati sono stati 4:

- Altezza filo caldo [ $h_{hot}$ ] : Tale parametro ricopre il ruolo fondamentale nello scambio di calore poiché la potenza termica dipende dal quadrato della distanza tra sorgente e corpo,

$$Q_{irr} \propto \frac{1}{h_{hot}^2}$$

Valori troppo elevati non permettono un passaggio quasi istantaneo di calore, introducendo ritardo di risposta, con conseguente problema di localizzazione spaziale del sensore, inoltre potrebbe non essere chiaramente visibile il picco in  $\lambda$ . Valori bassi causano problemi di surriscaldamento con degrado del coating ed al limite rottura della fibra

- Riscaldamento percentuale del filo caldo [ $q$ ] : La macchina di prova non permette di controllare direttamente la temperatura della sorgente di calore, la quale dipenderà dalla velocità di avanzamento del filo nonché dalle dimensioni del filo stesso. Si è potuto agire sul parametro di regolazione della percentuale di corrente circolante nel filo. Il riscaldamento, per effetto Joule, sarà tanto maggiore quanto più il parametro  $q$  è elevato mentre valori piccoli non permettono un adeguato riscaldamento del sensore, con conseguente lettura affetta da rumore o non interpretabile

- Velocità di scansione [ $V_{scan}$ ] : Per motivi di sicurezza ed integrità del filo caldo (evitando surriscaldamenti), la macchina deve garantire sempre una velocità minima di avanzamento. Tale parametro influenza notevolmente i risultati poiché governa la quantità di calore scambiato, su di una determinata zona di fibra nell'unità di tempo, ed è il valore di trasformazione tra la coordinata temporale dell'acquisizione e la coordinata spaziale. Lo studio della velocità migliore verrà discusso successivamente.
- Valori di soglia trigger [ $\Delta\lambda_t$ ] : La regolazione del valore di soglia è fortemente legato alle combinazioni dei parametri precedenti ed è necessario una verifica e messa a punto ad ogni variazione effettuata. Generalmente parlando tale valore è il livello, di temperatura/lunghezza d'onda, superato il quale si ha l'evento che coordina l'inizio dell'acquisizione su tutti i canali. Valore di soglia troppo basso anticipa l'inizio della registrazione, con il problema di avere le posizioni dei sensori aumentate di un valore pari a  $V_{scan} \cdot \Delta t$ , situazione contraria per valori di soglia troppo alti, con al limite il mancato avvio della registrazione.

Essendo i valori dei parametri dipendenti l'uno dall'altro, è stato necessario trovare un set che garantisse al meglio le performance del sistema di misura. Dalle prime prove di familiarizzazione si è notato come il valore di  $V_{scan}$  doveva essere indagato con maggior accuratezza, fissando un set di valori dei restanti parametri, così da limitare le prove da effettuare.

Si sono scelti i seguenti valori dei parametri, i quali soddisfano i requisiti di precisione della misura.

$h_{hot}$ [mm]	$q$ [%]	$V_{scan}$ [mm/s]	$\Delta\lambda_t$ [nm (°C)]
2	90	da 4 a 16	0.02 (2)

Tabella 4.2: Impostazione parametri per prova filo caldo

### 4.1.1 Analisi dati

Nel seguente paragrafo si analizzeranno i dati raccolti durante le prove, valutandone la bontà e definendo la precisione del metodo di misura nonché i limiti ed i miglioramenti da effettuare. Come discusso in precedenza le fibre sensibili utilizzate sono state 3, la lunghezza di scansione ossia il tratto tra l'inizio e la fine della registrazione è risultato essere lungo 255 mm.

La prima attività è stata la localizzazione dei marker dei sensori FBG misurando la distanza degli estremi esterni, tale rilevazione servirà come confronto per la validità del metodo, poiché non dovranno capitare misure all'esterno di tali marker. I valori riportati in tabella 4.3 sono

Fibra	$L_{FBG}$ [mm]	mk 1 [mm]	c [mm]	mk 2 [mm]	mk 3 [mm]	c [mm]	mk 4 [mm]
Ormocer	3	50	66	82	151	167	183
Immide	3	87	94	101			
Acrilato	10	84	92.5	101			

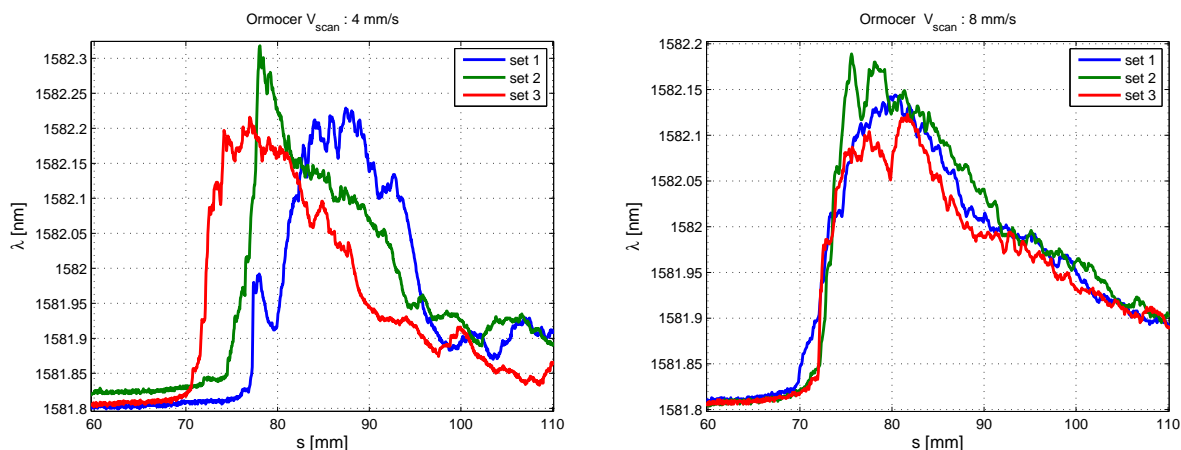
Tabella 4.3: Dati geometrici delle fibre ottiche analizzate

i riferimenti utilizzati per il confronto con l'analisi numerica effettuata sui dati acquisiti, come evidenziato il sensore con coating in Acrilato porta un FBG di lunghezza superiore rispetto alle

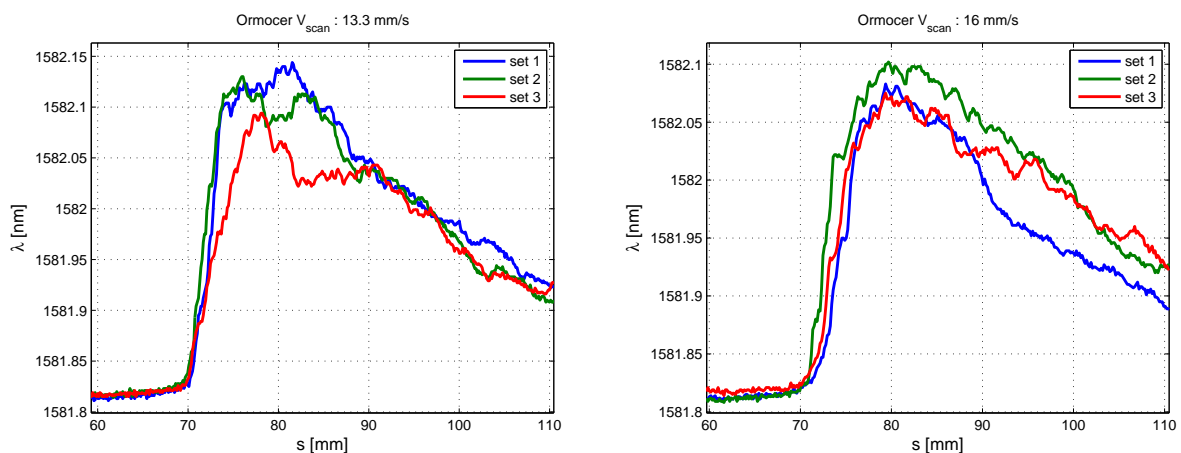
altre due fibre, pari a 10 mm. Inoltre da notare è il passo tra i centri dei due sensori FBG in Ormocer, nominalmente di valore 100 mm, risultato di 101 mm calcolando il centro tra i marker, ciò rimarca la precisione del passo tra sensori che i fornitori garantiscono ma la minor precisione dei marker.

Dato il buon numero di prove effettuate (36) si presenteranno successivamente solo i risultati più significativi ed i grafici di maggior contenuto esplicativo.

La frequenza di campionamento scelta per le misurazioni è stata di 100 Hz disponendo così di una risoluzione spaziale, dipendente dalla velocità di scansione, compresa tra 0.04 mm e 0.16 mm.



(a) Sensore ormoceramico, velocità filo caldo 4 mm/s (b) Sensore ormoceramico, velocità filo caldo 8 mm/s



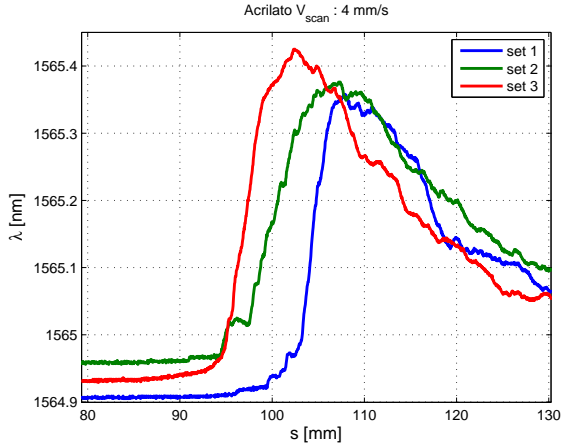
(c) Sensore ormoceramico, velocità filo caldo 13 mm/s (d) Sensore ormoceramico, velocità filo caldo 16 mm/s

Figura 4.5: Esempio di risultati delle prove di identificazione sensori con coating ormoceramico, FBG2

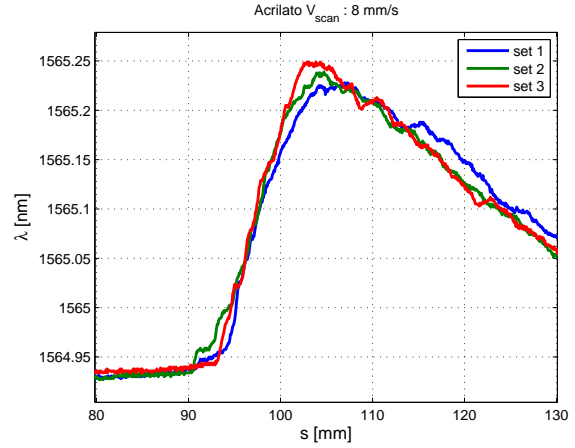
Le figure 4.6, 4.5 rappresentano 3 set di dati significativi, raccolti durante l'esecuzione delle prove. Per motivi di comprensione e spazio non sono stati mostrati tutti i set di dati acquisiti, ma analizzando le figure è possibile trarre diverse conclusioni di carattere generale.

Come prima cosa si nota come all'aumentare della velocità di scansione la dispersione dei set di dati decresca, ciò rende più confidenti della bontà delle misurazioni effettuate. Per tutte e 3 le tipologie di fibre (qui riportate solo due, Ormocer-Acrlato) i dati acquisiti con velocità di 4 mm/s non sono precisi mentre aumentando il valore si nota un limite di miglioramento,

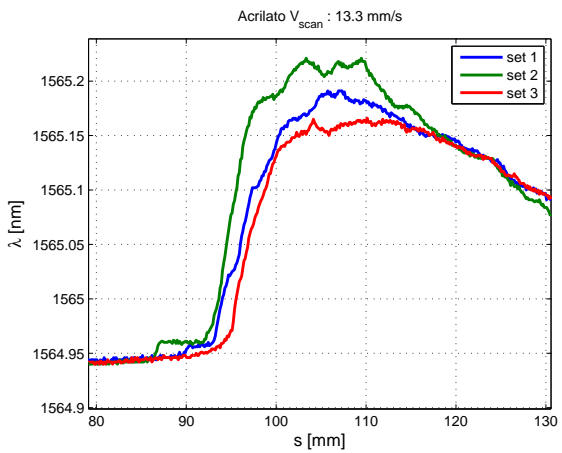




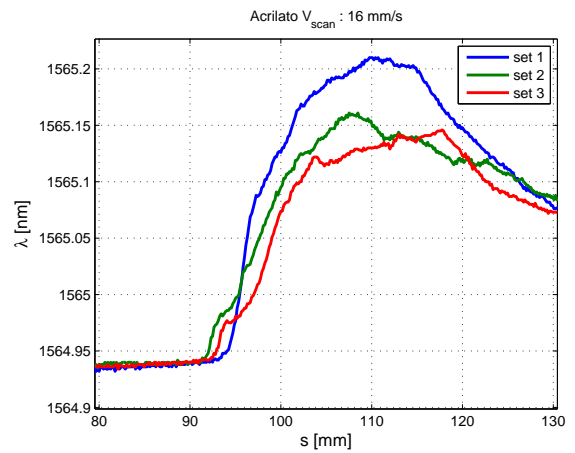
(a) Sensore acrilato, velocità filo caldo 4 mm/s



(b) Sensore acrilato, velocità filo caldo 8 mm/s



(c) Sensore acrilato, velocità filo caldo 13 mm/s



(d) Sensore acrilato, velocità filo caldo 16 mm/s

Figura 4.6: Esempio di risultati delle prove di identificazione sensori con coating in acrilato

infatti già a partire da 8 mm/s le curve coincidono adeguatamente, risultando le meno disperse proprio per tale valore.

Una seconda considerazione riguarda l'ampiezza massima dei picchi, corrispondente alla temperatura sentita dal sensore, che risulta tanto maggiore quanto minore è la velocità poiché il tempo di permanenza del filo caldo sulla zona sensibile aumenta, ciò si nota analizzando la scala delle ordinate per le quattro velocità differenti.

Rimane da definire la presunta posizione del sensore, ricordando la lunghezza  $L_{FBG2} = 3$  mm ed  $L_{FBG4} = 10$  mm, è ragionevole ipotizzare che il sensore si trovi nel tratto crescente dei grafici. Analizzando l'estensione dello spazio tra l'inizio del tratto crescente ed il massimo del segnale ci si accorge come tale estensione sia maggiore rispetto alle lunghezze degli FBG, circa 9 mm per ormoocer ed immedie mentre 11 mm per l'acrilato.

Nasce la necessità di definire un parametro significativo per identificare univocamente la presunta posizione del sensore.

Il valore di picco massimo è stato scartato poiché non sempre chiaramente rilevabile ed inoltre diverso tra set di dati realizzati alla stessa velocità.

La fisica alla base dello scambio di calore può essere analizzata, in prima approssimazione, considerando un irraggiamento tra filo caldo e coating con successiva conduzione tra coating e core. L'aumento di temperatura, supponendo una situazione sempre a regime (rapido transitorio di

riscaldamento di un tratto di sensore  $dx$ ), può essere descritto dalla seguente equazione

$$\dot{Q} = mCp \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

ricordando la trasformazione effettuata  $ds = V_{scan} \cdot dt$ , avendo nominato la potenza termica  $\dot{Q}$ , si ottiene

$$\dot{Q} = mCpV_{scan} \frac{dT}{ds} \rightarrow \frac{dT}{ds} \propto \frac{dT}{dt} \propto \dot{Q} \quad (4.2)$$

Come intuibile dalla pratica, supportato dalla teoria in equazione 4.2, la zona sensibile è riconducibile al tratto di maggior pendenza della curva, tratto in cui la fibra ottica grazie al sensore iscritto risponderà prontamente alla sollecitazione termica.

Il punto di massimo della curva, corrispondente al picco di temperatura, viene raggiunto quando il filo caldo ha sorpassato interamente l'intera zona sensibile rilasciando la maggior quantità di calore ma ciò non è indice della presenza del centro sensore in quanto raggiunto al tempo corrispondente pari al superamento del sensore stesso.

Analogamente si misura una prima zona di aumento della temperatura avente un rateo di crescita limitato, tale fatto è imputabile all'induzione del calore sul sensore quando il filo caldo precede di poco l'inizio degli FBG.

La figura 4.7 può aiutare a comprendere gli effetti sopra descritti e mostra come il sensore possa risentire della temperatura ancor prima e dopo il passaggio del filo caldo stesso sulla zona d'interesse.

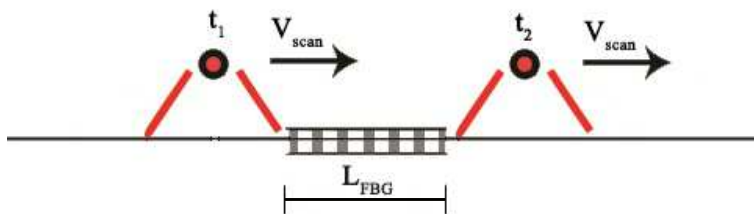


Figura 4.7: Schema dell'irraggiamento sul sensore FBG

Analizzando i dati corrispondenti alle velocità di 4 mm/s, Figura 4.5 4.6, alla luce di quanto espresso in precedenza, si stono stimate le pendenze massime in corrispondenza di:  $s_{FBG2} = 73$  mm,  $s_{FBG3} = 97$  mm,  $s_{FBG4} = 98$  mm, indicando con  $s$  la coordinata spaziale con origine nel sensore di start.

Confrontando tali valori con i rispettivi centri  $c$  della tabella 4.3 si nota come i valori siano tutti molto maggiori rispetto ai previsti.

L'errore può trovare spiegazione considerando il tempo che il calore impiega a diffondere nella sezione della fibra, composta da coating cladding e core. La risposta risulta in ritardo rispetto al passaggio della sorgente di calore sopra il punto considerato.

Per ovviare a tale inconveniente, avanzando l'ipotesi che il ritardo rimanga costante per parametri di prova invariati, si è deciso di procedere ad una scansione nel verso contrario al primo, mediando i valori dei centri trovati con la scansione di andata e quella di ritorno.

Dalle figure 4.8 è evidente l'effetto benefico della sospensione in aria della fibra sensibile. Le cause di tale effetto sono state discusse in precedenza, si nota come i picchi corrispondenti alla nuova struttura di prova (rialzo) siano di ampiezza doppia rispetto ai grafici in rosso, ciò

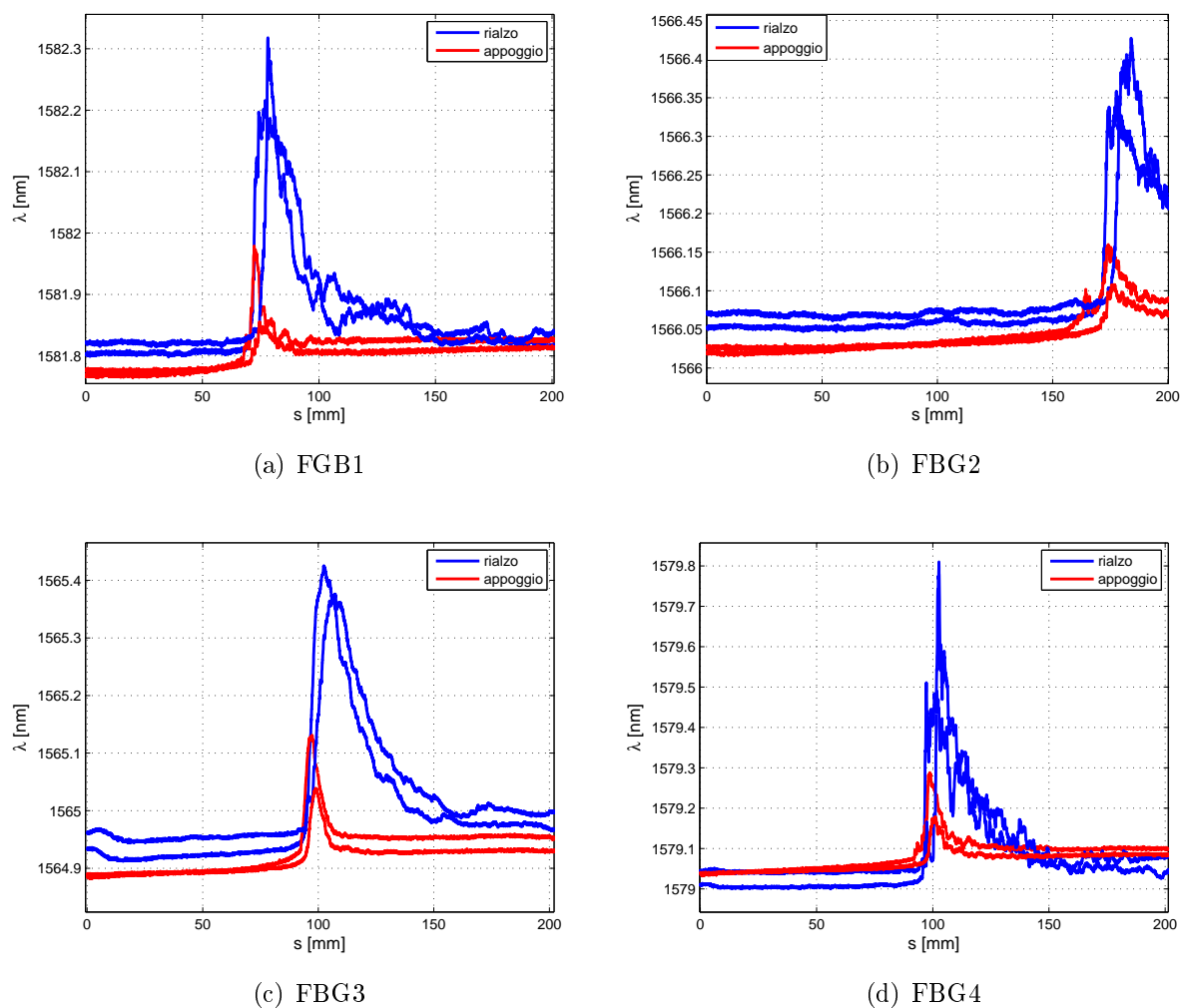


Figura 4.8: Effetto del rialzo di 1 mm sullo spettro dei sensori,  $V_{scan} = 4$  mm/s

migliora la lettura dei dati e diminuisce gli effetti di eventuali errori e disturbi sulla misura.

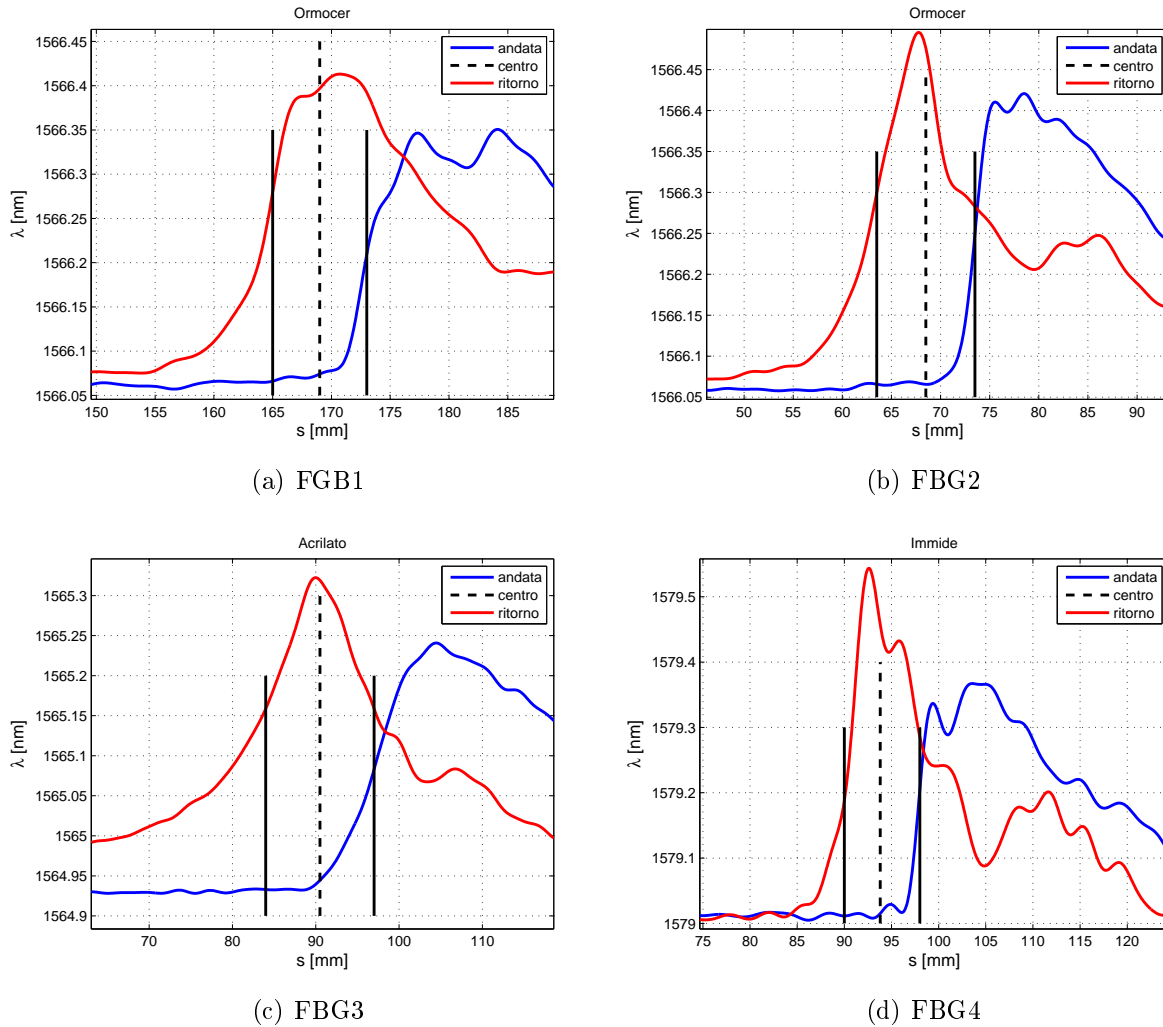
Tutte le prove di identificazione sono state condotte in configurazione 'rialzata'.

Le misurazioni per identificare il centro dei sensori FBG sono state condotte seguendo al procedura corrente:

- Posizionamento sensori su piastra con rialzo
- Regolazione dei parametri, come indicato in tabella 4.2 e  $V_{scan} = 8$  mm/s
- Doppio passaggio di scansione, andata - ritorno
- Identificazione grafica delle zone di pendenza massima
- Calcolo posizione del centro sensore  $C_{FBG}$

Durante il test sono state effettuate tre misure in andata e tre misure in ritorno, i dati in tabella 4.4 rappresentano i risultati delle combinazioni effettuate con i due set di dati migliori in andata e ritorno (quattro combinazioni).

Le figure 4.9 raffigurano la tecnica di processo dei dati, dove si sono indicate con linee nere continue i presunti centri ottenuti dalle scansioni in andata e ritorno, mentre la linea tratteggiata


 Figura 4.9: Identificazione centro sensore,  $V_{scan} = 8 \text{ mm/s}$ 

rappresenta la media delle due, corrispondente alla posizione stimata del centro del sensore. I risultati delle misurazioni sono espressi in tabella 4.4.

	$C_{FGB1}$ [mm]	$C_{FGB2}$ [mm]	$C_{FGB3}$ [mm]	$C_{FGB4}$ [mm]
	168.5	68	91.3	93.8
	168	68	90.8	93.5
	169	68.5	90.5	94
	168.8	68.3	90.5	94
media	168.5	68.2	90.8	93.8

Tabella 4.4: Misure centri dei sensori per le quattro combinazioni selezionate

Dal confronto emerge come il metodo di prova abbia una buona precisione, verificabile attraverso l'unica misura certa a disposizione ossia il passo tra FGB1 ed FGB2 pari a 100 mm. La misurazione effettuata con il filo caldo si avvicina bene alla distanza considerata, inoltre i valori rilevati si collocano all'interno dei marker in posizione accettabile (si ricorda come i sensori non sono precisamente centrati rispetto ai due marker identificativi).

sensore	$C$ [mm]	$c$ [mm]	$\Delta$ [mm]
FBG1	168.5	167	1.5
FBG2	68.2	66	2.2
FBG3	90.8	92.5	-1.7
FBG4	93.8	94	-0.2

Tabella 4.5: Confronto posizione sensori tra rilevazione sperimentale ( $C$ ) e media tra marker ( $c$ )

Il metodo di misurazione della posizione attraverso una sorgente di calore risulta essere una tecnica veloce ed abbastanza precisa per l'identificazione della posizione di sensori FBG in laboratorio.

Un'ultima considerazione, emersa a posteriori durante lo studio dei dati, consiste nell'analizzare la forma delle curve generate dalle scansioni in andata e ritorno, figura 4.10.

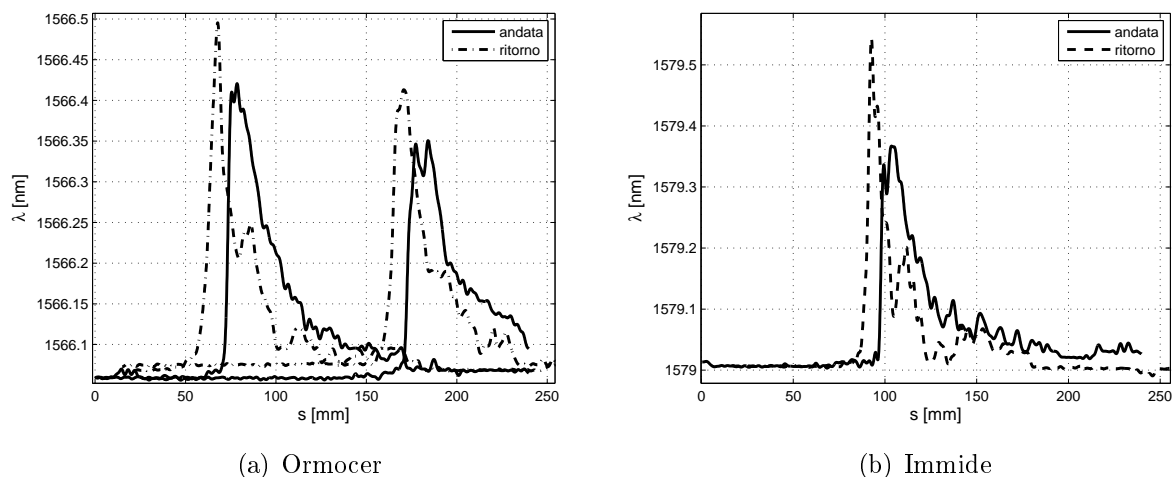


Figura 4.10: Forme generali delle curve di temperature acquisite

Dalle due immagini risulta come le due forme, in corrispondenza della zona sensibile, siano molto simili presentando una rapida salita nella parte sinistra del picco mentre la parte destra presenta una diminuzione meno marcata.

