



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE

# Università degli Studi di Padova

---

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione - DEI

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Informazione

## Sensori in fibra ottica e applicazioni nel monitoraggio delle strutture di ingegneria civile

**Relatore:**

Prof. Marco Santagiustina

**Candidato:**

Riccardo Principe

**Matricola:**

1227151

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

25 Novembre 2022



# Abstract

La presente tesina è incentrata sulla tecnologia emergente dei sensori in fibra ottica, il cui impiego è notevolmente aumentato grazie alla ottima sensibilità di questi strumenti. Infatti questo documento sottolinea i notevoli vantaggi che la fibra ottica presenta: questa tecnologia è piccola, leggera, robusta, facilmente gestibile ed è composta da materiale dielettrico che la rende immune alle interferenze elettromagnetiche. Inoltre verranno presentate le due principali tipologie di sensori in fibra ottica (OFS) che possono essere distribuiti lungo la fibra oppure in piccole sezioni. Nello specifico verranno esaminati i sensori distribuiti (DOFS) che sfruttano lo scattering di Rayleigh, una proprietà intrinseca della fibra, che permette di rilevare direttamente su di essa gli agenti fisici, come una variazione di temperatura e pressione. Infine verranno riportati una serie di applicazioni di questi sensori nel monitoraggio delle strutture di ingegneria civile, tra i quali un particolare esempio riguarda la rilevazione di fessurazioni sulla superficie di trave in calcestruzzo.

*Dedico questo spazio del mio elaborato alle persone che hanno contribuito, con il loro supporto, alla realizzazione dello stesso.*

*Un ringraziamento speciale ai miei nonni, Nadia e Gianfranco, che mi hanno sempre sostenuto e motivato in questo percorso di studi.*

*Un grazie a Eleonora, che mi ha aiutato ad affrontare i momenti di difficoltà standomi vicino.*

*A i miei compagni di università Sara, Mattia e Francesco, grazie ai quali ho vissuto serenamente questo periodo triennale, sia nel tempo libero che nello studio.*

*Alla mia famiglia, che è stata sempre al mio fianco in ogni mia decisione.*

*Al prof. Marco Santagiustina, per l'aiuto nella realizzazione di questo elaborato*

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Dedica</b>	<b>II</b>
<b>Indice</b>	<b>III</b>
<b>Introduzione</b>	<b>V</b>
<b>1 Fibre Ottiche</b>	<b>1</b>
1.1 Funzionamento . . . . .	1
1.2 Proprietà della guida d'onda delle fibre ottiche . . . . .	4
1.3 Caratterizzazione della Fibra Ottica . . . . .	5
<b>2 Sensori in Fibra Ottica (OFS)</b>	<b>11</b>
2.1 OFS intrinseci ed estrinseci . . . . .	12
2.1.1 Reticoli di Bragg in fibra (FBG) . . . . .	14
2.1.2 Sensori a campo evanescente (EFS) . . . . .	17
<b>3 Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (DOFS)</b>	<b>19</b>
3.1 I fenomeni di Scattering . . . . .	21
3.2 Sensori di Rayleigh . . . . .	23
3.3 Principi di funzionamento . . . . .	24
3.3.1 Tecnologie OTDR . . . . .	25
3.3.2 Tecnologie OFDR . . . . .	29
<b>4 Applicazioni</b>	<b>31</b>

4.1	Sensori FBG . . . . .	32
4.2	Sensori EFS . . . . .	35
4.3	Rilevamento basato sulla diffusione di Rayleigh . . . . .	37
4.3.1	Sfide . . . . .	39
	<b>Conclusioni</b>	<b>44</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>A</b>

# Introduzione

Nata negli anni Settanta nel campo delle telecomunicazioni su lunga distanza, la tecnologia della fibra ottica è stata caratterizzata da una forte evoluzione nel corso degli ultimi decenni. Il notevole sviluppo è stato causato dalla elevata capacità e velocità nel trasmettere dati anche a distanze molto elevate, e dall'uso di raggi luminosi insensibili ad interferenze elettromagnetiche. Uno spin-off di tale scienza tecnologica è rappresentato dalle applicazioni di rilevamento (sensing), oggi sempre più utilizzate soprattutto nell'installazione di sistemi di monitoraggio della salute strutturale (SHM) sulle infrastrutture civili, al fine di migliorare la sicurezza e ottimizzare le strategie di manutenzione. Per quanto riguarda la sensoristica, esse danno la possibilità di collegare numerosi sensori ad un singolo ingresso della centralina di acquisizione, e di usarli in ambienti ostili, nonché dalla loro passività (la non necessità di una fonte di alimentazione) [Gia+82].

Appunto nel campo della sensoristica si evidenzia che certi tipi di perturbazioni (acustica, magnetica, temperatura, rotazione) possono modificare i parametri di propagazione della luce all'interno del cavo e attraverso accorgimenti particolari durante la fase di costruzione tali sensori possono impiegarsi in ambienti ad alto voltaggio, rumorosi o corrosivi. In questo campo, a differenza delle telecomunicazioni, l'interesse della ricerca spinge all'aumento della sensibilità dei sensori che utilizzano la fibra ottica. Difatti si è verificato negli ultimi decenni un tasso di crescita annuo del 15%, rendendo i sensori in fibra ottica sempre più popolari, soprattutto nell'ambito civile del SHM [CFP22].

L'impiego di sensori in fibra ottica è una valida alternativa ai sensori tradizionali, poiché quest'ultimi richiedono molti cavi per alimentazione e trasmissione e i quali soffrono di interferenze elettromagnetiche nel monitoraggio.

Si possono trovare molteplici esempi di sensoristica come la tecnologia FBG, ossia Fiber Bragg Grating, di tipo single e multi-point, dove le regioni di rilevamento possono essere distanziate da pochi millimetri a diversi metri; con i Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (DOFS) l'intera lunghezza della fibra (fino a 150/200 km) può essere utilizzata per rilevare uno o più parametri fisici ad essa esterni. In particolare, numerosi sistemi di monitoraggio di strutture civili e geostrutture sono stati realizzati utilizzando i DOFS. Tra le metodologie di acquisizione dati pertinenti a tale categoria occorre menzionare le metodologie Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) e Optical Frequency Domain Reflectometer (OFDR), entrambe basate sui fenomeni di scattering.

I tre componenti principali che costituiscono i sistemi di monitoraggio basati su tali tecniche sono: sensori in fibra ottica distribuiti, montati sulle strutture oggetto di monitoraggio, atti alle misure di deformazione e temperatura, sistemi di acquisizione dati (acquisizione, trasmissione e memorizzazione dei dati) e, infine, sistemi di valutazione dello stato di salute della struttura monitorata [Men15].



CHAPTER

# 1

# Fibre Ottiche

La luce che viaggia all'interno della fibra ottica è sensibile alle deformazioni della fibra stessa. Da questa considerazione sono emerse applicazioni che sfruttano l'analisi delle onde trasmesse e riflesse per valutare se lungo il percorso vi sono fattori che hanno provocato deformazioni, cercando di localizzare la zona interessata e l'entità del fenomeno.

## 1.1 Funzionamento

Nelle fibre ottiche viene sfruttato il fenomeno della riflessione totale interna in cui i raggi di luce passando attraverso un'interfaccia tra due mezzi trasparenti, caratterizzati da un indice di rifrazione differente, subiscono il fenomeno della rifrazione e cambiano direzione secondo la legge di Snell, come riportata nel libro [Sar19] e mostrato in Fig.(1.1):

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

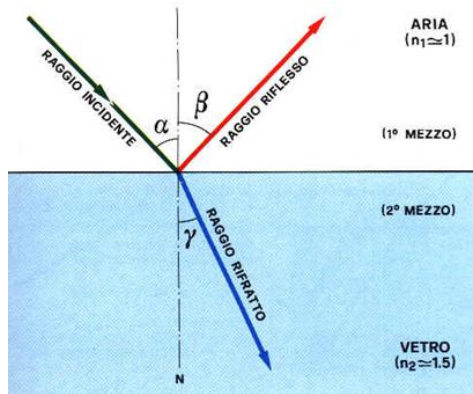


Figura 1.1: Leggi di Snell. ([E14], figura 1.1)

Quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione maggiore a uno minore così come avviene all'interno delle fibre, esiste un angolo limite  $\theta_1 = \theta_{cr}$  in corrispondenza del quale  $\theta_2 = 90^\circ$ , ossia non vi è più la presenza del raggio rifratto. Per la determinazione dell'angolo limite vale la seguente relazione, come riportata nel libro [Sar19]:

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

In corrispondenza di un angolo di incidenza maggiore o uguale a  $\theta_{cr}$  avviene la riflessione totale interna mostrata in Fig.(1.2). Risulta quindi essenziale trasmettere la luce all'interno della fibra in modo che l'angolo d'incidenza interno verifichi la suddetta condizione e il segnale, rimanendo confinato nel nucleo, possa propagarsi per successive riflessioni fino a raggiungere il rilevatore. Se tale condizione non è verificata, avviene una rifrazione dei raggi parziali, il che comporta una perdita di potenza del segnale ad ogni riflessione e quindi una rapida scomparsa del segnale.

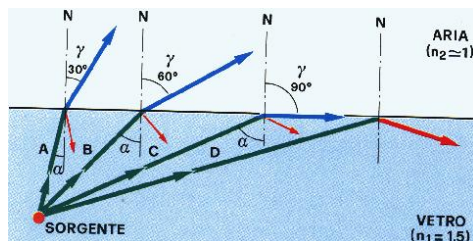


Figura 1.2: Riflessione totale interna. ([E14], 1.2)

Poiché la fibra viene eccitata lateralmente attraverso raggi che viaggiano in un mezzo con indice di rifrazione  $n_0 \sim 1$ , l'angolo di incidenza in ingresso  $\theta$  dei raggi dovrebbe essere minore di un angolo di accettazione  $\theta_0$  detto *apertura numerica* e dato da:

$$\theta_0 \approx \sin \theta_0 = n_{core} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2} = \sqrt{2n_{core}\Delta n} \quad (\Delta n \ll 1) \quad (1.3)$$

Questa equazione definisce l'angolo di accettazione del segnale proveniente dall'esterno della fibra, ossia quell'angolo  $\theta$  che garantisce che la luce rifratta subisca il fenomeno della riflessione totale interna. L'insieme di tutte le possibili traiettorie incidenti aventi angolo inferiore o al più uguale all'angolo di accettazione, costituisce il cono di accettazione mostrato in Fig.(1.3) [Rav21].

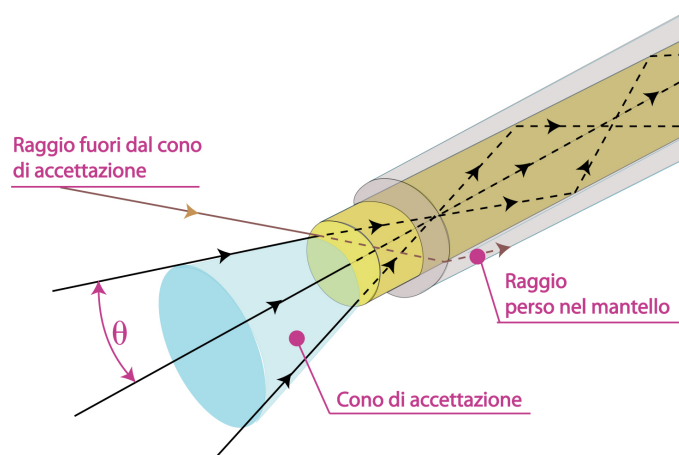


Figura 1.3: Cono di accettazione. ([E14], figura 1.3)

Le categorie in cui è possibile classificare i raggi che si propagano all'interno di una fibra ottica sono due:

- Meridionali: raggi che attraversano l'asse della fibra dopo ogni riflessione;
- Obliqui: raggi paralleli all'asse della fibra che viaggiano lungo tutta la lunghezza della linea senza subire riflessioni.

La teoria di base delle fibre è realizzata basandosi sui raggi meridionali, che possono a loro volta essere suddivisi in due classi:

- Modi di basso ordine: raggi inviati in fibra con un angolo piccolo rispetto a quello di accettazione  $\theta_0$  (al limite coincidono con raggi obliqui);
- Modi di alto ordine: corrispondono a raggi inviati in fibra con un angolo prossimo a quello di accettazione  $\theta_0$ .

I modi di basso ordine sono caratterizzati da un minor numero di riflessioni rispetto a quelli ad alto ordine. Le fibre che consentono la propagazione di più di un modo al loro interno sono dette multimodali (*multi-mode fiber*, da cui MMF), mentre quelle che consentono la propagazione di un solo modo al loro interno sono dette monomodali (*single-mode fiber*, da cui SMF) [CFP22].

## 1.2 Proprietà della guida d'onda delle fibre ottiche

La tipica geometria di una fibra ottica standard, utilizzata sia per applicazioni di telecomunicazione che di rilevamento, è riportata in Fig.(1.4). Si tratta di una componente cilindrica, di lunghezza molto maggiore del diametro, che comprende tre parti [CFP22]:

- Nucleo (core), in cui si propaga la luce. La sua dimensione è di circa 5–10  $\mu\text{m}$  di diametro (cioè poche lunghezze d'onda della luce iniettata) per le fibre monomodali (SMF), mentre può raggiungere 50–80  $\mu\text{m}$  di diametro per le fibre multimodali (MMF);
- Mantello (cladding), che circonda il nucleo. La sua dimensione è nell'ordine di 125  $\mu\text{m}$  di diametro;
- Coating (rivestimento di protezione), che circonda il mantello. Protegge la fibra dagli impatti ambientali e ne aumenta la resistenza meccanica. Questo strato aggiuntivo di solito porta la fibra a un diametro totale di 150–250  $\mu\text{m}$ , anche se può raggiungere pochi millimetri per applicazioni specifiche come il rilevamento nei materiali in calcestruzzo, quando viene utilizzata una protezione aggiuntiva più spessa. Il rivestimento è solitamente in materiale plastico, cioè acrilato o poliammide a seconda della temperatura di utilizzo. Data l'applicazione, la sua superficie interna può essere incollata al rivestimen-

to (es. per il rilevamento della deformazione), o staccata da esso per essere insensibile alle deformazioni fisiche (es. per il rilevamento della temperatura).

