

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì**

**Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe: LM-33**

**TESI DI LAUREA
in Tecnologie Speciali LM**

**Applicazione di reticoli di Bragg “chirped” per il
monitoraggio strutturale di laminati CFRP**

**CANDIDATO
Maicol Lanzoni**

**RELATORE
Lorenzo Donati**

Anno Accademico 2013/2014

Sessione III

Ai miei genitori

Indice

1. Introduzione	5
2. Monitoraggio strutturale	9
2.1. Monitoraggio	11
2.1.1. Misure di deformazione	11
2.1.2. Risposta alle vibrazioni	13
2.1.3. SHM mediante sensori a fibra ottica	14
2.1.3.1. Reti di sensori e sensori localizzati	15
2.2. Diagnosi	17
2.3. Prognosi	18
2.4. Materiali compositi	20
2.4.1. Tipologie di danneggiamento	22
2.4.2. Tolleranza al danno	23
3. FBG e sistemi di monitoraggio tramite fibre ottiche	27
3.1. Le fibre ottiche	27
3.1.1. Struttura	28
3.1.2. Funzionamento	30
3.1.3. Classificazione	32
3.1.4. Problematiche relative alle fibre ottiche	34
3.1.4.1. Attenuazione	34
3.1.4.2. Dispersione	38
3.2. Reticoli di Bragg in fibra ottica (FBG)	39
3.2.1. Struttura del reticolo	42
3.2.2. Fabbricazione	43
3.2.3. Tipi di reticolo	46
3.2.4. Legame foto-termo-elastico	49
3.3. FBG chirped	51
4. Prove sperimentali	55

4.1. Materiali	55
4.1.1. Pre-pregs	55
4.1.2. Estensimetri	58
4.1.3. Fibre ottiche	59
4.2. Macchinari e strumenti	59
4.2.1. Pressa	59
4.2.2. Autoclave	60
4.2.3. Interrogatore di sensori FBG	61
4.2.4. Giuntatrice	63
4.2.5. Strain Indicator	63
4.3. Svolgimento prove	64
4.3.1. Laminazione provini ed embedding delle fibre ottiche	64
4.3.2. Cura in autoclave	71
4.3.3. Taglio dei provini	73
4.3.4. Applicazione dei tab	76
4.3.5. Lucidatura provini	77
4.3.6. Applicazione estensimetri	78
4.3.7. Connettorizzazione della fibre ottiche	79
4.3.8. Prove di flessione a 3 punti	81
4.3.9. Test di trazione e analisi strutturale sui provini non strumentati	83
4.3.10. Test di trazione sui provini strumentati	85
5. Analisi dei risultati	87
5.1. Prova di flessione a 3 punti	87
5.2. Densità di frattura nei provini in unidirezionale (UD)	90
5.2.1. Analisi al microscopio	92
5.3. Analisi degli spettri del provino in UD	95
5.3.1. Analisi degli spettri a riposo	95

5.3.2. Analisi degli spettri sotto carico	97
5.4. Analisi della microstruttura dei provini in PW	100
5.5. Caratteristica meccanica dei provini in PW	102
5.6. Analisi degli spettri del provino in PW	103
5.6.1. Analisi degli spettri a riposo	104
5.6.2. Analisi degli spettri sotto carico	105
5.7. Risposta del sensore alla deformazione	108
6. Conclusioni	111
7. Bibliografia	113
8. Ringraziamenti	117

1. Introduzione

L'uso dei materiali compositi, soprattutto nel campo delle strutture aeronautiche, è andato aumentando negli ultimi decenni per la loro elevata rigidità e resistenza specifica, assieme ad un possibile risparmio notevole in termini di peso dell'intera struttura.

Tali materiali introducono però delle nuove problematiche riguardanti le modalità di danneggiamento e il comportamento a fatica. Mentre questi fenomeni sono relativamente ben compresi nei materiali metallici, per una struttura in composito non esistono ancora modelli teorici o numerici in grado di predire con sufficiente affidabilità l'evoluzione del danneggiamento.

Dal momento che la sicurezza non può passare in secondo piano rispetto alla riduzione dei costi e all'aumento dell'efficienza di una struttura, negli ultimi anni la ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di sistemi in grado di rilevare la presenza e l'evoluzione del danno. Tali sistemi vengono definiti *Structural Health Monitoring Systems* (SHMS), ovvero sistemi di monitoraggio strutturale.

Il danneggiamento strutturale può così essere individuato e identificato per mezzo di sensori distribuiti integrati nella struttura stessa, aventi la possibilità di trasmettere queste informazioni ad un sistema di analisi esterno permettendo di valutare lo stato di degrado della struttura in tempo reale. Se efficientemente implementate, queste metodologie possono garantire la sicurezza strutturale riducendo al minimo i tempi di fermo macchina per le operazioni di ispezione e manutenzione.