La linea continua è ottenuta spostandosi da 0 a 255 mm, dal grafico è intuibile come il tempo di riscaldamento risulti veloce mentre il raffreddamento sembra essere più lento.

La linea tratteggiata rappresenta la scansione da 255 mm a 0; intuitivamente ci si aspetterebbe un riscaldamento veloce ed un lento raffreddamento (grafici speculari), tuttavia la forma del grafico mostra come il riscaldamento sia lento mentre il raffreddamento abbia un rateo simile al rateo di riscaldamento della scansione in andata.

La questione in esame non è stata approfondita, ma si sono cercate delle spiegazioni possibili, giungendo a due conclusioni:

1. Costruzione dell'attrezzatura di prova non perfetta la quale provoca una diversa dinamica tra le zone anteriori e posteriori ai sensori. Ipotesi difficilmente accettabile poiché il comportamento si manifesta per tutte e 4 i sensori, collocati su 3 fibre differenti.

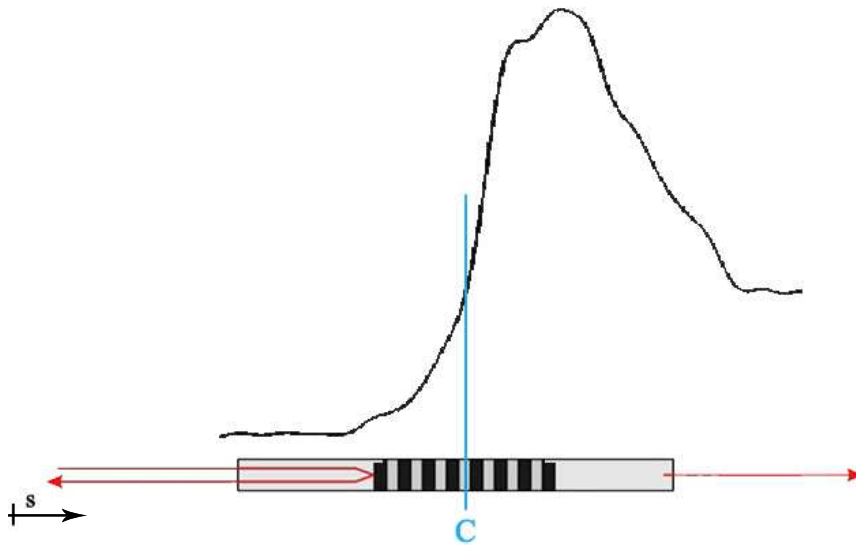


Figura 4.11: Andamento della temperatura lungo il sensore FBG

2. Dipendenza del segnale dalla direzione di riflessione della luce all'interno del core, figura 4.11. La sorgente di calore potrebbe interferire in dipendenza della direzionalità della luce, variando le caratteristiche del fascio riflesso.

### 4.1.2 Conclusioni e possibili sviluppi

Dalle analisi discusse nella precedente sezione si possono trarre diverse conclusioni riguardanti una prima sperimentazione sull'identificazione di sensori FBG con sorgente di calore quasi puntiforme.

- Il sistema, così come descritto, rileva bene le posizioni dei sensori. Si può affermare di avere scostamenti massimi della misura di  $\pm 2$  mm
- La sospensione del filo, sfruttando la riflessione della superficie metallica, migliora il riscaldamento della fibra
- La velocità di scansione ottima è risultata essere di 8 mm/s. Garantisce set di dati con buona ripetibilità, risoluzione spaziale maggiore, essendo la minima velocità (escludendo  $V_{scan} = 4$  mm/s) ed elevata energia termica irradiata.
- Il punto grafico corrispondente al centro del sensore è riconducibile alla prima zona di pendenza massima.
- Risulta necessaria una doppia scansione per mediare i dati e rilevare esattamente la posizione
- L'andamento spaziale del picco di  $\lambda_b$  sembra essere correlato alla direzione di riflessione della luce nella fibra. Tale considerazione merita di essere analizzata meglio e compresa, le considerazioni qui presentate sono delle prime ipotesi.  
Se verificata, sarà possibile pensare ad un utilizzo di tale effetto come misura della direzionalità del fascio ottico avendo un'informazione indirettamente aggiunta nella fibra.

Dai test effettuati è possibile affermare come la macchina per il tagli a filo caldo può essere usata con buoni risultati nonostante non permetta una scansione discreta ed un arresto del filo in determinate posizioni. Risulterebbe interessante indagare altre tecniche di scansione, ad esempio con posizione di riscaldamento fisso misurando il tempo impiegato da  $\lambda_b$  per arrivare a regime. Si può pensare a differenti tecniche di riscaldamento, di maggior precisione, al fine di realizzare un macchinario apposito (eventualmente portatile) per l'identificazione dei sensori FBG.

L'uso di una sorgente calda come fonte di interrogazione risulta economica e facilmente reperibile tuttavia non garantisce precisioni elevate.

Utilizzando moderni interrogatori esistono tecniche ottiche di scansione che permettono di rilevare con precisione la posizione di Bragg Grating iscritti nella fibra, sfruttando la misura del tempo del segnale luminoso riflesso. Per la decisione della tecnica di misura adatta si dovranno valutare i costi, disponibilità e precisioni richieste al fine di effettuare una scelta mirata.

## 4.2 Tecnologia di protezione FO

La principale attività tecnologia svolta durante il lavoro di tesi è stata la determinazione della procedura tecnologica per la realizzazione di un longherone, realizzato in composito carbonio-epossidica, con inglobati sensori FBG per il monitoraggio delle deformazioni.

Il longherone, che verrà utilizzato come struttura test per indagare diverse tecniche di monitoraggio con fibra ottica, è stato realizzato seguendo le indicazioni fornite nel precedente lavoro di tesi [11], in cui si studiato attraverso l'analisi FEM la migliore sequenza di laminazione e posizionamento dei sensori ottici.

Le criticità tecnologiche legate alla realizzazione del longherone risiedono principalmente nelle fasi di inglobamento dei sensori e successivo ciclo di cura in autoclave.

Nella progettazione dell'attrezzatura e nella determinazione della sequenza tecnologica si sono dovuti considerare aspetti critici, quali:

- Evitare la rottura delle fibre durante l'intero ciclo di produzione
- Protezione della FO in corrispondenza delle zone sensibili, come l'interfaccia all'uscita del laminato
- Proteggere le fibre ottiche dalla pressione del sacco in autoclave
- Gestire un'unica fibra ottica, con tutti i sensori iscritti, attraverso i percorsi stabiliti, garantendo il corretto passaggio tra soletta superiore ed inferiore
- Disporre correttamente la FO lungo tutta l'estensione della soletta, garantendo la corretta posizione dei sensori FBG sia in apertura che in profondità
- Progettare l'attrezzatura in grado di resistere alle temperature e pressioni massime imposte durante il ciclo di cura
- Evitare fuoriuscite di resina
- Ottenere le dimensioni finali come da progetto, garantendo la miglior finitura superficiale
- Ottenere un manufatto privo di difetti non desiderati (verranno introdotti difetti artificiali in precise zone predeterminate)

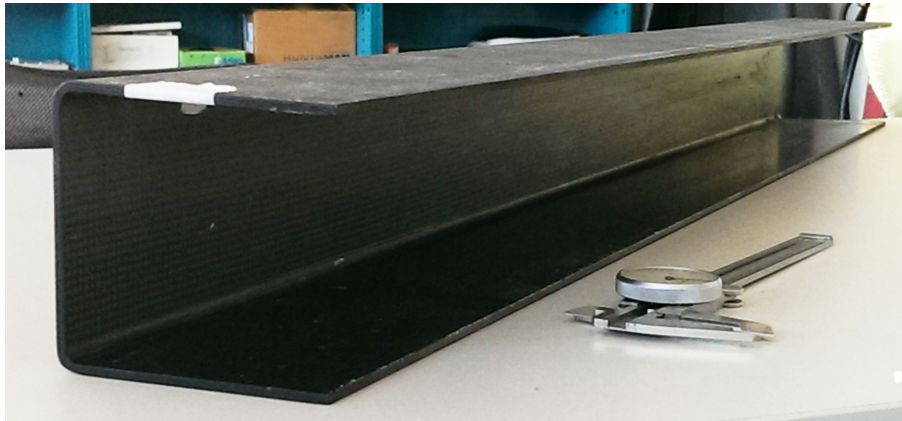


Figura 4.12: Longherone semilavorato

- Gestione del drop-off delle lamine costituenti la soletta
- Considerare l'ingombro del laminato ed il peso dello stampo nella definizione della procedura di realizzazione del manufatto

Il longherone è realizzato in tessuto fabric Hexcel Hexply M49, avente profilo a C e lunghezza di 1 m, come visibile in figura 4.12.

Le fasi principali della realizzazione sono tre: laminazione del longherone a C, inglobamento dei sensori e laminazione delle solette, assemblaggio finale.

La laminazione del semilavorato a C segue la sequenza riportata in tabella 4.6

ply	orientazione [°]	ply	orientazione [°]
1	$\pm 45$	9	$\pm 45$
2	0 – 90	10	0 – 90
3	$\pm 45$	11	$\pm 45$
4	0 – 90	12	0 – 90
5	$\pm 45$	13	$\pm 45$
6	$\pm 45$	14	$\pm 45$
7	$\pm 45$	15	$\pm 45$
8	0 – 90		

Tabella 4.6: Sequenza di laminazione del profilato a C

Dati del produttore indicano come lo spessore, dopo il ciclo di cura, di ogni lamina sia pari a 0.2 mm, questo comporta uno spessore nominale del profilo a C di 3 mm. Dalle misurazioni effettuate dopo la realizzazione del componente è emerso come lo spessore reale sia leggermente superiore, soprattutto in prossimità delle zone di estremità del longherone, zone in cui è prevista l'interfaccia con le fibre ottiche.

Le fibre ottiche verranno inglobate, secondariamente, durante la laminazione delle solette. La figura 4.13 rappresenta il concetto di inglobamento di un'unica fibra ottica, si nota il passaggio della fibra dalla soletta superiore alla inferiore e lo stampo in alluminio.

Il primo problema affrontato è stato lo sviluppo di un'attrezzatura in grado di proteggere la FO, evitando il più possibile sforzi concentrati e brusche pieghe (la fibra non deve seguire lo spigolo del laminato o dello stampo) garantendo la tenuta dell'attrezzatura alla resina fuoriuscente durante le fasi di reticolazione.



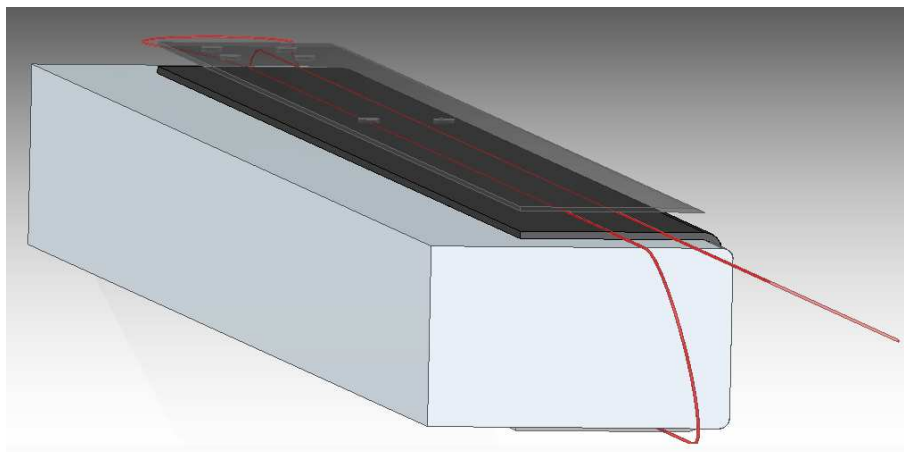
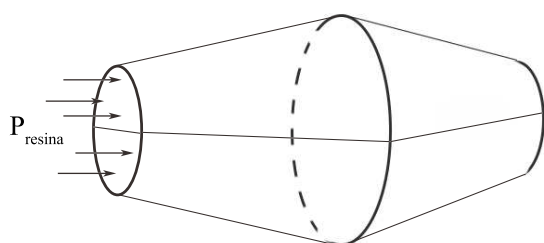
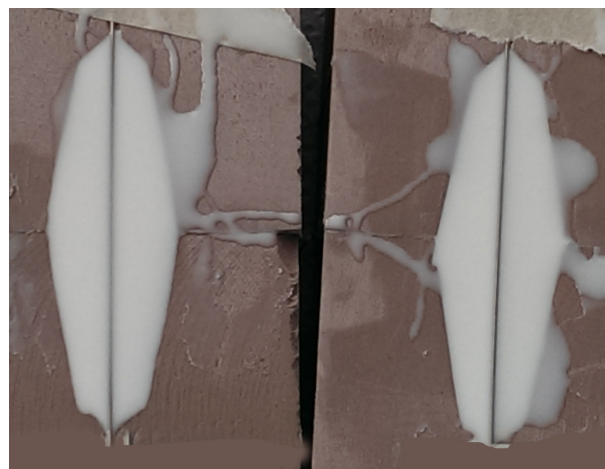


Figura 4.13: Esempio di percorso delle fibre ottiche

Per provvedere alla protezione della fibra ed al bloccaggio della fuoriuscita di resina dal laminato, si è deciso di adottare un inserto in gomma siliconica, materiale già usato con successo in precedenti attività simili. L'idea alla base è l'utilizzo dell'inserto in gomma in corrispondenza della FO all'interno di una cava, ottenuta fresando una sponda in alluminio la quale assolve la funzione di arginare la resina ed ottenere la corretta superficie del laminato nella zona di uscita della fibra.



(a) Schema della geometria



(b) Colata della gomma per inserti

Figura 4.14: Rappresentazione del concetto di inserto conico

La prima forma pensata per l'inserto fu una geometria conica, figura 4.14, divisa in due parti simmetriche all'interno delle quali era prevista una sede per il passaggio della fibra protetta da una guaina di rivestimento, come intuibile dall'immagine 4.14 (b).

La doppia conicità è stata studiata per avere sufficiente materiale che facesse tenuta, minimizzando l'area a contatto con il laminato su cui agisce la pressione della resina ( $P_{resina}$ ). Minimizzare tale superficie porta due vantaggi; il primo risulta di carattere estetico in quanto la resina potrà conformarsi solamente alla superficie morbida di gomma mentre la sponda in alluminio garantisce una buona finitura, la seconda e più importante motivazione è l'effetto cuneo che il cono posteriore produce, evitando lo spostamento al di fuori della sede, provocato dalla pressione della resina durante il ciclo con conseguente sollecitazione della FO.

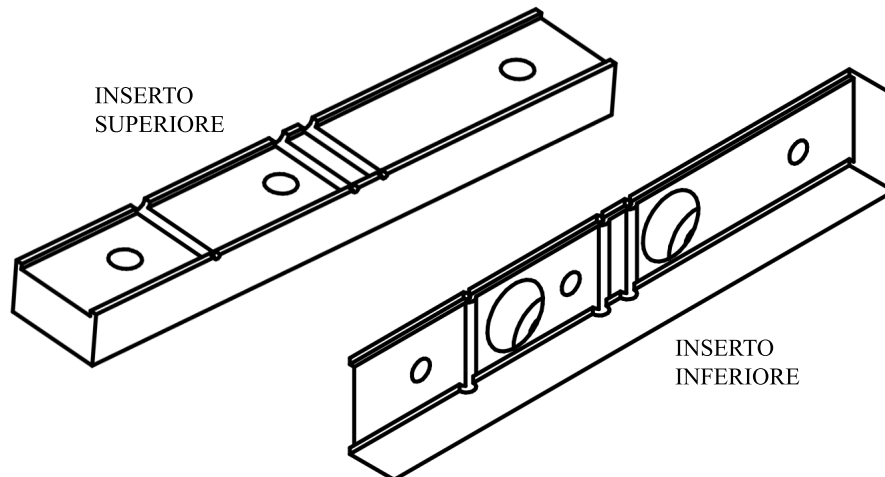


Figura 4.15: Geometria definitiva degli inserti per la protezione delle FO

La pressione agente sulla faccia a contatto con il laminato provoca l'allungamento dell'inserto in gomma, con conseguente estrusione posteriore e sollecitazione del tubetto di protezione della fibra ottica. Per limitare le problematiche appena discusse si è pensato ad una soluzione avente l'area a contatto con il laminato minore possibile ma sufficiente a proteggere e garantire tenuta all'interfaccia con il materiale composito, mentre l'area posteriore deve essere maggiore possibile così da limitare la lunghezza estrusa.

Qualsiasi accoppiamento tra inserti in gomma, come i due semiconi, devono avere una scanalatura di dimensioni simili al tubo di protezione della FO poiché tale accorgimento permetterà una miglior conformazione dell'elastomero attorno al tubicino, evitando così le asole che altrimenti si formerebbero ai lati del tubicino, compromettendo la tenuta.

Successivamente l'idea di una forma conica è stata scarta per diversi motivi come la difficoltà di realizzare la sede per il cono asportando materiale dalla sponda in alluminio, la difficile realizzazione della scanalatura nell'inserto in gomma e la gestione degli inserti in una futura applicazione su stampi complessi.

Inoltre la soluzione pensata non garantisce la tenuta metallo su metallo che si crea dall'accoppiamento tra la parte superiore ed inferiore della sponda poiché l'elastomero, che genera la tenuta, è limitato alla zona circostante la FO.

Alla luce delle considerazioni proposte, si è deciso di cambiare la conformazione dell'inserto, ricercando una soluzione più robusta e facilmente gestibile.

**Inserti :** La configurazione definitiva degli inserti utilizzati per la produzione del manufatto è composta da due parti, una superiore ed una inferiore come rappresentato dalla figura 4.15. In entrambe i componenti si sono ricavate delle sedi, per fresatura, così da facilitare l'alloggiamento del tubo di protezione della FO. Inoltre le sedi devono essere collocate alle quote esatte perché serviranno come riferimento per il corretto posizionamento delle fibre ottiche, fungendo da dima ed aiutando l'operatore.

Il ribasso centrale, presente in entrambe gli inserti, è stato studiato per poter alloggiare la gomma siliconica. Nella soluzione adottata, la geometria della gomma è molto semplice e disposta continuamente su tutta la lunghezza dell'inserto garantendone la tenuta. La gomma dovrà avere una forma rettangolare, contenuta tra le due sponde dell'inserto, ed uno spessore qualche decimo di millimetro superiore alla profondità della cava, così da garantire interferenza e tenuta una volta serrati i due inserti.

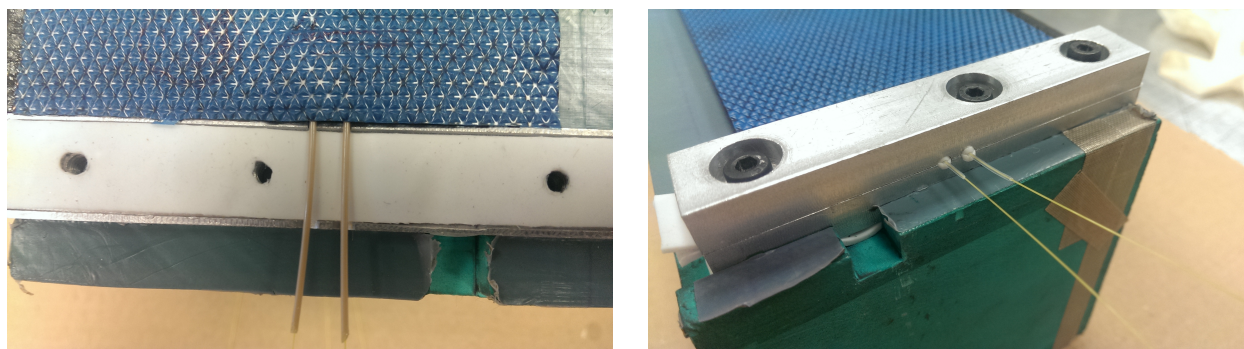


Figura 4.16: Foto inserti e tecnica di protezione delle FO

Per il serraggio ed il fissaggio sullo stampo è stato necessario eseguire delle forature e filettature. Nell'inserto superiore sono allocati tre fori passanti non filettati i quali si accoppieranno con i reciproci fori dell'inserto inferiore, quest'ultimi filettati per garantire il serraggio tra le parti. L'inserto inferiore reca altri due fori passanti, con alesaggio per ospitare la testa delle viti, che verranno accoppiati con i rispettivi fori filettati eseguiti sullo stampo. Questi ultimi sono indispensabili per il corretto posizionamento dell'inserto e dei percorsi ottici rispetto alla posizione del laminato.

Gli inserti sono la parte fondamentale dell'attrezzatura di laminazione, attrezzatura composta da più parti che verranno analizzate di seguito. La figura 4.17 mostra l'insieme dei componenti progettati al fine di realizzare il longherone strumentato con le fibre ottiche.

L'attrezzatura si compone delle seguenti parti:

1. Stampo in alluminio, lavorato per ricavare le sedi degli inserti
2. Inserti superiori ed inferiori
3. Piastre laterali, a formare il box di protezione per le FO
4. Aste di supporto per le piastre
5. Copertura box, non rappresentata in figura 4.17
6. Spessori in gomma siliconica
7. Viti a brugola

L'attrezzatura presentata è stata sviluppata per poter resistere alla pressione e temperatura del ciclo di cura del materiale composito M49.

La sede per gli inserti, ottenuta fresando lo stampo, deve avere una profondità precisa che permetta di avere la stessa altezza tra l'inserto inferiore e la fibra ottica posizionata sul laminato. Ciò evita discontinuità e problemi di sforzi di taglio sul tubo protettivo della fibra.

La soluzione presentata deve essere replicata su tutti e quattro i lati delle solette.

Il semilavorato a C non presenta le stesse altezze su tutti i lati, differendo di qualche decimo. Risulta impensabile progettare ad hoc ogni inserto per un ben preciso lato, inoltre il sistema deve essere flessibile e riutilizzabile.

Per ottenere maggiore flessibilità si è deciso di interporre uno strato di gomma bianca, dello spessore di circa 1.5 mm, tra la cava sullo stampo e l'inserto inferiore. La gomma viene compressa avvitando le due viti a brugola dell'inserto inferiore nei fori filettati ricavati sullo

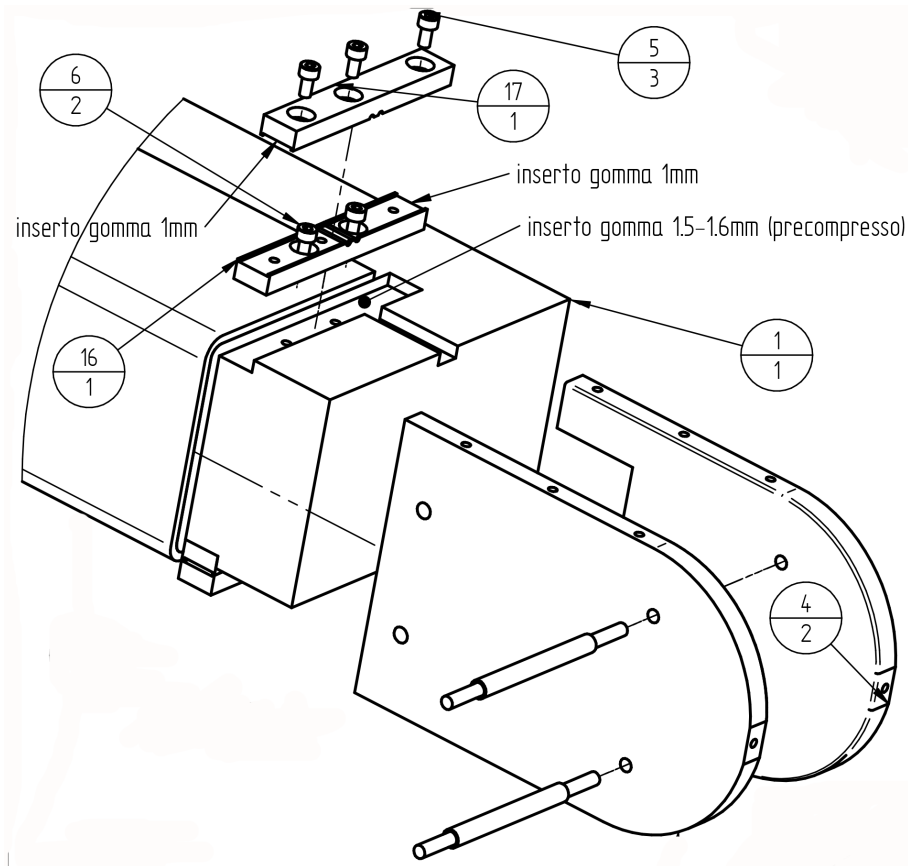
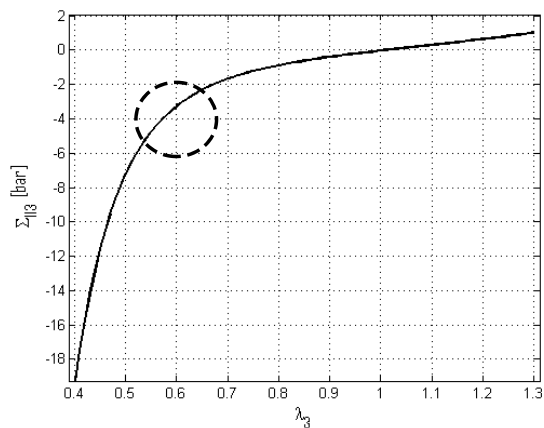
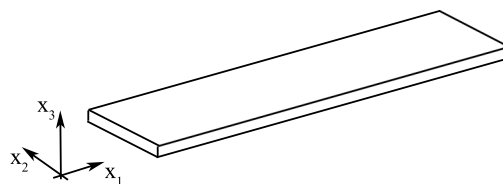


Figura 4.17: Attrezzatura di laminazione completa

stampo, serrando con più forza si comprime la gomma, regolando l'altezza fino ad allineare la fibra ottica con le cave ricavate negli inserti. La gomma si comporta come una molla regolata dal serraggio delle viti.



(a) Curva sforzo-allungamento per gomma siliconica, approssimazione modello di Odgen secondo ordine



(b) Assi di riferimento

Figura 4.18: Analisi dello stato di sforzo sullo spessore in gomma compresso

Le viti impediscono il movimento dell'inserto solamente nel verso positivo della direzione  $x_3$ , mentre una pressione esercitata sugli inserti potrà provocare un'ulteriore schiacciamento della gomma siliconica, rischiando di introdurre sforzi di taglio sulla FO poiché gli inserti, abbassandosi, si comporterebbero come un coltello rispetto alla fibra fissa sul laminato. Per evitare ciò è necessario prevedere un preserraggio della gomma ad un valore di sforzo pari alla pressione massima che si raggiungerà in autoclave.

La figura 4.18(a) mostra lo studio preliminare, condotto approssimando la gomma con modello elastomerico di Odgen del secondo ordine, dello sforzo agente in direzione 3 al variare dell'allungamento  $\lambda = \frac{l_f}{l_i}$ . Si nota un cambio netto di pendenza per  $\lambda_3 = 0.5$  ciò significa che applicando una pressione fino ai 3 bar il materiale risponde in maniera 'morbida', aumentando la propria rigidità per valori di sforzo superiori.

Il che verrà eseguito ha pressione massima di 4 bar, è necessario precaricare la gomma fino a valori prossimi alla massima pressione, ossia  $\lambda_3 = 0.6 \pm 0.05$ , che per uno spessore iniziale di 1.5 mm si traduce in  $l_f = 0.9 \pm 0.1\text{mm}$ , avendo altresì ottenuto la possibilità di recuperare eventuali differenze di spessori del laminato non esattamente uniformi.

**Piastre laterali :** Le piastre di copertura laterali sono gli elementi che, insieme alla lamiera di copertura, costituiscono i box di protezione, ospitando al loro interno la fibra ottica passante da una soletta all'altra.

Le piastre devono resistere alla differenza di pressione generata durante il ciclo ed essere spesse sufficientemente ad ospitare i fori per l'assemblaggio con la copertura.

Come mostra la figura 4.17 le piastre sono montate a sbalzo rispetto allo stampo, esse risentiranno della pressione deformandosi verso l'interno, introducendo un carico di compressione nella copertura montata superiormente. Per ovviare al problema si sono introdotti dei vincoli, costituiti da due barre in acciaio interposte tra le piastre aventi lo scopo di limitare la deformazione, assorbendo i carichi. Inoltre le aste solidarizzano ed irrigidiscono le due piastre le quali sono fissate allo stampo principale grazie al bloccaggio, effettuato con due viti, di una sola delle due piastre.

**Copertura box :** Il box di protezione è completato assemblando la lamiera di rivestimento, fissata mediante 14 viti alle due piastre.

La copertura è realizzata in lamiera di alluminio 2024, calandrata per adattarsi alla forma specifica.

Per la definizione dello spessore adatto si è studiata la migliore configurazione che permettesse di resistere alla differenza di pressione tra interno ed esterno box e la facilità di realizzazione, scegliendo il minimo spessore che garantisce la resistenza alla pressione.

Lo studio è stato condotto analizzando la configurazione con l'ausilio di programmi CAD e FEM, verificando zone critiche e spessori adeguati. Il risultato finale ha portato alla scelta di una lamiera di spessore 2 mm con fori per le viti di diametro 4 mm, dimensioni dei fori maggiori generano sforzi elevati in prossimità delle forature.

Dalle analisi si è potuto notare come le posizioni dei fori debbano essere adeguatamente distanti dal bordo interno delle coperture poiché la sovrapposizione della deformazione introdotta dallo spigolo della piastra di appoggio e dalla presenza del foro genererebbero picchi di sforzo elevati.

Dall'analisi della configurazione finale adottata, come mostrato in figura 4.20, si osserva uno sforzo massimo pari a circa 150 MPa, inferiore al limite di snervamento del materiale utilizzato (280 MPa).