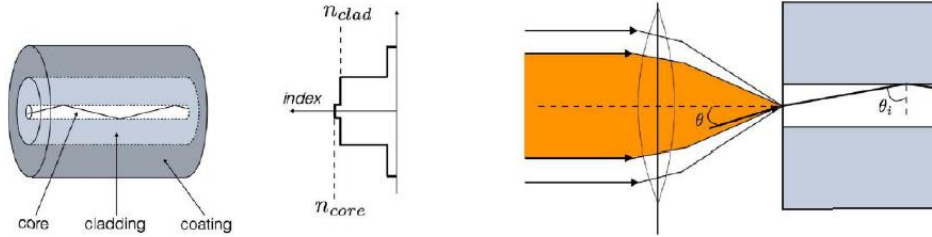


Figura 1.4: Geometria di una fibra ottica con indice a gradino (a sinistra), con riflessione interna totale nel nucleo e apertura numerica della guida d'onda ottenuta (a destra). ([CFP22], figura 1)

Il *nucleo* e il *mantello* sono realizzati con vetro di silice ( $\text{SiO}_2$ ) molto trasparente e stabile. Per il rivestimento viene utilizzata silice pura, con indice costante  $n_{clad} = 1.46$ , mentre la silice nel nucleo è opportunamente drogata (tipicamente utilizzando Germanio o Fosforo) in modo da aumentare l'indice fino ad un valore  $n_{core} > n_{clad}$ , con  $\Delta n = n_{core} - n_{clad}$  da pochi  $10^{-3}$  (fibre SMF) a  $10^{-2}$  (fibre MMF).

### 1.3 Caratterizzazione della Fibra Ottica

Vi sono due diverse configurazioni per le fibre:

- Fibre con indice di gradino (Fig.1.5): questa tipologia di fibre è costituita da un nucleo (*core*) cilindrico in vetro, silice o materiale polimerico avente indice di rifrazione  $n_1$  ricoperto da un sottile mantello (*cladding*) realizzato in vetro, silice o materiale polimerico avente indice di rifrazione  $n_2$  con  $n_1 > n_2$  [E14].

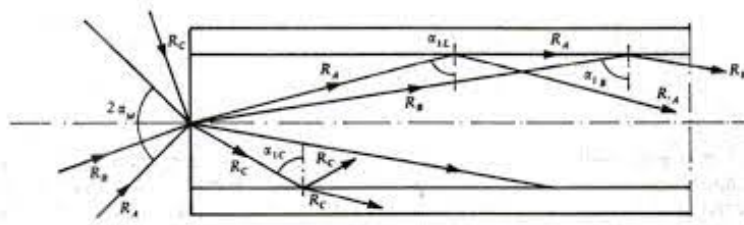


Figura 1.5: Fibra ottica con indice a gradino. ([Gia+82], figura 2.5)

- Fibre con indice di rifrazione graduale (Fig.1.6): sono realizzate in vetro, silice o materiale polimerico, con indice di rifrazione che cambia gradualmente dal centro, in cui è presente il valore massimo, al perimetro, in cui è presente il valore minimo.

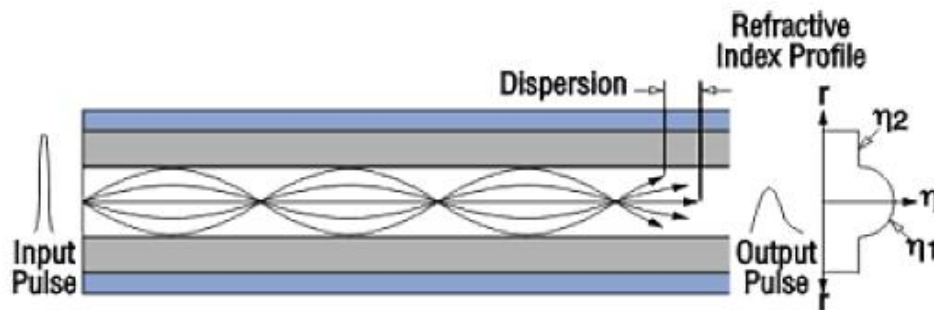


Figura 1.6: Modi di propagazione in una fibra con indice graduale. ([E14], figura 1.5)

Una particolare attenzione durante l'uso e la posa delle fibre ottiche va posta sui raggi di curvatura, poiché raggi di curvatura ridotti possono generare angoli incidenti inferiori a quello critico e provocare di conseguenza una perdita di potenza del raggio luminoso come mostrato in Fig.(1.7) [E14].

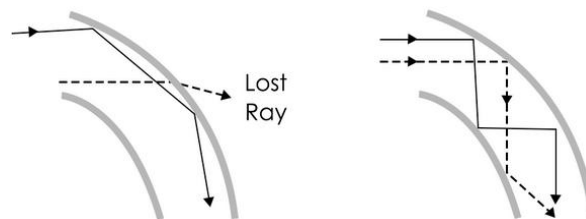


Figura 1.7: Raggio di curvatura eccessivo. ([E14], figura 1.6)

Un'importante caratteristica della fibra che ne ha favorito il largo impiego nel campo delle telecomunicazioni anche in quello sensoristico è la larghezza di banda del segnale che si trasmette in fibra, ossia l'intervallo di frequenza in cui opera il segnale. Tale intervallo può essere molto ampio ma va tuttavia considerato, su lunghe distanze, il fenomeno della dispersione e il coefficiente di attenuazione della fibra affinché i raggi si propaghino senza perdite eccessive di potenza e non subiscano distorsioni.

I sistemi ottici di telecomunicazione impiegano frequenze a portante elevata, nell'ordine dei 100 THz, le cui lunghezze d'onda appartengono allo spettro elettromagnetico del vicino infrarosso (Fig.1.8).

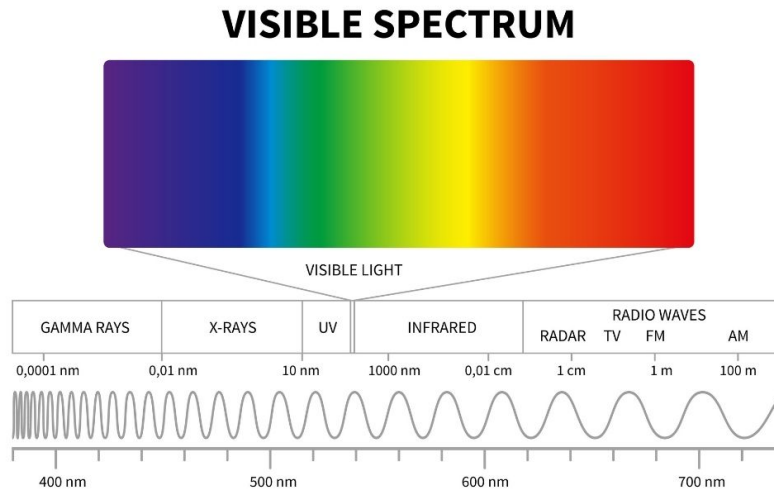


Figura 1.8: Spettro elettromagnetico. ([E14], figura 1.7)

Si definiscono finestre di trasmissione gli intervalli di lunghezza d'onda  $\lambda$ , nell'intorno della portante ottica, entro i quali si hanno i minimi di attenuazione nel trasferimento del segnale. Le tre principali finestre di trasmissione impiegate per le fibre ottiche sono 850 nm, 1300 nm, 1550 nm [Men15]. Nella tabella sottostante vengono riportati i valori delle finestre di trasmissione in funzione del modo di propagazione del segnale luminoso.

Finestra	Fibra	Lunghezza d'onda	Attenuazione
I	Multimodale	850 nm	3.0 dB/km
II	Multimodale	1300 nm	1.0 dB/km
II	Monomodale	1300 nm	0.36 dB/km
III	Monomodale	1550 nm	0.22 dB/km

Visualizzando la Fig.(1.9) è facile capire la scelta di tali finestre: sul grafico è riportato l'andamento della perdita di segnale in funzione della lunghezza d'onda e le tre finestre corrispondono ai tre minimi.

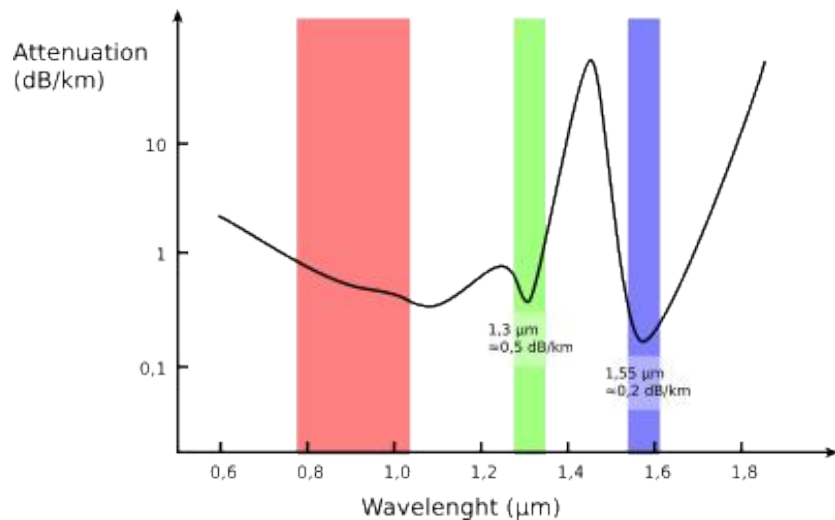


Figura 1.9: Finestre di trasmissione per le fibre ottiche. ([E14], figura 1.8)

L'attenuazione all'interno di una fibra ottica è dovuta principalmente a tre fattori[Kei00]:

- Assorbimento del materiale: causato da impurità molecolari presenti all'interno del nucleo della fibra, che causano l'assorbimento di determinate lunghezze d'onda. È possibile limitarlo attraverso processi produttivi della fibra particolarmente accurati e costosi; si cerca pertanto di evitare l'utilizzo di tali cavi impiegando sorgenti luminose idonee, ovvero che emettano luce approssimativamente in corrispondenza dei massimi di trasmissione;
- Scattering del materiale: causato da impurità particellari all'interno del nucleo della fibra, fluttuazioni di temperatura e di composizione che causano riflessione della luce. Questo fenomeno può anche essere generato da irregolarità dell'interfaccia del nucleo/mantello, che producono una trasmissione del segnale nel mantello e quindi una conseguente diminuzione di energia nel raggio riflesso;
- Curvature: possono causare attenuazione se il raggio di curvatura raggiunge valori tali da far sì che il raggio arrivi all'interfaccia nucleo/mantello con un angolo minore rispetto all'angolo critico che garantisce la riflessione interna totale. Oltre alle macrocurvature vanno anche evitate le microcurvature: anch'esse possono causare problemi di riflessioni del segnale luminoso come si può vedere in Fig.(1.10).



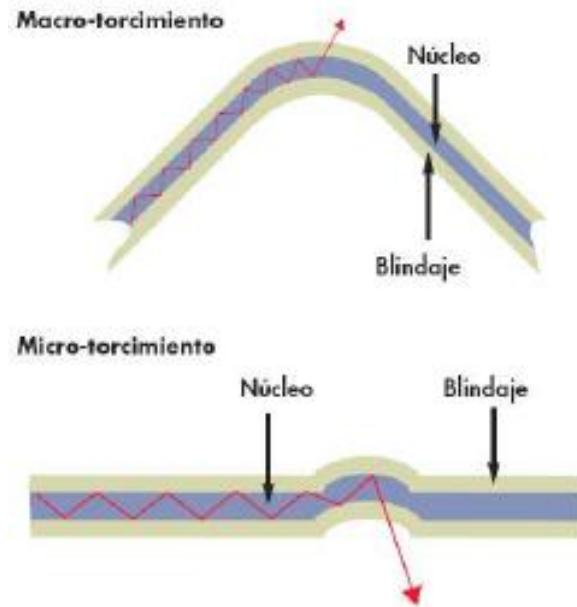


Figura 1.10: Micro e macro curvatures. ([E14], figura 1.9)

Per quanto riguarda la dispersione, esso è un fenomeno che può limitare, come già detto, la banda passante della fibra. Questo fenomeno può presentarsi in due tipologie:

- Dispersione del materiale (cromatica): causato dal fatto che differenti lunghezze d'onda si propagano con velocità diverse all'interno dello stesso mezzo. Per questo motivo, le diverse lunghezza d'onde inviate simultaneamente all'interno del cavo, non raggiungeranno allo stesso tempo il ricevitore ma accuseranno dispersione temporale legata alla differenza di tempo di propagazione. Questo fenomeno può essere ridotto usando una sorgente luminosa con uno stretto spettro di emissione [Kei00].
- Dispersione modale: causata dal differente cammino ottico percorso dai modi di basso ordine rispetto ai modi di alto ordine. I modi di alto ordine, percorrendo un cammino maggiore, saranno caratterizzati da tempi di propagazione maggiori rispetto ai modi di basso ordine e quindi raggi lanciati simultaneamente presentano una dispersione temporale al ricevitore. Questo fenomeno può essere ridotto nelle fibre con indice a gradino diminuendo l'apertura numerica NA, in modo che solo i modi di basso ordine possano propagarsi. Nelle fibre a indice graduale invece esiste una compensazione intrinseca di questo effetto in quanto i modi di alto ordine viaggiano più velocemente

nelle zone a basso indice di rifrazione, che sono le zone in cui transitano più spesso, e quindi la differenza di propagazione temporale risulta notevolmente limitata. Questo tipo di dispersione è presente solo nelle fibre multimodo [Kei00].

Quest'ultimo tipo di problema è presente solo per le comunicazioni sulle lunghe distanze, per questo motivo le fibre con indice graduale, sebbene più costose rispetto a quelle con indice a gradino, vengono utilizzate insieme ai laser nel campo misuristico. Per distanze inferiori ai 500 metri, con minori bande passanti, le fibre con indice a gradino sono favorite per il loro basso costo e la maggior facilità di accoppiamento. Nella scelta del tipo di fibra ottica da impiegare bisogna considerare il fatto che le fibre monomodali non presentano dispersione modale, sono dotate di una notevole banda passante (migliaia di GHz per Km di fibra), attenuano meno delle fibre con indice graduale ed inoltre sono caratterizzate da un minor costo produttivo rispetto a quest'ultime.