È in questo contesto che si inseriscono le attività di ricerca sulle strutture intelligenti (*Smart Structures*) che, inglobando al loro interno opportune tipologie di sensori e attuatori, sono in grado di monitorare l'ambiente fisico operativo, raccoglierne e interpretarne le informazioni (attraverso un centro

di elaborazione dati) per poi rispondere ai cambiamenti della struttura in modo appropriato attraverso gli attuatori. Le *Smart Structures* hanno l'obiettivo di aumentare l'efficienza strutturale esibendo proprietà funzionali con minimi aggravii di peso, di costo e di affidabilità, mantenendo inalterate le elevate prestazioni dei materiali compositi.

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

L'attività di ricerca condotta in questa tesi è rivolta all'indagine di tecniche di *health monitoring* per mezzo di sensori di deformazione a fibra ottica. Essi presentano molteplici peculiarità che li rendono i candidati ideali per applicazioni di monitoraggio strutturale, tra cui in primis il peso e le dimensioni contenute che ne consentono l'inglobamento nei laminati mantenendo una ridotta invasività. A queste doti si aggiungono la capacità di multiplexing di più sensori sulla stessa fibra, la possibilità di effettuare misure di diverse grandezze nonché l'immunità alle interferenze elettromagnetiche.

Esistono diversi tipi di sensori che utilizzano le fibre ottiche. Nel presente lavoro si sono utilizzati sensori di deformazione basati sui reticoli di Bragg (*Fiber Bragg Gratings* - FBG) chirped. Questi sensori sono costituiti da un reticolo inscritto all'interno della fibra, che ha l'effetto di riflettere solo alcune lunghezze d'onda della luce incidente. Se le proprietà geometriche del reticolo cambiano per effetto di una deformazione, cambia anche la forma dello spettro riflesso. Inoltre, con il tipo di sensore usato, è possibile correlare lo spettro con la posizione di eventuali danneggiamenti interni al materiale.

Gli obiettivi di questa ricerca sono di verificare gli effetti della presenza di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche di un laminato e di trovare un legame tra la risposta in frequenza del sensore FBG e lo stato tensionale e il grado di danneggiamento di un componente in composito.

In questo elaborato vengono inizialmente descritti il problema del monitoraggio strutturale e le strategie attualmente utilizzate. Successivamente vengono illustrati i principi alla base delle fibre ottiche e dei sensori a reticolo di Bragg, evidenziandone vantaggi, caratteristiche ottiche e geometriche e principi di funzionamento. Infine vengono descritte le attività sperimentali svolte al fine di rilevare il danneggiamento interno di un laminato e analizzati i risultati ottenuti.

2. Monitoraggio strutturale

La conoscenza dello stato di sollecitazione e di deformazione di una struttura in opera, in funzionamento, rappresenta una delle problematiche di maggior interesse nel campo dell'ingegneria strutturale. Questa informazione permette infatti di risalire allo stato di salute della struttura, ovvero di determinare la nascita e la propagazione di un danno al suo interno e di valutarne gli effetti sulla vita residua della struttura e sulla sicurezza per gli utilizzatori.

Negli ultimi anni l'interesse verso tecniche che permettano di identificare il danneggiamento per mezzo di sensori integrati nella struttura è notevolmente cresciuto. Queste tecniche trovano grande impiego nel campo dell'ingegneria civile per il monitoraggio di strutture particolarmente sensibili, come gli edifici antichi o i ponti sospesi.

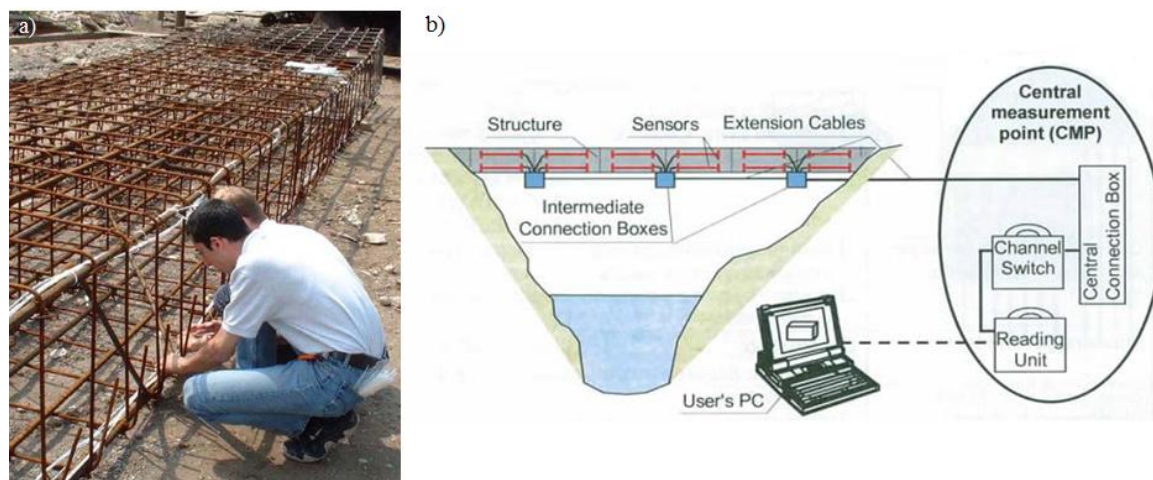


Figura 1 - Montaggio sensori in fibra ottica all'interno di un'armatura e schema sistema di controllo per il monitoraggio strutturale di un ponte