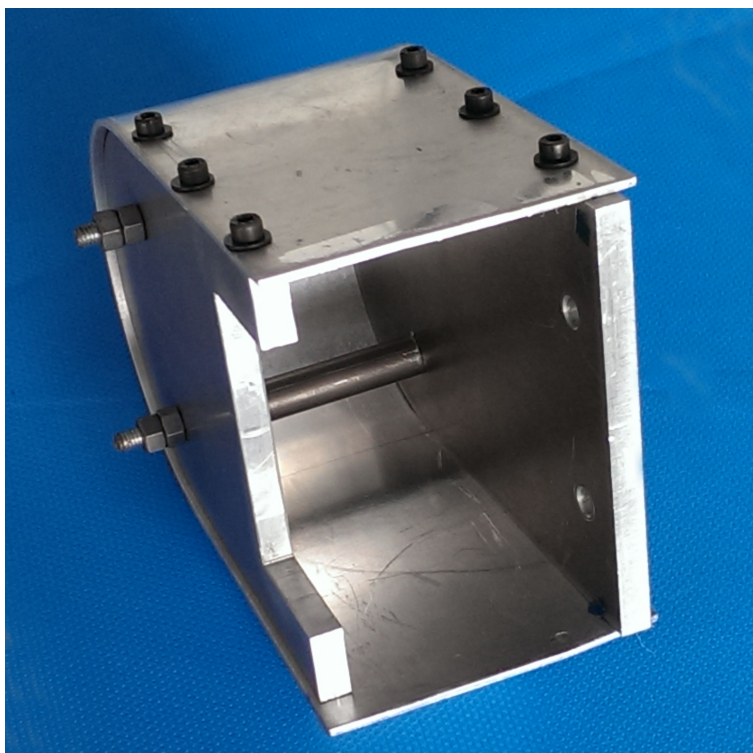


Figura 4.19: Box di protezione

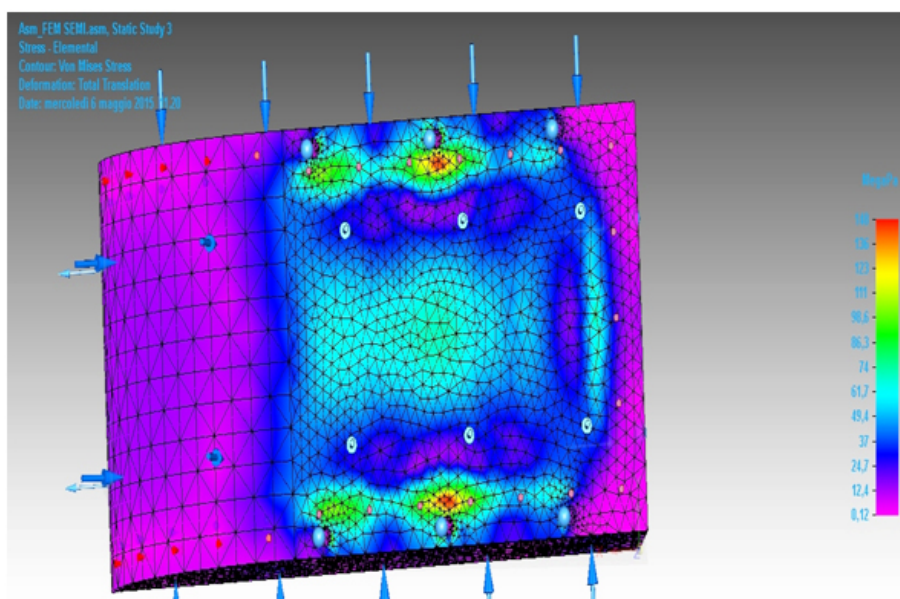


Figura 4.20: Analisi FEM del box di protezione



### 4.3 Sviluppo della tecnologia di produzione del longherone

Nel presente paragrafo verranno analizzati i componenti realizzati attraverso la tecnologia descritta precedentemente, mostrando i manufatti finali e descrivendo i passaggi implementati per la corretta definizione della procedura di manufacturing.

Prima di procedere alla realizzazione del manufatto finale si è verificato il corretto funzionamento dell'attrezzatura progettata, realizzando dei componenti simili all'originale ma di dimensioni inferiori.

Si sono prodotti due travi aventi sezione a C di dimensione pari al longherone finale ma di lunghezza inferiore, su cui sono stati effettuati due inglobamenti di fibre ottiche. Inoltre si è potuto verificare la migliore tecnica per la gestione del drop-off delle lamine.

Lo stampo adottato per la verifica della tecnologia è stato realizzato in RenShape<sup>®</sup> BM5055, resina epossidica di colore verde, materiale facilmente macchinabile ed in grado di resistere alle temperature massime raggiunte in autoclave.

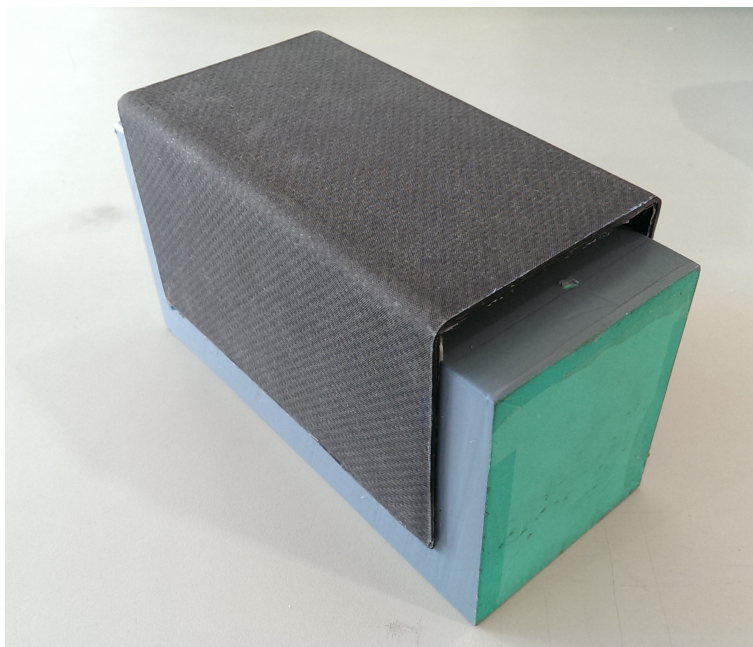


Figura 4.21: Stampo e semilavorato di prova

La prima attività svolta è stata la realizzazione del semilavorato, effettuato secondo la corretta sequenza di laminazione riportata in tabella 4.6.

Successivamente si sono effettuate le lavorazioni di fresatura dello stampo, così da ricavare le sedi per alloggiare gli inserti e le filettature per la solidarizzazione del box con lo stampo.

Disponendo di tutta l'attrezzatura composta di stampo, laminato a C, inserti, viti e box è stato possibile procedere con la laminazione delle solette e l'inglobamento delle fibre ottiche.

#### 4.3.1 Finitura superficiale e drop off

Le solette sono realizzate in tessuto fibra di carboni-epossidica, Hexcel Hexply M49, ognuna costituita da 10 lamine disposte in direzione  $0^\circ - 90^\circ$ , per uno spessore complessivo di 2 mm.

Le solette terminano con un raccordo, sono state eseguite due sequenze differenti di drop-off per verificare la migliore soluzione da adottare nel manufatto finale.

Volendo garantire una buona finitura superficiale è necessario disporre uno strato di peel-ply

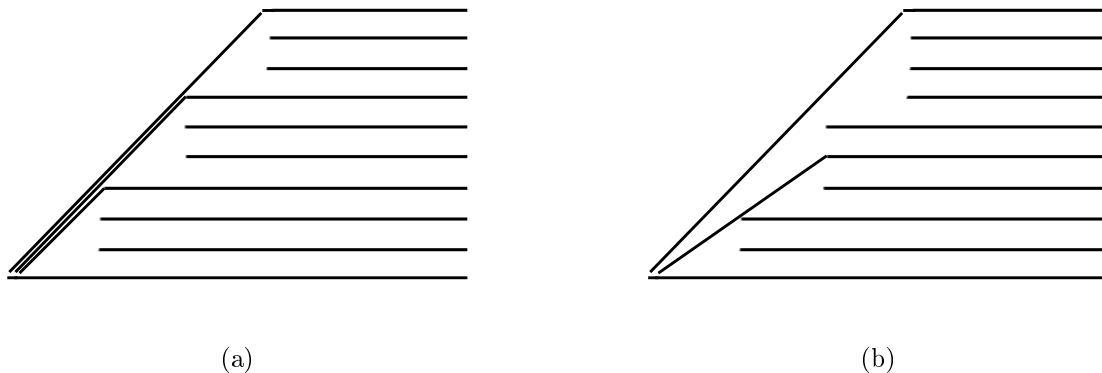


Figura 4.22: Sequenze di drop off delle lamine

sopra l'ultima pelle di carbonio.

Per ottenere la forma del raccordo migliore possibile si sono sperimentate due cartellette, la formata da 2 ply di tessuto di carbonio, la seconda di gomma. La soluzione migliore è risultata essere la seconda, infatti la gomma meglio si deforma e segue il raccordo delle lamine.

Ulteriore vantaggio risiede nella capacità della gomma di espandersi leggermente, andando a colmare gli interstizi causati dalla non precisa forma. Differentemente, la cartelletta in carbonio deve sormontare perfettamente la soletta. Se così non fosse si formerebbero degli interstizi in prossimità degli inserti causando la risalita della resina ed una finitura non gradevole, come successo durante la prima prova rappresentata in figura 4.23 (b).

Si è provato ad utilizzare localmente della gomma espandente, posta superiormente alla cartelletta in gomma grigia, con l'intento di colmare i vuoti durante il ciclo di cura.

Con la soluzione adottata si è ottenuto uno spigolo ben formato ma si sono introdotti ulteriori difetti legati alla sovrappressione localizzata generata dall'espansione dell'elastomero.

Concludendo, la soluzione più affidabile è risultata essere l'adozione di una cartelletta in gomma grigia, sovrapposta ad uno strato di peel-ply, la quale avvolga il laminato, avendo cura di dimensionarla con estrema precisione così da adattarsi precisamente.

Non si sono notate differenze per le due sequenze di drop-off provate.

### 4.3.2 Inglobamento delle fibre ottiche

Le fibre ottiche devono essere disposte, precisamente, lungo percorsi ben determinati.

Il progetto finale prevede l'inglobamento di fibre in Ormocer, differentemente, durante le laminazioni di verifica tecnologica, si sono utilizzate FO con coating in poliacrilato non sensorizzate.

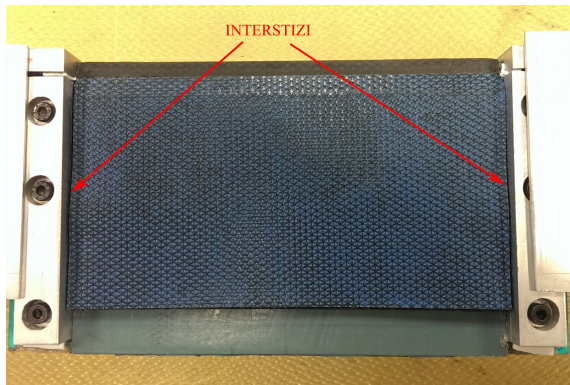
La figura 4.24 mostra la disposizione delle FO lungo la soletta. Le fibre devono essere inglobate tra la seconda e la terza lamina della soletta.

Per garantire la protezione delle fibre all'uscita dal laminato è necessario utilizzare una protezione, locale, costituita da un tubetto di materiale plastico.

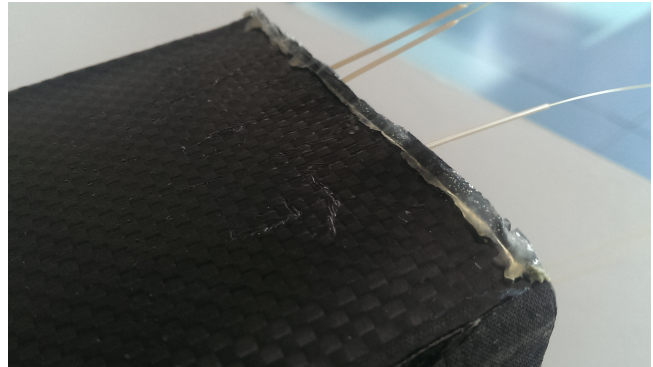
Il tubetto deve essere forato per poter garantire il passaggio della FO, con un diametro esterno non eccessivo.

Durante le laminazioni sono stati utilizzati tubetti con diametro esterno pari a 1 mm, di due differenti materiali, PEEK (beige) con caratteristiche meccaniche elevate e Nylon (trasparente). La corretta procedura di protezione delle FO mediante tubi protettivi, necessita di occludere

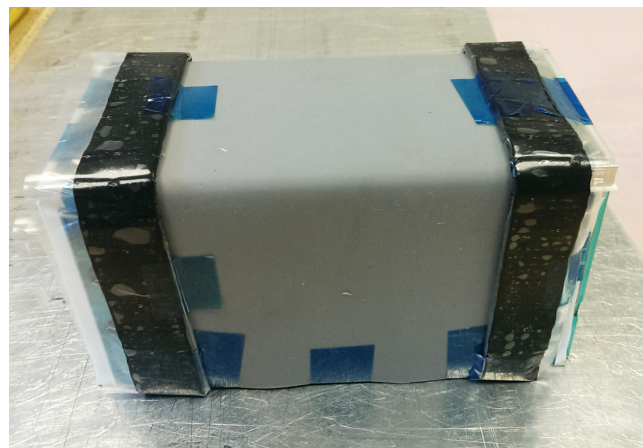




(a) Laminazione della soletta



(b) Imperfezione sul lato del laminato



(c) Cartelletta in gomma grigia più gomma nera espandente

Figura 4.23: Prove di laminazione delle solette

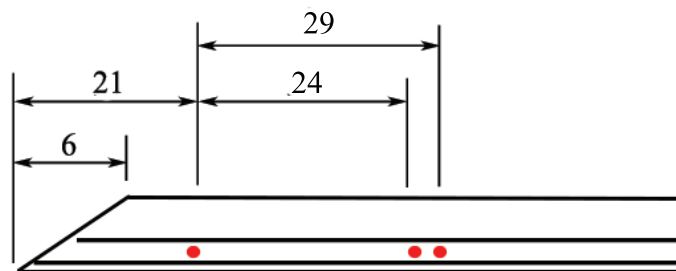


Figura 4.24: Quote dei cammini ottici

con della colla gli interstizi presenti tra la fibra ed il diametro interno del tubetto. Se così non fosse, durante il ciclo di cura, la resina fluidificando risalirebbe per capillarità all'interno dei tubetti generando sollecitazioni di taglio sulla fibra durante la successiva reticolazione, con probabilità di rotture. Inoltre si rischierebbe di veicolare la resina dal laminato all'interno del box di protezione.

L'incollaggio deve avvenire durante la fase di deposizione. La colla usata deve garantire la tenuta ed avere la capacità di rammollimento alle alte temperature, quando la pressione dell'autoclave raggiunge il massimo, così da assorbire eventuali sforzi presenti.

Si è scelto una colla epossidica bi-componente.

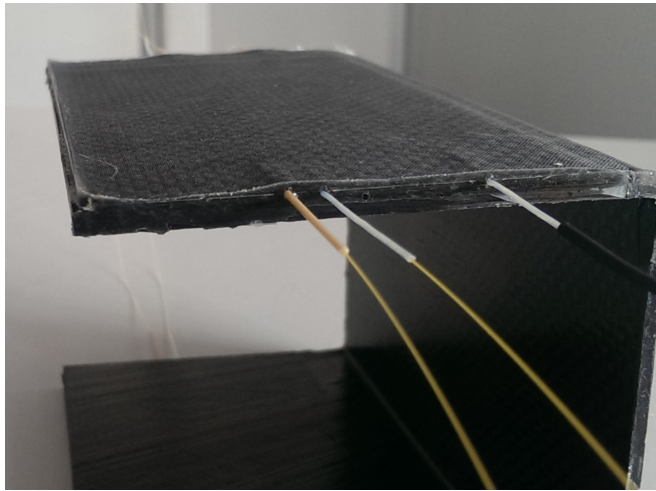
Durante la deposizione delle fibre, i tubicini devono essere parzialmente inglobati per un tratto di circa 20 mm.



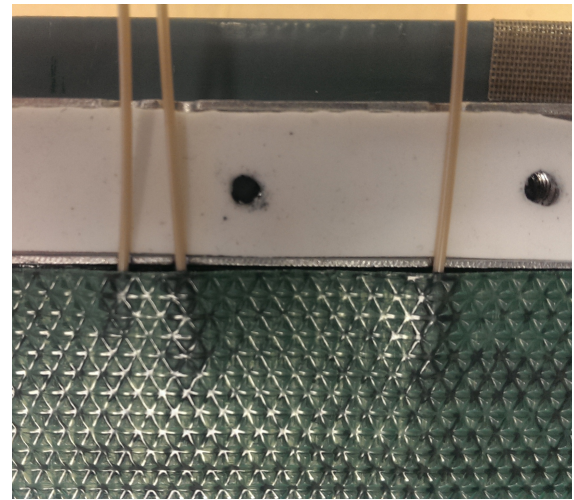
Figura 4.25: Attrezzatura di laminazione

Sono state realizzati due provini, ognuno dei quali portava due percorsi ottici in una soletta e tre nell'altra. I punti di uscita delle fibre dal laminato sono 10 per provino.

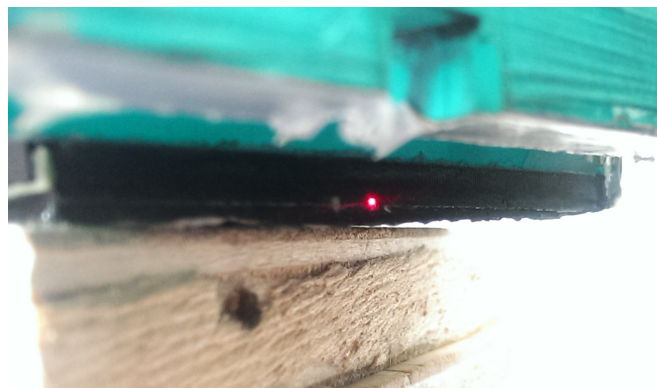
Concludendo, la tecnologia messa a punto ha protetto le fibre ed impedito il passaggio della resina, i tubetti non hanno subito deformazioni plastiche, tutte e 20 le interfacce hanno resistito ed il box di protezione ha retto adeguatamente.



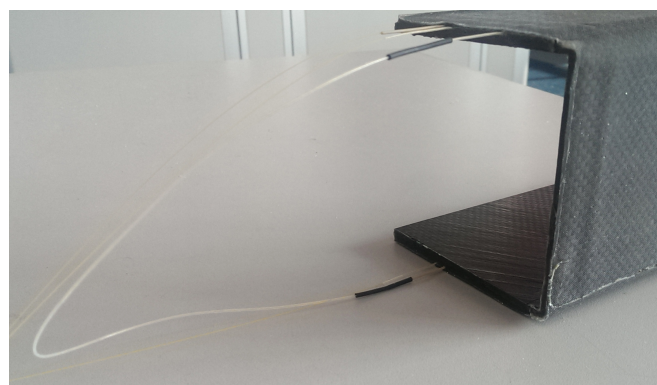
(a) Risultato finale



(b) Inglobamento dei tubetti protettivi



(c) Luce trasmessa all'interno della fibra



(d) Continuità di percorso tra soletta superiore ed inferiore

Figura 4.26: Inglobamento delle fibre ottiche nel laminato

## 4.4 Attrezzatura di prova definitiva

Le soddisfacenti prove effettuate sul laminato campione hanno permesso di procedere alla realizzazione del manufatto finale, con la tecnologia studiata, inserendo i sensori DTG nel laminato. Differentemente da quanto studiato nel progetto numerico precedentemente svolto [11], è stato necessario apportare delle modifiche sia alle centine in alluminio che alla posizione e numero dei difetti, nonché al numero e tipologia di sensori ottici.

### 4.4.1 Laminazione solette ed inglobamento dei sensori in FO

Rispetto al progetto originale [11], sono state effettuate delle modifiche al numero di sensori e posizione dei difetti inglobati.

Sono stati inglobati solamente due array DTG da 10 e 20 FBG ciascuno, rispettivamente sulla soletta superiore ed inferiore in corrispondenza dei due difetti, così da simulare una reale delaminazione.

Inoltre, lungo i percorsi originariamente studiati per ospitare i singoli sensori FBG, sono state inserite ugualmente fibre ottiche in polimide non sensorizzate, con l'intenzione di fornire un cammino luminoso per l'interrogazione attraverso la tecnica Brillouin.

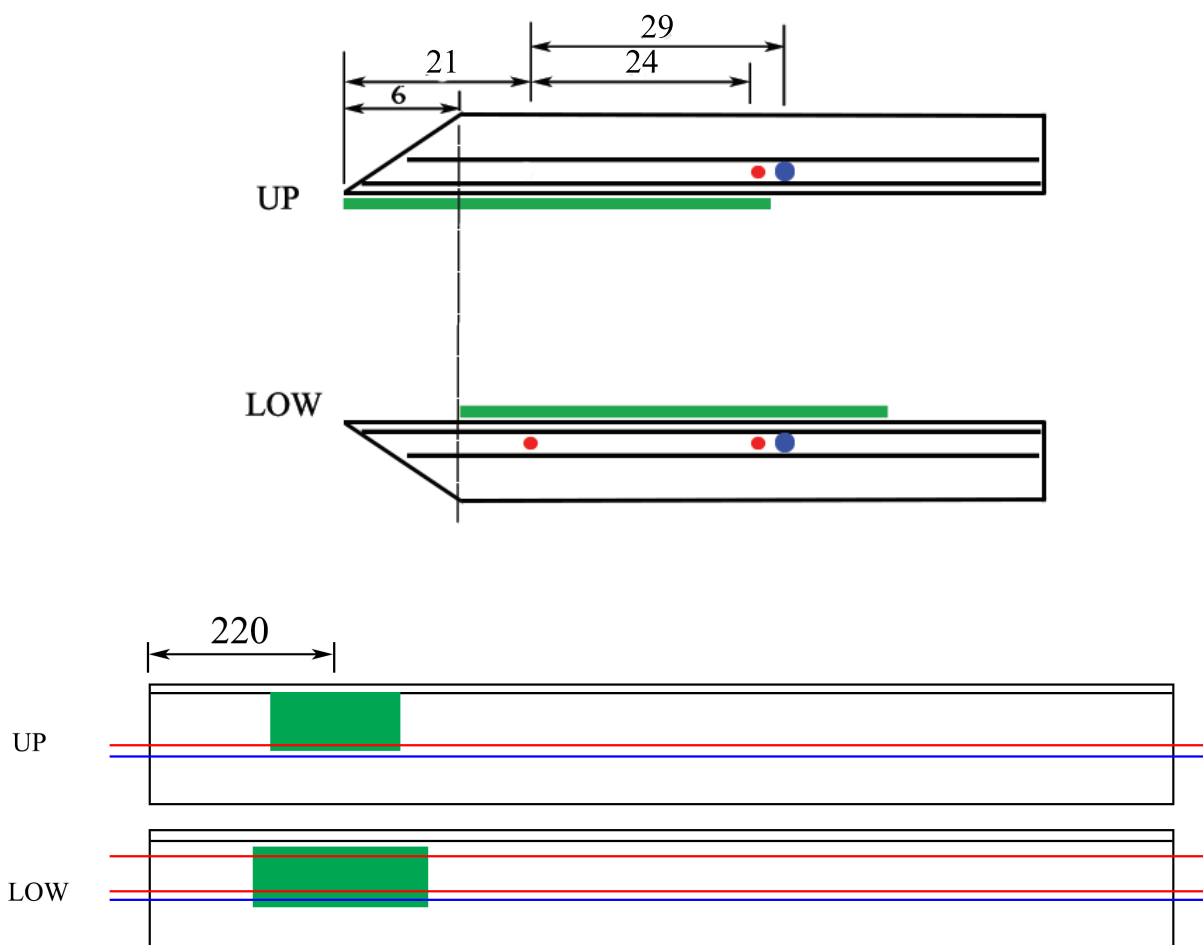


Figura 4.27: Posizionamento dei difetti e delle FO nel laminato

posizione	difetto	fibre ottiche		
		21 mm	45 mm	50 mm
UP	56x48 mm	-	immide	ormocer 10 DTG
LOW	72x48 mm	immide	immide	ormocer 20 DTG

Tabella 4.7: Posizionamento difetti e FO, le quote sono riferite all'inizio della soletta

Le immagini 4.27 mostrano le disposizioni all'interno del laminato dei difetti e dei percorsi ottici. I rettangoli verdi rappresentano le delaminazioni artificialmente imposte, posizionate all'interfaccia tra la C e la prima lamina delle solette. I difetti inglobati sono stati due, posizionati in modo tale che il loro centro sia distante 220 mm dal bordo del laminato.

Il difetto inglobato nella soletta superiore (up) ha dimensioni 48x56 mm ed è posizionato partendo dal bordo dello smusso, il difetto inglobato nella soletta inferiore ha dimensioni 72x48 mm ed è posizionato a 6 mm dall'inizio dello smusso, ossia in corrispondenza della fine del drop-off.

Le fibre ottiche sensorizzate con array sono raffigurate dal colore blu mentre le fibre in immide sono schematizzate in rosso.

Dalle immagini si nota come il percorso del sensore (blu) nella soletta superiore sia esterno al difetto contrariamente nella soletta inferiore la FO passa sopra la zona difettosa. Tale disposizione è stata scelta con lo scopo di ottenere una configurazione di danno difficilmente rilevabile ed una seconda più facilmente distinguibile. Le fibre ottiche inglobate hanno le seguenti caratteristiche:

Polimide  $D_{ext} = 170 \mu m$ ,  $D_{clad} = 130 \mu m$

Ormocer  $D_{ext} = 220 \mu m$ ,  $D_{clad} = 150 \mu m$

La figura 4.28 mostra la disposizione dei singoli sensori FBG costituenti gli array. Le quote indicate, riferite al bordo del laminato, identificano il centro di ogni sensore, distanziati di 10 mm, i quali hanno un'estensione di 3 mm ognuno.

La sequenza di laminazione, come discusso in precedenza, è composta da 10 lamine di tessuto Hexcel Hexply M49 con orientazione  $0^\circ - 90^\circ$ . Il drop off è stato realizzato come indicato in 4.22 (b), le lamine, di lunghezza 1 m, hanno le larghezze indicate in 4.8, la prima lamina risulta a contatto con il laminato a C: Come protezione delle fibre ottiche, in corrispondenza dell'uscita dalle solette, sono stati utilizzati tubetti in PEEK 4.29. Il materiale utilizzato, oltre ad elevate caratteristiche di resistenza meccanica garantisce un migliore incollaggio alla resina epossidica, evitando eventuali sfilamenti dal laminato. Il tubetto necessita un parziale inglobamento di almeno 15-20 mm nel laminato, inoltre è fondamentale sigillare l'interstizio creatosi tra la FO ed il diametro interno del tubetto mediante colla epossidica.

L'attrezzatura di laminazione è stata la medesima utilizzata durante le fasi di test tecnologico precedenti, a differenza dello stampo di lunghezza 1,20 m su cui si sono ricavati i fori e le sedi per i componenti descritti al paragrafo precedente.

Come spessori di gomma siliconica bianca, usati come protezione ed interposti tra gli inserti, sono stati scelti due fogli di spessore 1 mm, mentre lo spessore della gomma interposta tra l'inserto inferiore e lo stampo è pari a 1.5 mm, come indicato dal disegno 4.17

Per ottenere la finitura superficiale desiderata, ed uno smusso (drop-off) soddisfacente, si è adottata la soluzione più semplice ma risultata affidabile, ponendo superiormente all'ultima lamina delle solette uno strato di peel-ply successivamente ricoperto da una cartelletta in gomma grigia della lunghezza precisa del laminato 4.32.

$n^\circ$	[mm]
1	87,5
2	85
fibre ottiche	
3	85
4	83
5	87
6	83
7	81
8	81
9	81
10	87

Tabella 4.8: sequenza e larghezza lamine solette

Risulta fondamentale ricavare una cartelletta precisa al millimetro per evitare che la resina, in corrispondenza degli inserti, risalga nello spessore lasciato libero.

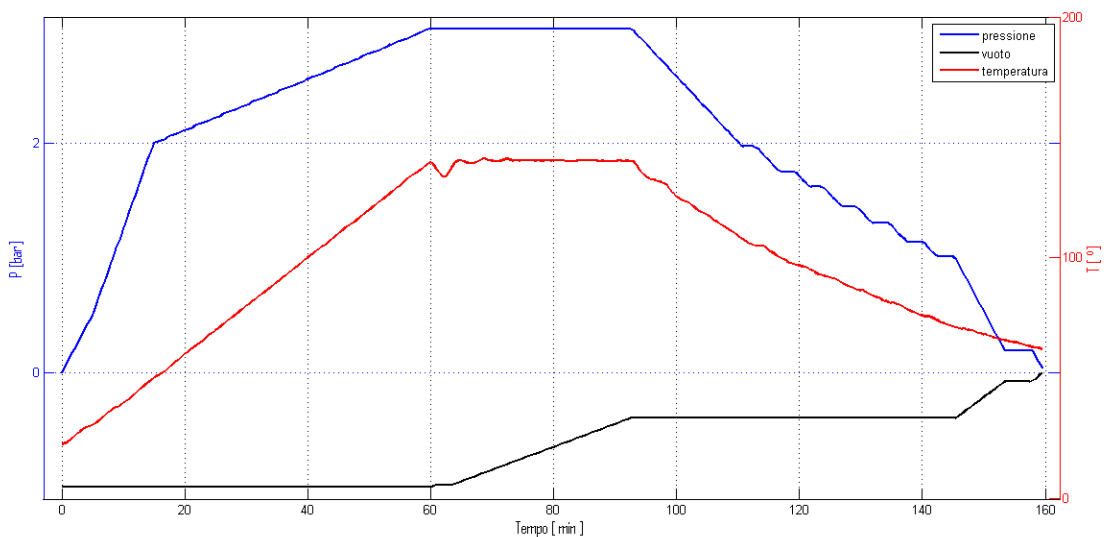


Figura 4.34: Ciclo di cura eseguito per il manufatto

Il ciclo di reticolazione della resina, per i laminati utilizzati, è descritto in figura 4.34.