CHAPTER

# 2

## Sensori in Fibra Ottica (OFS)

Nell'ambito delle telecomunicazioni, al fine di realizzare la migliore comunicazione possibile, le fibre vengono isolate per mezzo di tecniche di cablaggio. Tuttavia, poiché le perturbazioni esterne modificano le proprietà della luce che viaggia nella guida d'onda, è possibile usare la fibra ottica per rilevare, monitorare e persino misurare tali perturbazioni in un formato integrale o distribuito.

Un dispositivo in grado di rilevare, misurare e riprodurre fedelmente una determinata variabile fisica nel dominio elettrico è definito come "sensore". Se tale dispositivo è basato sull'utilizzo della luce e il misurando è in grado di modificare alcune delle proprietà della luce, si avrà un "sensore fotonico" oppure un "sensore ottico". Nell'ambito dei sensori ottici, per sensore in fibra ottica (Optical Fiber Sensors, OFS) si intende l'insieme costituito dalla fibra ottica e dalla tecnologia implementata intorno ad essa. In particolare, i sensori distribuiti in fibra ottica (DOFS) sono in grado di rilevare e misurare variabili lungo l'intera estensione della fibra che, pertanto, funge sia da trasduttore distribuito che da canale ottico [C20]. I sensori in fibra ottica presentano molti vantaggi rispetto ai sensori elettronici tradizionali:

- leggerezza, dimensioni contenute e facilità di installazione;
- elevata precisione; insensibilità ai campi elettromagnetici;
- resistenza alle alte temperature, assenza di corrosione metallica e di produzione di scintille;
- possibilità di rilievo di aree normalmente inaccessibili;
- possibilità di interfacciarsi con i sistemi di comunicazione dei dati, trasmissione sicura dei dati.

Inoltre, la sensoristica in fibra ottica consente di effettuare misure su grandi distanze (dell'ordine di molti *km*), sfruttando il coefficiente di attenuazione molto basso e la possibilità di implementare molteplici sensori in una singola fibra.

## 2.1 OFS intrinseci ed estrinseci

In base alla caratteristica considerata, come processi di modulazione e demodulazione, applicazione, punti di misura, ecc., esistono diversi modi per classificare gli OFS. Prendendo in considerazione la modulazione, a seconda che la variazione di alcune proprietà della luce convogliata sia prodotta all'interno o all'esterno (ovvero in un altro mezzo) della fibra ottica, è possibile distinguere due diversi tipi di OFS (Fig. 2.1): sensori intrinseci (la modulazione avviene direttamente nella fibra) ed estrinseci (la modulazione viene realizzata per mezzo di un trasduttore esterno). In particolare, questi ultimi sono dotati di un dispositivo separato in cui la luce viene alterata (o modulata). Il fascio luminoso esce dalla fibra ed entra nell'ambiente di misura in cui viene modificato per poi essere raccolto dalla stessa fibra o da un'altra. Tale tecnologia è largamente applicata per misurazioni in ambito chimico e biochimico [CK08].

I sensori intrinseci, invece, utilizzano parte della fibra in qualità di sensore. Le perturbazioni agenti sulla fibra modificano alcune caratteristiche della luce che si propaga al suo interno ed è possibile risalire all'entità delle stesse perturbazioni che hanno modificato la propagazione del fascio luminoso. Questo, però, significa poter misurare solo fenomeni esterni alla fibra che, in

qualche modo, modificano la propagazione della luce. Poiché nei sensori intrinseci la luce non lascia mai la fibra, vengono eliminate le interferenze tra la fibra e la zona di modulazione e, di conseguenza, la misura risulta essere di buona qualità. I sensori di tipo intrinseco sono spesso utilizzati per effettuare rilevamenti in ambito fisico [Gia+82].

I sensori intrinseci, a loro volta, possono essere classificati in (Figura 2.2):

- **Single-point**, nei quali la porzione della fibra dedicata al rilevamento è localizzata alla sua estremità; misurano parametri singoli o multipli in corrispondenza di un determinato punto spaziale;
- **Multi-point** (sensori quasi distribuiti), costituiti da due o più regioni di rilevamento lungo la lunghezza della fibra, ognuna delle quali può acquisire lo stesso parametro oppure una grandezza diversa. La tecnologia Fiber Bragg Grating (FBG) è un esempio di sensoristica single point e multi-point in cui le regioni di rilevamento possono essere distanziate da pochi millimetri a diversi metri;
- **DOFS** (sensori distribuiti), tali che l'intera lunghezza della fibra (fino a 150/200 km) può essere usata per rilevare uno o più parametri esterni.

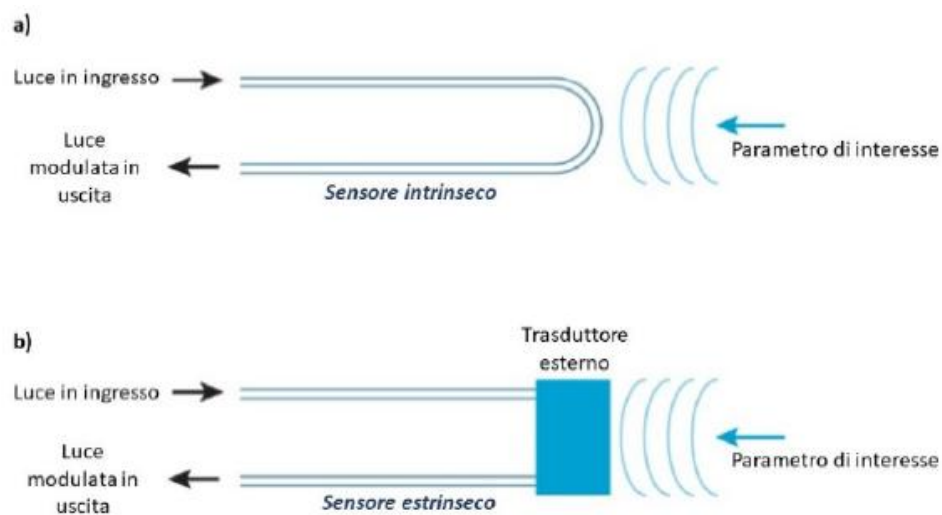


Figura 2.1: Schema rappresentativo delle due tipologie di sensori: intrinseci (a) ed estrinseci (b). ([E14], figura 1.10)

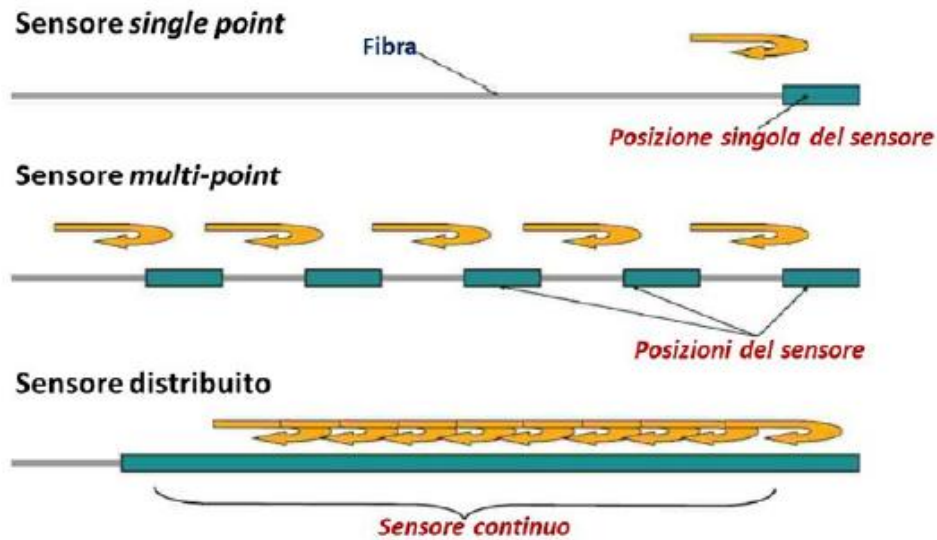


Figura 2.2: Classificazione dei sensori intrinseci: sensori single point, multi-point e distribuiti. ([C20], figura 2.2)

### 2.1.1 Reticoli di Bragg in fibra (FBG)

Il reticolo di Bragg in fibra è una microstruttura periodica che agisce riflettendo selettivamente le lunghezze d'onda come uno specchio. Ciò significa che se la luce proveniente da una sorgente a banda larga viene introdotta nella fibra ottica, solo quella avente una larghezza di banda spettrale molto stretta, centrata sulla lunghezza d'onda di Bragg, verrà riflessa indietro dal reticolo. La luce restante continuerà il suo percorso lungo la fibra ottica fino al successivo reticolo di Bragg senza subire alcuna perdita. Il reticolo di Bragg in fibra è una struttura simmetrica, per cui rifletterà sempre la luce alla lunghezza d'onda di Bragg, senza che il lato da cui essa proviene abbia alcuna importanza. La lunghezza d'onda di Bragg  $\lambda_B$  viene definita dal periodo della microstruttura e dall'indice di rifrazione del nucleo ( $n_{eff}$ )[Car10].

$$\lambda_B = \Lambda(n_{eff1} + n_{eff2}) = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1)$$

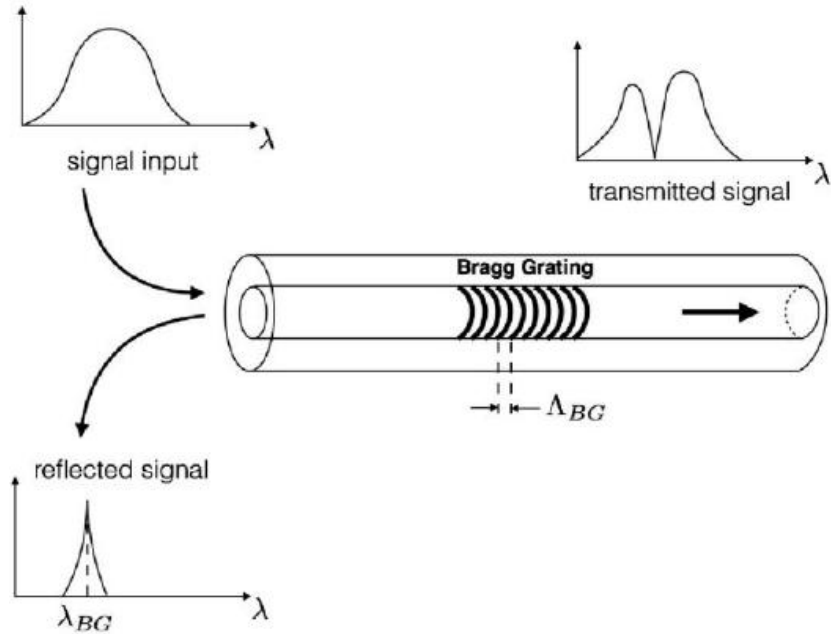


Figura 2.3: Illustrazione del principio FBG. ([Har17], figura 4.3)

Il reticolo di Bragg in fibra possiede una caratteristica univoca per comportarsi come un sensore. Ad esempio, quando la fibra viene tirata o compressa, la FBG misurerà delle deformazioni. Ciò accade sostanzialmente perché la deformazione della fibra ottica provoca il cambiamento del periodo della microstruttura e, di conseguenza, della lunghezza d'onda di Bragg.

Anche la sensibilità alla temperatura è intrinseca nella fibra a reticolo di Bragg. In tal caso, il contributo principale al cambiamento della lunghezza d'onda è la variazione dell'indice di rifrazione della silice, indotta dall'effetto termo-ottico. Si aggiunge anche il contributo della dilatazione termica, che altera il periodo della microstruttura. Tuttavia quest'ultimo effetto è marginale, dato il basso coefficiente di dilatazione termica della silice.

A dimostrazione della estrema sensibilità rispetto alla temperatura ( $T$ ) e deformazione ( $\epsilon_z = \Delta L/L$ ), riprendendo l'equazione (2.1) presente nel libro [Kei00].

$$\Delta\lambda = 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon_z} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial\epsilon_z}\right)\Delta\epsilon_z + 2\left(n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2.2)$$

dove è possibile notare la dominanza dei termini  $n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon_z}$  e  $\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ .

A verifica di quanto scritto, viene sotto riportata una tabella che riporta come al variare di  $\lambda_B$  (lunghezza d'onda di Bragg) cambino i coefficienti di deformazione e temperatura.

$\lambda_B$ [nm]	coeff. Deformazione [pm/ $\mu\epsilon$ ]	coeff. Temperatura [pm/ $^{\circ}\text{C}$ ]
789	0.6	6.6
1300	1.0	10
1561	1.2	11.9

### FBG Multiplexing

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è la sua capacità intrinseca di multiplexing. Infatti, su una singola fibra ottica si possono inscrivere centinaia di reticoli di Bragg, posti a pochi millimetri uno dall'altro o separati da alcuni chilometri (Fig. 2.4). Con adeguato impaccamento, ognuna di queste microstrutture può essere resa sensibile a grandezze diverse dalla temperatura o deformazione, ad esempio pressione, accelerazione, spostamento, ecc., consentendo alla schiera di sensori una caratteristica multifunzionale.

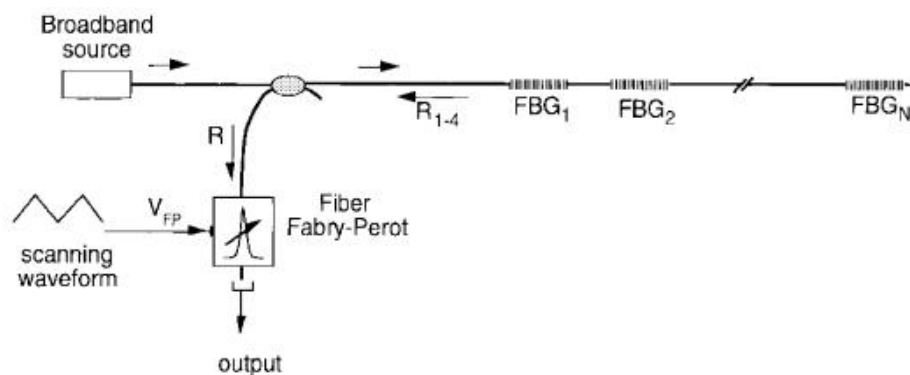


Figura 2.4: Filtro a scansione del reticolo FBG con tecnica di rilevamento. ([Har17], figura 4.5)

È importante sottolineare il fatto che tutti i sensori possono essere rilevati utilizzando una singola sorgente ottica. L'aggiunta di un numero sempre maggiore di sensori sulla stessa fibra



comporta solo minori perdite e minor diafonia purché sia sufficiente la banda spettrale dello spettro di luce riservata per ogni sensore.