Lo sviluppo di tecniche innovative che prevedano l'inglobamento del sensore nella struttura stessa è stato trainato dal sempre maggiore impiego di materiali compositi soprattutto in campo aeronautico e dalla conseguente crescente richiesta di sistemi di *health monitoring* [1].

Il ricorso a tecniche sempre più sofisticate per l'individuazione di eventuali fratture e danneggiamenti nelle strutture è diventato sempre più importante e necessario per vari motivi:

- le analisi non distruttive prevedono l'utilizzo di tecnologie che non compromettono negativamente la vita operativa dei componenti;
- la possibilità di avere, anche in tempo reale, informazioni riguardo ai carichi agenti su una struttura;
- la possibilità di passare da procedure di manutenzione programmata a procedure *on condition*, diminuendo i tempi di fermo della macchina in quanto l'intervento avviene solamente quando vi è reale necessità, cioè prima che una rottura si verifichi all'interno dell'apparato meccanico;
- è molto difficile progettare un componente utilizzando coefficienti di sicurezza che diano la completa certezza circa l'affidabilità e la sicurezza dello stesso;
- la riduzione dei tempi di ispezione della struttura, soprattutto nei punti di difficile accesso.

Lo sviluppo di un sistema di SHM efficiente è un'operazione molto complessa in quanto è necessario tener conto di diversi fattori, che spaziano dalla scelta dei sensori all'individuazione di indicatori significativi della nucleazione e propagazione del danno, dalla progettazione del sistema di elaborazione alla definizione delle procedure di manutenzione. In ogni caso un sistema di SHM deve prevedere i seguenti elementi fondamentali, che consentono un corretto svolgimento dell'attività di monitoraggio e predizione del comportamento della struttura [1]:

- Apparato di monitoraggio: comprende i sensori e la strumentazione necessaria all'acquisizione e alla trasmissione dei dati rilevati dai sensori stessi.

- Sistema di diagnosi: utilizzando le informazioni ricevute dalla rete di sensori, deve essere in grado di determinare la presenza di un danneggiamento della struttura e la sua posizione.
- Sistema di prognosi: effettua previsioni sulla propagazione del danno e sulla vita residua della struttura.

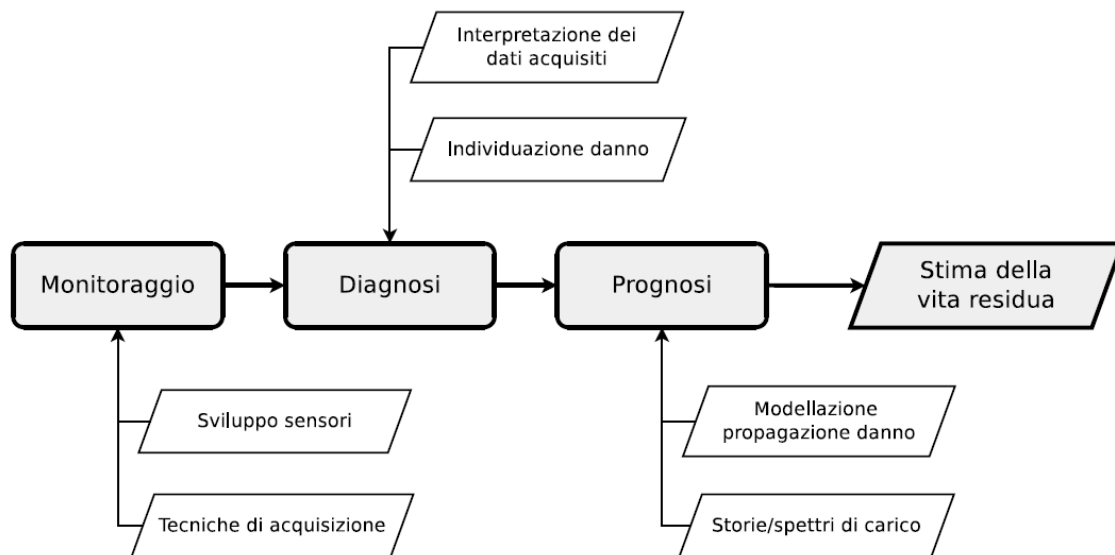


Figura 2 - Funzionamento di un sistema di Structural Health Monitoring

2.1 Monitoraggio

La fase di monitoraggio prevede l'utilizzo di sensori che misurino determinate caratteristiche della struttura che sono influenzate dalla presenza di un danno.