## 4.4.2 Assemblaggio finale

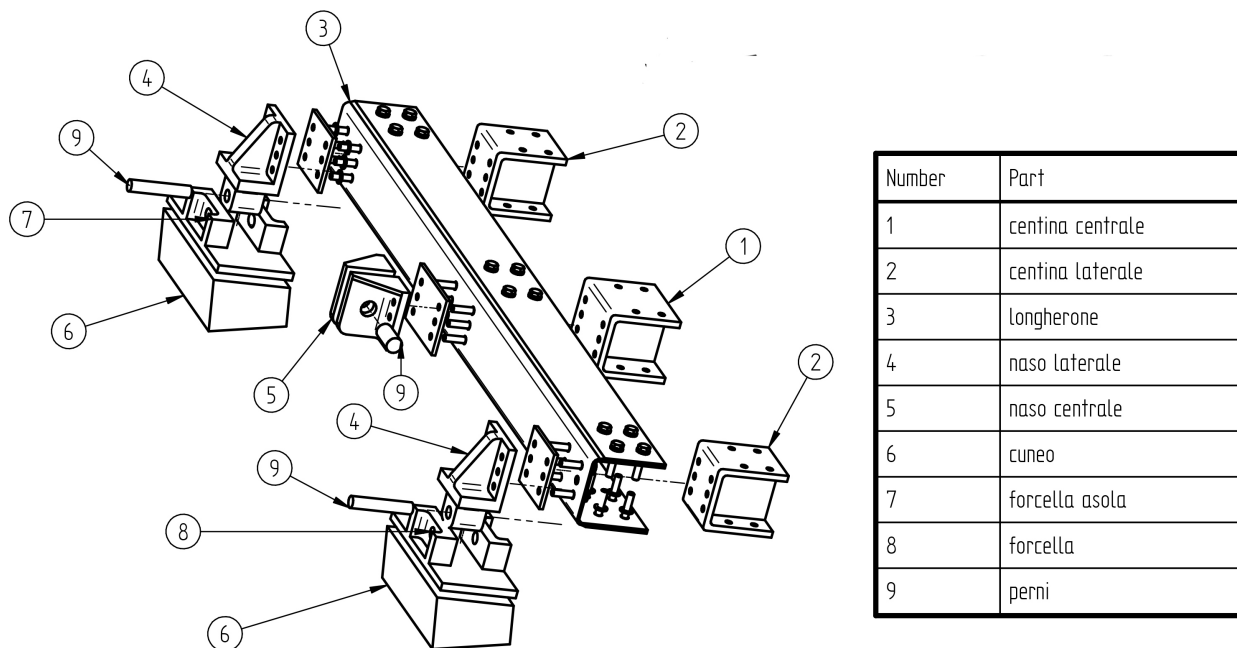


Figura 4.35: Assieme del longherone di prova

La procedura di assemblaggio richiede il corretto montaggio delle strutture preposte a trasferire il carico sulla trave e vincolarla a terra.

All'interno del profilo a C, sono imbullonate tre centine in alluminio con i corrispettivi nasi esterni preposti al fissaggio a terra ed al trasferimento di carico (naso centrale). Tutti i pezzi sono stati ricavati per asportazione di materiale, da pieno di alluminio, garantiscono elevate rigidità così da trasferire efficacemente il carico al longherone.

I bulloni sono composti da viti M8, le forature nella trave in carbonio hanno diametro 8 mm, ma è possibile pensare a successivi sviluppi inserendo delle boccole, incollate, all'interno dei fori.

I disegni delle singole parti sono riportati in appendice C, l'assieme della struttura finale è riportata in figura 4.35.

I cunei sono le basi che possono essere utilizzate per la prova a flessione-torsione essendo inclinate di un angolo determinato.

Concludendo è possibile riassumere le operazioni effettuate per la realizzazione del longherone strumentato in:

1. Progettazione e realizzazione dell'attrezzatura di laminazione, composta da inserti, lavorazioni sul longherone, box di protezione.
2. Verifica e messa a punto della procedura tecnologica di inglobamento delle fibre ottiche
3. Determinazione della corretta laminazione per l'ottenimento del drop-off e della finitura superficiale
4. Implementazione della tecnologia sul laminato definitivo con inglobamento di fibre ottiche sensorizzate ed applicazione dei difetti artificiali

5. Realizzazione delle strutture per il trasferimento del carico quali centine, nasi, forcelle, perni
6. Foratura del longherone tale da garantire il corretto assemblaggio di tutti i componenti
7. Assemblaggio finale

Per ottenere un perfetto assemblaggio, garantendo la coassialità tra tutti i fori, si è forato il longherone utilizzando i macchinati in alluminio come maschera di foratura.

Data la precisione ed esclusività dell'operazione è necessario montare sempre nella medesima posizione ogni componente. Per facilitare l'operazione si sono marcati centine e forcelle distinguendole tra lato sinistro (L) e lato destro (R) e lato soletta (UP).

I riferimenti sono da intendersi guardando i nasi della trave, il lato inferiore è distinguibile avendo il triplice percorso ottico diversamente dalla soletta superiore nella quale sono inglobate solo due percorsi ottici.

Come è possibile notare dalla figura 4.36 gli estensimetri sono stati collocati, secondo la convenzione di riferimento adottata, nel lato destro del longherone.



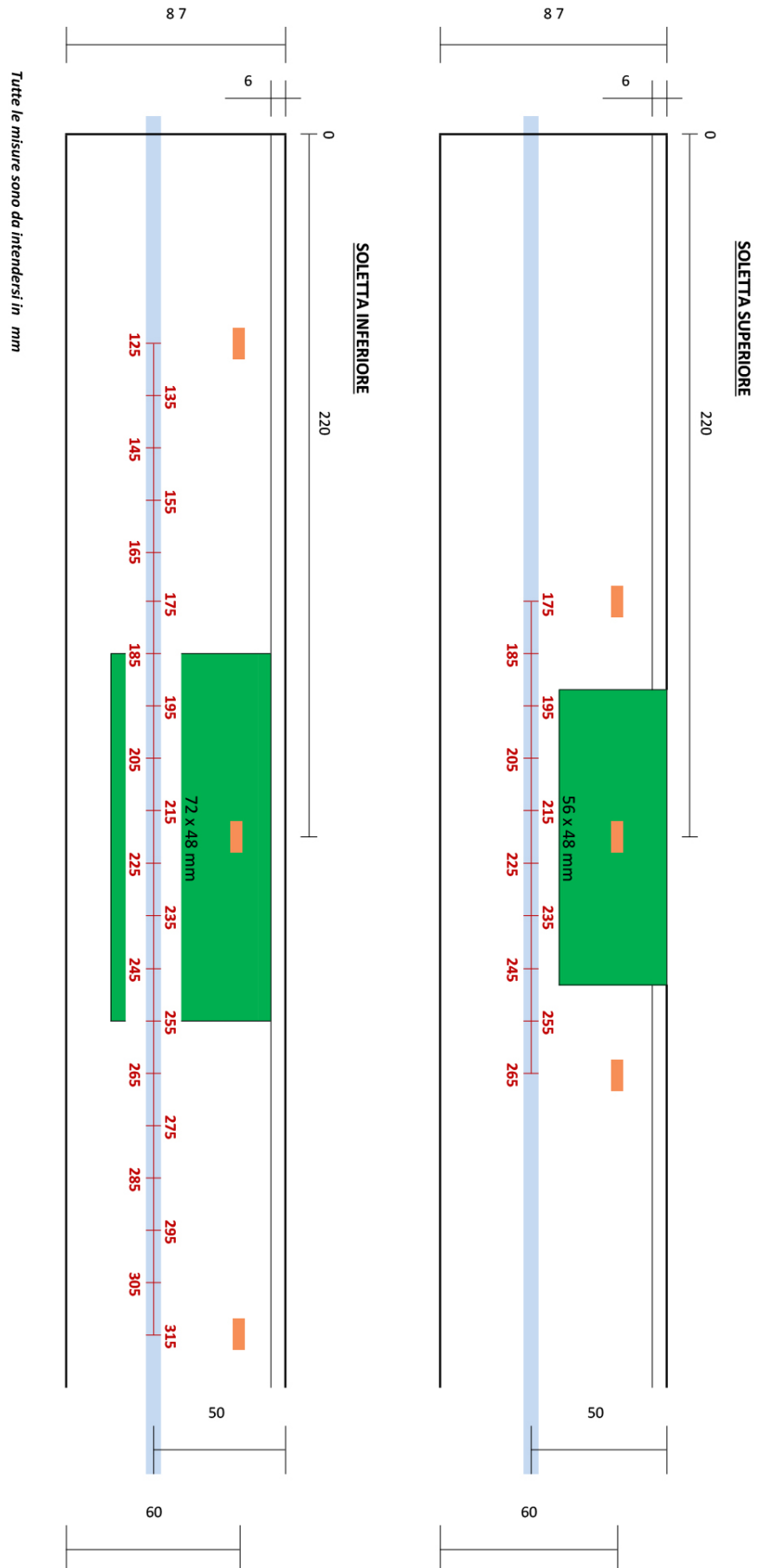


Figura 4.28: Particolare di inglobamento dei difetti e dei sensori

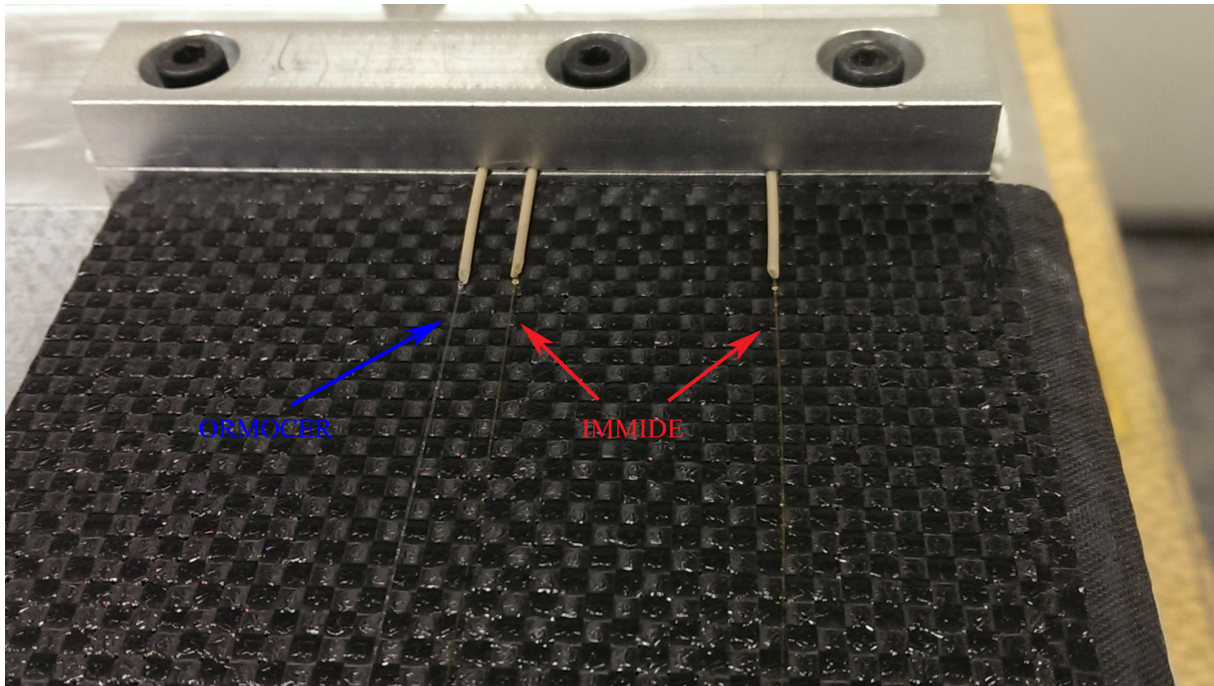


Figura 4.29: Particolare di inglobamento delle fibre ottiche



Figura 4.30: Inserimento del difetto di laminazione, doppio lembo di teflon, nella soletta superiore (56 mm x 48 mm)

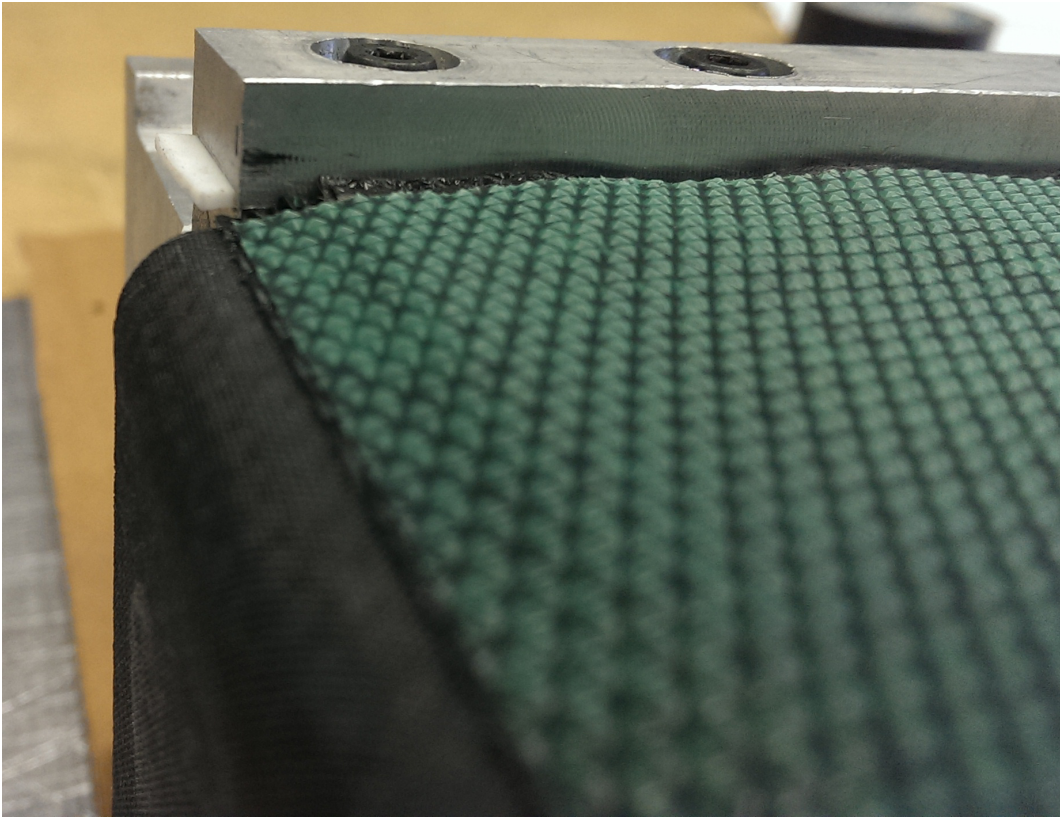


Figura 4.31: Laminazione completa e particolare del drop-off, antecedente il ciclo di cura

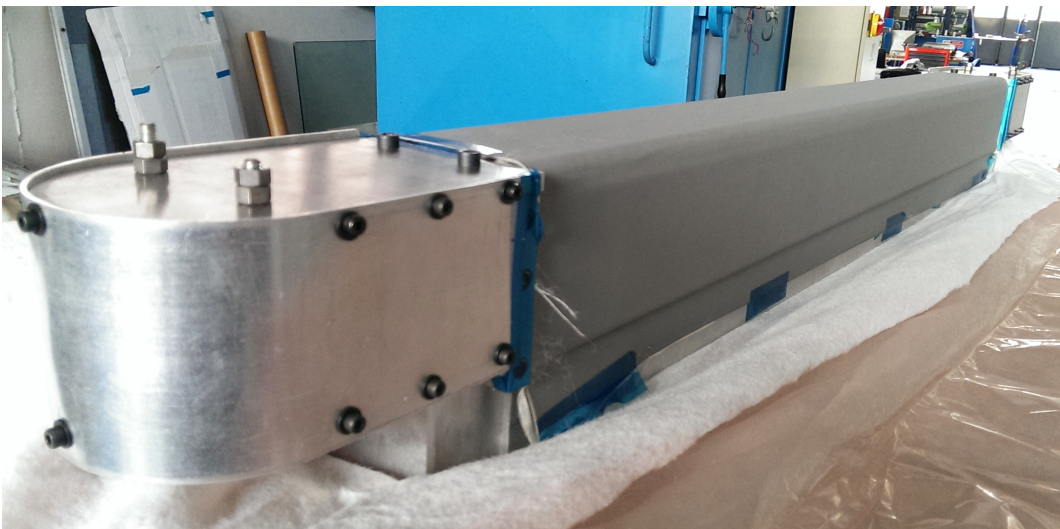


Figura 4.32: Cartelletta in gomma





Figura 4.33: Precompattazione con sacco da vuoto

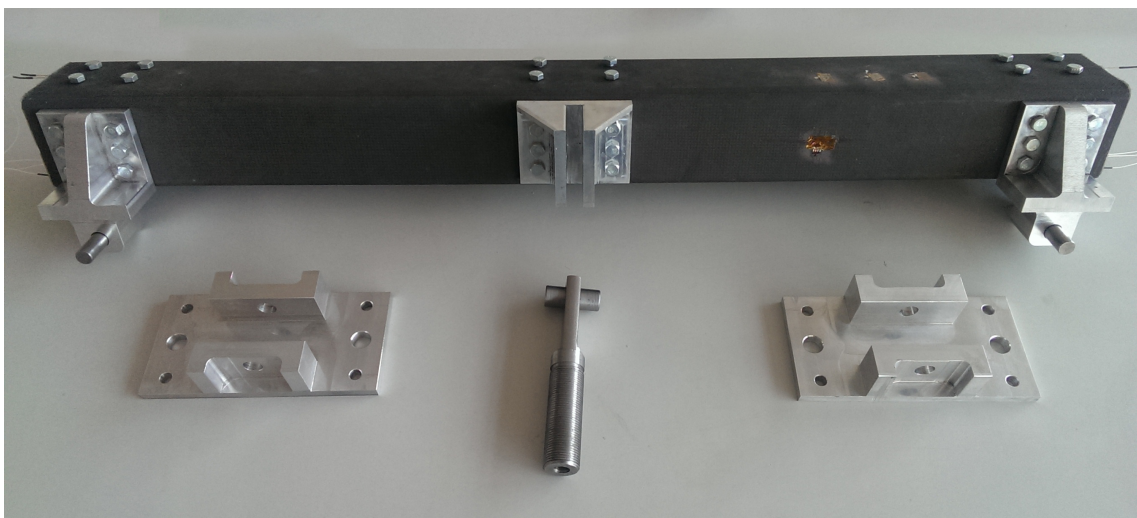


Figura 4.36: Vista d'assieme del longherone

# Capitolo 5

## Prove sperimentali

Nel capitolo seguente si descriverà la procedura di prova ed i risultati ottenuti dal test di flessione a tre punti, realizzato sul longherone.

La sperimentazione ha lo scopo di verificare il corretto funzionamento dei sensori ottici al fine di identificare le delaminazioni attraverso la ricostruzione del campo di deformazione indotto sugli elementi sensibili.

### 5.1 Procedura di prova

Il longherone è strumentato con 2 array di sensori DTG, inglobati in corrispondenza dei difetti, più tre estensimetri per soletta posizionati in corrispondenza del primo, medio ed ultimo FBG dell'array (figura 4.28).

Il test vuole mostrare come i sensori inglobati siano capaci di descrivere la deformazione ed identificare il danno, differentemente dagli estensimetri incollati sulla superficie.

Il manufatto verrà sollecitato in flessione a tre punti, caricando la trave attraverso il naso centrale .

La forza è esercitata attraverso un martinetto oleodinamico con valore di carico massimo di 2200 kg, posizionato perpendicolarmente all'asse della trave.

Il test implica una sollecitazione di pura flessione, è stato quindi necessario caricare la trave lungo il suo centro di taglio.

La sollecitazione massima verrà raggiunta in più step di carico, registrando la misura di deformazione ad ogni livello di forza statica prefissata .

La procedura di prova adottata risulta essere la seguente:

- Montaggio della trave sulla struttura di prova
- Connettorizzazione degli estensimetri e delle fibre ottiche
- Precarico di assestamento della struttura
- Verifica del corretto funzionamento dell'attrezzatura
- Verifica dell'applicazione del carico lungo il centro di taglio (no rotazione della sezione centrale)
- Acquisizione dello 'zero' dei dati
- Applicazione della forzante a livelli prefissati, mediante martinetto oleodinamico, ed acquisizione dei parametri di prova ad ogni step di carico indicato in tabella 5.1

La procedura di sollecitazione descritta in tabella 5.1 è stata ripetuta per ogni catena di acquisizione ottica (MO, OSA), ottenendo un totale di 4 set di carico-scarico del longherone. I livelli di carico in corrispondenza dei quali si sono acquisiti i segnali vengono riportati in tabella 5.1.

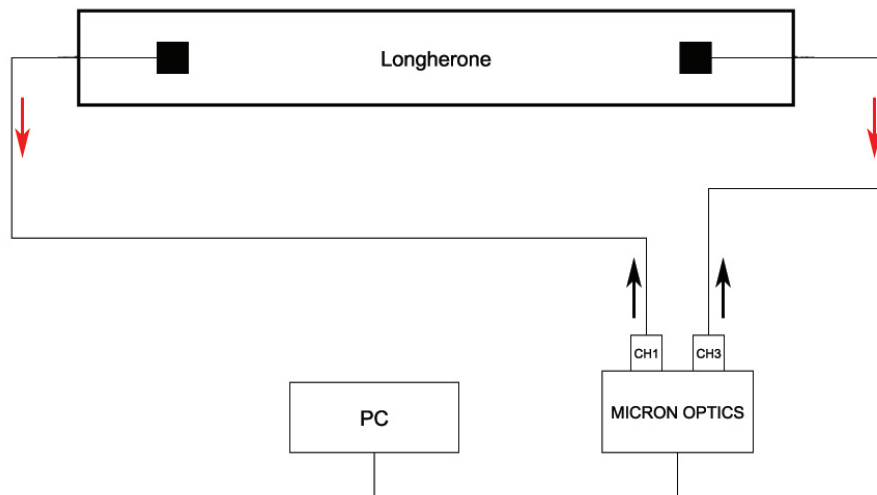


Figura 5.1: Schema sistema di acquisizione con analizzatore laser a scansione Micron Optics (MO)

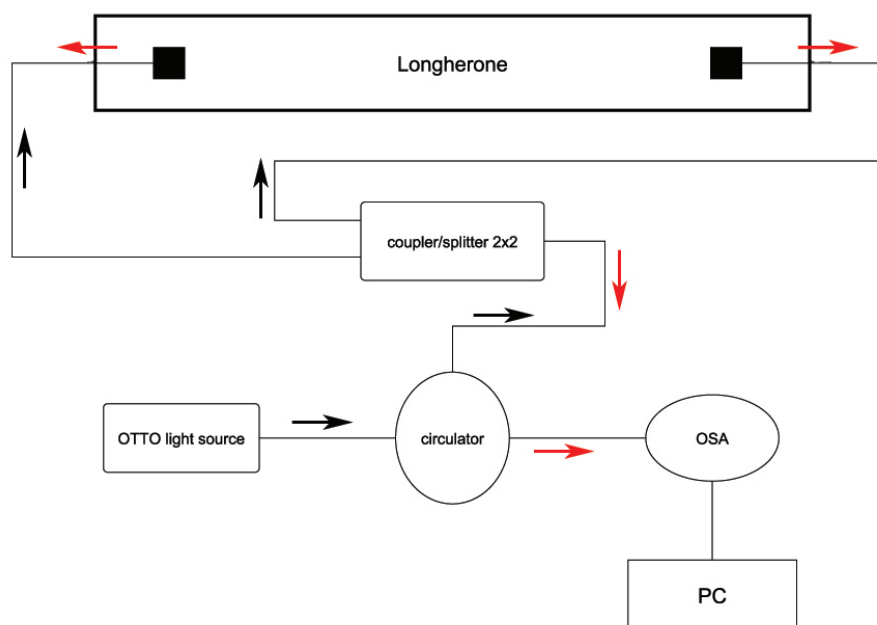


Figura 5.2: Schema sistema di acquisizione con analizzatore di spettro OSA

punto prova	carico [kg]	punto prova	carico [kg]
1	0	9	1000
2	0	10	15
3	15	11	1000
4	1000	12	1700
5	1700	13	2200
6	2200	14	1700
7	2200	15	1000
8	1700	16	15

Tabella 5.1: Punti prova

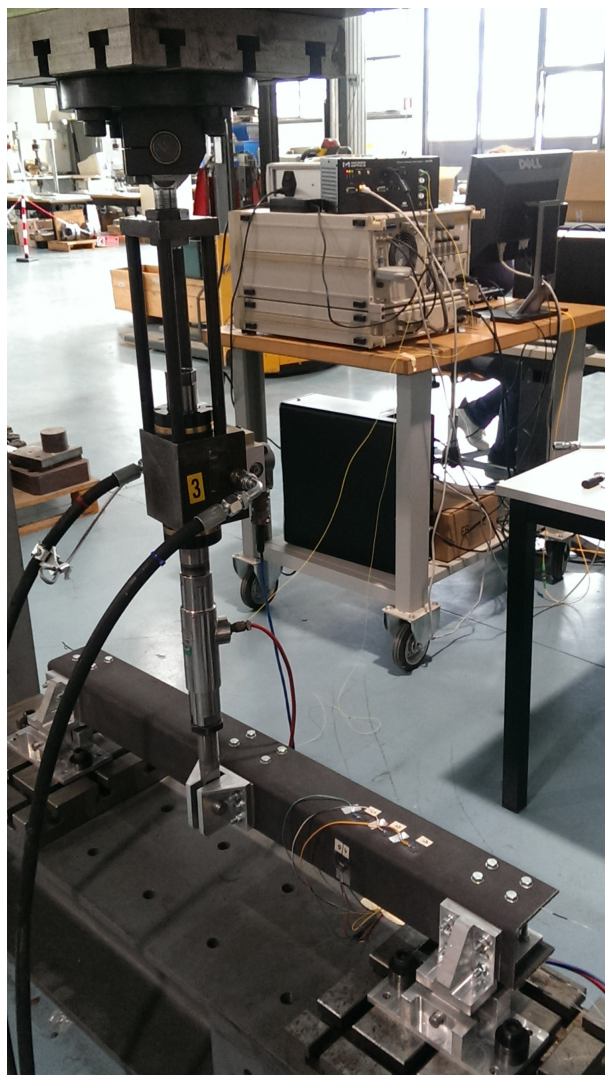
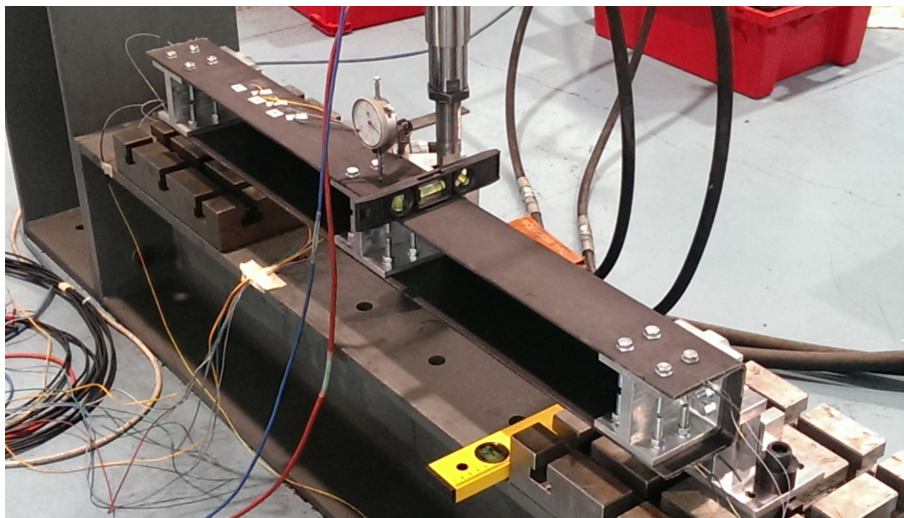
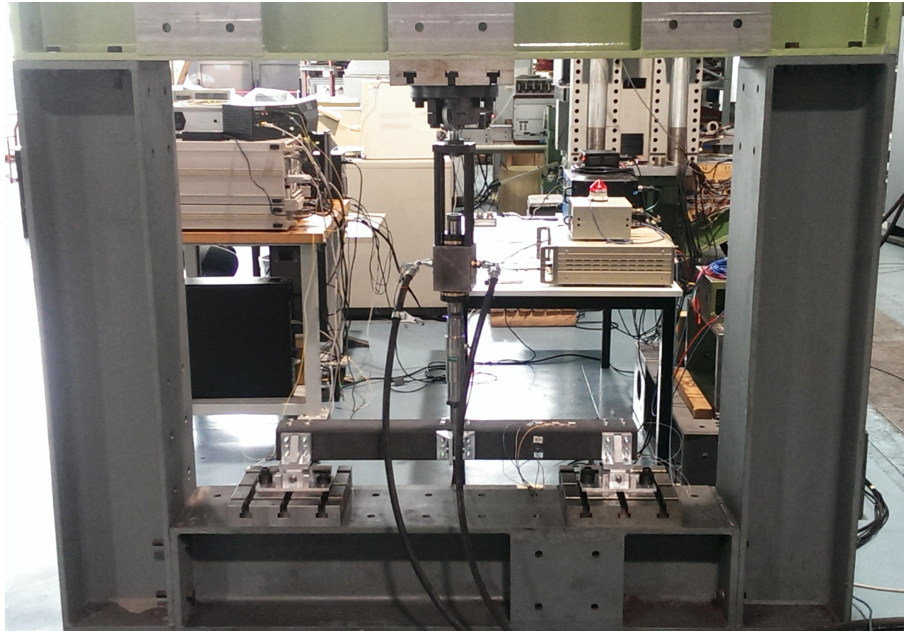


Figura 5.3: Struttura e strumentazione per la prova a flessione







## 5.2 Analisi dati

Nel paragrafo in esame si analizzeranno i dati acquisiti dai sensori (FBG, estensimetri), al fine verificare la reale sensibilità delle fibre ottiche e degli algoritmi sviluppati.