Essendo un sensore a fibra ottica, il reticolo di Bragg possiede tutti i vantaggi attribuiti a questi tipi di trasduttori, vale a dire: bassa perdite (attenuazione) rispetto alla lunghezza della fibra, immunità alle interferenze elettromagnetiche e radiofrequenze, piccole dimensioni e basso peso, sicura operatività a sicurezza intrinseca in ambienti caratterizzati a materiale con pericolo di esplosione, elevata sensibilità ed affidabilità a lungo termine. Inoltre, la tecnologia delle fibre a reticolo di Bragg possiede un'intrinseca capacità di multiplexing seriale ed è in grado di fornire misure assolute senza la necessità di impiegare accorgimenti. Tutto ciò rende questa tecnologia la naturale alternativa a quella elettrica convenzionale [LL11].

Tuttavia il processo è limitato dal numero di reticoli che possono essere svantaggi del rilevamento FBG è che richiede la conoscenza a priori delle posizioni critiche per poter posizionare i reticoli sulla fibra. Negli ultimi anni sono stati studiati anche metodi ibridi basati sull'uso simultaneo di sensori FBG e attuatori piezoelettrici con propagazione di onde elastiche [CFP22].

### **2.1.2 Sensori a campo evanescente (EFS)**

In questa parte verrà presentato un metodo di modulazione dell'intensità basato sull'interazione diretta del misurando con l'onda elettromagnetica. Le fibre convenzionali mono o multimodali, come riportato nel capitolo (1), si riconducono al noto fenomeno della riflessione interna totale, quindi i raggi che provengono da determinate incidenze vengono riflessi totalmente, tuttavia una piccola parte della luce attraverserà lo stesso l'interfaccia ed entrerà sempre di più nel mezzo con basso indice di rifrazione. Questa parte del campo elettromagnetico è chiamata *campo evanescente* (Fig. 2.5) e la sua particolarità è di diminuire esponenzialmente [KB20].

Il principio di base del sensore di campo evanescente (si veda la Fig.2.5) è di far interagire la quantità da misurare e questa parte del campo elettromagnetico. Quindi è necessario avvicinarsi il più possibile alla parte guida (cioè il nucleo) per ottenere una sensibilità sufficiente.

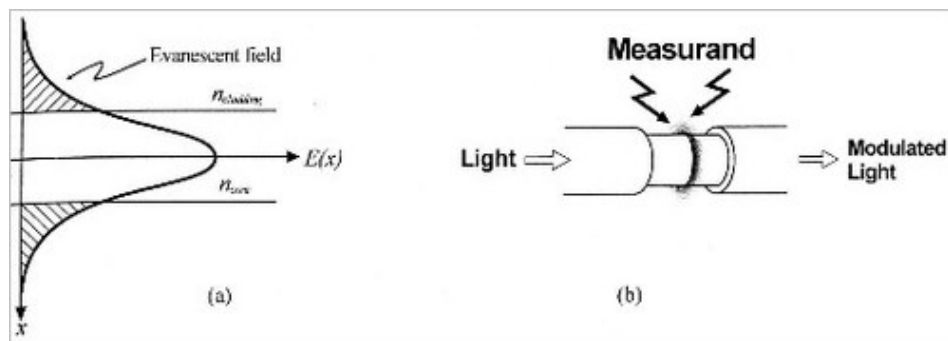


Figura 2.5: a): campo evanescente in una fibra ottica. b): Principio del trasduttore su campo evanescente. ([SGS19], figura 1)

Il problema principale di questo tipo di sensori è la bassa interazione tra il campo evanescente e il misurando. Per le guide d'onda, questa interazione è proporzionale alla profondità della penetrazione nel rivestimento. Questa profondità è legata ai parametri opto-geometrici delle fibre, che sono riassunti nella frequenza normalizzata  $v$ . Per dirla semplicemente, più alto è il valore di  $v$ , più profonda è la penetrazione nel campo evanescente [KB20].

La configurazione più semplice di questo sensore è mostrata in Fig.(2.5), dove è stata rimossa la guaina plastica protettiva della fibra e il mantello è stato ridotto mediante lucidatura o attacchi chimici. Quindi è semplice rilevare specie chimiche o gas scegliendo adeguatamente la lunghezza d'onda utilizzata. La presenza del misurando sarà evidente attraverso l'assorbimento dell'onda evanescente, creando dispersioni e modulando l'intensità luminosa.

Per aumentare l'interazione con il campo evanescente, è possibile utilizzare fibre speciali, come le D-fibre o le fibre microstrutturate. È anche possibile affilare la fibra riscaldandola fino alla sua temperatura di rammollimento e poi allungandola. Gli esperti nel settore ricorrono spesso a mettere uno strato più sottile o più grande sul rivestimento, perché, siccome le sue caratteristiche ottiche variano a seconda della sostanza da rilevare, anche l'onda evanescente ne risentirà. Infine, il sensore di campo evanescente può essere utilizzato in numerose configurazioni, basta far interagire l'onda direttamente o indirettamente con il misurando [LL11].

CHAPTER

# 3

## Sensori Distribuiti in Fibra Ottica (DOFS)

I DOFS consentono di misurare un parametro lungo una regione spazialmente continua utilizzando esclusivamente un cavo sensibile in fibra ottica e gli apparati optoelettronici dell'interrogatore (a differenza dei sensori discreti che richiedono un elevato numero di cavi di connessione).

I sensori distribuiti, rispetto a quelli puntuali, sono più versatili e potenti in quanto non richiedono una conoscenza a priori del comportamento strutturale da analizzare. In un sensore distribuito la stessa fibra ottica diventa un sensore e, dal momento che le misurazioni vengono eseguite lungo l'intera fibra collegata ai dispositivi di lettura, non è più necessario definire le posizioni previste del sensore come nel caso dei sensori quasi-distribuiti. Infatti si evidenzia la maggior efficienza dei DOFS rispetto agli altri tipi di sensori e la possibilità di monitorare "in continuo", nello spazio e nel tempo, strutture ed elementi di diverso tipo. Le applicazioni di questa sensoristica sono molteplici e adattabili ai più svariati settori: dalla misura di temperatura e deformazione di grandi opere, quali dighe, viadotti, gallerie, ecc., a grandezze da esse derivate, come grado di umidità e stati tensionali, fino ad applicazioni in ambito

industriale (misura di carichi distribuiti, gradiente termico, ecc.). Si possono poi ritrovare numerose applicazioni destinate alla diagnostica di infrastrutture asservite alla distribuzione di acqua, gas e petrolio così come al controllo del territorio [E14].

Con la diffusione delle moderne tecnologie di telecomunicazione basate su fibra ottica, il monitoraggio strutturale è emerso recentemente come un potente strumento per la valutazione delle condizioni di “salute” delle infrastrutture, che possono essere monitorate periodicamente, oppure in continuo, da una stazione centrale posta a diversi chilometri di distanza. Un sistema di monitoraggio permanente in fibra ottica consente di individuare rapidamente l’insorgere di eventuali danni, in modo tale che siano adottate le azioni necessarie per ridurre il rischio. Le fibre ottiche possono essere utilizzate per indicare le deformazioni di pendii soggetti a movimenti rapidi, ai fini della messa in opera di sistemi di allerta preventiva che potrebbero essere attivati nel momento in cui esse superino una soglia prestabilita. Con la tecnologia DOFS, le fibre vengono ancorate alla superficie o incorporate all’interno del materiale. Quando deformazioni e variazioni di temperatura vengono trasferite alla fibra ottica, il segnale disperso all’interno della fibra è modulato da questi parametri fisici. Il rilevamento o *sensing* si ottiene misurando una variazione di tale segnale modulato [BC12].

Il grande problema dei DOFS, rispetto agli altri sistemi di misura, è dato dalla necessità di determinare continuamente il valore del misurando come funzione della posizione lungo il percorso della fibra ottica e con definibili risoluzione spaziale e sensibilità. Quindi ciascuna misura deve essere in qualche modo associata ad una determinata sezione della fibra la cui posizione deve essere nota. L’identificazione deve essere effettuata a partire dall’una o dall’altra estremità della fibra; in alcuni casi occorre utilizzare entrambe le estremità.

Si può presentare un elenco dei principali parametri comunemente usati per caratterizzare i DOFS [C20]:

- *Risoluzione spaziale*, la più piccola lunghezza della fibra sulla quale è possibile rilevare la variazione spaziale della grandezza osservata;
- *Sensibilità*, la variazione della potenza ottica del rivelatore, prodotta da una modifica dell’unità del campo di misura per unità di lunghezza della fibra;

- *Accuratezza*, ovvero l'accuratezza con cui la potenza di uscita del rivelatore può essere misurata rispetto ai livelli di rumore del sistema;
- *Gamma dinamica*, il rapporto tra i valori massimi e minimi del campo di misura che consente di effettuare il rilievo con l'accuratezza richiesta;
- *Larghezza di banda di misura*, la larghezza di banda su cui possono essere misurate le variazioni nel campo di misura per l'intera lunghezza della fibra.

### 3.1 I fenomeni di Scattering

La distorsione ottica, dovuta alla dispersione della guida cromatica, e le attenuazioni, ovvero le perdite di potenza ottica lungo la propagazione, sono due degli aspetti principali della propagazione nelle fibre ottiche. Le attenuazioni possono essere in parte dovute al disadattamento dell'indice, in termini di picchi di Fresnel che producono riflessione, alle connessioni con transizioni vetro-aria o interfacce dielettriche, a condizioni ambientali quali irradiazione, eccessiva curvatura della fibra o micro-flessione. Anche utilizzando la silice che ha una perdita ottica molto bassa, alcune sorgenti di attenuazione lungo la fibra sono intrinseche al materiale, cioè sono generate dalle interazioni tra la luce e il mezzo di propagazione, e possono diventare significative per lunghe distanze di propagazione. L'attenuazione può quindi essere descritta come (legge di Beer-Lambert):

$$P(\lambda, z) = P_0 \cdot 10^{-\alpha(\lambda)z} = P_0 \cdot 10^{-\alpha_{dB}(\lambda)z/10} \quad (3.1)$$

con  $P_0$  la potenza ottica in ingresso della fibra, e  $\alpha$  il coefficiente di attenuazione lineare della fibra in  $km^{-1}$  che dipende dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  del segnale di propagazione [CFP22].

Se si analizzano le perdite intrinseche, quando un'onda elettromagnetica viene lanciata in una fibra ottica, la propagazione attraverso il mezzo interagisce con atomi e molecole e il campo elettrico induce un dipolo di polarizzazione dipendente dal tempo. Il dipolo indotto genera un'onda elettromagnetica secondaria: questo fenomeno è noto come dispersione o *scattering* della luce. Quando il mezzo in cui si verifica la dispersione è omogeneo, è consentito lo

scattering di un solo fascio luminoso in avanti. La fibra ottica, a causa delle sue variazioni di densità e composizione, è però un mezzo disomogeneo, per cui alcuni fotoni ritornano verso la sorgente luminosa, dando luogo al fenomeno del *backscattering*. La luce contropropagante può essere, quindi, utilizzata per ricavare informazioni sulle proprietà della fibra e, di conseguenza, degli effetti ambientali a cui essa è sottoposta. Per un'onda di luce incidente monocromatica, il backscattering della luce proveniente dal segmento di fibra ottica senza difetti o caratteristiche anomale viene decomposto spettralmente in tre picchi distinti corrispondenti a tre diversi fenomeni, ovvero gli scattering di Rayleigh, Raman e Brillouin (Fig. 3.1). Questi ultimi sono anche le componenti della luce diffusa: vengono dette componenti di *Stokes* se la loro frequenza è più piccola di quella della luce incidente; altrimenti, se la frequenza è maggiore di quella della luce incidente vengono chiamate componenti *anti-Stokes* [E14].

Si può osservare nella Fig.3.1 la variazione di potenza di scattering e lo spostamento in frequenza.

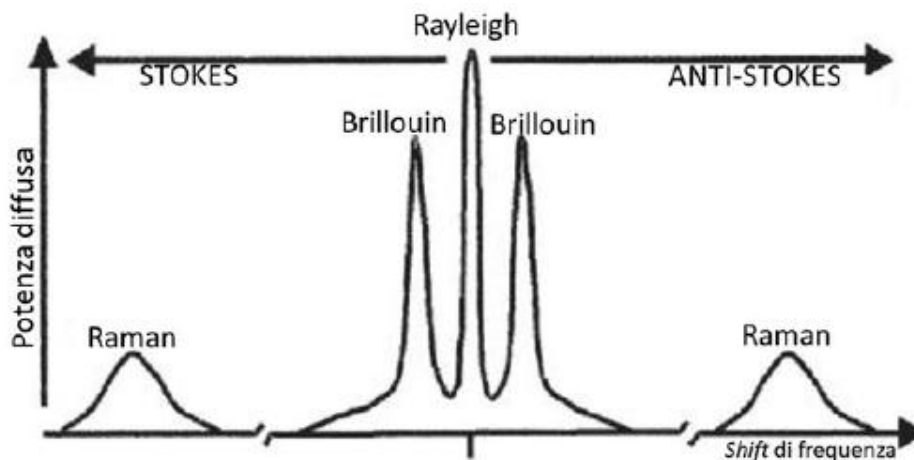


Figura 3.1: Spettri della luce diffusa. ([Har17], figura 1.7)

Mentre lo scattering di Rayleigh è un fenomeno elastico che nasce dall'interazione tra l'onda elettromagnetica e le impurità della silice, lo scattering di Raman è un fenomeno di dispersione anelastica che ha origine quando i fotoni della luce incidente interagiscono con le vibrazioni termiche della molecola di silice (fononi termici). Un ulteriore fenomeno inelastico è rappresentato dallo scattering di Brillouin, il quale si verifica quando un fotone di luce incidente

interagisce con onde acustiche termicamente eccitate dando origine a componenti di shift di frequenza. Rispetto alla frequenza ottica della luce originale, i segnali luminosi diffusi di Raman e di Brillouin presentano una differenza di frequenza rispettivamente di circa  $\pm 10$  THz e  $\pm 10$  GHz.