Le tecniche più diffuse si basano su misure di deformazione o sull'analisi della risposta in frequenza della struttura.

2.1.1 Misure di deformazione

Le tecniche di SHM che fanno uso di sensori di deformazione sfruttano il fatto che, in presenza di un danneggiamento, la distribuzione di deformazione subisce delle variazioni, dovute alla redistribuzione dei carichi in prossimità della zona danneggiata.

L'utilizzo di sensori quali gli estensimetri elettrici, trasduttori piezoelettrici o alcuni tipi di sensori in fibra ottica permette un monitoraggio di tipo puntuale, rendendo necessario un loro corretto posizionamento nei punti più sensibili al danneggiamento. Tali punti, che vengono definiti *hot spots*, si trovano principalmente nelle zone in cui sono presenti delle concentrazioni di sforzo, ad esempio in presenza di brusche variazioni di sezione o di giunzioni.

Nel caso in cui sia necessario monitorare delle zone molto ampie, ad esempio per identificare il carico agente sulla struttura, si ottengono buoni risultati con l'adozione di sistemi costituiti da sensori a fibra ottica. Questi sono particolarmente adatti ad applicazioni di questo tipo, poiché attraverso tecniche di multiplexing è possibile veicolare su di una fibra il segnale proveniente da diversi sensori, rendendo quindi realizzabile il monitoraggio distribuito di porzioni molto ampie della struttura. Sensori di questo tipo, formati cioè da tanti sensori più piccoli iscritti sulla stessa fibra, prendono il nome di array.

Uno degli svantaggi più grandi dell'utilizzo di sensori localizzati per il monitoraggio di grosse strutture riguarda il loro posizionamento. È infatti molto difficile identificare correttamente i punti più sensibili alla nucleazione di un danno, e allo stesso tempo risulta impraticabile inserire un numero di sensori tale da coprire l'intera struttura.

Questa strada, oltre ad avere costi elevatissimi, risulta essere estremamente invasiva per la struttura ospite. Invasività che, nel caso di sensori inglobati nella struttura, si traduce in un notevole degrado delle caratteristiche meccaniche della struttura stessa. Il problema dell'interazione tra struttura e sensori è un fattore da tenere in conto anche nell'utilizzo di tecniche di *distributed sensing*, soprattutto in vista del fatto che i sensori utilizzati raggiungono lunghezze dell'ordine dei metri.

2.1.2 Risposta alle vibrazioni

I sistemi SHM appartenenti a questa categoria misurano delle variazioni nella risposta dinamica della struttura per identificare un eventuale danno. Dalla misura delle vibrazioni di una struttura si può ricavare la sua caratteristica dinamica. I modi normali e le frequenze proprie di vibrazione costituiscono la risposta della struttura alle sollecitazioni e una variazione di questi parametri indica la presenza di una modifica della struttura.

Esistono diversi metodi per il monitoraggio attraverso le vibrazioni, che vengono divisi in due categorie principali: sistemi attivi e passivi.

I sistemi passivi non prevedono l'eccitazione della struttura, ma si basano sull'emissione di onde generate in caso di rottura o di delaminazione che si propagano all'interno della struttura stessa. Tali onde permettono di valutare entità e posizione del danno che le ha provocate.

I sistemi attivi prevedono invece l'utilizzo di sistemi di eccitazione periodica della struttura, come gli attuatori piezoelettrici, e di accelerometri in grado di rilevare la risposta della struttura a questa sollecitazione. In caso di danneggiamento, la risposta in frequenza della struttura varia, ed è quindi possibile risalire ad entità e posizione del danneggiamento. Un'altra tecnica di monitoraggio attivo prevede invece lo studio della propagazione nella struttura di onde emesse da una sorgente. Le onde infatti si propagano in modo diverso a seconda che la struttura sia danneggiata o meno, permettendo quindi la determinazione dello stato di salute della struttura.

Il grande vantaggio di questi sistemi è che permettono il monitoraggio di porzioni molto estese della struttura, in quanto un danneggiamento posizionato in un punto qualsiasi della struttura ne modifica il comportamento a livello globale.

Sistemi di questo tipo presentano tuttavia notevoli problemi, come ad esempio la difficoltà di eccitare in modo opportuno tutta la struttura e di correlare la risposta in frequenza con la posizione del danno.

2.1.3 SHM mediante sensori a fibra ottica

La grande versatilità dei sensori a fibra ottica, così come la loro bassa invasività e facilità di installazione hanno fatto sì che negli ultimi anni ci sia stato un crescente interesse verso questo tipo di sensori.