La prima verifica effettuata è stato il controllo dei segnali luminosi riflessi dai sensori inglobati. I processi di inglobamento ed il successivo ciclo di cura produce stress sull'array di sensori, variandone lo spettro di riflessione tra la configurazione vergine ed la configurazione inglobata.

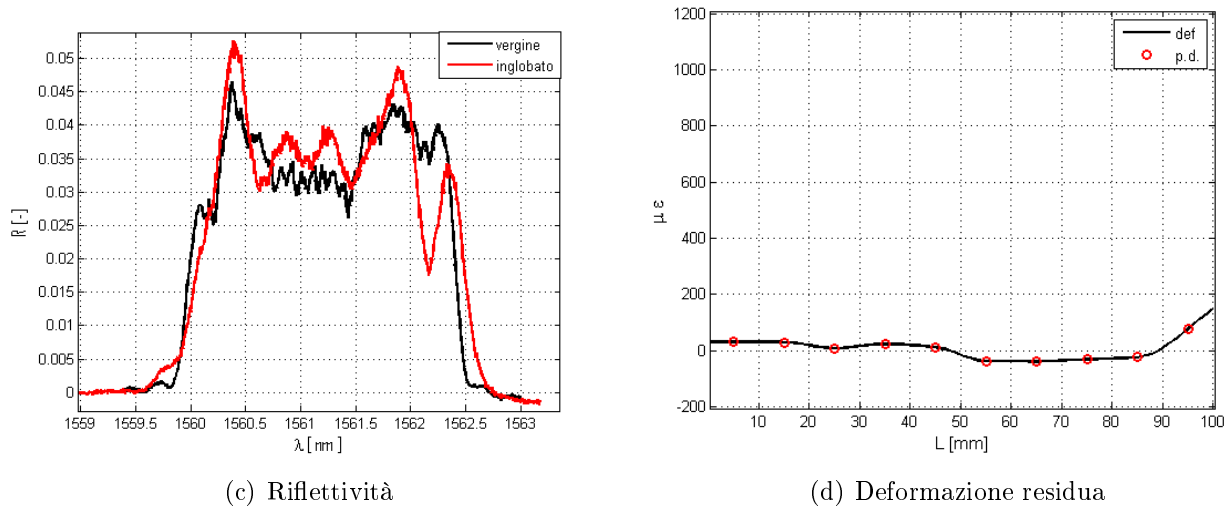


Figura 5.4: Differenza del sensore prima e dopo l'inglobamento nel laminato, 10 FBG (up)

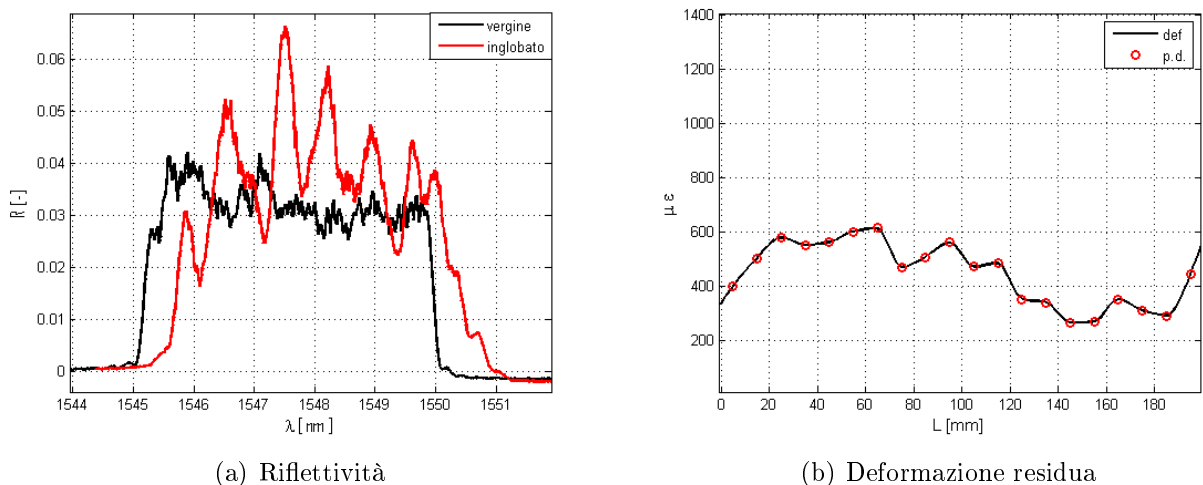


Figura 5.5: Differenza del sensore prima e dopo l'inglobamento nel laminato, 20 FBG (low)

Le figure 5.4 5.5 mostrano differenze non trascurabili tra le forme degli spettri riflessi prima e dopo l'inglobamento, inoltre sono state calcolate (attraverso FBGCenter) le presunte deformazioni residue, lungo la componente longitudinale della fibra, agenti sui sensori inglobati.

Il sensore posto inferiormente (20DTG) risulta avere una sollecitazione residua di trazione per tutta la sua lunghezza, differentemente il sensore superiore (10 DTG) ha deformazione residua limitata ma non trascurabile e di segno opposto.

Le cause generanti tali sforzi possono essere molteplici. Come dimostrato in precedenti studi, le sollecitazioni indotte sulla fibra sono causate dall'effetto della temperatura durante il ciclo di cura; i differenti CTE tra composito e fibra causano dilatazioni diverse tra i due materiali e per la congruenza degli spostamenti all'interfaccia fibra-matrice si generano sforzi residui di natura termoelastica.

Ulteriore sollecitazione è generata dall'operazione di posizionamento manuale, infatti l'operatore può applicare una trazione durante la fase di posizionamento.

Data la natura delle fibre ottiche inglobate, Ormocer ad alta apertura numerica, si escludono variazioni di riflettività legate a fenomeni di microbending.

Le sollecitazioni di natura termoelastica provocano sforzi omogenei lungo la direzione dell'asse della fibra, però non è possibile escludere a priori la nascita di sforzi di taglio lungo le zone sensibili. La forma del tessuto e la non planarità delle lamine del composito costringo le fibre a seguire le curvature tra trama ed ordito le quali possono indurre sforzi di taglio nella sezione, inoltre data la laminazione non bilanciata delle solette, le sollecitazioni introdotte durante le lavorazioni possono generare componenti di taglio nel laminato.

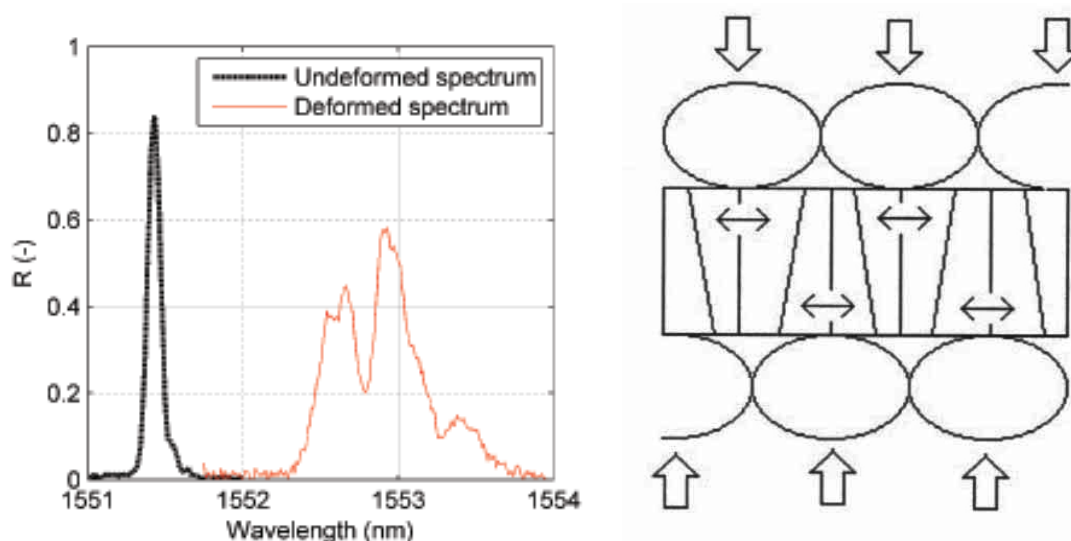


Figura 5.6: Effetto della sollecitazione di taglio nella sezione del sensore FBG

Analizzando le forme degli spettri di riflessione, soprattutto nel caso del sensore inferiore (20 FBG), è possibile notare come la pendenza del tratto in prossimità di  $\lambda = 1551\text{nm}$  sia leggermente inferiore alla curva nera, in accordo con gli andamenti mostrati in figura 5.6.

Concludendo si afferma che l'array di sensori ha subito uno stato di sollecitazione prevalentemente di trazione non escludendo la nascita di sforzi tangenziali.

Data la discrepanza dei segnali riflessi proveniente dai sensori inglobati, non è più possibile approssimare il sensore inglobato con i dati appartenenti all'array indeformato vergine. Tuttavia risulta ancora possibile applicare gli algoritmi di ricostruzione della deformazione, agendo opportunamente sulla definizione dei dati e sulla ricostruito numerica dello spettro indeformato (controllo apodizzazione). Risulta possibile definire tre condizioni principali:

- Sensore non inglobato.
- Sensore inglobato con deformazione residua. Condizione di partenza per la prova a flessione
- Sensore inglobato e sollecitato dal carico applicato durante la prova

Per la risoluzione del problema inverso, alla luce delle difficoltà di ricostruzione numerica dello spettro per le cause sopra citate, si sono applicate due diverse metodologie di analisi dei dati. Una prima tecnica di analisi, valutata per entrambe i set di dati, è stata il confronto diretto tra gli spettri definiti nel seguente modo:

- configurazione indeformata : spettro generato dal sensore, dopo l'inglobamento, con sollecitazione nulla. Condizione di riferimento (zero della prova)
- configurazione deformata : spettro campionato durante l'applicazione del carico sul longherone

Prima di utilizzare il programma di identificazione della deformazione tramite «FBGCenter» è necessario ripristinare il sensore (inglobato) indeformato alla reale condizione iniziale.

Regolando opportunamente i dati che descrivono i reticoli ed applicando tassativamente la routine denominata «controllo apodizzazione», si è in grado di caratterizzare il sensore in modo tale che lo spettro ricostruito numericamente si avvicini il più possibile allo spettro del sensore inglobamento a sollecitazione nulla. Tali valori saranno la base di partenza per la procedura di calcolo la quale comparerà lo spettro inglobato a deformazione nulla con gli spettri ottenuti per i vari carichi imposti.

Il secondo metodo, applicato allo studio del solo profilo di deformazione agente sulla soletta inferiore, presuppone la depurazione della misura di deformazione attraverso un offset pari al profilo di deformazione residuo. Gli spettri sono identificati nel modo seguente

- configurazione indeformata : spettro generato dal sensore vergine prima dell'inglobamento
- configurazione deformata : spettro campionato durante i test

Ad ogni punto prova la deformata finale verrà calcolata sottraendo alla deformazione ricostruita la deformazione ottenuta dal confronto tra il sensore vergine ed il sensore inglobato.

### **Deformazione soletta superiore**

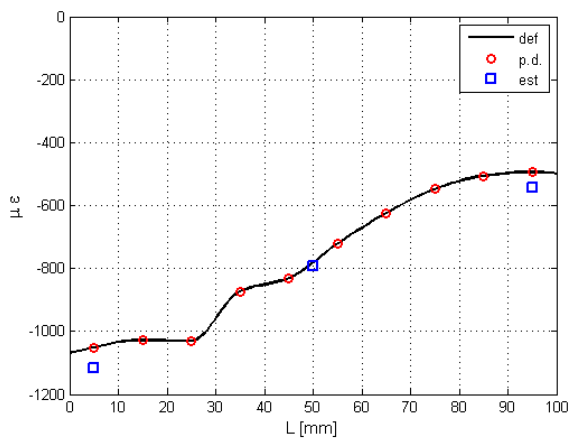
Le immagini 5.7 mostrano la deformazione sentita dal sensore composto da 10 FBG situato nella soletta superiore (zona compressa).

Il danno ha una estensione di 56 mm, centrata rispetto all'array; la zona interessata risulterà compresa tra  $22\text{mm} < L < 78\text{mm}$ .

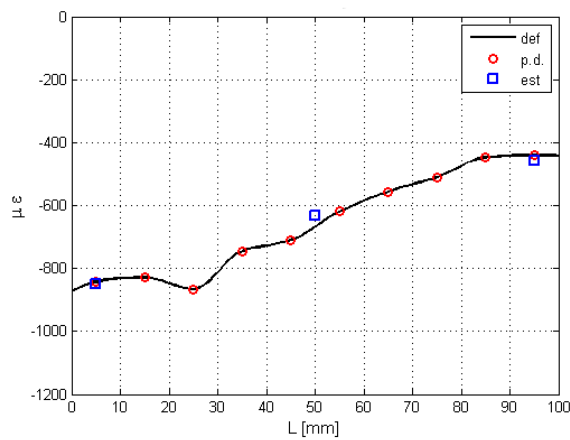
Dalle elaborazioni effettuate si nota una discontinuità in prossimità di  $L = 30$  mm, specialmente nei casi di sollecitazione elevata.

Si può concludere come i valori di deformazione siano affidabili, paragonate alle misure provenienti dagli estensimetri (blu), l'analisi ha riscontrato discontinuità solamente nella zona più sollecitata all'estremità del difetto, mentre nella parte in prossimità del vincolo (centina laterale) non si riscontrano discontinuità.

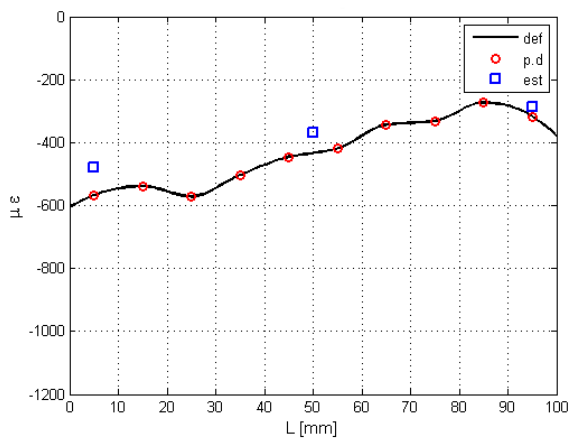
La topologia del difetto non permette, teoricamente, una facile identificazione della zona delaminata (4.29). L'analisi riesce a cogliere solo parzialmente l'eventuale difetto, evidenziando comunque una buona ricostruzione dello spettro (paragonando le misure estensimetriche) .



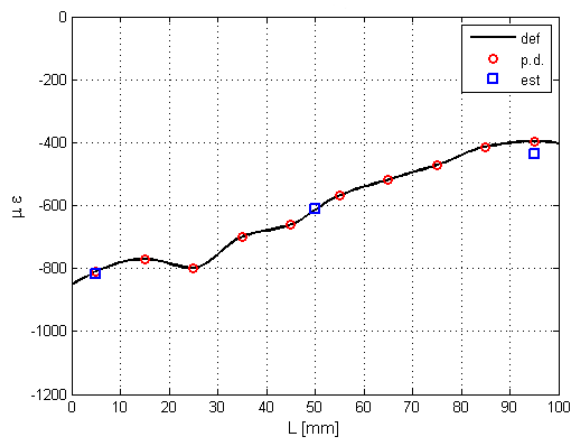
(a) Punto prova 6, 2200 kg



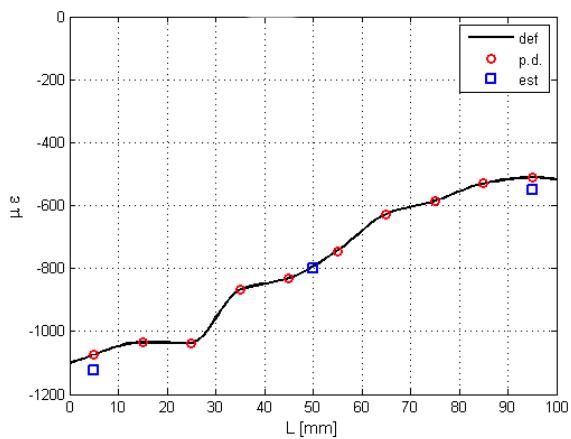
(b) Punto prova 8, 1700 kg



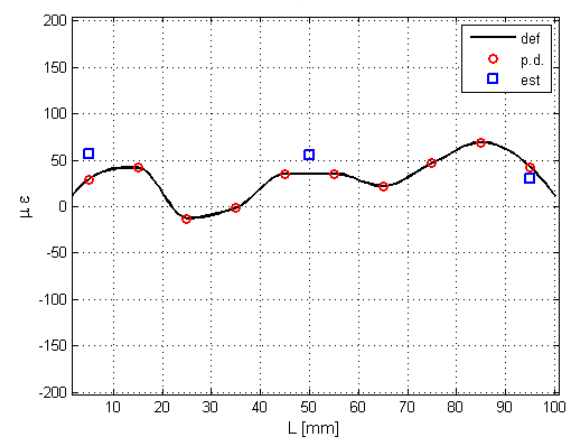
(c) Punto prova 9, 1000 kg



(d) Punto prova 12, 1700 kg

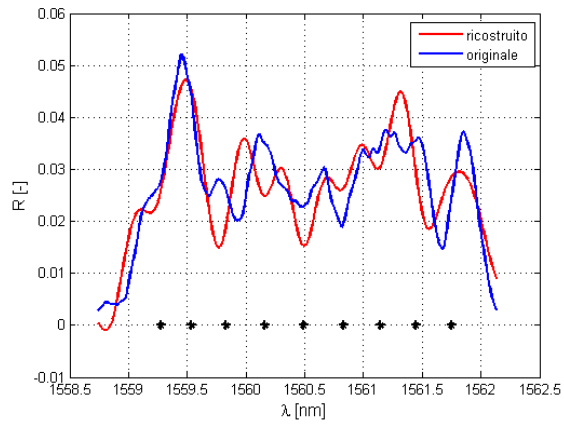


(e) Punto prova 13, 2200 kg

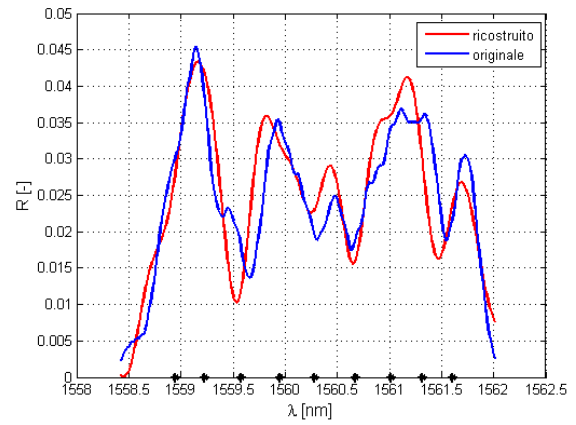


(f) Punto prova 16, 15 kg

Figura 5.7: Ricostruzione della deformazione lungo la soletta superiore, array DTG 10 FBG



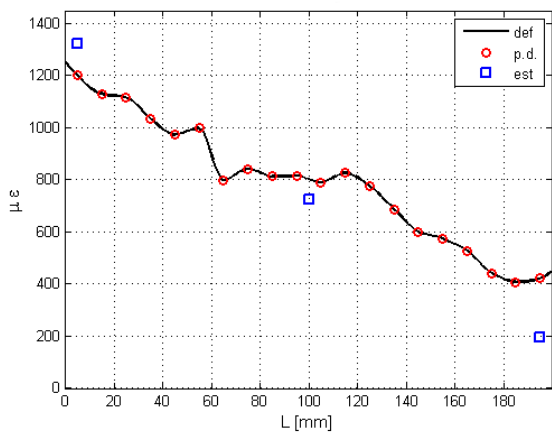
(a) Punto prova 12, 1700 kg



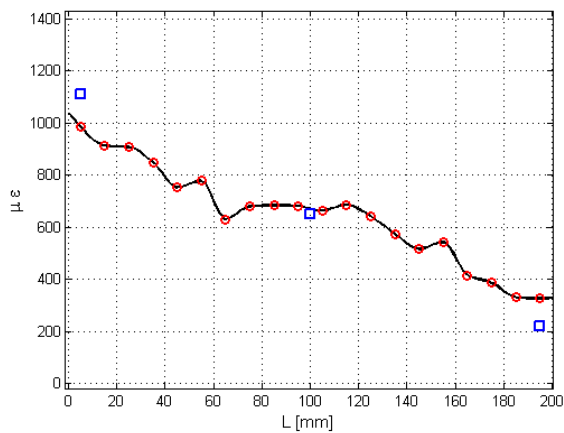
(b) Punto prova 13, 2200 kg

Figura 5.8: Ricostruzione dello spettro dell'array DTG 10 FBG

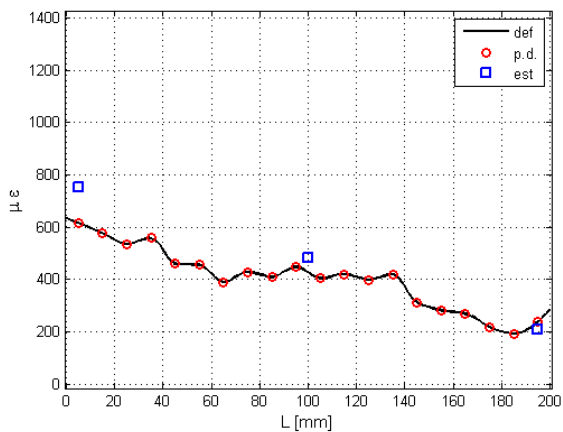
## Deformazione soletta inferiore



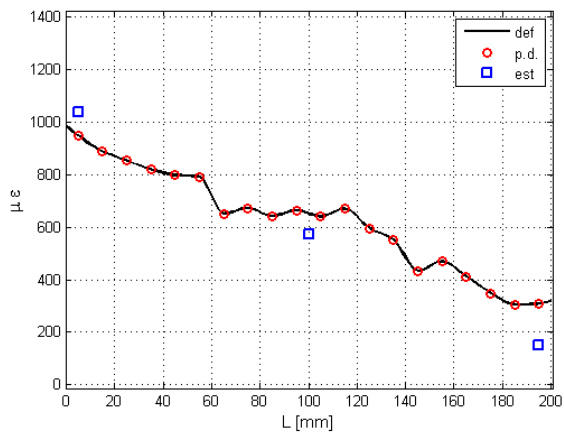
(a) Punto prova 7, 2200 kg



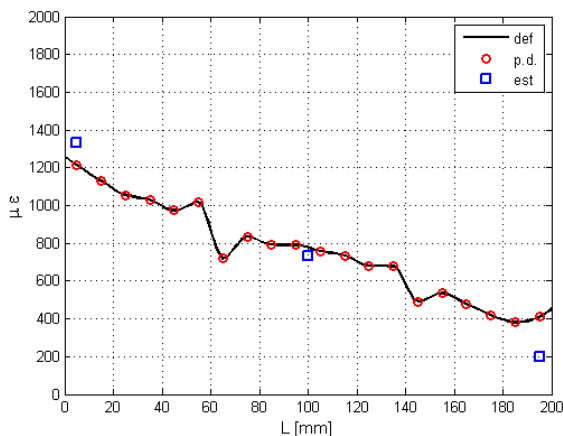
(b) Punto prova 8, 1700 kg



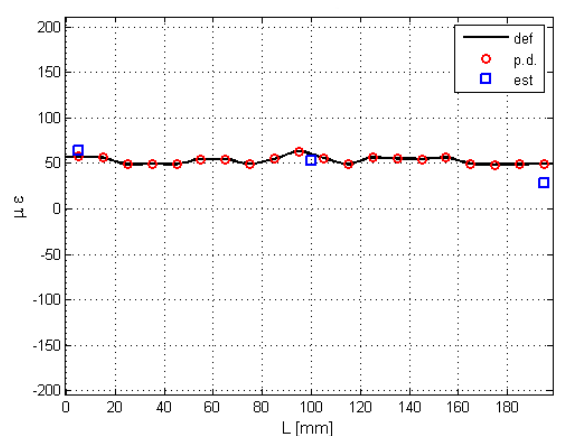
(c) Punto prova 9, 1000 kg



(d) Punto prova 12, 1700 kg

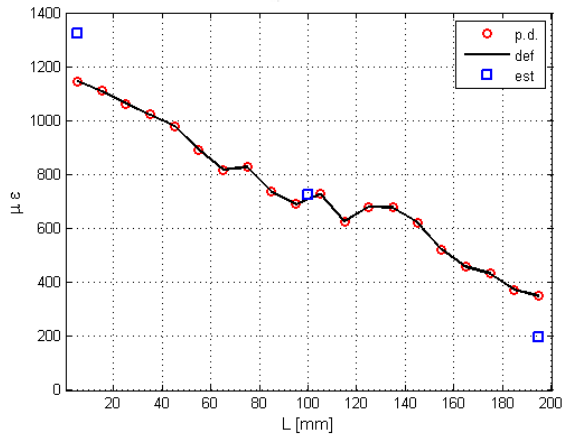


(e) Punto prova 13, 2200 kg

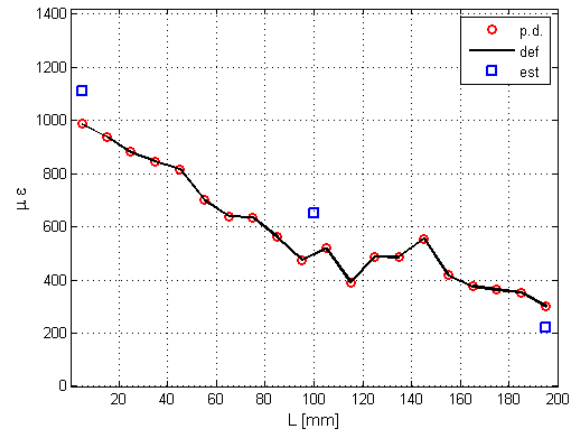


(f) Punto prova 16, 15 kg

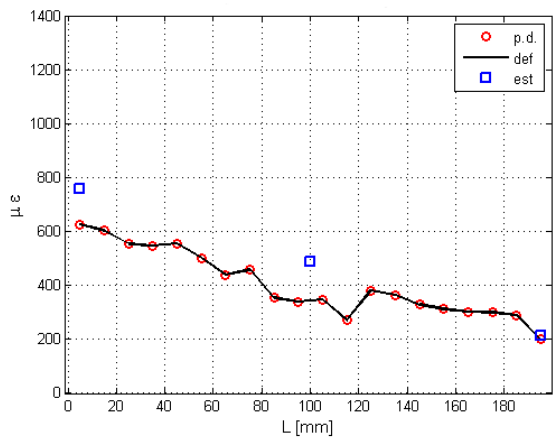
Figura 5.9: Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo classico



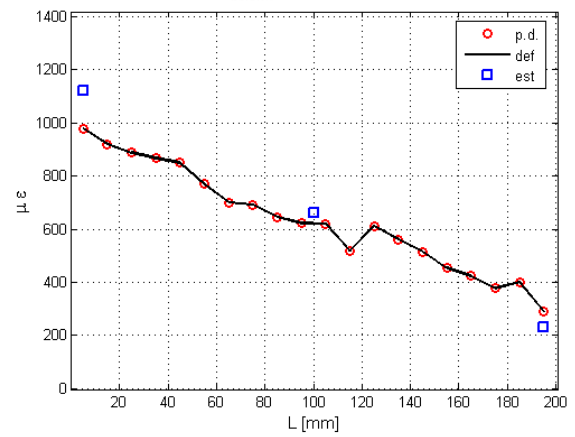
(a) Punto prova 7, 2200 kg



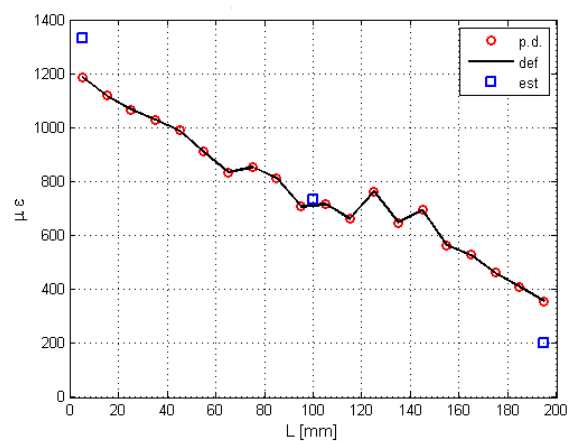
(b) Punto prova 8, 1700 kg



(c) Punto prova 9, 1000 kg



(d) Punto prova 12, 1700 kg



(e) Punto prova 13, 2200 kg

Figura 5.10: Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo offset

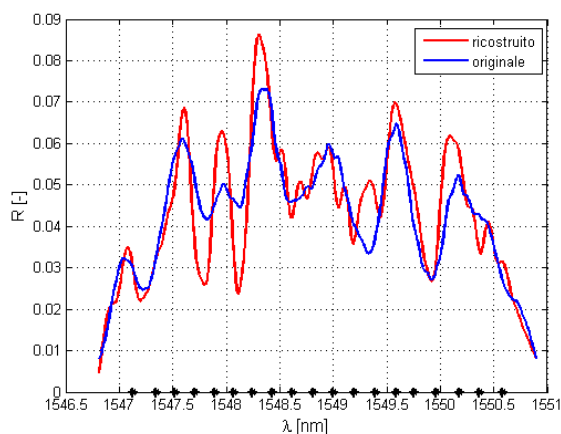
Le immagini 5.9 5.10 mostrano i risultati dei punti prova effettuati a differenti livelli di carico. La lunghezza del sensore  $L$  è di 200 mm, il difetto artificiale di lunghezza 72 mm è posizionato centralmente rispetto all'array di FBG, la zona di delaminazione attesa si estende teoricamente da 64 mm ad 136 mm.

Con entrambe i metodi si nota una zona centrale di discontinuità la quale indica la presenza di un gradiente di deformazione non costante provocato dal difetto inglobato.

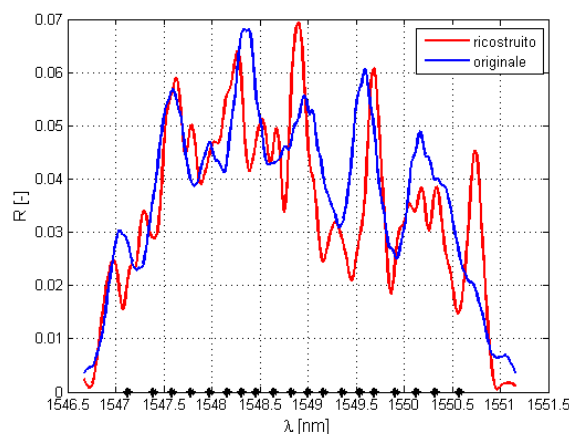
La deformata indicata dalle figure 5.9 (metodo classico), mostra una forma simile in cui la zona delaminata si estende indicativamente tra 60mm e 140 mm, con discontinuità evidenti in prossimità di tali valori ed un plateau centrale.