La maggior parte delle tecnologie DOFS si basa su uno o più degli effetti di scattering Rayleigh, Raman e Brillouin. Il rilevamento si realizza utilizzando un appropriato interrogatore che trasmette il segnale ottico nella fibra e raccoglie la radiazione retrodiffusa originata da uno o più dei tre fenomeni. In ogni cella di risoluzione lungo la fibra, il misurando viene dedotto tramite un'elaborazione dedicata [C20].

## **3.2 Sensori di Rayleigh**

I sensori che sfruttano il fenomeno della diffusione di Rayleigh sono molto differenti dalle tipologie di Brillouin e Raman. Nella diffusione di Brillouin le alterazioni del raggio luminoso sono determinate da variazioni di temperatura e dalle deformazioni, mentre nel Raman solo dalla temperatura. Nel fenomeno di Rayleigh non vi è alcun legame intrinseco tra il fascio luminoso e la maggior parte delle grandezze fisiche. [L13].

Gli effetti della propagazione sono l'attenuazione, il guadagno, l'interferenza di fase e la variazione di polarizzazione. Essi incentivano a sfruttare sensori di tipo Rayleigh quindi oltre a poter misurare temperatura e deformazione possono essere legati ad altre grandezze fisiche. In particolare, l'attenuazione indotta da un accoppiamento per campo evanescente è sfruttata per analizzare parametri relativi diversi come umidità, concentrazioni chimiche, deformazioni e pressioni. L'interferenza di fase è alla base del calcolo, mediante sensori di Rayleigh, per il controllo di deformazione e temperatura. Infine la polarizzazione della luce gioca un ruolo fondamentale in quanto consente il rilevamento di vari fenomeni fisici come campi magnetici, torsioni e disposizione geometrica [Men15].

### 3.3 Principi di funzionamento

Si può proseguire analizzando le soluzioni DOFS che sfruttano il backscattering di Rayleigh sempre più utilizzati per SHM. I processi di rilevamento impiegati e le tecnologie associate, si basano sul confronto con un pattern di diffusione Rayleigh (firma della fibra) inizialmente misurato e memorizzato derivante da uno stato di riferimento. È necessario confrontare le prestazioni di varie soluzioni in termini di campo di misura, risoluzione spaziale e sensibilità (relativa a SNR) che sono le caratteristiche principali dei sensori DOFS e descrivere i sistemi di rilevamento aggiornati basati su Rayleigh. Bisogna tenere presente che le nuove tecnologie che utilizzano la retrodiffusione Rayleigh sono continuamente sviluppate per soluzioni di rilevamento con prestazioni sempre migliorate [CFP22].

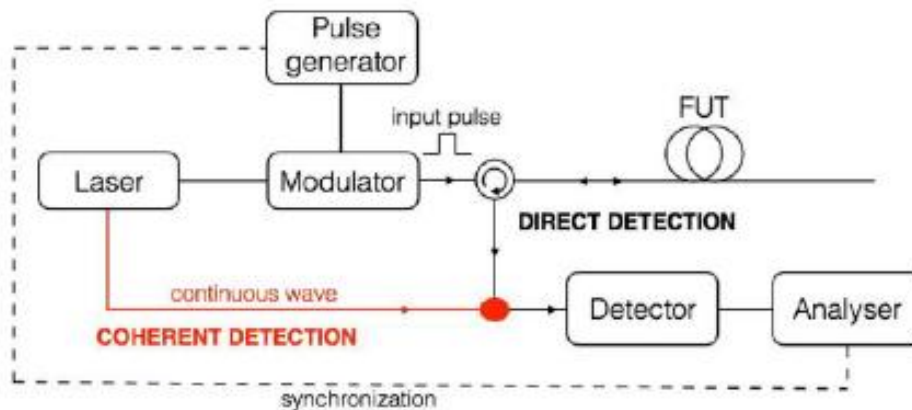


Figura 3.2: Configurazione sperimentale dei tipici sistemi OTDR (nero) e COTDR (rosso). ([CFP22], figura 6)

Dalla figura si può osservare che il campo di misura massimo del sistema di rilevamento si verifica quando l'ampiezza o il contenuto del segnale retrodiffuso diventa così debole che è impossibile ricavarne informazioni rilevanti. Per quanto riguarda la risoluzione spaziale (o passo/lunghezza del misuratore), rappresenta l'accuratezza spaziale con cui il campo fisico misurato può essere mappato. Poiché una risoluzione spaziale più spinta deteriora il range di misura, si dovrebbe cercare un compromesso che può essere quantificato dal rapporto tra range di misura e risoluzione spaziale. Questo rapporto può essere interpretato come il numero di punti di rilevamento equivalenti offerti dalla fibra. Anche il rumore di misurazione,



proveniente da una varietà di sorgenti, è un fattore importante perchè influisce sulla gamma dinamica, ovvero sulla differenza tra il livello di energia retrodiffusa di riferimento e il livello di rumore, e la sensibilità (in termini di rapporto SNR).

Infine, il rilevamento dal backscattering di Rayleigh richiede un dispositivo specifico (terminale) all'estremità della fibra, oltre al collegamento all'unità di interrogazione. Lo scopo del terminale è prevenire forti riflessioni all'indietro del segnale dall'estremità della fibra che interferirebbero e inquinerebbero il segnale di Rayleigh [CFP22].

### 3.3.1 Tecnologie OTDR

I DOFS possono essere basati su differenti tecniche e principi. La metodologia OTDR (Time Domain Reflectometry), sviluppata agli inizi degli anni Ottanta è stata molto importante per testare cavi ottici nel campo dell'industria delle telecomunicazioni.

Una sorgente ottica genera un singolo impulso che viene inviato al collegamento in fibra attraverso un circolatore o un accoppiatore direzionale. In un momento arbitrario dall'invio dell'impulso, il fotodiodo riceve la potenza diffusa da una sezione di fibra situata a distanza

$$z = \frac{c_0 t}{2n_{eff}}$$

dove  $c_0$  è la velocità della luce nel vuoto e il fattore  $2n_{eff}$  indica l'indice efficace della fibra e spiega il fatto che la luce subisce un viaggio di andata e ritorno. Questa formula stabilisce una relazione tra l'istante di arrivo e la posizione lungo il collegamento in fibra; in questo modo è possibile mappare l'attenuazione lungo la fibra. Questo strumento appunto è chiamato OTDR. Mentre l'impulso si propaga lungo la fibra, una piccola frazione della sua luce viene diffusa in tutte le direzioni dallo scattering di Rayleigh e una porzione ancora più piccola viene catturata dal nucleo della fibra e ricondotta all'ingresso della fibra, dove viene deviata verso il ricevitore (fotodiodo) [Har17].

Lanciando nella fibra un impulso ottico breve, man mano che il fascio si propaga lungo la fibra, un fotorilevatore elabora la quantità di luce sottoposta a backscattering. In questo processo si

verificano delle perdite a causa dello scattering di Rayleigh, in conseguenza delle variazioni microscopiche casuali dell'indice di rifrazione del nucleo.

Nella Fig. 3.3 vengono mostrati oltre al classico OTDR anche quelli relativi a Brillouin e Raman.

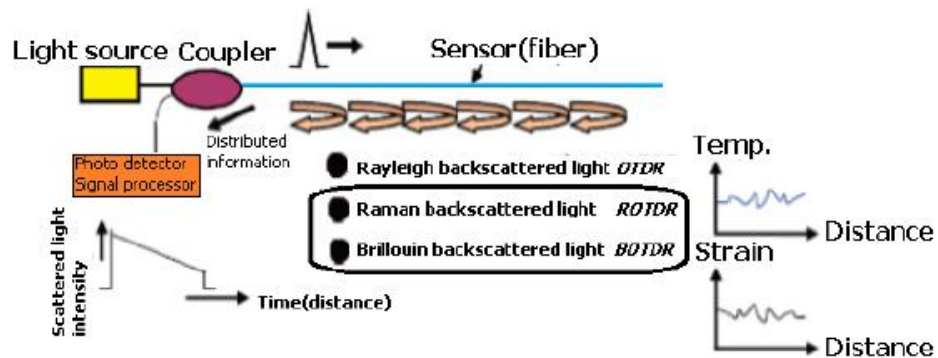


Figura 3.3: Acquisitori di segnali. ([E14], figura 2.5)

La realizzazione di questo riflettometro è relativamente semplice: sono necessari solamente un generatore di impulsi ottici, un fotorivelatore ed infine adeguati componenti ottici, in maniera tale da separare il percorso d'andata da quello di ritorno, ed elettronici, indispensabile per il controllo e l'immagazzinamento dei dati. Ovviamente, più breve è l'impulso maggiore sarà la risoluzione della misura.

Gli impulsi ottici hanno una durata finita, di conseguenza, l'impulso occupa un tratto di fibra di lunghezza  $\Delta = \frac{c_0}{n}t$ . Una durata tipica dell'impulso è di 100 ns, che corrisponde a una lunghezza dell'impulso di circa 20 m. Considerando che la durata dell'impulso può variare da pochi nanosecondi a pochi microsecondi, si desume che la risoluzione spaziale di un OTDR è limitata dalla durata dell'impulso.

In linea di principio l'impulso potrebbe anche essere distorto dalla dispersione modale e cromatica della fibra; tuttavia, gli impulsi sono solitamente così lunghi che, nelle fibre monomodali, la dispersione cromatica può essere trascurata (bisogna tenere presente che la durata dell'impulso di un sistema da 1 Gb/s è inferiore a 1 ns). Diversamente, nelle fibre multimodali la dispersione modale potrebbe compromettere una minore risoluzione spaziale [BC12].

La risoluzione spaziale di un OTDR può essere analizzata convenientemente dal diagramma di Minkowski (rappresentato in Fig. 3.4). La retta delle ascisse rappresenta il tempo, mentre le ordinate sono lo spazio normalizzato percorso dalla velocità di gruppo.

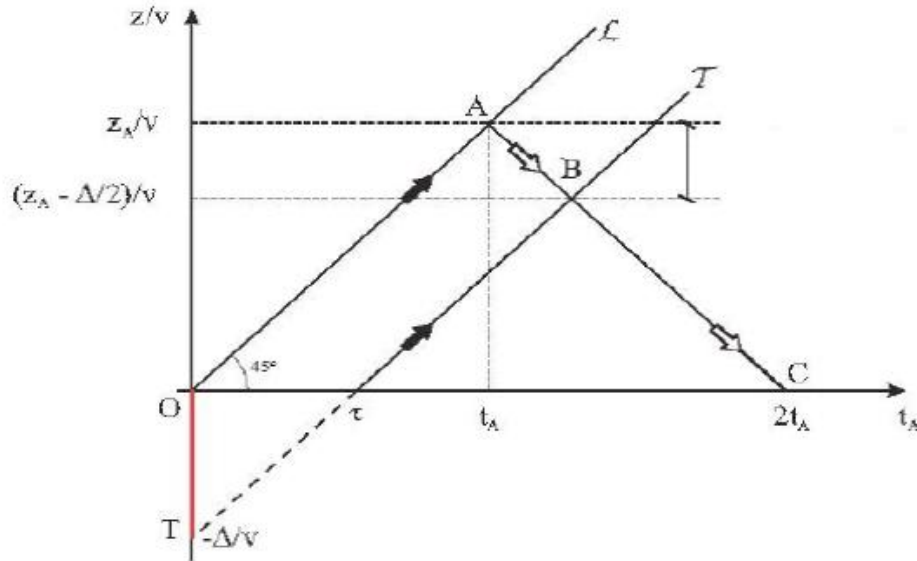


Figura 3.4: Diagramma di Minkowski. ([CFP22], figura 7)

Si supponga di inviare un impulso rettangolare, per semplicità assumiamo inoltre che l'ingresso nella fibra del segnale sia a  $t = 0$ . Nel diagramma lo spazio occupato è rappresentato dal segmento OT. Si presuppone anche che il punto A venga raggiunto in un tempo  $t_A$  e che la luce di backscattering che nasce, compie il segmento AC in  $2 t_A$ . Inoltre l'impulso continua a propagarsi nella fibra. Osservando il punto B si vede dal diagramma una sovrapposizione delle propagazioni all'ingresso della fibra nell'istante  $2 t_A$ . La potenza retrodiffusa ricevuta in quel momento è in realtà originata da un tratto di fibra di lunghezza  $\Delta/2$  posto prima del punto di coordinata  $z = vt/2$ . Di conseguenza, la risoluzione spaziale di un OTDR è pari alla metà della lunghezza dell'impulso. Si potrebbe anche essere tentati di utilizzare impulsi il più brevi possibile. Ma si deve notare che la potenza retrodiffusa è proporzionale alla lunghezza dell'impulso [Men15].

Se si considera una sezione di fibra di lunghezza  $\delta z$ , abbastanza corta da trascurare perdite, e se questa sezione di fibra è illuminata con luce CW, la potenza della retrodiffusione della luce,

riportando quella presente nel libro [Men15], può essere scritta come

$$P_B = (S_R S_C) \delta z P_i = S \delta z P_i. \quad (3.2)$$

Si intende per  $P_i$  la potenza incidente,  $S_C \propto 1/\lambda^4$  il coefficiente di diffusione della silice di Rayleigh espresso in  $m^{-1}$ ,  $S_C$  il coefficiente di "cattura" che descrive la porzione di luce diffusa catturata dal nucleo (adimensionale) e  $S = S_R S_C$  il coefficiente di retrodiffusione espresso in  $m^{-1}$ . Di conseguenza, a causa delle conclusioni sulla risoluzione spaziale, la potenza retrodiffusa da un impulso di lunghezza  $\Delta$  è  $P_B = \frac{1}{2} S \Delta P_i$ . Si potrebbe convertire l'espressione precedente in dBm e ottenere

$$P_B[dBm] = P_i[dBm] + 10 \log_{10} \left( S \frac{\Delta}{2} \right) = P_i[dBm] + \sigma + 10 \log_{10} \left( \frac{\Delta}{2} \right)$$

dove  $\sigma = 10 \log_{10}(S \cdot 1m)$  e  $\Delta$  è espressa in metri.