La possibilità di misurare diverse grandezze, l'alta sensibilità, l'insensibilità alle interferenze elettromagnetiche e la bassa invasività rendono questi sensori adatti ad una grande varietà di applicazioni. In particolare le dimensioni contenute e il basso peso dei sensori rendono le fibre ottiche i candidati ideali all'inglobamento nei laminati in composito per applicazioni di *health monitoring*.

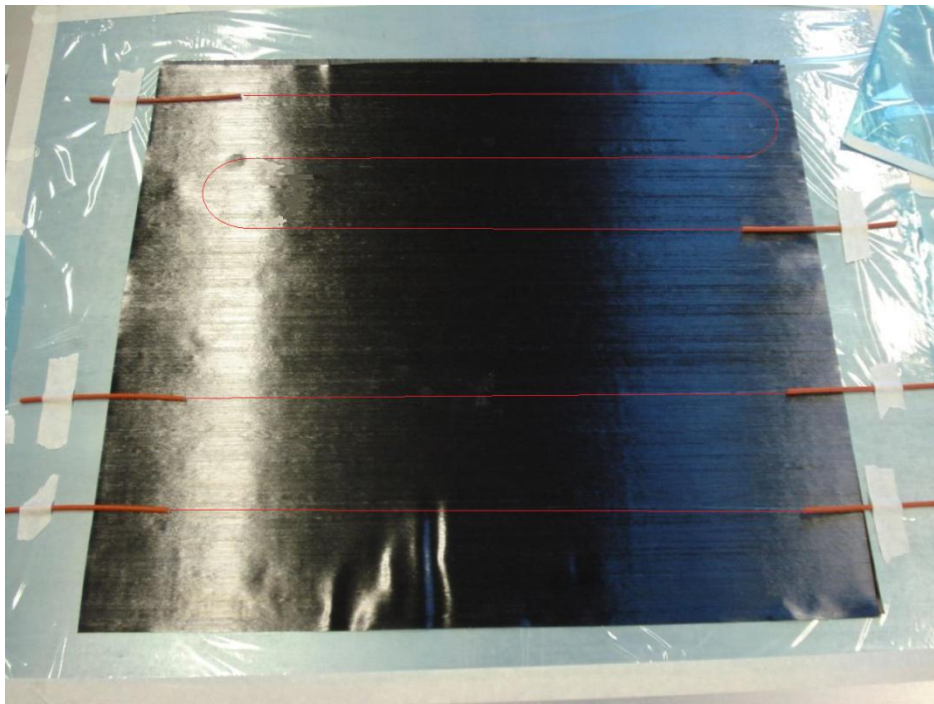


Figura 3 - Esempio di sensori a fibra ottica inglobati in un laminato

L'inglobamento nella struttura stessa offre numerosi vantaggi, primo tra tutti la possibilità di monitorare la struttura direttamente dall'interno, oppure in punti altrimenti non accessibili durante il normale utilizzo. La struttura

ospite, inoltre, protegge il sensore dagli agenti esterni, riducendo le probabilità di malfunzionamento del sistema di misura.

Un altro importante vantaggio derivante dall'inglobamento dei sensori è la possibilità di implementare sistemi di monitoraggio *from the cradle to the grave*, che prevedono il monitoraggio del pezzo a partire dalle prime fasi di produzione fino alla fine della sua vita operativa. Questa tecnica permette di controllare e ottimizzare i processi produttivi, valutando la nascita di sforzi residui o di danneggiamenti.

Pur tuttavia, l'inglobamento dei sensori porta con se alcuni svantaggi, relativamente all'invasività e alle problematiche tecnologiche connesse alla loro corretta installazione. L'inglobamento di una rete di sensori potrebbe infatti influenzare la vita a fatica della struttura, dal momento che ogni fibra inglobata provoca una discontinuità nel materiale, e una conseguente concentrazione di sforzo.

Un altro svantaggio dell'inglobamento è relativo alla riparabilità del sistema di misura. Un sensore inglobato diventa infatti inaccessibile, e una sua rottura comporta la sostituzione del componente che lo ospita.

2.1.3.1 Reti di sensori e sensori localizzati

Un'importante caratteristica dei sensori a fibra ottica è data dalla possibilità di realizzare delle reti di sensori per il monitoraggio distribuito della struttura. Facendo uso di tecniche di multiplexing è infatti possibile avere più sensori sulla stessa fibra, costruendo, di fatto, sensori quasi distribuiti aventi lunghezze dell'ordine dei metri. Il prerequisito è che i sensori abbiano differenti lunghezze d'onda di Bragg caratteristiche in modo che sia garantita una distanza di sicurezza tra i picchi delle lunghezze d'onda dei vari sensori per permettere all'interrogatore di analizzare le riflessioni in sequenza [8].