Le discontinuità sono tanto più evidenti quanto alto è il carico applicato al naso centrale della trave.

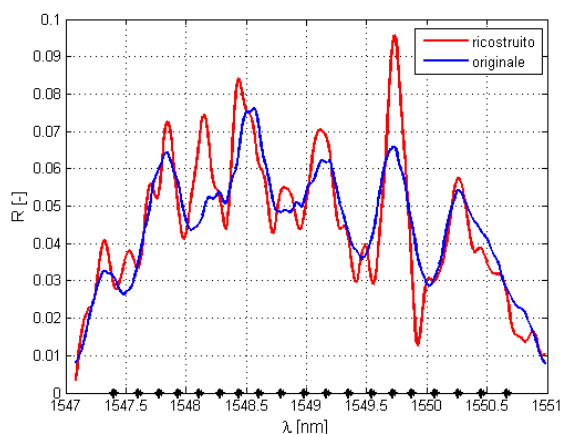
I quadrati blu indicano i valori di deformazione letta dagli estensimetri, posti sulla superficie del laminato con lo scopo di verificare il corretto funzionamento delle fibre ottiche. I dati ricostruiti, avendo a disposizione gli spettri di riflessione  $R$ , si correlano bene con le misure estensimetriche ad eccezione dei punti (p.d.) di estremità, dove il metodo FGBCenter non sempre riesce a calcolare in maniera ottimale la deformazione.



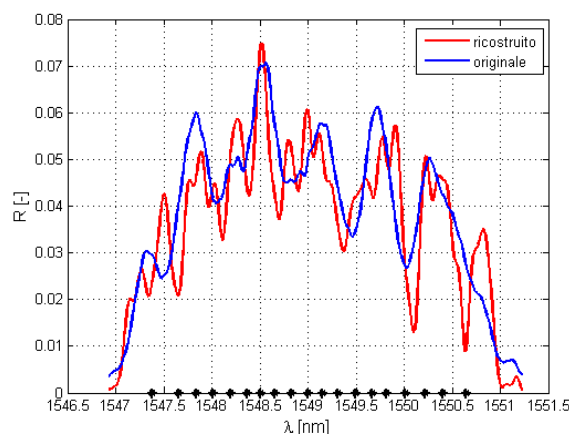
(a) Punto prova 8, 1700 kg, metodo classico



(b) Punto prova 8, 1700 kg, metodo offset



(c) Punto prova 13, 2200 kg, metodo classico



(d) Punto prova 13, 2200 kg, metodo offset

Figura 5.11: Ricostruzione della deformazione lungo la soletta inferiore, array DTG 20 FBG. Metodo offset



Al fine di determinare quale dei due approcci ricostruisce la deformata migliore si sono comparati gli spettri ricostruiti dai due metodi, figura 5.11. Dall'analisi si nota come non ci sia una differenza sostanziale, ma gli spettri ottenuti attraverso il metodo definito classico hanno correlazione migliore rispetto al metodo con offset.

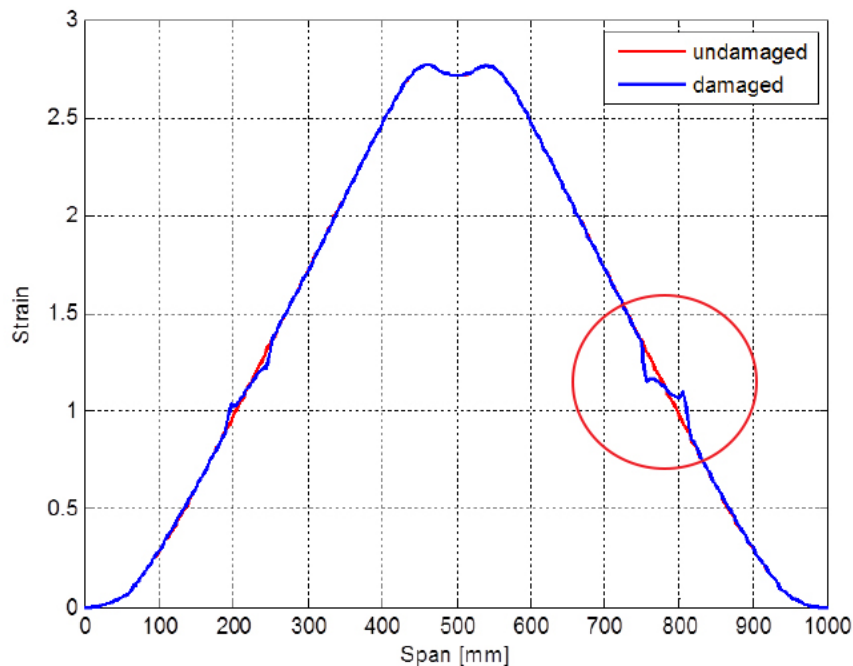
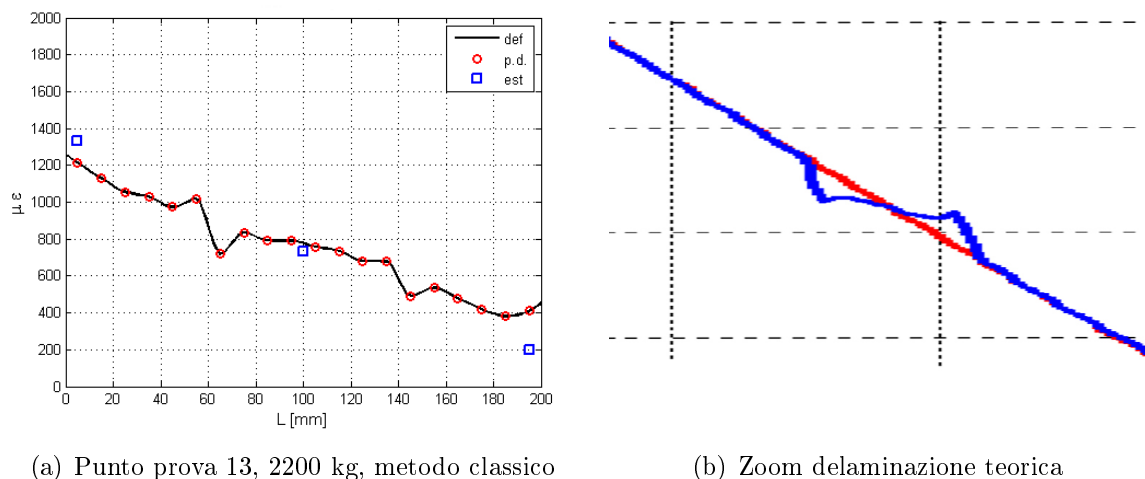


Figura 5.12: Ricostruzione numerica della deformazione agente sul cammino del sensore nella soletta inferiore.  $F = 2500$  kg



(a) Punto prova 13, 2200 kg, metodo classico

(b) Zoom delaminazione teorica

Figura 5.13: Confronto tra deformazione sperimentale e numerica nella zona di delaminazione

Le figure 5.12 5.13 mostrano i risultati numerici ottenuti nel lavoro di tesi [11](Zanetti F.). La curva è stata ottenuta simulando un carico di 2500 kg, il 15 % superiore al carico massimo applicato durante il test. La zona di danno corrispondente alla delaminazione lunga 72 mm, è evidenziata dal cerchio rosso. Ingrandendo la parte in esame e confrontandola qualitativamente, si evince una somiglianza di forma tra caso simulato e reale.

In entrambe le immagini sono presenti delle discontinuità ai margini della zona delaminata mentre la porzione centrale osserva una diminuzione di pendenza.

## 5.3 Conclusioni

Le prove condotte sul longherone hanno portato a risultati soddisfacenti.

Il difetto situato nella soletta superiore, di difficile rilevabilità, si è mostrato tale. Il metodo di identificazione coglie solo marginalmente una discontinuità imputabile al difetto.

La delaminazione introdotta nella soletta inferiore, date le dimensioni notevoli ed il percorso opportuno del sensore ottico, viene riscontrata con maggior facilità 5.13.

La correlazione con le previsioni numeriche sviluppate in [11] sono simili ma non identiche, qualitativamente le analisi sperimentali sono in accordo con la numerica ma quantitativamente si sono evidenziate lievi discrepanze.

Ciò può essere imputato alla differenza tra manufatto reale e simulazione, posizionamento ed entità del difetto inglobato e procedura di prova, ricordando come le analisi FEM condotte presupponevano un carico si 2500 kg, limitato a 2200 kg durante il test.

Gli unici dati certi della prova sono le misure estensimetriche le quali si sono mostrate in accordo con le misure provenienti dai sensori ottici.

Le deformazioni residue causate dall'inglobamento sui sensori provocano spettri di riflessione distorti in maniera evidente.

Tale fatto ha reso difficoltosa la corretta procedura per ottenere i profili di deformazione, limitandone la precisione pur essendo attendibili.

Si consiglia di inglobare successivi sensori tra lamine di UD evitando l'inglobamento tra tessuti così da limitare le sollecitazioni a taglio (critiche per il metodo implementato).

Analisi successive potranno essere condotte per la validazione del metodo numerico e l'identificazione della propagazione del difetto a fatica. Per correlare definitivamente la ricostruzione della presunta zona delaminata è possibile pensare all'utilizzo di CND, come ultrasuoni o radiografia, al fine di misurare e confrontare con certezza i risultati ottenuti.

# Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti dalla prova a flessione, realizzata sul longherone prodotto e strumentato, sono soddisfacenti e lasciano margini di miglioramento che potranno portare ad evoluzioni future, rendendo il metodo più affidabile e sensibile.

Come è stato possibile rilevare, confrontando le due diverse configurazioni di danno inglobato, l'array posizionato nella soletta superiore ha colto solo parzialmente la discontinuità del campo di deformazione indotta dalla delaminazione (come atteso dalle simulazioni FEM) mentre l'array di 20 sensori FBG, posizionato nella soletta inferiore, visualizza delle discontinuità più evidenti, proporzionali al carico applicato ed imputabili alla delaminazione artificiale introdotta.

Sono state riscontrate delle difficoltà nella ricostruzione della deformazione agente lungo il sensore poiché gli sforzi residui, indotti dalla procedura di inglobamento, distorcono lo spettro di riflessione rendendo difficoltoso il calcolo dello spettro reale e la comparazione tra condizione deformata ed indeformata.

Futuri inglobamenti dovranno essere condotti con perizia, posizionando le fibre ottiche tra lamine di unidirezionale od indagando differenti tecnologie di inglobamento, evitando l'utilizzo di tessuti a contatto con i sensori e limitando le sollecitazioni a taglio agente sulla sezione della fibra, le quali provocano distorsioni della sezione e conseguente modifica dello spettro riflesso dagli FBG.

Dal paragrafo 'Identificazione sensori' possono essere colti degli spunti per apparecchiature future in grado di determinare la corretta posizione dei sensori FBG, utilizzando una sorgente di calore puntiforme. Tale tecnica di indagine risulta precisa ed economica anche se migliori accuratezze ed elevate precisioni possono essere raggiunte sfruttando i moderni analizzatori di segnale luminoso, i quali determinano la posizione dei sensori sfruttando la differenza di tempo intercorso tra l'impulso ed il segnale di ritorno acquisito.

Nell'analizzare i risultati è stato impossibile correlare quantitativamente i risultati ottenuti sperimentalmente con i dati ottenuti dalle analisi FEM condotte in passato [11]. Ciò è dovuto principalmente al differente valori di carico massimo applicato (2200 kg) rispetto al simulato (2500 kg), inoltre non si è verificata la reale estensione del difetto il quale può generare stati di sforzo diversi dal previsto. Anche l'attrezzatura e le caratteristiche delle strutture di rinforzo (centine e nasi), modificati rispetto al caso teorico, inducono un diverso comportamento.

Nonostante tali imprecisioni, gli andamenti qualitativi sono soddisfacenti ed indicano come la strada intrapresa sia corretta.

I metodi numerici sviluppati per la comparazione e ricostruzione degli spettri nonché di risoluzione del problema inverso, si sono mostrati affidabili nei casi in cui gli spettri non siano stati distorti, migliorando altresì i tempi di calcolo rispetto alle procedure passate.

Sviluppi futuri potranno interessare il miglioramento nella procedura di risoluzione del problema inverso, agendo sugli algoritmi di ricostruzione della deformazione (cercando nuovi parametri descrittivi su cui confrontare gli spettri), migliorando la numerica alla base dei metodi ed au-

tomatizzando le fasi preliminari di definizione dati ed identificazione delle condizioni iniziali, attualmente procedure manuali o semiautomatiche, con l'intento di ovviare alle problematiche riscontrate soprattutto durante l'analisi dei segnali provenienti dai sensori inglobati( sollecitazioni residue).

Il processo tecnologico sviluppato per realizzare il laminato ed inglobare nella corretta posizione le fibre ottiche, si è dimostrato solido e funzionale limitando la fuoriuscita di resina, proteggendo efficacemente le fibre nella zona di uscita dal laminato ed ottenendo una finitura superficiale accettabile, con spessori delle solette aventi tolleranze massime di  $\pm 0.1$  mm dal valore nominale.

Lavori futuri potranno essere svolti al fine di correlare i risultati sperimentali ottenuti attraverso analisi FEM con modelli fedeli della struttura realizzata, inoltre le prove condotte hanno avuto lo scopo di verificare il corretto funzionamento del componente nel suo insieme ma sono in numero limitato per poter affermare una reale validità del metodo.

Andranno condotte ulteriori prove statiche, prove a fatica ed indagini di confronto tramite differenti tecniche di controlli non distruttivi inoltre potranno essere studiate differenti tecniche di monitoraggio utilizzando sensori ottici(sensori puntuali, effetto Brillouin, array incollati superficialmente), al fine di valutare le metodologie più adatte.

Concludendo è possibile affermare come la strada intrapresa sia corretta ed i sensori ottici, utilizzati nel lavoro di tesi presentato, colgano bene il campo di deformazione agente all'interno della struttura.

# Appendice A

## Principi ottici

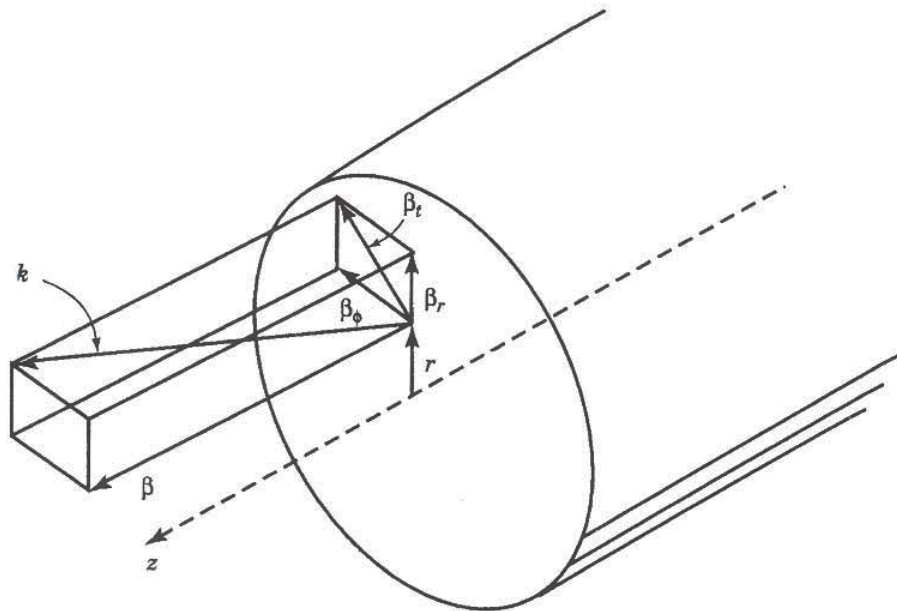
Il presente capitolo in appendice ha l'obiettivo di chiarificare la comprensione di alcuni parametri presenti nelle equazioni differenziali 2.5 2.12 2.19 descriventi l'andamento del campo elettrico della luce nella fibra ottica.

Attraverso schemi e raffigurazioni si cercherà di rappresentare il significato fisico delle grandezze principali.

Il principale parametro che governa la trasmissione del fascio luminoso è l'indice di rifrazione  $n$ , il cui significato è il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo considerato

$$n(\lambda) = \frac{c}{v}$$

, l'indice è in funzione della particolare radiazione considerata.



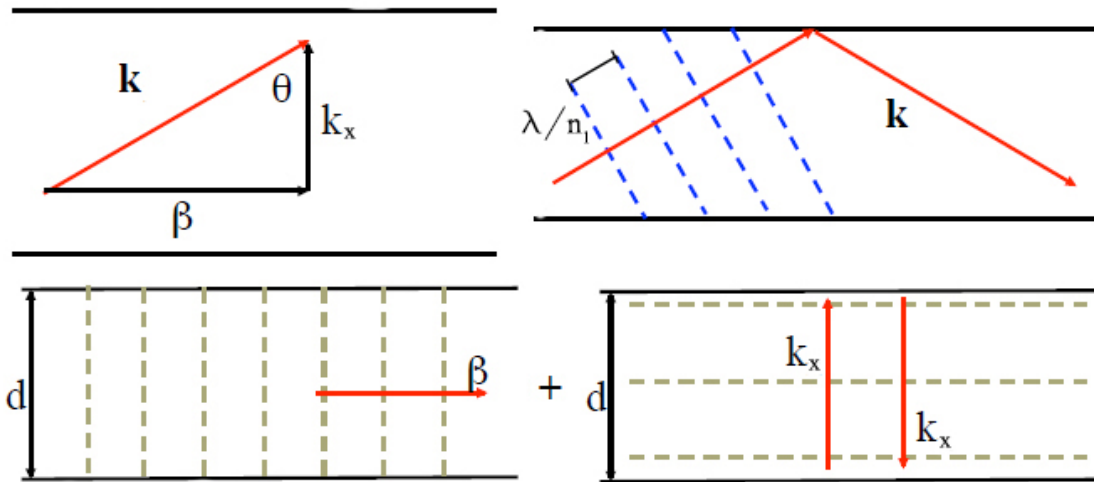
Con  $\mathbf{k}$  viene indicato il vettore d'onda, che descrive la direzione della luce (vettore perpendicolare al piano di variazione del campo elettromagnetico),

$$k = n \frac{\omega}{c}$$

il quale viene diviso lungo le componenti degli assi di riferimento.

Per FO monomodali, usate comunemente per la trasmissione dati, si può supporre che il fascio

passi per l'asse centrale e possa essere scomposto lungo le direzioni longitudinale  $z$  e radiale  $x$ . Un modo d'onda può esistere solo se è presente una risonanza, nel caso in esame la componente



$k_x$  risona all'interno del core, mentre la componente  $\beta$  trasmette il segnale.

$$\mathbf{k} = \beta + \beta_t$$

anche indicato

$$\beta_t = k_x$$

Le due componenti sono scomponibili secondo l'angolo di trasmissione.

$$k_x = n \frac{\omega}{c} \sin \theta$$

$$\beta = n \frac{\omega}{c} \cos \theta$$

La risonanza può essere descritta, in maniera semplificata, secondo la seguente equazione, che definisce la *phase match condition*

$$2kd \cos \theta = 2\pi m$$

dove  $m$  indica il numero del modo.

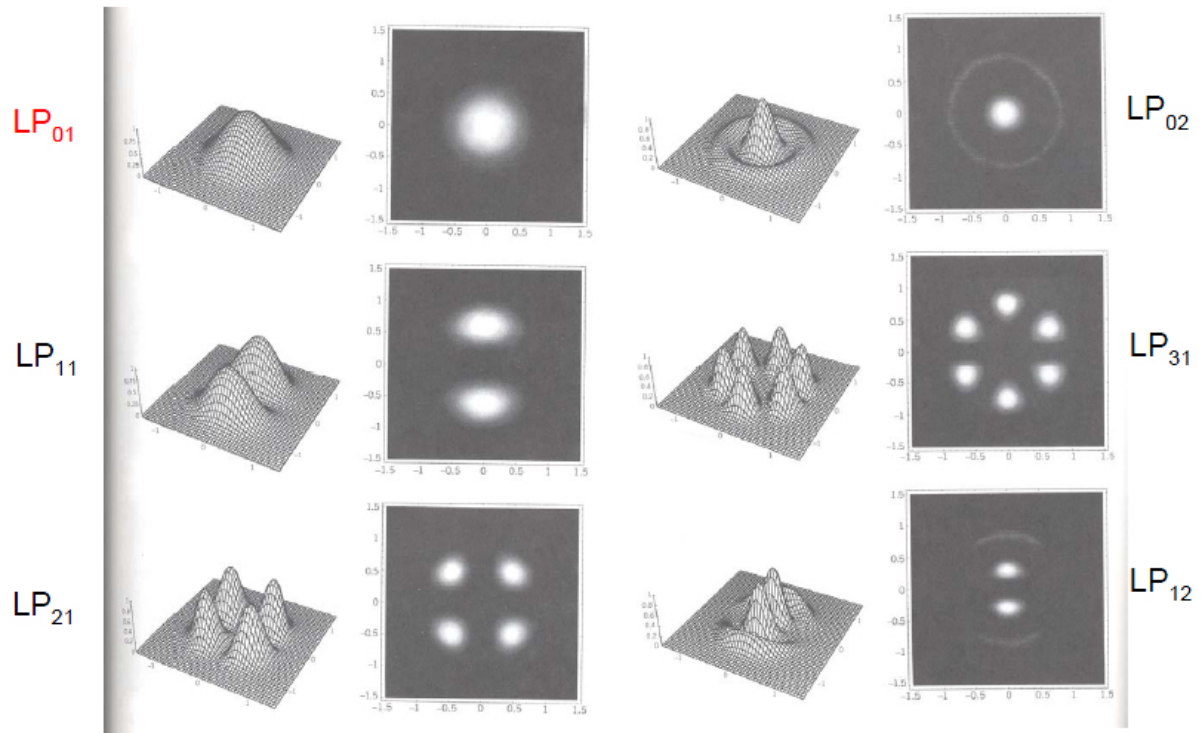
Le fibre ottiche utilizzate nella tesi sono monomodali, esistono però, diversi modi che possono presentarsi, indicati con  $LP_{lm}$ , dove  $l$  rappresenta il numero di modi circolari ed  $m$  radiali, come mostrato in figura.

Esiste un parametro detto *cutoff normalized frequency*  $V_c$  che permette di determinare quali modi possano propagare nel core.

Perché possa esistere solo il primo modo  $LP_{01}$  è necessario che il parametro  $V_c(\lambda) < V_c^{11}$ , dove il parametro assume il valore  $V_c^{11} = 2.405$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot NA$$

dove  $n_1$   $n_2$  indicano rispettivamente i valori di indice di rifrazione di core e cladding.



Come ultima definizione si intende descrivere il significato dell'indice di rifrazione efficace  $n_{eff}$ .

$$n_{eff} = c/V_p = c \frac{\beta}{\omega} = \frac{\beta}{k}$$

$$n_{eff} = n \sin \theta$$

indicando con  $V_p$  il termine denominato *wavguide phase velocity*.

core	GeO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
cladding	SiO <sub>2</sub>		SiO <sub>2</sub>		B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>

Tabella A.1: Materiali e sostanze dopanti per FO





# Appendice B

## Script MATLAB <sup>®</sup>

### Identificazione profilo di apodizzazione

```
1  % programma per la procedura di taratura del profilo di apodizzazione
   % mediante un simil-controllo proporzionale
   % OGNI SOTTORETICOLO DIVISO IN 2

   clc
6  clear all
   close all

   % carico lo spettro acquisito, indeformato.
   %BASE = load('./riflettivita_dati_exp/r_sca3_CELM.txt');
11  %BASE = load('./riflettivita_dati_exp/r_5A_SP_0mm.txt');
   BASE = load('./DTG3IN.txt');

   %.....DATI.....
   % Definisco il numerod dei sottoreticoli, attenzione a descrivere
16  % correttamente il numero, da a, in funzione della lunghezza del
   % sottoreticolo: L=3mm ho 30 punti L=10mm avro' 100punti

   %dati_reticolo = FBGSim_Dati_r_5A_SP_my;
   dati_reticolo = FBGSim_Dati_DTG3;
21

   Nsr=10;

   y_pc_mat=zeros(1,1000);
   y_pc_mat(33:67) =1;
26  y_pc_mat(133:167)=1;
   y_pc_mat(233:267)=1;
   y_pc_mat(333:367)=1;
   y_pc_mat(433:467)=1;
   y_pc_mat(533:567)=1;
31  y_pc_mat(633:667)=1;
   y_pc_mat(733:767)=1;
   y_pc_mat(833:867)=1;
   y_pc_mat(933:967)=1;

36  % valori del controllo proporzionale - derivativo
   k_diag=15;
   k_ul=k_diag/5;
   kd_diag = 0;
   soglia = 0.005; % inizio punto di validita' della forma
```

```

41 | toll=0.003; % tolleranza di arresto dell'iterazione
    | maxiter=6;
    |
    | %.....ALGORITMO.....
    | % Filtra il segnale
46 | w = 0.34; % <----- impostazione della frquenza di taglio ,
    | % per tutti i filtraggi da qui in poi
    | % Butterworth 10 poli
    | [s,r] = butter(10, w, 'low');
    | BASE(:,2) = filtfilt(s,r,BASE(:,2));
51 |
    | Kp_diag=eye(2*Nsr)*k_diag;
    | Kp_u=diag(ones(2*Nsr-1,1)*k_ul,1);
    | Kp_l=diag(ones(2*Nsr-1,1)*k_ul,-1);
    | KP=Kp_diag+Kp_u+Kp_l;
56 | Kd=eye(2*Nsr)*kd_diag;
    | %-----
    | n=1;
    | err=zeros(2*Nsr,1);
    | err_d=zeros(2*Nsr,1);
61 | Me=toll+1;
    | a=ones(2*Nsr,1);
    | % inizio la procedura di controllo iterativo
    | while Me>toll && n<maxiter
    |     if n<3
66 |         err_d = zeros(2*Nsr,1);
    |     end
    | Da=KP*err-Kd*err_d;
    | %a=ones(2*Nsr,1); % vettore dei profili di apodizzazione
71 | a(1) = y_pc_mat(40);
    | a(2) = y_pc_mat(60);
    | a(3) = y_pc_mat(140);
    | a(4) = y_pc_mat(160);
    | a(5) = y_pc_mat(240);
76 | a(6) = y_pc_mat(260);
    | a(7) = y_pc_mat(340);
    | a(8) = y_pc_mat(360);
    | a(9) = y_pc_mat(440);
    | a(10) = y_pc_mat(460);
81 | a(11) = y_pc_mat(540);
    | a(12) = y_pc_mat(560);
    | a(13) = y_pc_mat(640);
    | a(14) = y_pc_mat(660);
    | a(15) = y_pc_mat(740);
86 | a(16) = y_pc_mat(760);
    | a(17) = y_pc_mat(840);
    | a(18) = y_pc_mat(860);
    | a(19) = y_pc_mat(940);
    | a(20) = y_pc_mat(960);
91 |
    | % controllo
    | a=a-Da;
    | lim=find(a<0.4);
    | a(lim)=0.4;
96 | y_pc_mat(33:50) =a(1);
    | y_pc_mat(51:67) =a(2);
    | y_pc_mat(133:150)=a(3);

```

```

101 y_pc_mat(151:167)=a(4);
y_pc_mat(233:250)=a(5);
y_pc_mat(251:267)=a(6);
101 y_pc_mat(333:350)=a(7);
y_pc_mat(351:367)=a(8);
y_pc_mat(433:450)=a(9);
y_pc_mat(451:467)=a(10);
106 y_pc_mat(533:550)=a(11);
y_pc_mat(551:567)=a(12);
y_pc_mat(633:650)=a(13);
y_pc_mat(651:667)=a(14);
y_pc_mat(733:750)=a(15);
111 y_pc_mat(751:767)=a(16);
y_pc_mat(833:850)=a(17);
y_pc_mat(851:867)=a(18);
y_pc_mat(933:950)=a(19);
y_pc_mat(951:967)=a(20);
116 save('y_pc_mat.txt','y_pc_mat','-ASCII')

%—ricostruzione parametri sensori
L = dati_reticolo.L;
Nsr = dati_reticolo.Nsr;
121 LR = dati_reticolo.LR;
p_imp = dati_reticolo.p_imp;
dati_reticolo.per = FBGSim_mod_per_array...
(L, dati_reticolo.M, dati_reticolo.zM, Nsr, LR, p_imp);

126 %risolvo il probelma
[erre, ti, time] = FBGSim_Solutore (dati_reticolo);

[s,r] = butter(10, w, 'low');
NEW = filtfilt(s,r,erre);
131 q=find((BASE(:,2)-soglia)>0);

% ridefinisco gli spettri
BASE_1=BASE(q,:);
136 NEW_1=interp1(dati_reticolo.Lambda,NEW,BASE_1(:,1));

div=round(length(NEW_1)/2/Nsr);
err=zeros(2*Nsr,1);
div3=ceil(div/6);
141 %—————definizione dell'errore—————
err_pp=err; % errore al passo precedente
err(1)=mean(NEW_1(1:div+div3)-BASE_1(1:div+div3,2));
for i=2:2*Nsr-1
146 err(i)=mean(NEW_1((i-1)*div-div3:div*i+div3)-...
BASE_1((i-1)*div-div3:div*i+div3,2));
end
err(end)=mean(NEW_1((Nsr-1)*div-div3:end)-BASE_1((Nsr-1)*div-div3:end,2));
%—————
151 n=n+1;
Me=max(abs(err));
figure(n)
subplot(1,2,1)
plot(err,'k -*', 'linewidth',2);
156 xlabel('k','fontsize',12);ylabel('e','fontsize',12)