Come mostrato nella Tab. 3.5 seguente, il coefficiente di retrodiffusione per le fibre monomodali è di circa -70 dB per metro di fibra; quindi l'OTDR ha a che fare con una potenza ottica piuttosto bassa. Ad esempio, supponendo un impulso di 10 ns con potenza di picco di 10 dBm, la potenza retrodiffusa ricevuta dopo 10 km di fibra è di circa -64 dBm (supponendo 0,2 dB/km), ovvero circa 400 pW [Men15].

Fiber type	$\lambda$ [nm]	$S_R$ [1/m]	$S_C$	$\sigma$ [dB]
Multimodal step-index NA = 0.2	850	$0.70 \times 10^{-3}$	$6.6 \times 10^{-3}$	-53
	1300	$0.12 \times 10^{-3}$		-61
Multimodal graded-index NA = 0.2	850	$0.70 \times 10^{-3}$	$4.4 \times 10^{-3}$	-55
	1300	$0.12 \times 10^{-3}$		-63
Single-mode (MFD $9.5\mu m$ at 1300 nm)	1300	$0.070 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	-70
	1550	$0.045 \times 10^{-3}$		-72
Single-mode dispersion shifted (MFD $9.5\mu m$ at 1550 nm)	1300	$0.070 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3}$	-68
	1550	$0.045 \times 10^{-3}$		-70

Figura 3.5: ([Har17], tabella 3.1)

### 3.3.2 Tecnologie OFDR

Gli approcci di rilevamento alternativi che sfruttano l'effetto di Rayleigh si basano su un'analisi nel dominio della frequenza. Questo si riferisce alla riflettometria nel dominio della frequenza ottica (OFDR) in cui il segnale della sonda è un'onda ottica a scansione di frequenza continua (chirp) invece di un segnale pulsato. Pertanto, contrariamente all'OTDR che misura la risposta all'impulso della fibra leggendo l'intensità del segnale retrodiffuso di Rayleigh, la tecnica OFDR consiste nel misurare la sua risposta in frequenza analizzando le frange di interferenza. L'analisi nel dominio delle frequenze può essere effettuata seguendo due differenti modi, basati entrambi sulla misurazione della risposta in frequenza. Si tratta dell'approccio Incoherent Optical Time Reflectometry (I-OFDR) e quello Coherent Optical Time Domain Reflectometry (C-OFDR) anche conosciuto come tecnica in onda continua a frequenza modulate (FMCW) [C20].

La configurazione è la stessa di Fig. 3.3, tuttavia la differenza fondamentale è che la fonte non è un impulso bensì un'onda continua di luce modulata in ampiezza da un segnale in radio frequenza. A quest'ultimo viene fatta variare linearmente la frequenza, così facendo si ottiene la risposta in frequenza su una determinata banda. Come nel dominio temporale, la risoluzione spaziale è inversamente proporzionale alla risoluzione in banda del segnale sorgente, per cui è necessario avere un ricevitore a banda larga per ottenere una buona risoluzione spaziale.

Lo schema di un OFDR è riportato in Fig. 3.6, dove un laser altamente coerente emette un'onda continua, la cui frequenza viene linearmente aumentata fino a diverse decine di nanometri. Il segnale viene inviato in parte nella fibra in prova e nell'altra sezione utilizzato come oscillatore locale, il quale viene mischiato col backscattering. Di conseguenza il risultato viene rilevato dal ricevitore e rappresenta una interferenza coerente. Questo tipo di soluzione porta dei vantaggi molto rilevanti: mescolare il segnale con un oscillatore locale porta ad una efficace demodulazione a frequenza intermedia, inoltre lavorando sulla velocità di variazione della frequenza è possibile passare da una larghezza di banda di una decina di nanometri scansionata dalla sorgente ad un segnale elettrico più comodo di qualche MHz. La risoluzione è molto elevata, ed è descritta da  $\lambda_s \lambda_f / (2n\Delta\lambda)$ , dove  $\lambda_s, \lambda_f$  sono gli estremi della lunghezza

d'onda di scansione,  $\Delta\lambda$  rappresenta la differenza tra i due estremi ed infine  $n$  è l'indice di rifrazione della fibra. Attraverso una scansione di una decina di nanometri è possibile raggiungere risoluzioni spaziali micrometriche [E14].

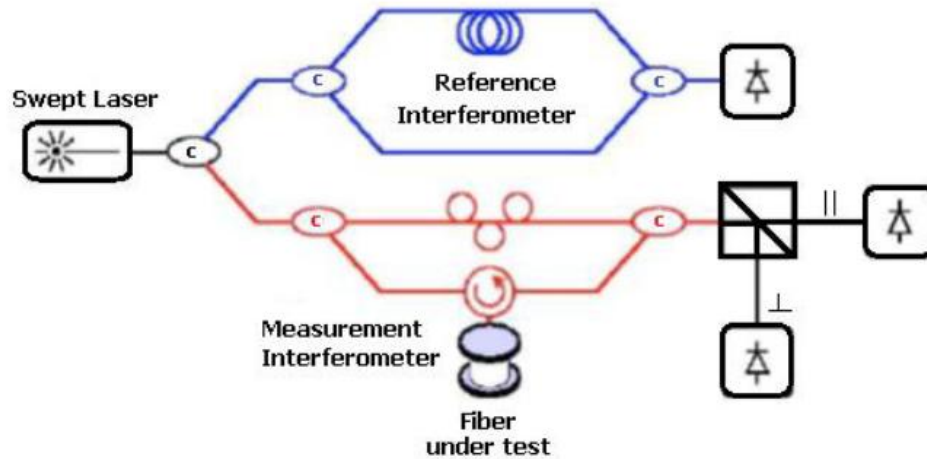


Figura 3.6: Configurazione OFDR. ([E14], figura 2.7)

Si conclude che i vantaggi finora dimostrati comportano una maggiore complessità e un limitato range di misura. Le prestazioni possono peggiorare seriamente se la frequenza ottica non viene modificata linearmente; per questo motivo devono essere compensate possibili non linearità. Come esempio, la tecnica mostrata in Fig.3.2 sfrutta un interferometro Mach-Zehnder per misurare la frequenza ottica effettiva [E14].

Per ottenere il meglio della ricezione eterodina, devono essere utilizzati dei fotodiodi bilanciati. Inoltre, essendo basato sull'interferenza ottica, OFDR è intrinsecamente sensibile alla polarizzazione, di conseguenza deve essere utilizzato un analizzatore di polarizzazione. Inoltre il fattore più limitante nel OFDR è la coerenza della sorgente. Infine risoluzioni spaziali micrometriche sono quindi raggiunte solo su fibra di lunghezza dell'ordine di poche decine di metri [Men15].

CHAPTER

# 4

# Applicazioni

Lo sviluppo e l'uso di sistemi di monitoraggio basati su fibra ottica nell'ingegneria civile è aumentato negli ultimi anni in seguito all'espansione di questa tecnologia. La costruzione di ponti innovativi, l'introduzione di nuovi materiali e l'impiego di nuove pratiche di progettazione hanno portato a una crescente necessità di raccogliere ulteriori informazioni e feedback sul loro comportamento strutturale e sulla loro sicurezza.

Allo stesso tempo, l'infrastruttura già costruita, con ponti progressivamente invecchiati che sopravvivono spesso con piani di manutenzione inadeguati, porta alla necessità di una coerente metodologia di valutazione della sicurezza e di una strategia di sorveglianza integrata durante la loro vita residua.

Nel caso particolare dei sistemi di monitoraggio dei ponti, sono stati utilizzati diversi tipi di soluzioni di rilevamento in fibra ottica e diverse strategie di rete sia nei lavori di ricerca che nelle applicazioni in campo. I sensori in fibra ottica sono stati impiegati nella misurazione di diversi parametri delle strutture del ponte, come deformazioni, spostamenti, pressioni, carichi, accelerazioni, rotazioni, variazioni di temperatura, fessurazioni del calcestruzzo e monitoraggio della corrosione delle armature, mediante soluzioni sia integrate che installate esternamente.

## 4.1 Sensori FBG

Mirando all'applicazione pratica ed efficace dei sensori FBG nelle strutture di ingegneria civile, dovrebbero essere sviluppati trasduttori con caratteristiche e prestazioni adeguate. L'obiettivo primario di questi trasduttori è trasformare una grandezza fisica considerata rappresentativa del comportamento strutturale locale o globale in un segnale di natura ottica, come ad esempio la lunghezza d'onda associata all'FBG. Tuttavia, durante la concezione dei trasduttori vengono presi in considerazione anche gli aspetti relativi alle prestazioni, alla facilità di installazione, alla robustezza e all'integrazione in rete dei trasduttori nelle applicazioni sul campo.

L'installazione di sensori FBG nudi su componenti di strutture civili può comportare un'elevata percentuale di guasti di questi dispositivi di controllo a causa della natura fragile della fibra di vetro e dell'ambiente ostile del settore edile. Anche la gestione dei problemi derivanti dalle ridotte dimensioni fisiche della fibra si aggiunge alle difficoltà associate al collegamento di sensori FBG nudi ai componenti strutturali [Tji05].

Come riportato nel paragrafo 2.1.1, un sensore FBG nudo è sensibile alla temperatura, alla deformazione e alla pressione. Tuttavia un sensore ideale dovrebbe essere sensibile a un solo parametro ed essere immune agli altri. Pertanto è necessario sviluppare tecniche per ridurre al minimo gli effetti incrociati nei sensori FBG. L'eliminazione della sensibilità incrociata può essere ottenuta mediante misurazioni a due diverse lunghezze d'onda o due diverse modalità ottiche, per le quali le risposte di deformazione e temperatura sono diverse. Nell'articolo [FMA02] si propone la discriminazione della temperatura basata su un sensore FBG e un materiale termocromico, in cui la deformazione viene misurata attraverso le variazioni della lunghezza d'onda FBG mentre la temperatura viene misurata utilizzando la variazione della potenza ottica riflessa dal materiale termocromico. Tuttavia, queste tecniche soffrono della complessità del sistema, un range di misurazione limitato e capacità di multiplexing limitate. Un modo più semplice per correggere una misurazione della deformazione per l'effetto della temperatura consiste nell'utilizzare sensori separati fisicamente, in cui quello per la compensazione della temperatura è isolato dal campo di deformazione [Tji05].



Successivamente verranno descritti i sensori FBG di deformazione e di temperatura progettati per applicazioni nell'ingegneria civile e strutturale. L'aspetto importante della progettazione di questi sensori FBG è il loro rivestimento progettato proprio per questa tipologia di applicazioni. Il dispositivo per il rilevamento della temperatura è costituito da un sensore FBG racchiuso in un tubo metallico lungo 35 mm. Il tubo metallico protegge l'FBG dalle sollecitazioni esterne e aumenta oltre l'intervallo di rilevamento della temperatura e la sensibilità, accrescendo la dilatazione dell'FBG. Lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg del sensore di temperatura FBG è correlato solo al cambiamento della temperatura ambiente. Una tipica curva di calibrazione per il sensore di temperatura è mostrata in Fig.4.1. Il coefficiente lunghezza d'onda-temperatura è  $25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , con una sensibilità di  $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$  e la precisione è  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Il sensore di deformazione incorporato è costituito da un FBG inserito tra strati di materiale composito di carbonio ed è lungo circa 50 mm e spesso 0,5 mm.

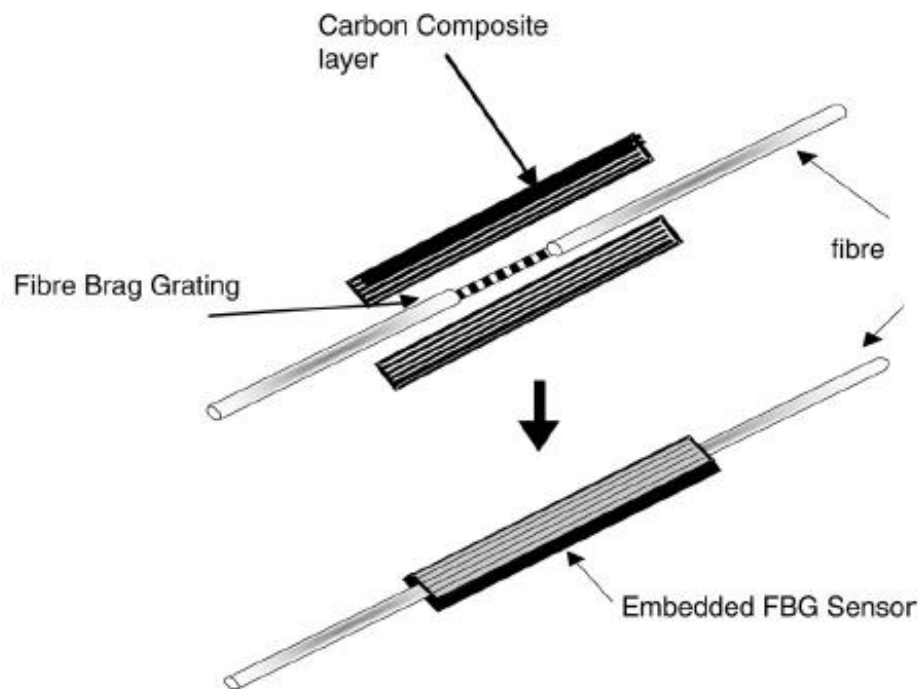


Figura 4.1: Sensore di deformazione FBG integrato. ([Tji05], figura 4)

La precisione e la sensibilità del sensore dipendono dal sistema di interrogazione ottica, la cui funzione è quella di rilevare lo spostamento della lunghezza d'onda in relazione alla perturbazione esterna e di dedurre i misurandi utilizzando l'Eq. 2.2 [Tji05].