Gli array permettono quindi di monitorare porzioni molto estese della struttura, e, noto il campo di deformazione su di essa, di identificare eventuali danneggiamenti o di risalire ai carichi applicati.

In molti casi, tuttavia, la risoluzione spaziale dei sensori distribuiti non è sufficiente a individuare danneggiamenti localizzati di piccole dimensioni, quali a esempio le delaminazioni dovute all'impatto di piccoli oggetti.

D'altra parte esistono anche sensori in grado di dare indicazioni molto precise sull'andamento delle deformazioni sulla lunghezza del sensore stesso, con una risoluzione dell'ordine dei millimetri. Se correttamente collocati, tali sensori possono rilevare la nascita e l'evoluzione del danneggiamento in maniera molto precisa. Il problema sta però nel riuscire a individuare le zone in cui è più probabile la generazione di un danno.

I due tipi di misura, localizzata o distribuita, presentano anche differenze dal punto di vista dell'acquisizione. Misurazioni con sensori in grado di arrivare a risoluzioni dell'ordine dei millimetri richiedono infatti sistemi di acquisizione molto complessi e delicati che non permettono frequenze di acquisizione elevate. Al contrario, se non è richiesta una grande risoluzione spaziale possono essere utilizzate tecniche di acquisizione molto veloci e strumenti più compatti e resistenti. Queste peculiarità rendono i sensori del secondo tipo particolarmente adatti ad applicazioni *real time*, irrealizzabili invece per sensori appartenenti alla prima categoria.

La progettazione di un sistema di SHM completo deve quindi tenere in conto tutti questi aspetti, in modo da sfruttare appieno i vantaggi offerti da ciascuna tecnica e da ciascun tipo di sensore. Una strada promettente prevede l'integrazione di entrambi i tipi di sensori all'interno dello stesso sistema di misura, ma con finalità diverse. I sensori distribuiti, grazie all'applicabilità di tecniche di interrogazione rapida, vengono utilizzati per la determinazione in tempo reale del carico agente sulla struttura. Al contrario i sensori ad alta risoluzione vengono posti in corrispondenza di zone critiche, quali gli incollaggi, in previsione però di un'acquisizione molto meno frequente, ad esempio in occasione delle manutenzioni programmate.

Approcci che prevedano l'integrazione delle misure provenienti da diversi tipi di sensore e l'utilizzo di tecniche di analisi complesse dei dati misurati hanno già mostrato risultati incoraggianti riguardo all'applicabilità di tecniche di SHM mediante sensori a fibra ottica alle strutture aeronautiche in composito [20].

2.2 Diagnosi

Il compito del sistema di diagnosi è l'elaborazione dei dati letti dal sistema di misura al fine di determinare con la maggiore precisione possibile posizione ed entità del danno. Il problema principale della fase di diagnosi risiede nello stabilire una correlazione tra la grandezza misurata e il danneggiamento. Tale correlazione è tutt'altro che banale e richiede lo sviluppo di strumenti di analisi molto complessi, che prevedono modelli numerici della struttura e della rete di sensori.

Al fine di implementare un efficiente sistema di ricostruzione è necessario, in generale, affrontare due problemi di diversa natura:

- il problema Diretto, che riguarda la modellazione della risposta di un sensore ad una sollecitazione applicata nota;
- il problema Inverso, che permette, nota la risposta del sensore rilevata sperimentalmente, di ricostruire la sollecitazione agente su di esso.

Questi due problemi vengono risolti in modi totalmente diversi ed indipendenti.

La risoluzione del problema diretto è strettamente correlata al tipo di sensore utilizzato e alla precisione richiesta alla sua simulazione. La sua soluzione consiste nel determinare la risposta della struttura ad una sollecitazione nota in termini di spostamento, velocità e accelerazione dei gradi di libertà, essendo noti i parametri di rigidità, smorzamento e massa.

Il problema inverso ha invece una natura più generale e tipicamente si basa su degli algoritmi di ottimizzazione che prevedono la minimizzazione di una

funzione costo rappresentativa della differenza tra segnale simulato e segnale sperimentale. Così facendo si ottiene la combinazione di variabili di ottimizzazione per cui segnale misurato e segnale simulato coincidono. Le variabili di ottimizzazione possono essere direttamente le deformazioni agenti sul sensore oppure dei parametri rappresentativi del danneggiamento della struttura.

Tecniche che prevedono modelli numerici complessi non si prestano però ad un monitoraggio in tempo reale dello stato di una struttura. A tale scopo è necessario sviluppare modelli molto semplificati che prescindano da una interpretazione fisica del problema ma si limitino ad un'analisi numerica qualitativa dei dati acquisiti.