```

```

subplot(1,2,2)
plot(y_pc_mat,'k');grid on;
hold on;ylabel('\deltan_{eff} [nm]','fontsize',12)
end
161 n
erre=NEW_1;
figure(n+1)
plot(BASE_1(:,1),BASE_1(:,2),'b',BASE_1(:,1),erre,'r',...
      linspace(BASE_1(1,1),BASE_1(end,1),Nsr+1),zeros(Nsr+1,1),...
166      'k o','linewidth',2);
grid on ; legend('riferimento','ricostruito');
xlabel('\lambda [nm]','fontsize',12);ylabel('R [-]','fontsize',12)

%.....SALVATAGGIO PROFILO.....
171 % salvataggio apodizzaziopne per successiva determinazione della deformata
% a 'zero deformazione'
s_zero=[BASE_1(:,1),erre];
save('def_zero_ric.txt','s_zero','-ASCII')

```

## Processo di suddivisione e calcolo dei baricentri

```

1  function [def,N,lambda_a,lambda_b,lambda_c,lambda_d,...
      La_def,Ri_def,C,C_rif]=deformazione(spettro_rif,spettro_def,...
      lambda_rif,lambda_def,Nsr,dati_reticolo,start,x_rif,x_def,div_rif)
% come input lambda i e lambda def, loro sono le basi che verranno divise
% in x parti per la selezione del profilo. ad ogni ciclo riaggiorno le
6  % lambda prima citate. a questo punto ho basi e valori sia dei profili
% deformati che di riferimento.
%% — definisco le parti di spettro da anlizzare, primo ed ultimo punto —

La = linspace(lambda_rif(1),lambda_rif(end),x_rif);
11 Ri = interp1(lambda_rif,spettro_rif,La);

for j=1:1:length(Ri)
    if (Ri(j) >= start)
        a = j;
16    break
    end
end
for j=length(Ri):-1:1
    if (Ri(j) >= start)
21    b = j;
        break
    end
end
lambda_a = La(a);
26 lambda_b = La(b);
Ri_rif = Ri(a:b);
La_rif = La(a:b);

Ri_rif=interp1(La_rif,Ri_rif,linspace(lambda_a,lambda_b,300));
31 La_rif=linspace(lambda_a,lambda_b,300);

% ————— def —————
La = linspace(lambda_def(1),lambda_def(end),x_def);
Ri = interp1(lambda_def,spettro_def,La);
36
for j=1:1:length(Ri)
    if (Ri(j) >= start)
        c = j;
        break
41    end
end
for j=length(Ri):-1:1
    if (Ri(j) >= start)
46    d = j;
        break
    end
end
lambda_c = La(c);

```

```

lambda_d = La(d);
51 %dlambda def = lambda d - lambda c;
Ri_def = Ri(c:d);
La_def = La(c:d);
Ri_def=interp1(La_def,Ri_def,linspace(lambda_c,lambda_d,300));
La_def=linspace(lambda_c,lambda_d,300);
56 %% determinazione aree spettro indeformato
%
%           div rif = numero di divisioni per sottoreticolo, in lambda
%           PUNTI DI RIFERIMENTO PER IL TRACKING DEI CENTRI AERA
N = Nsr*div_rif;
61 z=10;           % numero di sub discretizzazioni per ogni N
np=z*N;

if np > 1000 % controllo limitazione numero di punti
    np=1000;
66     z=floor(np/N);
end
% Rivaluto lo spettro nei nuovi punti
lambda = linspace(lambda_a,lambda_b,(np+1));
spettro = interp1(La_rif,Ri_rif,lambda);
71
%% calcolo baricentri spettro indeformato

% carico il profilo di apodizzazione
y=load('y_pc_mat.txt');
76 z=load('z_pc_mat.txt');

P=floor(length(y)/N);
Area_apo= trapz(z,y);
Int_rif_norm =zeros(1,N);
81 for i=1:N
    a_apo=trapz(z((i-1)*P+1:i*P),y((i-1)*P+1:i*P));
    Int_rif_norm(i) = a_apo/Area_apo;
end
INT_rif = trapz(La_rif,Ri_rif);
86
% media/max dei valori di riflettivita '
RM = max(Ri_rif);
% setup tolleranza
Amin = min(Int_rif_norm);
91 % definisco la percentuale di area di tolleranza (1=1%)
toll_perc = 0.1;
% calcolo passo di integrazione che garantisca il soddisfacimento della
% tolleranza imposta (valore medio, si sfrutta la casualita' della forma
% d'onda per minimizzare eventuali errori)
96 toll_perc = toll_perc/100;
DA = Amin*toll_perc;
passo=DA/RM*INT_rif;
% discretizzazione con passo calcolato precedentemente in accordo con la
% tolleranza scelta per l'integrazione

```

```

101 nd=round((La_rif(end)-La_rif(1))/passo);

%—— inizializzazione ——
j = 1;
Ap=zeros(length(Int_rif_norm),1);
106 E_rif=zeros(length(Int_rif_norm),1);
C_rif=zeros(length(Int_rif_norm),1);
deltaA=0;

for i=1:length(Int_rif_norm)
111 Arif = Int_rif_norm(i)-deltaA;
AAp=0;
Sa=0;
while AAp < Arif-DA/2

116 j=j+1;
length(La_rif);
aap = trapz(La_rif(j-1:j),Ri_rif(j-1:j)/INT_rif);
xcg = mean([La_rif(j-1),La_rif(j)]);
S = aap*xcg;
121 Sa = Sa+S;
AAp = AAp+aap;
end
C_rif(i)=Sa/AAp;
Ap(i)=AAp;
126 E_rif(i)=La_rif(j);
deltaA=Ap(i)-Arif;
end
%% valutazione dei centri per spettro deformato

131 INT_def = trapz(La_def,Ri_def);
% media/max dei valori di riflettivita '
RM = max(Ri_def);
% setup tolleranza
Amin = min(Int_rif_norm);
136 % definisco la percentuale di area di tolleranza (1=1%)
toll_perc = 0.1;
% calcolo passo di integrazione che garantisca il soddisfacimento della
% tolleranza imposta (valore medio, si sfrutta la casualita' della forma
% d'onda per minimizzare eventuali errori)
141 toll_perc = toll_perc/100;
DA = Amin*toll_perc;
passo=DA/RM*INT_def;
%discretizzazione con passo calcolato precedentemente in accordo con la
%tolleranza scelta per l'integrazione

146 %—— inizializzazione ——
j = 1;
Ap=zeros(length(Int_rif_norm),1);
E=zeros(length(Int_rif_norm),1);
151 C=zeros(length(Int_rif_norm),1);

```

```

deltaA=0;

for i=1:length(Int_rif_norm)
    Arif = Int_rif_norm(i)-deltaA;
156    AAp=0;
    Sa=0;
    while AAp < Arif-DA/2

        j=j+1;
161    length(La_def);
        aap = trapz(La_def(j-1:j), Ri_def(j-1:j)/INT_def);
        xcg = mean([La_def(j-1), La_def(j)]);
        S = aap*xcg;
        Sa = Sa+S;
166    AAp = AAp+aap;
    end
    C(i)=Sa/AAp;
    Ap(i)=AAp;
    E(i)=La_def(j);
171    deltaA=Ap(i)-Arif;
end

format long
diffc=(C-C_rif');
176 figure(4)
plot(La_rif, Ri_rif, La_def, Ri_def, 'r', C_rif, zeros(length(C_rif),1), '. k'
    ,...
    C(1:end), zeros(length(C(1:end)),1), '. m', lambda, spettro, '.c')
grid on; legend('rif', 'def')
%% ricostruzione della deformazione
181 grad=1/((1-dati_reticolo.pe)*dati_reticolo.LambdaBragg)*1e6;
%grad = 830;[micro eps/nm]
def=diffc*grad;
figure(2)
plot(def, '. ')

```



## Determinazione della deformazione, FGBCenter

```
function FBGcenter()  
% funzione del pacchetto FBG_sim che ha lo scopo di calcolare lo  
% spostamento del baricentro delle fettine d'area in cui vengono suddivisi  
% gli spettri di riferimento e deformato. L'output finale sono le  
5 % deformazioni applicate lungo l'intera lunghezza del sensore in esame  
close all  
clear all  
clc  
%% imposto i dati per la corretta descrizione del reticolo  
10 t1 = tic;  
  
%dati_reticolo = FBGSim_Dati_r_5A_SP_my();  
%dati_reticolo = FBGSim_Dati_sca3;  
dati_reticolo = FBGSim_Dati_DTG3();  
15 L = dati_reticolo.L;  
Nsr = dati_reticolo.Nsr;  
LR = dati_reticolo.LR;  
p_imp = dati_reticolo.p_imp;  
dati_reticolo.per = FBGSim_mod_per_array...  
20 (L, dati_reticolo.M, dati_reticolo.zM, Nsr, LR, p_imp);  
  
%dati_reticolo_def = FBGSim_Dati_r_5A_SP_my();  
% dati_reticolo_def = FBGSim_Dati_SAR;  
dati_reticolo_def = FBGSim_Dati_DTG3();  
25 %% ..... carico gli spettri ed imposto i dati.....  
%spettro_rif = Interpola_spettro  
% ('./riflettivita_dati_exp/r_sca3_CELM.txt', dati_reticolo.Lambda);  
%spettro_def = Interpola_spettro  
% ('./riflettivita_dati_exp/r_dist3_CELM.txt', dati_reticolo.Lambda);  
30 %spettro_rif = Interpola_spettro  
% ('./riflettivita_dati_exp/r_5A_SP_0mm.txt', dati_reticolo.Lambda);  
%spettro_def = Interpola_spettro  
% ('./riflettivita_dati_exp/r_5A_SP_4mm.txt', dati_reticolo.Lambda);  
  
35 spettro_def = Interpola_spettro('./DTG3EXPDef.txt', dati_reticolo.Lambda);  
spettro_rif = Interpola_spettro('./DTG3IN.txt', dati_reticolo.Lambda);  
  
div_rif=1; % [sottodivisioni per ogni singolo reticolo, massimo 2]  
  
40 % minimo valore dell'errore accettabile  
ERR=0.4;  
  
% iterazioni massime  
nmax=1;  
45  
% percentuale di altezza per calcolo primo punto(attenzione valutarlo bene  
)  
h =0.1;
```

```

%% ..... ALGORITMO .....
50 tt_rif=find(isnan(spettro_rif));
   if sum(tt_rif)>0;
       spettro_rif(tt_rif)=0;
   end
55 tt_def=find(isnan(spettro_def));
   if sum(tt_def)>0;
       spettro_def(tt_def)=0;
   end

60 w = 0.9;
   % Butterworth 10 poli
   [s,r] = butter(10, w, 'low');
   % Filtra il segnale
   spettro_rif = filtfilt(s,r,spettro_rif);
65 spettro_def = filtfilt(s,r,spettro_def);
   plot(dati_reticolo.Lambda,spettro_rif);
   spettro_rif = spettro_rif';
   spettro_def = spettro_def';
   plot(spettro_rif, 'k');hold on
70 plot(spettro_def, 'r');
   %% definizione dei parametri governanti l'iterazione successive

   % divisioni per il tracking dei baricentri e stima estremi di calcolo
   N = Nsr*div_rif;
75 lambda_rif = dati_reticolo.Lambda;
   lambda_def = dati_reticolo.Lambda;
   MM = max(spettro_def);
   start = MM*h;
   x_rif = length(lambda_rif)*2;
80 x_def = length(lambda_def)*2;

   % inizializzazione dei vettori
   n=0;
   E=1;
85 def=zeros(N,1);
   err=ones(N,1);
   %——— inizio ciclo ———
   while E>ERR && n<nmax
       n=n+1
90 length(lambda_def);
   length(spettro_def);
   %chiamata alla funzione calcolante le deformazioni puntuali
   [Ddef,N,lambda_a,lambda_b,lambda_c,lambda_d,La_def,Ri_def,C,C_rif]=...
       deformazione(spettro_rif,spettro_def,lambda_rif,lambda_def,...
95 Nsr,dati_reticolo,start,x_rif,x_def,div_rif);

   %controllo sull'errore per agire con la deformazione
   ii=find(err<ERR);
   Ddef(ii)=0;

```

```

100 Passo_periodo_C = C/(2*dati_reticolo.n0);

% matrice di correlazione tra punti spaziali e
% periodo reticolo relativo a centro(C)
105 Corr=zeros(N,N);
if n>1
    passo_periodo_mean=zeros(N,1);
    Q = ceil(length(dati_reticolo_def.per)/N);
    na = ceil(Q/10);
110 for j=1:N
    A =(j-1)*Q+na;
    B = j*Q-na;
    passo_periodo_mean(j) = mean...
        ([dati_reticolo_def.per(A) dati_reticolo_def.per(B)]);
115 end

% calcolo matrice correlazione (idealmente diagonale di 1)
for j=1:length(passo_periodo_mean)
    [~,js]=min(abs(passo_periodo_mean-Passo_periodo_C(j)));
120 Corr(js ,j)=1;
end

% controllo del reticolo associato alla deformazione
Ddef=Corr*Ddef;
125 end

% controllo sulla deformazione per avvicinarsi all'ottimo
def=Ddef+def;

130 % definizione dei punti (nella lunghezza del reticolo) a cui associare le
% deformazioni
L_fbg=3; %[mm]
l1=dati_reticolo.L/1e6/Nsr/2; %[ semi ampiezza del singolo sottoreticolo ,
% primo punto del centro FBG (mm)]
135 l2=L_fbg/2;
Dl2=L_fbg*Nsr/N;
dl2=L_fbg*Nsr/N/2;
LLi=zeros(div_rif,1);
LLi(1)=l1-l2+dl2;
140 for i=2:div_rif
    LLi(i)=LLi(i-1)+Dl2;
end
LL=LLi;
for k = 1:Nsr-1
145 la=k*l1*2+LLi;
    LL=[LL;la];
end

figure(3)
150 plot(LL,def,LL,def,'.r',linspace(0,dati_reticolo.L/1e6,N),def,'.-');

```

```

LL=linspace(11,dati_reticolo.L/1e6-11,N);
LL(1)=0;
LL(end)=L/1e6;
155 % (100 = numero punti arbitrario)
def_ric = pchip(LL,def,linspace(0,dati_reticolo.L/1e6,100));

%—————CONFRONTO GRAFICO con DEFORMAZIONE di riferimento—————
eps = [0.75 0.82 0.9 1.1 1.3 1.2 1.1 1 1.4 1.45 1.55]*(1e3);% def. expected
160 z = [0 10 20 30 40 50 53 60 70 80 90 95]+5;%[mm]
z_int = [0:0.1:z(end)];
def_sim = pchip(z,eps,z_int);
%—————

165 figure(10)
assex=linspace(0,dati_reticolo.L/1e6,100);
plot(linspace(0,dati_reticolo.L/1e6,100),def_ric,'k',...
     z_int,def_sim,'r','linewidth',2);
hold on;plot(LL,def,'r o','linewidth',2);%
170 title('deformazione lungo l''array');xlabel('L [mm]','fontsize',11)
;ylabel('\mu \epsilon','fontsize',12);grid on
axis([assex(1) assex(end) min(def)-50 max(def)+50]);hold off
%% ricostruzione spettro secondo deformazione precedentemente calcolata
L = dati_reticolo_def.L;
175 Nsr = dati_reticolo_def.Nsr;
LR = dati_reticolo_def.LR;
p_imp = dati_reticolo_def.p_imp;
dati_reticolo.per = FBGSim_mod_per_array...
(L, dati_reticolo_def.M,dati_reticolo_def.zM, Nsr, LR, p_imp);
180 LL=linspace(0,dati_reticolo.L/1e6,100);

%ricalcolo parametri del reticolo 'affetto' dalla deformazione
[zMdef, perdef, dzdef] = FBGSim_Reticolo_Deformato...
(dati_reticolo_def, def_ric/(1e6), LL*1e6);
185 dati_reticolo_def.zM = zMdef;
dati_reticolo_def.per = perdef;
dati_reticolo_def.dzdef = dzdef;
figure(11)
plot(dati_reticolo_def.zM/1e6,dati_reticolo_def.per,'r','linewidth',2);
190 grid on;hold on

lam_1=min(lambda_a,lambda_c);
lam_2=max(lambda_b,lambda_d);

195 dati_reticolo_def.Lambda = (lam_1-0.05:dati_reticolo.ris:lam_2+0.05);
[spettro_gen] = FBGSim_Solutore(dati_reticolo_def);

%%
% ricostruisco lo spettro in modo tale che i punti dei due spettri a
200 % confronto siano gli stessi
spettro_gen=interp1(dati_reticolo_def.Lambda,spettro_gen,La_def);

```

```

w = 0.4; % attenzione! influenza molto l'ampiezza dei picchi
% Butterworth 10 poli
205 [s,r] = butter(10, w, 'low');
% Filtra il segnale ricostruito
spettro_gen_p = filtfilt(s,r,spettro_gen);
%Ri_def = filtfilt(s,r,Ri_def);

210 size(Ri_def);
size(spettro_gen);

%% calcolo errore
err=zeros(N,1);

215 %
%-----procedura di calcolo errore-----
Crif=1000*C;
extr=ceil(Crif(1:end-1)+diff(Crif)/2);
220 extr=extr/1000;
lamb_lim=zeros(length(extr),1);

for ii=1:length(extr)
    [~,i]=min(abs(La_def-extr(ii)));
225 lamb_lim(ii)=i;
end
err(1)=mean(abs(spettro_gen(1:lamb_lim(1))...
    /mean(spettro_gen(1:lamb_lim(1)))-Ri_def(1:lamb_lim(1))...
    /mean(Ri_def(1:lamb_lim(1))));
230 for i=1:length(extr)-1
    er=(spettro_gen(lamb_lim(i):lamb_lim(i+1))...
        /mean(spettro_gen(lamb_lim(i):lamb_lim(i+1)))) - ...
        (Ri_def(lamb_lim(i):lamb_lim(i+1)) / ...
        mean(Ri_def(lamb_lim(i):lamb_lim(i+1))));
235 err(i+1)=mean(abs(er));
end
err(end)=mean(abs(spettro_gen(lamb_lim(end):end) / ...
    mean(spettro_gen(lamb_lim(end):end)) - ...
240 Ri_def(lamb_lim(end):end)/mean(Ri_def(lamb_lim(end):end))));
%
E=max(err);
err

245 if n==1
lamb_lim = length(La_def)*ones(1,N-1);
end

length(spettro_gen);
250 length(Ri_def);

figure()

```

```

plot(La_def,spettro_gen_p,'r',La_def,Ri_def,'b',...
      La_def(lamb_lim),zeros(1,N-1),'*k','linewidth',2);
255 legend('ricostruito','originale');
xlabel('\ $\lambda$  [nm]','fontsize',12);ylabel('R [-]','fontsize',11);grid on
%title ('SPETTRI DEFORMATI')

260 % RIDEFINISCO gli spettri per il confronto al passo successivo
spettro_rif = spettro_gen_p;
lambda_rif = La_def;% linspace(La_def(1),La_def(end),length(La_def));
spettro_def = Ri_def;
lambda_def = La_def;
265 fprintf(strcat('errore=','num2str(E)'));
end

%% _____

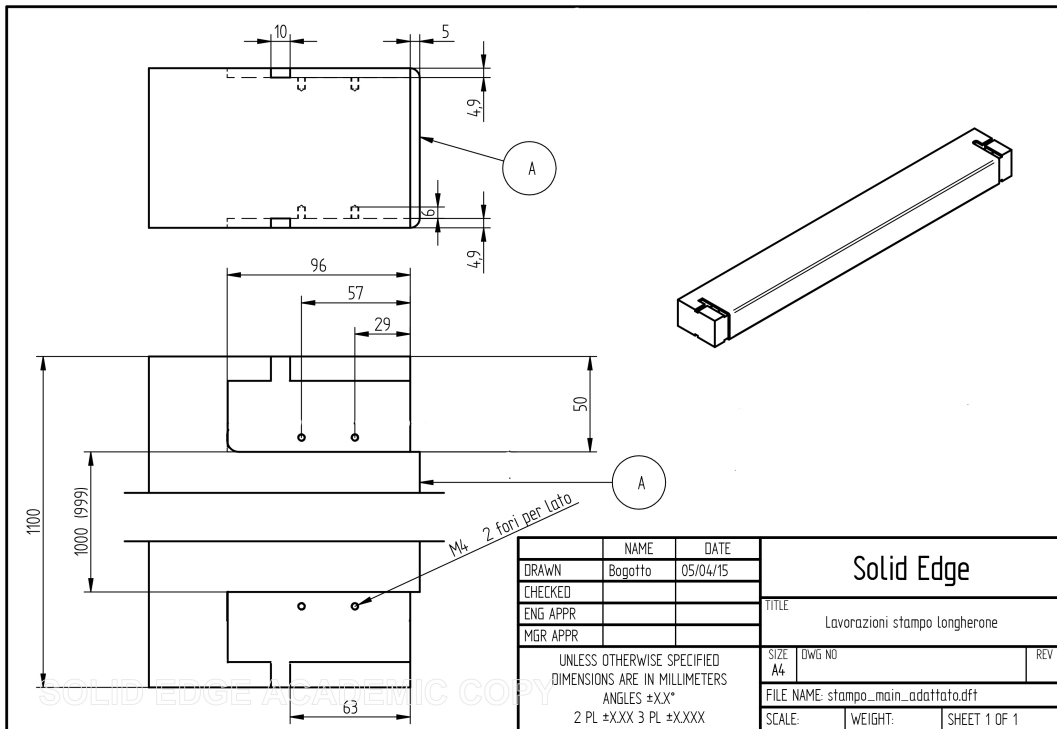
270 t2=toc(t1);
disp('Tempo totale di calcolo FBGStrain [sec]: ')
disp(t2);

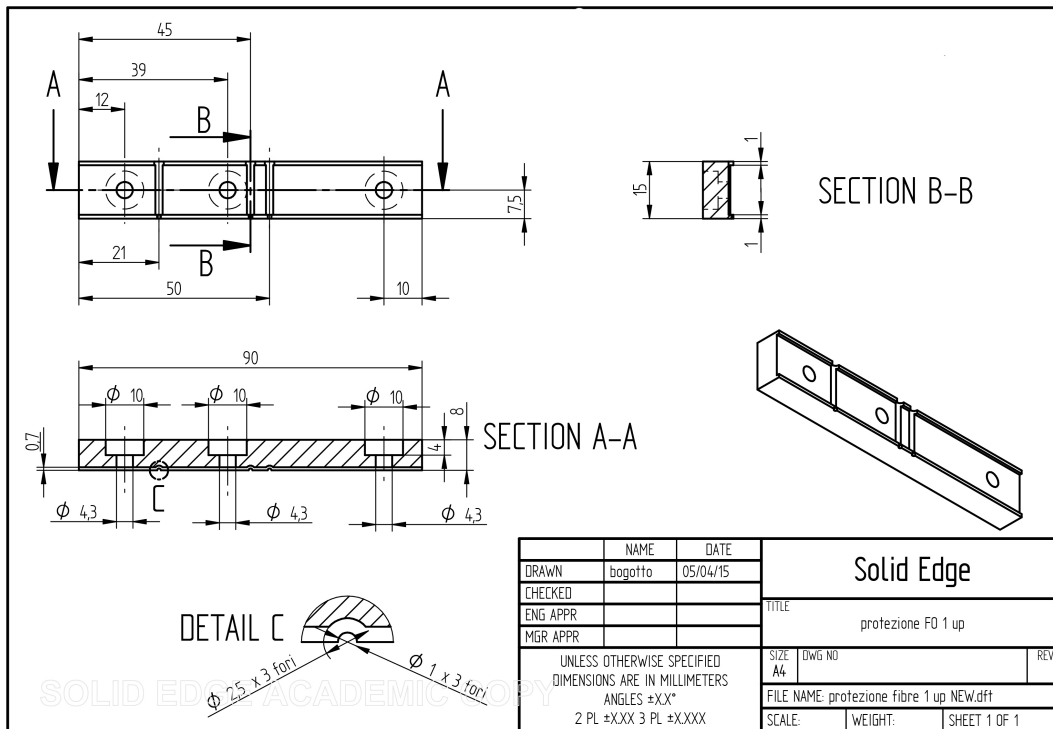
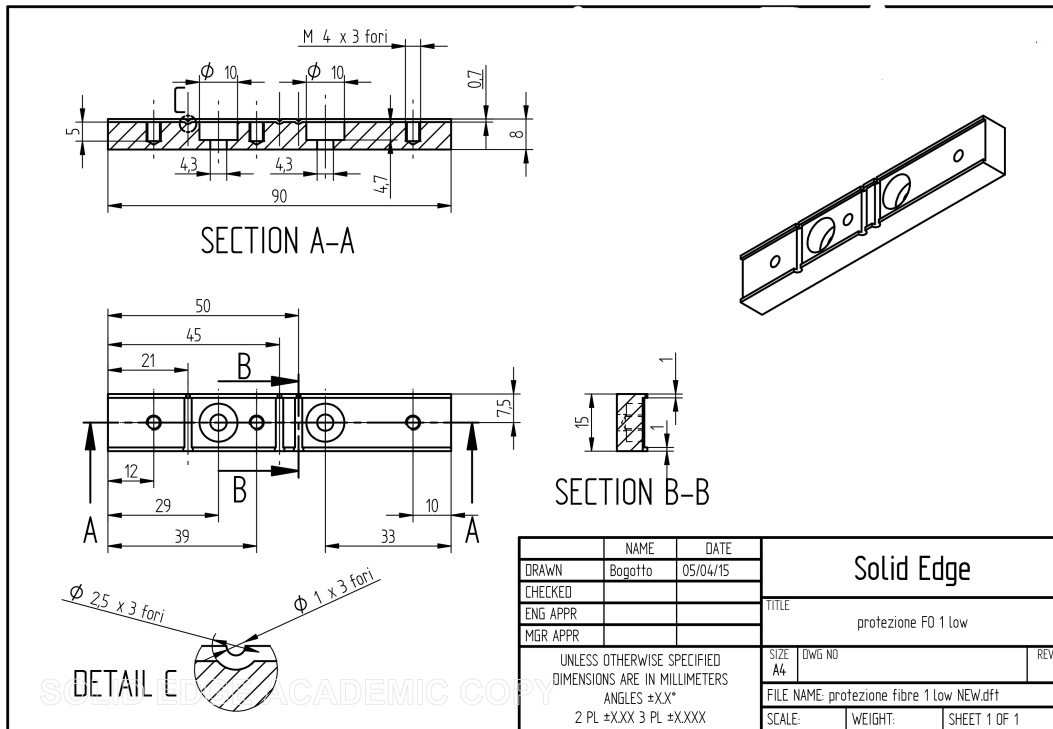
```

# Appendice C

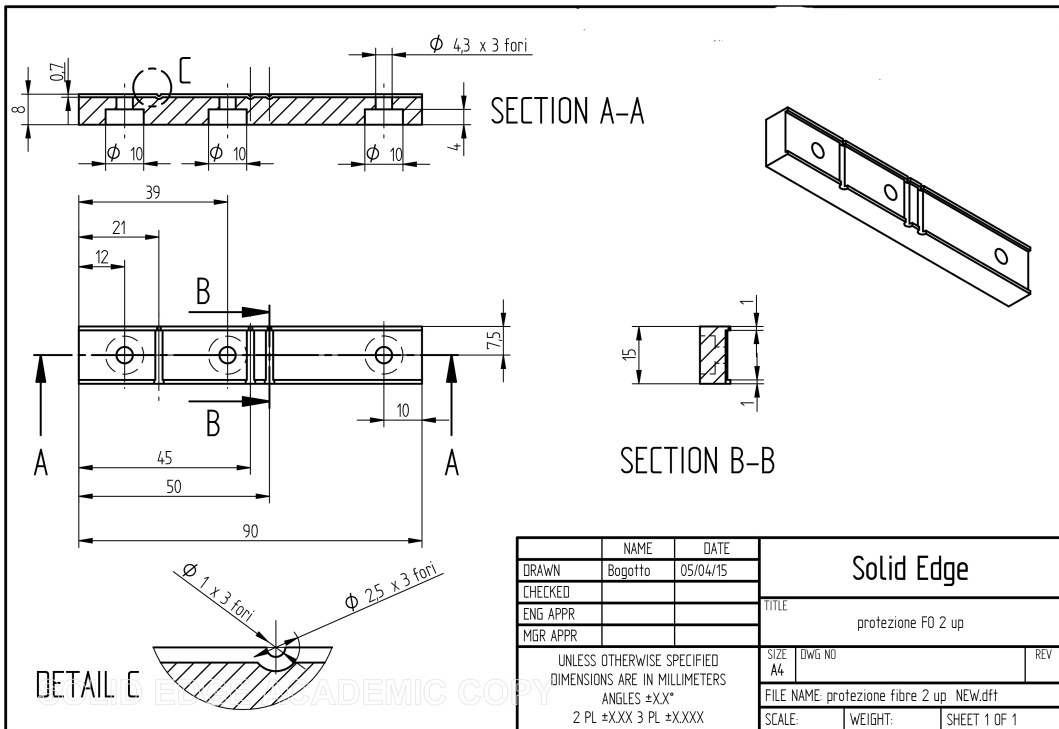
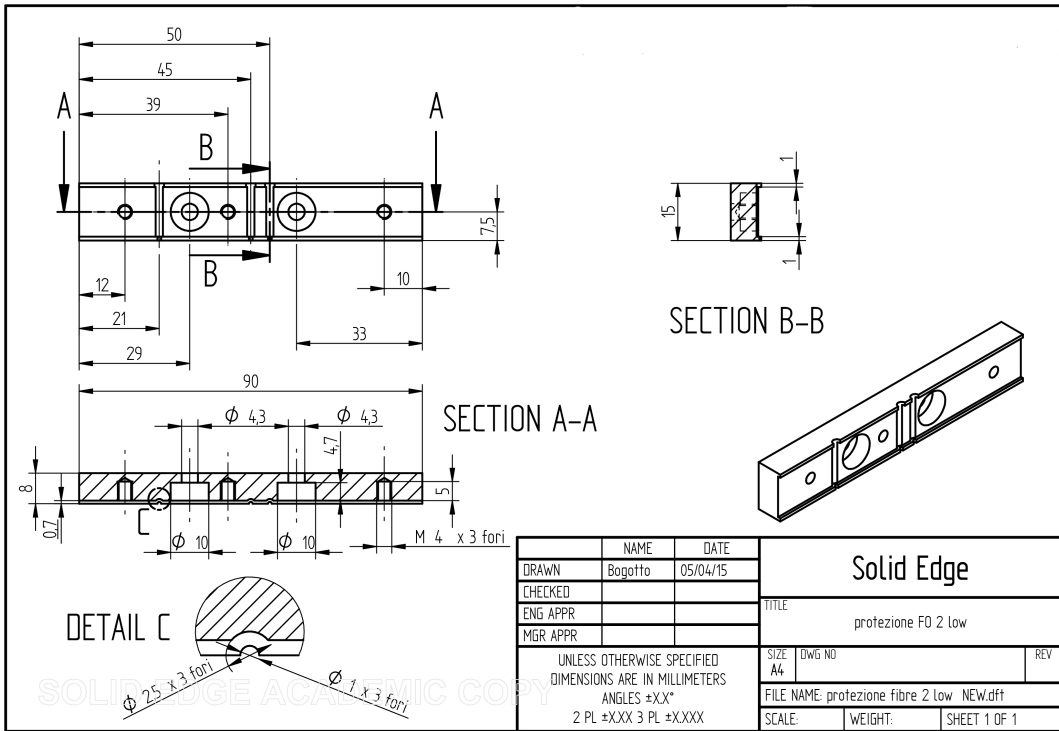
## Disegni di produzione dei componenti