Un'altra applicazione, basata sui sensori FBG, è la misura delle deformazioni nelle strutture di calcestruzzo.

Tenendo conto della specificità esibita dalle strutture in cemento armato, è stato sviluppato un nuovo trasduttore di deformazione, progettato per essere annegato nel calcestruzzo. Lo scopo del dispositivo è quello di rendere possibile l'installazione di sensori di deformazione FBG durante la fase di costruzione con prestazioni adeguate alle diverse condizioni strutturali, ossia considerando anche la comparsa di fessurazioni moderate.

Nell'articolo [Car10] è stato sviluppato e testato con successo un trasduttore con caratteristiche geometriche e meccaniche in grado di caratterizzare con precisione la deformazione del calcestruzzo, o di misurare con prestazioni soddisfacenti la deformazione media del calcestruzzo fessurato in una determinata lunghezza di riferimento. Il presente trasduttore è costituito da una barra liscia in acciaio inossidabile di 16 mm di diametro e 1,0 m di lunghezza, con una scanalatura elicoidale su entrambi i lati e un ancoraggio a ciascuna estremità. Due sensori FBG allineati longitudinalmente con la barra e incollati su fibre diametralmente opposte della barra in posizione centrale completano il trasduttore di deformazione schematicamente mostrato in Fig.4.2.

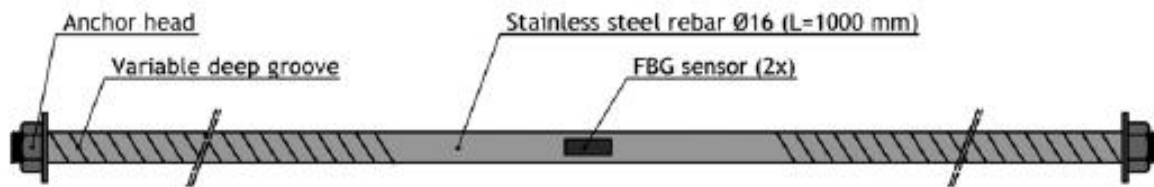


Figura 4.2: Rappresentazione schematica del trasduttore di deformazione ottico da incorporare nel calcestruzzo. ([Car10], figura 3)

La scelta di un sistema scanalato, a vite, con una profondità crescente dal centro all'estremità, mira a creare condizioni di adesione graduale, adatte alla caratterizzazione media del campo di deformazione nella lunghezza di riferimento.

L'effetto di adesione riportato deve essere preso in considerazione quando il calcestruzzo è fessurato, poiché le prestazioni del trasduttore non sono influenzate nel caso di calcestruzzo non fessurato. È stata adottata una coppia di sensori FBG, consentendo la ridondanza nella misurazione della deformazione effettiva e aumentando la confidenza sui risultati del trasduttore.

Tuttavia, solo uno dei sensori FBG può, in generale, essere attivo durante la fase di utilizzo del ponte [Car10].

Sono stati anche condotti test di laboratorio volti alla valutazione e calibrazione del comportamento del trasduttore. Sono state eseguite prove di compressione del carico ciclico, con il trasduttore incorporato in un prisma di cemento armato, e le misurazioni ottenute con il nuovo trasduttore sono state confrontate con i dati provenienti dalla restante strumentazione. Per il confronto sono stati utilizzati un estensimetro a filo vibrante incorporato e una coppia di trasduttori di spostamento esterni. È stata osservata una deviazione inferiore al 2% confrontando i risultati dei diversi trasduttori valutando la deformazione del calcestruzzo [Car10].

## 4.2 Sensori EFS

Sempre nell'ambito delle applicazioni nel monitoraggio delle strutture di ingegneria chimica, è possibile riportare i progressi nell'area dei sensori di onde evanescenti in fibra ottica (FOEW), i quali si basano sull'assorbimento ottico della potenza dell'onda evanescente da parte dell'analita, ossia la sostanza ricercata dall'analisi chimica.

La variazione della potenza di uscita con il mezzo assorbente circostante rivela il cambiamento della proprietà ottica del mezzo di rilevamento, la quale è funzione della temperatura, dell'umidità relativa e della concentrazione delle diverse specie biochimiche. Quindi, in verità, i sensori basati sulle onde evanescenti hanno applicazioni di rilevamento chimico, fisico e biologico più ampie. I parametri variabili del sensore FOEW sono: il tipo di sorgente luminosa in ingresso (collimata o diffusa), la geometria della fibra (diritta, piegata, rivestita o rastremata ecc.), la lunghezza della fibra, l'angolo di lancio e l'analita [SGS19].

L'ultimo decennio ha visto l'evoluzione dei sensori FOEW in base alle loro geometrie (curvatura, rastrematura) e rivestimento con diversi materiali. Le loro geometrie possono essere classificate come a forma di U, conica e a forma di D con lo scopo di aumentare il campo evanescente nel nucleo della fibra. L'aumento del campo evanescente porterà alla fine a prestazioni di rilevamento migliorate (nella sensibilità e nella risoluzione).

In particolare, la curvatura a forma di U viene generalmente eseguita su una fibra in modo da indurre la propagazione di modi di ordine superiore. Di conseguenza viene migliorata l'interazione del campo evanescente con l'analita e la profondità di penetrazione del campo nella regione di quest'ultimo. Oltre a una migliore sensibilità, i sensori FOEW piegati a U hanno anche il vantaggio di posizionare la sorgente e il rivelatore nella stessa posizione fisica [SGS19].

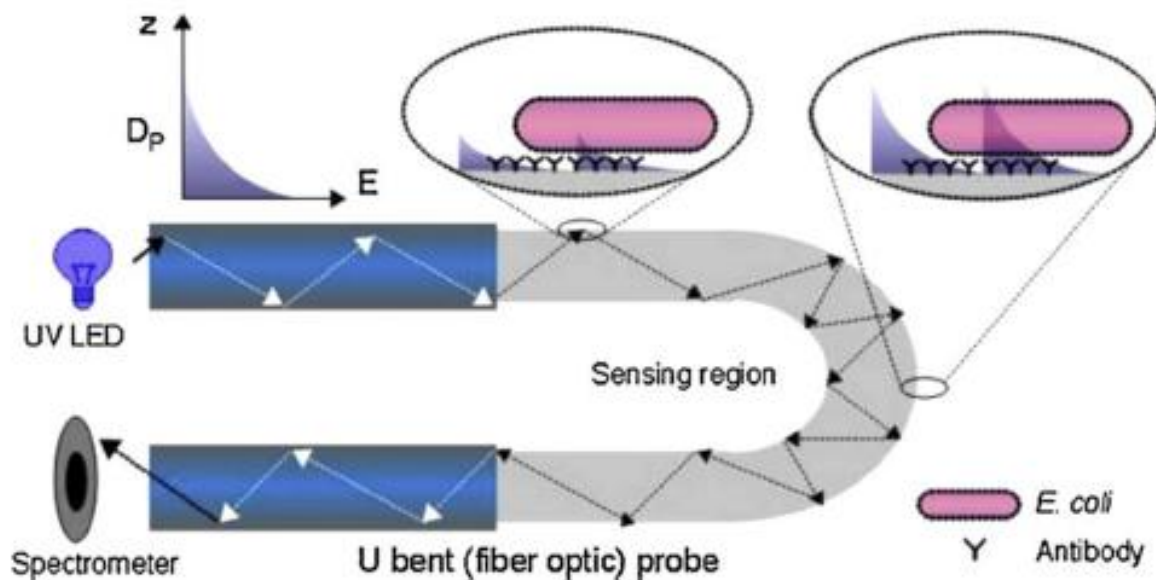


Figura 4.3: La curvatura della fibra a forma di U provoca l'aumento della profondità di penetrazione per il rilevamento di E.coli. ([SGS19], figura 6)

In generale, alcuni strati sensibili ai gas vengono applicati per applicazioni di rilevamento di quest'ultimi perché mostrano l'assorbimento della luce quando la fibra è esposta all'ambiente gassoso. Nel campo del rilevamento di gas, nell'articolo [YTT09], si è sviluppato un sensore FOEW con un film sottile di ossido semiconduttore ( $SnO_2$ ) depositato per il rilevamento di gas  $H_2$  attraverso la combinazione di gas  $H_2-N_2$ . Le prestazioni sono state riportate ad alte temperature comprese tra 300 °C e 700 °C, con un tempo di risposta molto rapido.

Un altro sensore FOEW è stato analizzato nell'articolo [Gao+16] per il rilevamento chimico. La geometria di rilevamento della fibra piegata a U utilizzava il rivestimento di ossido di grafene (GO) per il rilevamento dell'etanolo acquoso. Gli spettri di assorbimento vengono confrontati per diverse concentrazioni di etanolo acquoso (5%–100%) con un sensore piegato

a U con e senza pellicola di rilevamento GO nell'intervallo di lunghezze d'onda di 500–800 nm. Il sensore riportato ha mostrato una maggiore sensibilità, una risoluzione superiore e una risposta rapida. Il diagramma schematico del sensore è mostrato in Fig.4.4. È stata dimostrata una buona sensibilità per tutte le concentrazioni di etanolo (0-100%) con forte stabilità e ripetibilità.

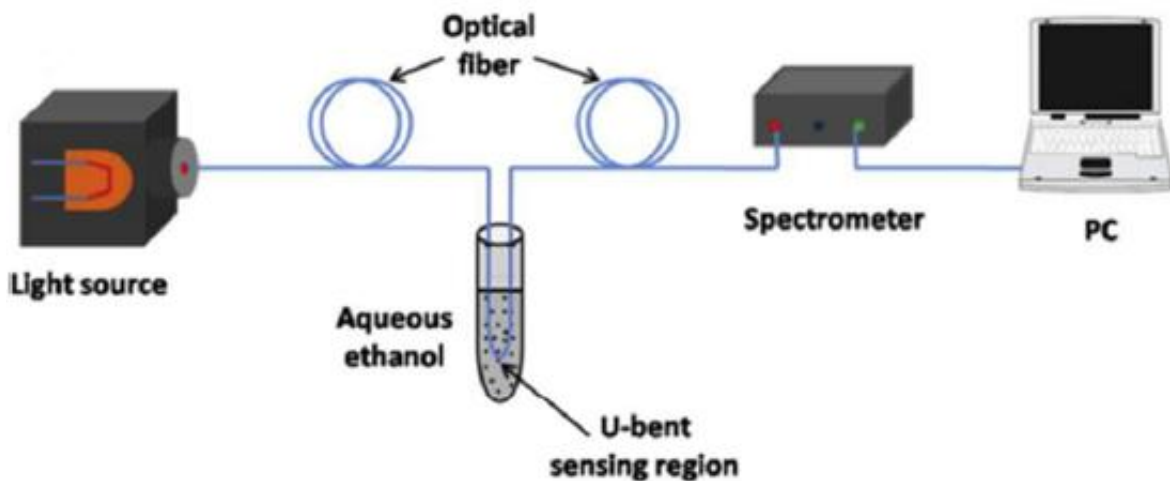


Figura 4.4: Schema della disposizione sperimentale del sensore FOEW rivestito con GO piegato a U. ([SGS19], figura 12)

### 4.3 Rilevamento basato sulla diffusione di Rayleigh

Nonostante il suo raggio di rilevamento limitato, OFDR basato sulla diffusione di Rayleigh fornisce un'elevata risoluzione spaziale che è l'ideale per la mappatura strutturale di deformazioni, rilevamento e monitoraggio dei danni localizzati a strutture civili, a condizione che sia presente una rete adeguata, come ad esempio l'uso di un reticolo regolare di fibre. Oltre alla disponibilità di potenti dispositivi commerciali per l'implementazione, è diventata una tecnologia matura che ha dato origine a molti lavori per applicazioni in vari campi, sia nella ricerca che nell'industria.

È importante ricordare che l'OFDR basato sulla diffusione di Rayleigh è una nuova emergente tecnologia per i sistemi SHM, soprattutto per il monitoraggio di vari parametri strutturali.

Un importante applicazione che sfrutta il rilevamento OFDR, si basa sul monitoraggio delle strutture di ingegneria civile in calcestruzzo, in particolare lo studio di una metodologia sperimentale per determinare la presenza di tagli e fessurazione nelle travi in cemento armato [Kon17].

Il rilevamento OFDR è utilizzato in pali soggetti a cedimento generale, con diverse applicazioni su materiali in cemento armato, o per il monitoraggio delle crepe (localizzazione delle crepe ed evoluzione della larghezza nel tempo) utilizzando sottili fibre rivestite in poliammide per travi sottoposte a tre punti di flessione. In diverse applicazioni, l'elevata risoluzione spaziale ha determinato un numero considerevole di picchi osservati in un profilo di deformazione distribuito, che indica il rilevamento della fessurazione anche a bassi livelli di carico e anche quando la fessurazione non era ancora visibile (screpolature premature).

Negli articoli presi in considerazione [BCV18][CFP22], è riportata un'applicazione su travi in cemento armato sottoposte ad una prova di carico a tre punti.

I campioni hanno lunghezza di 800 mm e 100 mm per sezione trasversale di 180 mm, con una sola barra di armatura dispiegata al centro della sezione.

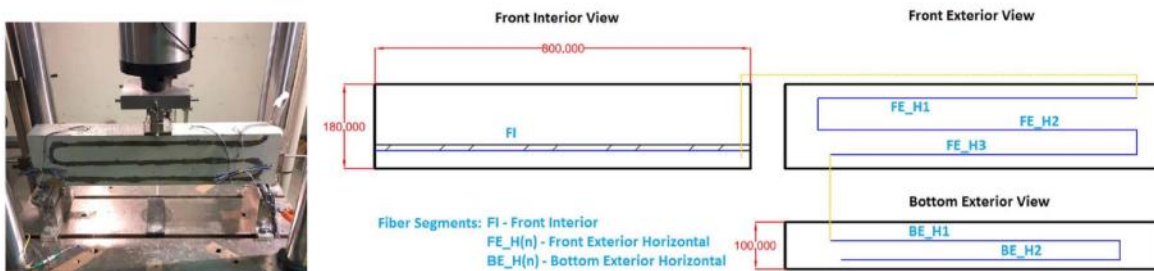


Figura 4.5: Campione di trave e distribuzione DOFS. ([BCV18], figura 7)

La fibra usata ha lunghezza di 5.2 m e un diametro di 155  $\mu\text{m}$ , con un unico rivestimento sottile in poliammide (nessuna protezione spessa) per aumentare l'affidabilità delle misurazioni. Parte della fibra è stata annegata direttamente negli elementi di armatura all'interno del calcestruzzo, con incollaggio sulla barra di armatura mediante cianoacrilato o adesivo epossidico, mentre la restante parte della fibra è incollata alla superficie dopo l'indurimento del calcestruzzo.