2.3 Prognosi

La fase di prognosi prevede l'utilizzo delle informazioni relative al danneggiamento e alla sua evoluzione per effettuare una stima della vita residua della struttura. Per le strutture metalliche, questi dati consentono di poter effettuare, con buona precisione, una valutazione sull'evoluzione del danno e sulla vita residua della struttura in modo tale da poter programmare un'adeguata manutenzione. Questa conoscenza non è stata ancora acquisita nel campo dei materiali compositi. Strutture realizzate con tali materiali sono progettate sull'ipotesi che qualsiasi danno, non direttamente visibile, non debba propagarsi con i normali carichi operativi.

La capacità di prognosi per un sistema di SHM è essenziale e costituisce il livello più alto di tali sistemi. La prognosi di un sistema di SHM richiede la conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati, tra cui tenacità, rigidità, resistenza a fatica e alla frattura. Sono inoltre necessarie informazioni sulle condizioni di carico e sulle condizioni al contorno della struttura. La modellazione dell'evoluzione del danno e della vita residua

richiedono l'utilizzo di strumenti numerici come l'analisi delle deformazioni, modelli per la propagazione della frattura e modelli agli elementi finiti.

Nell'ambito dell'SHM i sistemi di diagnosi godono di un certo grado di universalità mentre i sistemi di prognosi devono essere messi a punto per ogni singola struttura, per ogni singolo componente e condizione operativa e necessitano di modelli numerici molto raffinati.

Attualmente le attività di ricerca sono maggiormente incentrate sullo sviluppo di sistemi di diagnosi, data la loro maggiore universalità e possibilità di essere utilizzati per un ampio range di applicazioni, piuttosto che sui metodi di prognosi. Va sottolineato che senza le adeguate capacità di prognosi si può fare un uso limitato delle abilità diagnostiche, dal momento che non possono essere fatte previsioni sulla vita residua della struttura, ma solo valutazioni sullo stato di salute corrente.

I tradizionali sistemi di prognosi per strutture metalliche, come la tolleranza al danno e la previsione della vita a fatica, si basano sul fatto che all'interno della struttura siano presenti dei danni, ovvero la prognosi viene effettuata prima della diagnosi. Di conseguenza, a causa di queste incertezze, i progetti vengono effettuati sovradimensionando le strutture ai fini di sicurezza. La possibilità di rilevare il danneggiamento effettivo attraverso l'uso di "sensori intelligenti" offre nuove possibilità di prognosi: invece di assumere per certa la loro presenza, le caratteristiche effettive del danno possono essere usate per effettuare una previsione accurata e in tempo reale della sua evoluzione. Come per la diagnosi, la prognosi può essere continuamente modificata nel tempo con l'evoluzione del danno.

La combinazione di diagnosi e prognosi attraverso lo SHM possono minimizzare le incertezze associate ai materiali compositi e portare ad un progetto ottimizzato con aumenti quantificabili in termini di sicurezza e affidabilità.

2.4. Materiali compositi

Per materiale composito si intende una combinazione di due o più componenti che contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente superiori, o comunque più idonee all'uso che ci si prefigge, a quelle dei suoi singoli costituenti. Un materiale composito è costituito da:

- il materiale di rinforzo sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle;
- la matrice che, bloccando le fibre, trasferisce loro il carico esterno e le protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio.

I compositi sono materiali eterogenei, anisotropi, leggeri, rigidi e resistenti e trovano un sempre maggiore impiego grazie al loro elevato rapporto tra le proprietà meccaniche e la massa del materiale. Inoltre non sono soggetti a corrosione e hanno una buona resistenza a fatica.

Le loro proprietà sono strettamente legate alle caratteristiche dei singoli materiali componenti, dalla loro forma, dimensione, concentrazione, distribuzione, orientamento, nonché dalla loro mutua interazione.

La resistenza e la rigidezza del materiale composito dipendono in gran parte dal materiale di rinforzo e dall'orientazione delle fibre rispetto ai carichi applicati. Tuttavia il comportamento meccanico non dipende esclusivamente dal materiale di rinforzo, ma anche dalla sinergia tra il rinforzo e la matrice. Ad esempio, quando un fascio di fibre senza matrice è sottoposto a sollecitazione, la rottura di una di esse comporta che lo sforzo venga trasferito alle fibre rimanenti, con conseguente diminuzione della resistenza globale del fascio. Se, invece, le fibre sono immerse in una matrice, la rottura di una fibra non compromette la sua resistenza meccanica in virtù della presenza dell'interfaccia e della deformabilità della matrice che

assicurano il fenomeno del trasferimento di carico. Quando, infatti, le estremità della fibra nel punto di frattura si allontanano, la deformazione elastica o lo scorrimento plastico della matrice esercitano delle forze di taglio che ripartiscono gradualmente la sollecitazione anche sulla fibra fratturata.