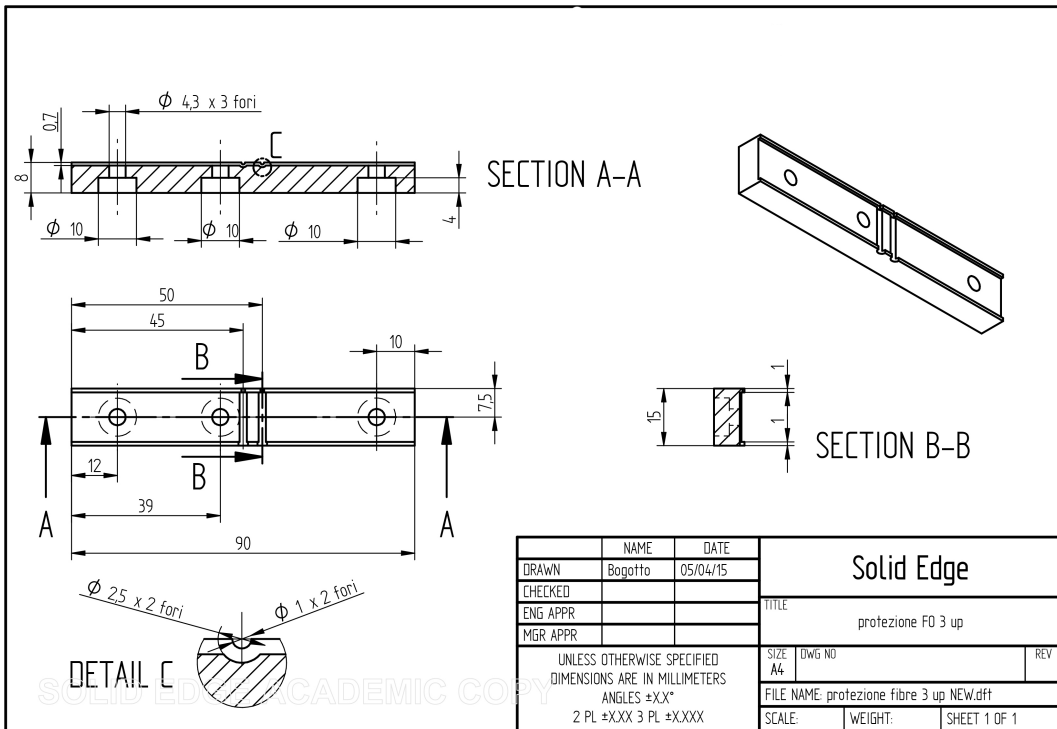
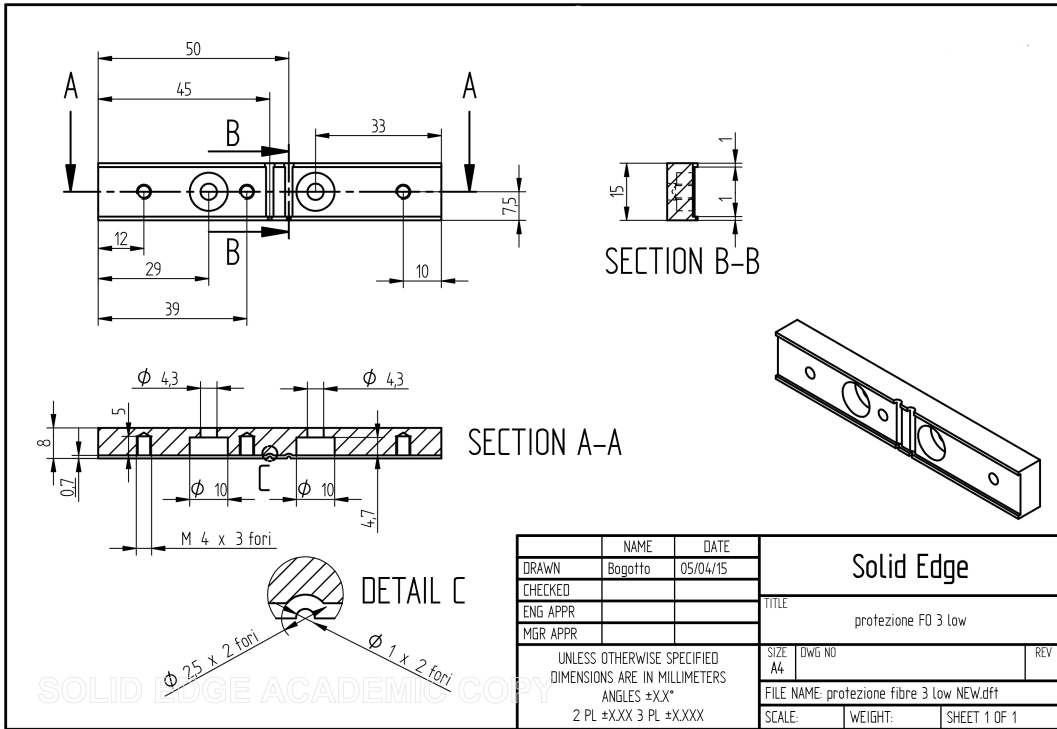
### Attrezzatura di laminazione

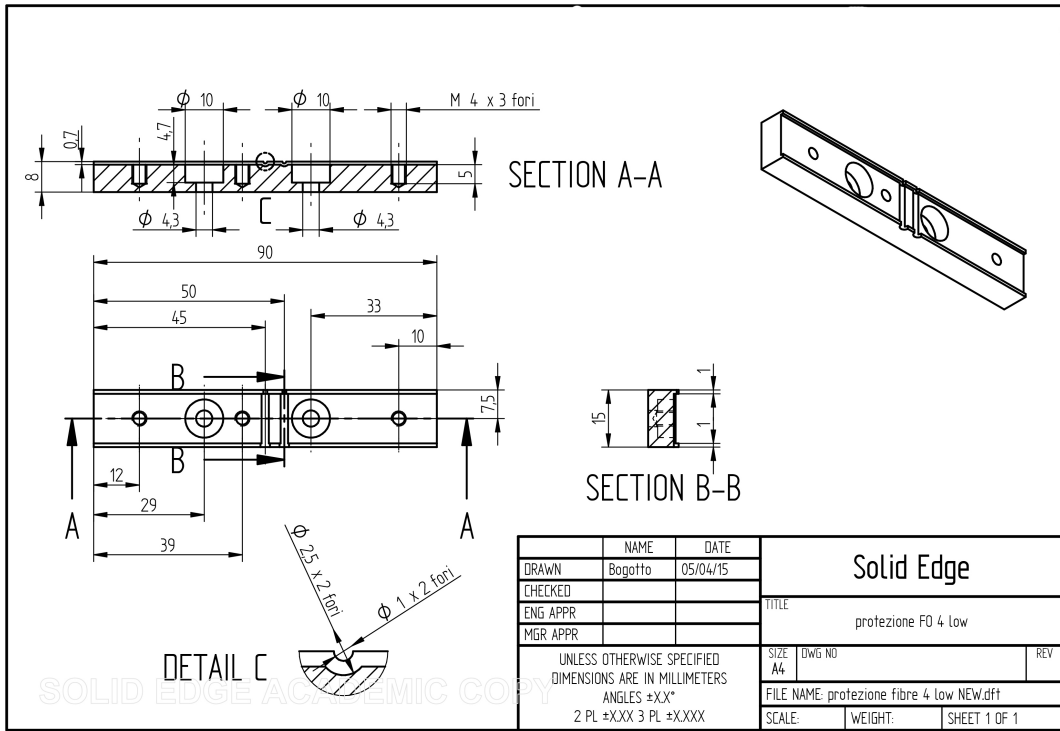
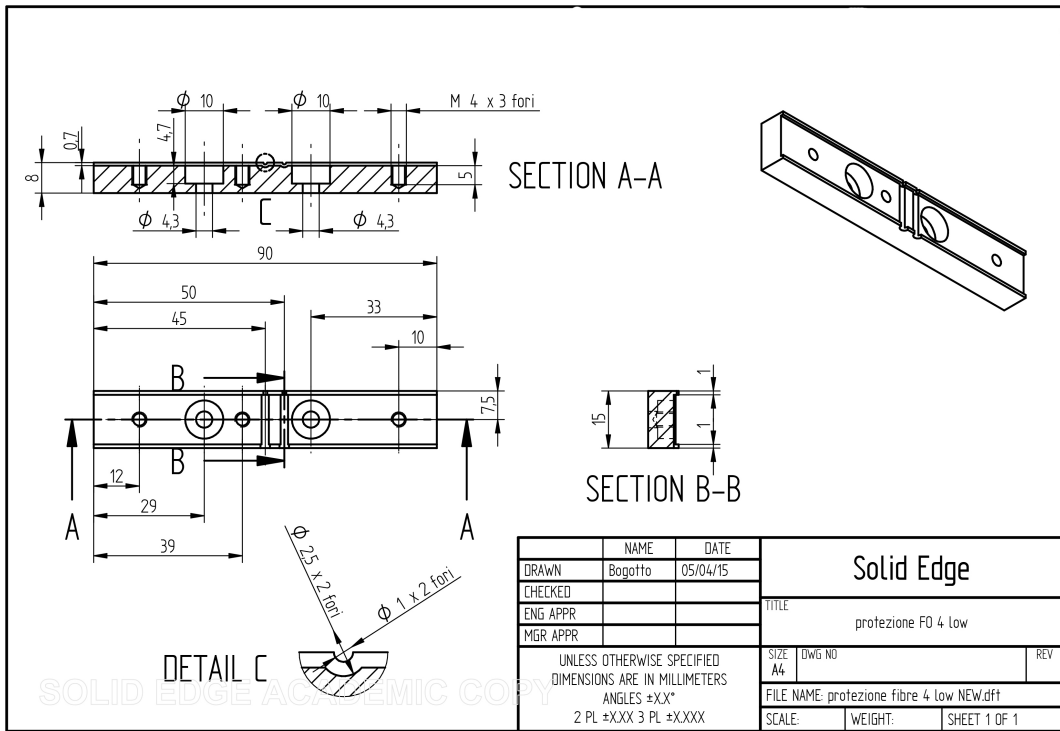












# Longherone di prova

Technical drawing of a central angle bracket (centina centrale). The drawing includes a top view, a side view, and a perspective view. Dimensions are as follows: top view width 92, height 105, hole spacing 20 and 34, hole diameter  $\phi 8$ ; side view height 45, hole spacing 22, 42, 62, and 17.5; perspective view shows a 90-degree angle with 14 holes. A detail view shows a corner with a thickness of 8 and a radius of R 5.

14 FORI  $\phi 8$ mm

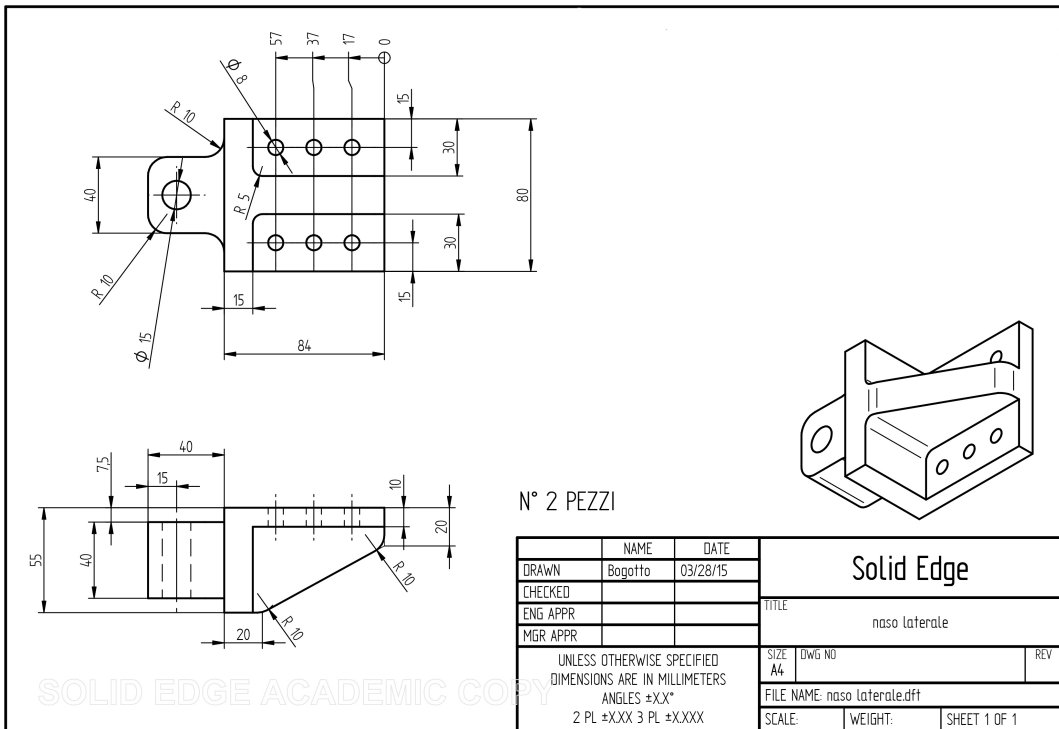
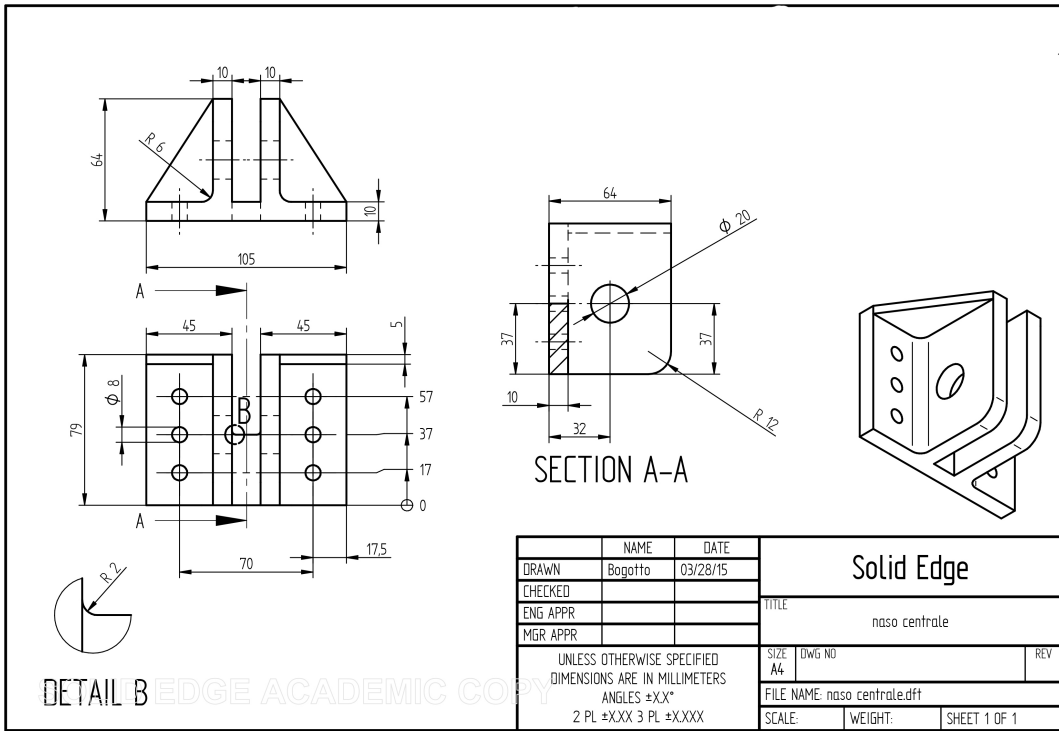
NAME		DATE	Solid Edge	
DRAWN	Bogotto	03/27/15	TITLE	
CHECKED			centina centrale	
ENG APPR			SIZE	DWG NO
MGR APPR			A4	REV
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX° 2 PL ±XXX 3 PL ±X,XXX			FILE NAME: centina_centrale.dft	
SCALE:		WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	

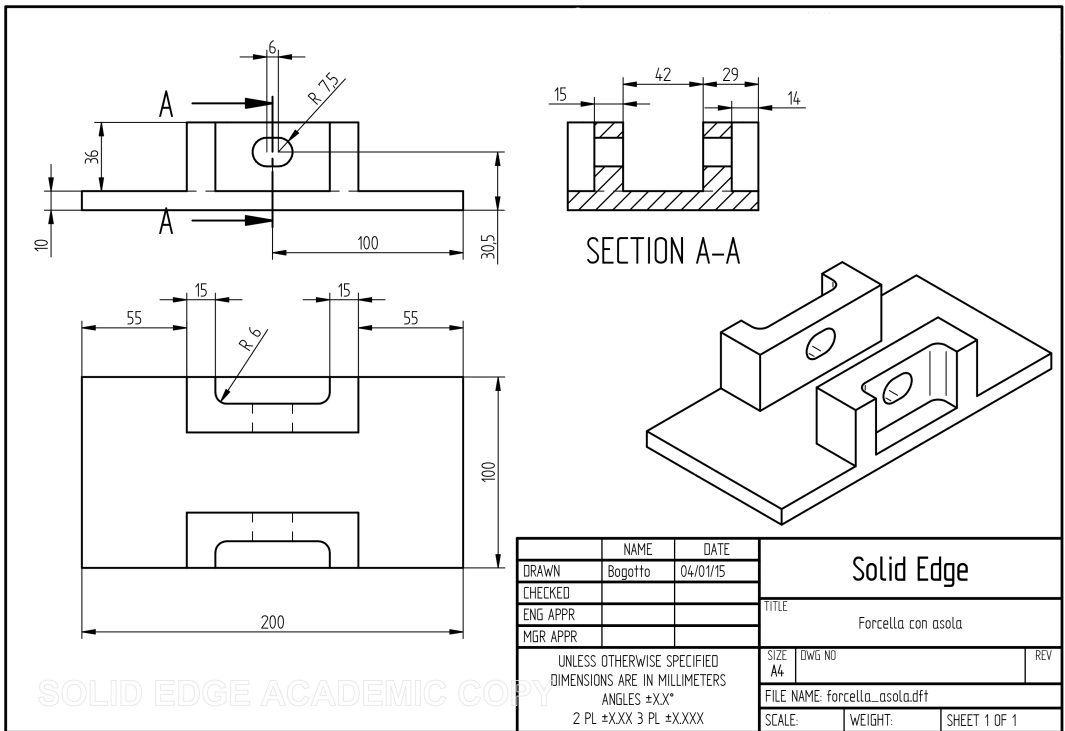
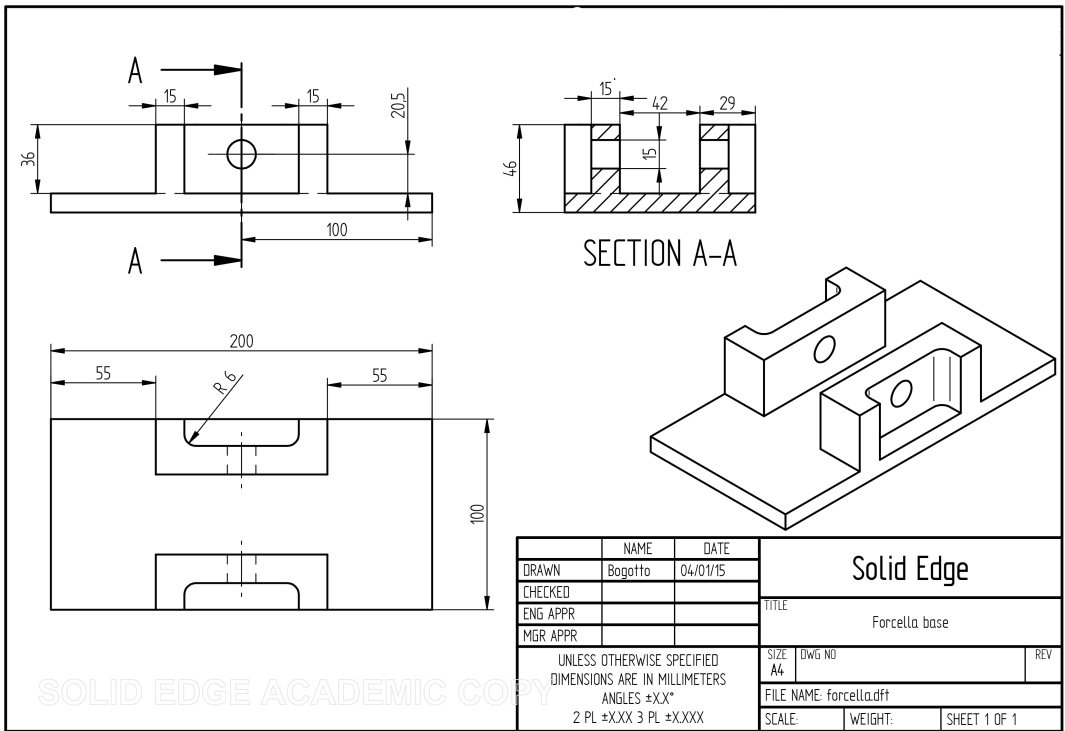
Technical drawing of a lateral angle bracket (centina laterale). The drawing includes a top view, a side view, and a perspective view. Dimensions are as follows: top view width 92, height 80, hole spacing 15 and 34, hole diameter  $\phi 8$ ; side view height 32.5, hole spacing 22, 42, 62, and 84; perspective view shows a 90-degree angle with 14 holes. A detail view shows a corner with a thickness of 8 and a radius of R 5.

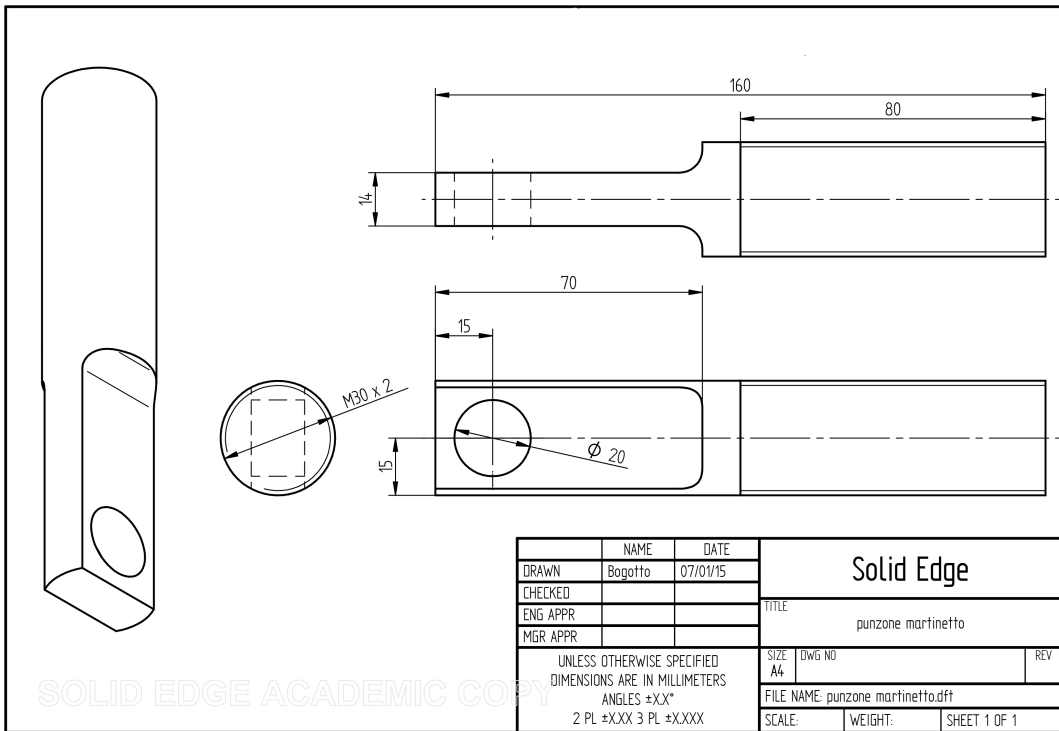
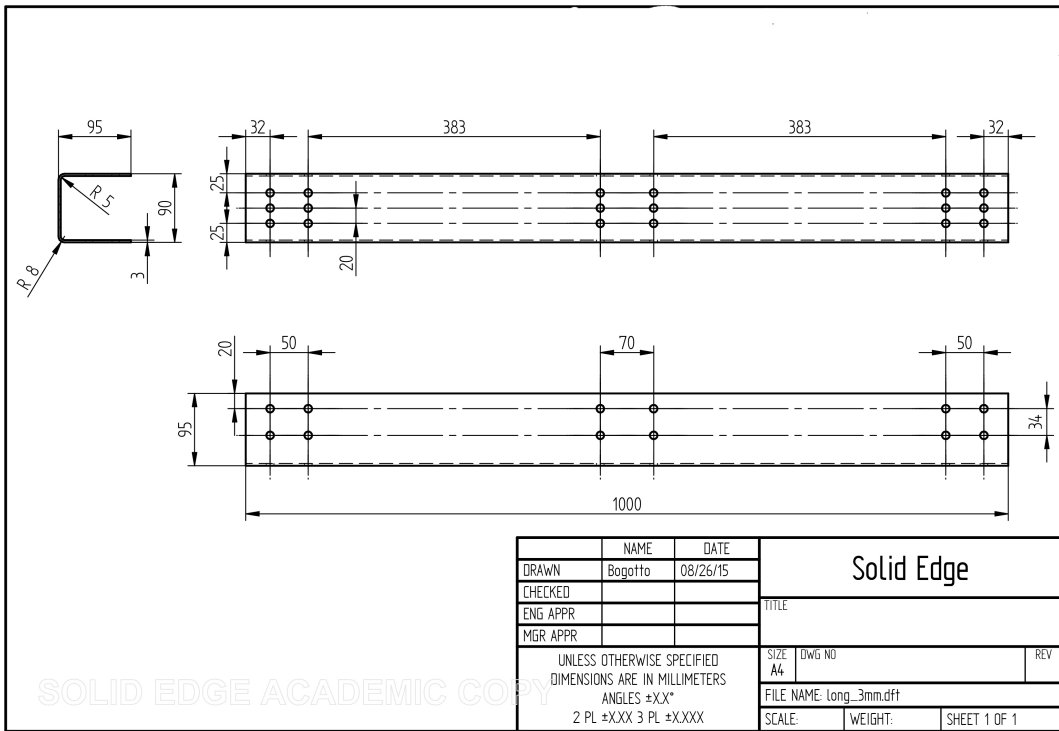
14 FORI  $\phi 8$ mm

N° 2 PEZZI

NAME		DATE	Solid Edge	
DRAWN	Bogotto	03/28/15	TITLE	
CHECKED			Centina laterale	
ENG APPR			SIZE	DWG NO
MGR APPR			A4	REV
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES ±XX° 2 PL ±XXX 3 PL ±X,XXX			FILE NAME: centina_laterale.dft	
SCALE:		WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	











# Bibliografia

- [1] D. Balageas. Non destructive evaluation of cooperative structures (NDECS): A third way? Technical report, ONERA, Structure & Damage Mech. Dept, Chatillon, France, 2006.
- [2] B. Glisic, D. Inaudi. *Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Wiley Std, 2007.
- [3] D. Sala. Studio numerico e sperimentale di sensori a fibra ottica per monitoraggio strutturale, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2011-2012.
- [4] G. Cuneo. Studio numerico e sperimentale di sensori a fibra ottica per applicazioni di structural health monitoring, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013.
- [5] D. Balageas, C.P. Fritzen, A. Guemes . *Structural Health Monitoring*. ISTE Ltd, first edition, 2006.
- [6] M.M. Derriso, D.M. Pratt, D.B. Homan, J.B. Schroeder, R.A. Bortner, editor. *Integrated Vehicle Health Management: the key of future aerospace system*. Diagnostics & Prognostics to structural health management, 4th International Workshop, DEStech, September 2003, Stanford, CA.
- [7] Saristu program, Online 30-08-15. <http://www.saristu.eu>.
- [8] Raman Kashyap. *FIBER BRAGG GRATINGS*. Academic Press, 1999. BT Laboratories, Martlesham Heath, Ipswich, UK .
- [9] I. Petermann. *Fiber Bragg Gratings. Realization, Characterization and Simulation*. PhD thesis, Thesis in Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Spring 2007.
- [10] C.H. Lee, J. Lee, M.K. Kim, K.T. Kim. Characteristics of fiber bragg grating temperature sensor using the thermal strain of an external tube. *Journal of Korean Physical Society*, 59(5), November 2011.
- [11] F. Zanetti. Monitoraggio delle delaminazioni in travi in composito : analisi di fattibilità e studi numerici, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013.
- [12] G.Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini . Didpense del corso di tecnologia e materiali aerospaziali. Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale. cap.22, cap.37, cap.42, cap.44, cap.52, cap.57 cap.61.
- [13] A. Pastore. Sviluppo di un sistema di monitoraggio in fibra ottica per strutture aeronautiche in composito, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013.
- [14] L. Accaroli. Monitoraggio strutturale di giunzioni in composito, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2012-2013.

- [15] Statistical summary of commercial jet airplane accidents, Online 05-09-15.  
<http://www.boeing.com>.
- [16] Micron Optics Inc, 1852 Century Place NE, Atlanta. *Optical Sensing Instrumentation and Software ENLIGHT*, 2013. Manual.