Questa configurazione consente un confronto diretto, da un unico sensore, tra le deformazioni sviluppate sulla superficie del calcestruzzo e l'armatura. Inoltre ci si aspetta di rilevare e

seguire l'evoluzione delle fratture con i segmenti esterni.

Tre estensimetri sono stati anche installati sull'armatura per il confronto. Le misurazioni sono state effettuate utilizzando una risoluzione spaziale di 1 *cm*, corrispondente a più di 500 misurazioni diverse punti lungo la fibra, con un intervallo di 5 *s* tra acquisizioni [CFP22].

Un'altra applicazione classica del rilevamento OFDR basato su Rayleigh riguarda il rilevamento e il monitoraggio dei danni nella tecnologia delle strutture composite utilizzate in aeronautica. I materiali compositi infatti hanno un complesso comportamento, con innesco e propagazione del danno causato da vari scenari (delaminazione e fessure trasversali) e in luoghi localizzati (impatto locale, rappezzi di riparazione e giunti di sovrapposizione). A causa delle loro piccole dimensioni e flessibilità, le fibre ottiche possono quindi essere incorporate vantaggiosamente nelle strutture di questi materiali compositi durante il processo di layup di produzione, con lo scopo di ottenere un'ulteriore mappatura della deformazione e risoluzione fino a pochi millimetri, e quindi un rilevamento locale ed efficace dei danni in posizioni a grande gradiente [Güe+18].

### **4.3.1 Sfide**

Il DOFS basato sulla diffusione di Rayleigh sta diventando molto comune nelle applicazioni SHM e ci si aspetta che il mercato continui a crescere con una combinazione di ricerca accademica e sviluppi industriali. Tuttavia, la tecnologia è ancora recente e affronta una serie di problemi e di carenze che rappresentano sfide da affrontare nei prossimi anni, con ulteriori test (per una migliore comprensione e analisi) e potenziali soluzioni tecniche [Kon17].

Una sfida importante è legata all'integrazione della fibra ottica nei materiali e nelle strutture. Nonostante sia molto piccola, una fibra standard per telecomunicazioni ha un diametro che rimane molto più grande delle fibre comunemente usate (ad esempio 5-10  $\mu m$  per le fibre di carbonio) nei materiali compositi con rinforzo a fibra lunga; è piuttosto dell'ordine di uno spessore di uno strato composito.

Anche con fibre di diametro molto ridotto (50  $\mu m$ ) che sono state sviluppate per scopi di rilevamento nelle strutture aerospaziali, la differenza è ancora di un ordine di grandezza. Di

conseguenza è probabile che una fibra incorporata influisca sul comportamento meccanico, indebolendo le prestazioni del materiale con ulteriori interfacce e che funga da iniziatore non intenzionale di concentrazione delle sollecitazioni e di tensioni a causa della creazione di tasche di resina nella fibra incorporata circostante [CFP22].

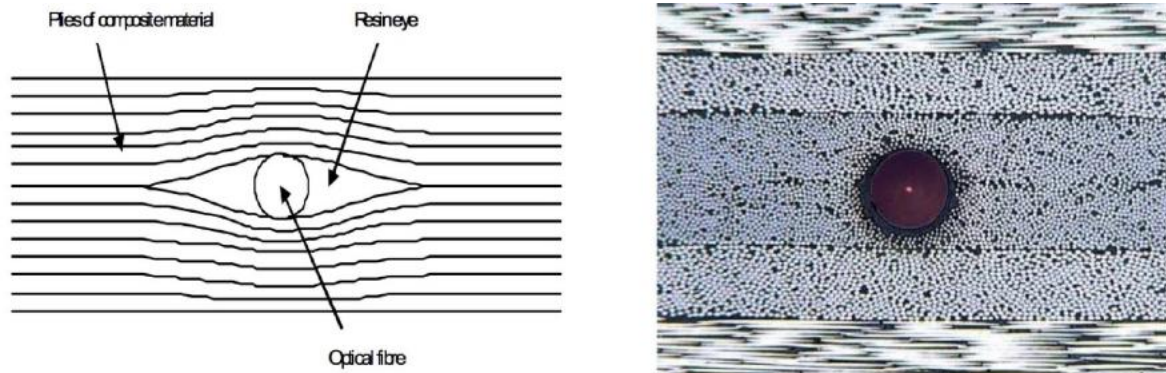


Figura 4.6: Schizzo della sezione trasversale del laminato con occhiello in resina (a sinistra) e fibra ottica incorporata parallelamente alle fibre di rinforzo in un nastro laminato (a destra). ([CFP22], figura 17)

L'impatto di una fibra sulla rigidità e sulle proprietà di resistenza possono essere valutate mediante modelli matematici e metodi numerici, tenendo conto degli strati strutturali, i tipi di impilamento degli strati, la disposizione e i rispettivi orientamenti di strati e fibre.

Tuttavia diverse osservazioni sperimentali hanno indicato che rispetto a questa questione le fibre in realtà non producono alcuna modifica significativa delle proprietà meccaniche della struttura ospite quando opportunamente inserite. Infatti se la fibra ottica è incorporata in strutture a strati e rimane nella direzione di essi, questi studi hanno dimostrato che ha un impatto poco intrusivo e riduce minimamente le capacità di carico della struttura.

Inoltre, un'altra difficoltà può derivare da deformazioni residue dopo la produzione; la fibra è infatti sottoposta allo stress creato al confine tra il rivestimento e lo stato composito durante la fase di riscaldamento, che viene rilasciato solo parzialmente durante la fase di raffreddamento. Alla fine, l'inclusione di sensori in fibra negli strati compositi interni di una struttura, richiede la modifica del processo di produzione esistente e tempi di stampaggio più lunghi, il che aumenterà la complessità e i costi di produzione [L13].



Un'altra grande sfida è determinare l'affidabilità e la robustezza, che possono essere influenzate da diversi fattori.

Una fibra ottica è relativamente fragile (resistenza al taglio molto scarsa), in particolare con un rivestimento sottile. Nell'intera sezione di un materiale, i punti di ingresso e uscita sono punti critici a causa della forte flessione subita durante la produzione o le condizioni operative, che possono causare gravi perdite ottiche e rottura della fibra. Inoltre, la fase di installazione è critica per l'integrità delle proprietà di rilevamento della fibra. Questo aspetto si riferisce anche a quello di manutenibilità; infatti un ulteriore aspetto è la facilità di sostituire i sensori in fibra danneggiati. Inoltre quando la fibra viene incollata sulla superficie della struttura, potrebbero esserci problemi con gli adesivi per quanto riguarda il trasferimento della deformazione (soprattutto con rivestimento spesso) [CFP22].

Pertanto, è necessario trovare un compromesso tra accuratezza della misurazione e protezione dei sensori nel caso dei DOFS, i quali poi devono anche essere efficacemente collegate ad un sistema di elaborazione per estrarre efficacemente le informazioni. Questi sistemi dovrebbero possedere una nuova capacità di raccolta ed elaborazione dei dati, algoritmi di simulazione avanzati per la diagnosi e la prognosi ed infine un sistema di controllo affidabile.



# Conclusioni

Nella presente tesina sono state mostrate le applicazioni dei sensori in fibra ottica nel monitoraggio delle strutture di ingegneria civile.

In particolare sono stati trattati i principi fisici di retrodiffusione che vengono sfruttati, nonché gli aspetti pratici della realizzazione del sensore e della strumentazione che consentono di misurare le quantità di interesse.

Nei vari paragrafi sono stati evidenziati i vari campi di applicazione dei sensori in fibra ottica ma soprattutto l'elevata sensibilità nell'analisi di diversi fenomeni fisici. Purtroppo i costi di queste apparecchiature sono molto elevati portando così ad una valutazione spesso negativa che fa preferire sensori alternativi, meno sensibili ma con costi decisamente inferiori.

L'attenzione si è maggiormente concentrata sui sensori FBG, quelli EFS, ma specialmente sui sistemi DOFS, le cui tecnologie, basate sul backscattering di Rayleigh, sono oggi le più interessanti. Queste apparecchiature, grazie alle loro capacità uniche, vengono soprattutto impiegate per applicazioni SHM su strutture dell'ingegneria civile di media scala, come l'utilizzo nella rilevazione di deformazioni e di cedimenti nelle strutture di calcestruzzo. Tuttavia, come dettagliato nell'ultima parte dell'elaborato, restano da affrontare importanti sfide, come l'integrazione nei materiali, l'affidabilità e la robustezza dei sensori in fibra ottica, prima che questa tecnologia avanzata diventi uno standard nelle attività industriali.



# Bibliografia

- [BC12] Xiaoyi Bao e Liang Chen. «Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors». In: *Sensors* 12.7 (2012), pp. 8601–8639. DOI: 10.3390/s120708601.
- [BCV18] António Barrias, Joan R. Casas e Sergi Villalba. «Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study». In: *Sensors* 18.4 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18040980. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/980>.
- [C20] Lanciano C. *Sensori distribuiti in fibra ottica e tecnologie geomatiche per il monitoraggio della stabilità dei fronti di cava*. Tesi di dottorato. (Università di Siena) Rel. Salvini R., 2020.
- [Car10] Rodrigues; Carlos. «Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges». In: *Engineering Structures* 32.8 (2010), pp. 1993–2002.
- [CFP22] L. Chamoin, S. Farahbakhsh e M. Poncelet. «An educational review on distributed optic fiber sensing based on Rayleigh backscattering for damage tracking and structural health monitoring». In: *Measurement Science and Technology* 33.12, 124008 (dic. 2022), p. 124008. DOI: 10.1088/1361-6501/ac9152.
- [CK08] Brian Culshaw e Alan Kersey. «Fiber-optic sensing: A historical perspective». In: *Journal of lightwave technology* 26.9 (2008), pp. 1064–1078.
- [E14] Irrera N.; Porcari E. *Monitoraggio dei sistemi mediante l'impiego dei sensori ottici*. Tesi di laurea. (Politecnico Milano) Rel. Castelli Dezza F., 2014.

- [FMA02] Carlos Fernández-Valdivielso, Ignacio Matias e Francisco Arregui. «Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material». In: *Sensors and Actuators A: Physical* 101 (set. 2002), pp. 107–116. DOI: 10.1016/S0924-4247(02)00188-7.
- [Gao+16] Saisai Gao et al. «Absorbance response of graphene oxide coated U-bent optical fiber sensor for aqueous ethanol». In: *RSC Adv.* 6 (gen. 2016). DOI: 10.1039/C5RA22211G.
- [Gia+82] Thomas G Giallorenzi et al. «Optical fiber sensor technology». In: *IEEE transactions on microwave theory and techniques* 30.4 (1982), pp. 472–511.
- [Güe+18] Alfredo Güemes et al. «Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors». In: *Sensors* 18.4 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18041094. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1094>.
- [Har17] Arthur H. Hartog. «An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors». In: CRC Press, 2017. Cap. 6. DOI: 10.1201/9781315119014.
- [KB20] Khonina; Svetlana Nikolaevna; Nikolay Lvovich Kazanskiy; e Muhammad Ali Butt. «Evanescent field ratio enhancement of a modified ridge waveguide structure for methane gas sensing application». In: *IEEE Sensors Journal* 20.15 (2020), pp. 8469–8476. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2985840.
- [Kei00] Gerd Keiser. *Optical fiber communications*. Vol. 2. McGraw-Hill New York, 2000.
- [Kit14] Kitayama. «Light propagation in optical fibers. In Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective». In: *Cambridge University* (2014), pp. 65–106. DOI: 10.1017/CB09781139206914.005.
- [Kon17] Hicke; Konstantin. «Condition monitoring of industrial infrastructures using distributed fibre optic acoustic sensors». In: *2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*. IEEE (2017).
- [L13] Palmieri L.; Schenato L. «Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh scattering». In: *The Open Optics Journal* 7.1 (2013). DOI: 10.2174/1874328501307010104.

- [LL11] Manuel López-Amo e José Miguel López-Higuera. «Multiplexing techniques for FBG sensors». In: *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation* (2011), pp. 99–115.
- [Men15] David A. Krohn; Trevor W. MacDougall; Alexis Mendez. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*. Quarta edizione. SPIE, 2015. ISBN: 9781628411805.
- [Rav21] Fawwaz Ulaby; Umberto Ravaioli. *Fondamenti di campi elettromagnetici*. Ottava edizione. Pearson, 2021. ISBN: 9788891906618B.
- [RCV19] Gerardo Rodriguez, Joan Casas e Sergi Villalba. «Shear crack width assessment in concrete structures by 2D distributed optical fiber». In: *Engineering Structures* 195 (set. 2019), pp. 508–523. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.079.
- [Sar19] Pierluigi Zotto; Sergio Lo Russo; Paolo Sartori. *FISICA GENERALE*. Elettromagnetismo - Ottica. Edizioni LaDotta, 2019. ISBN: 9788898648368.
- [SGS19] Anuj K. Sharma, Jyoti Gupta e Ishika Sharma. «Fiber optic evanescent wave absorption-based sensors: A detailed review of advancements in the last decade (2007–18)». In: *Optik* 183 (2019), pp. 1008–1025. ISSN: 0030-4026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.104>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402619302219>.
- [Tji05] P. Moya; J.M.W. Brownjohn; R. Suresh S.C. Tjin. «Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure». In: *Engineering structures* 27.12 (2005), pp. 1828–1834.
- [YTT09] Qiangu Yan, Shiquan Tao e Hossein Toghiani. «Optical fiber evanescent wave absorption spectrometry of nanocrystalline tin oxide thin films for selective hydrogen sensing in high temperature gas samples». In: *Talanta* 77.3 (2009), pp. 953–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.07.066>.