I materiali compositi hanno un altro vantaggio rispetto ai materiali convenzionali: la possibilità da parte del produttore di poter soddisfare più in specifico alcune caratteristiche meccaniche e termiche rispetto ad altre grazie all'ampia scelta di fibre, orientazioni, resine, additivi, e processi di lavorazione.

Grazie a queste interessanti caratteristiche l'utilizzo dei materiali compositi ha visto un notevole incremento negli ultimi 40 anni, a partire dalle prime applicazioni su parti non strutturali, fino ad arrivare a moderni velivoli come il Boeing 787, già attivo, oppure l'Airbus A350 di prossima realizzazione, in cui i compositi costituiscono più del 50% in peso della struttura.

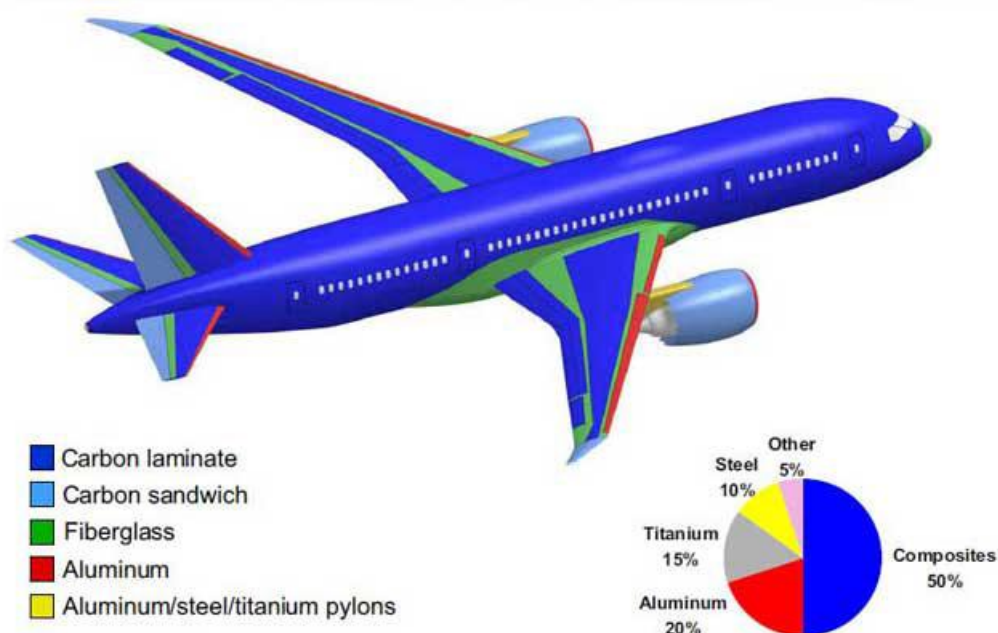


Figura 4 - Materiali utilizzati per la costruzione del Boeing 787

I materiali compositi presentano anche alcuni svantaggi: hanno un comportamento lineare-elastico con rottura fragile in quanto non mostrano

significative deformazioni a snervamento o plastiche. Inoltre sono materiali costosi, non resistono ad alte temperature per via del degrado della matrice, sono suscettibili agli agenti atmosferici e richiedono di particolari accorgimenti nella giunzione con pezzi metallici.

2.4.1 Tipologie di danneggiamento

L'utilizzo di questi materiali innovativi ha inoltre aperto nuovi scenari permettendo la realizzazione di strutture di tipo intelligente, dette *Smart Structures*, ma ha anche introdotto nuove problematiche da affrontare tra cui le peculiari modalità di danneggiamento del materiale.

Nonostante il comportamento dei materiali compositi in campo lineare sia compreso piuttosto bene, non esistono modelli affidabili per la propagazione del danno. Tale mancanza è dovuta alla complessità di questo tipo di materiali che, a differenza dei materiali metallici, presentano diverse modalità di nucleazione e propagazione del danno. Tipicamente si può affermare che esistano 4 tipologie di danneggiamento ben riconoscibili e distinguibili nei materiali compositi: la rottura delle fibre a trazione e compressione, il danneggiamento progressivo della matrice (*transverse matrix cracking*), il danneggiamento dell'interfaccia fibra-matrice (*interfacial debonding*) e i fenomeni di delaminazione. I primi tre meccanismi si riferiscono a danni di tipo intralaminare, che avvengono all'interno dello spessore della lamina e sono promossi dalle componenti di sforzo agenti nel piano delle lamine stesse. L'ultimo tipo di danneggiamento è invece interlaminare ed è originato dalle componenti di sforzo fuori dal piano.

I meccanismi di danno possono evolvere in modo indipendente o possono interagire tra di loro. La predominanza di una tipologia di danno rispetto ad un'altra dipende molto dalle caratteristiche del materiale e dalle sequenze di laminazione.

Le fratture per delaminazione possono avvenire secondo tre modalità di base, illustrate in figura 5, o secondo una loro combinazione.

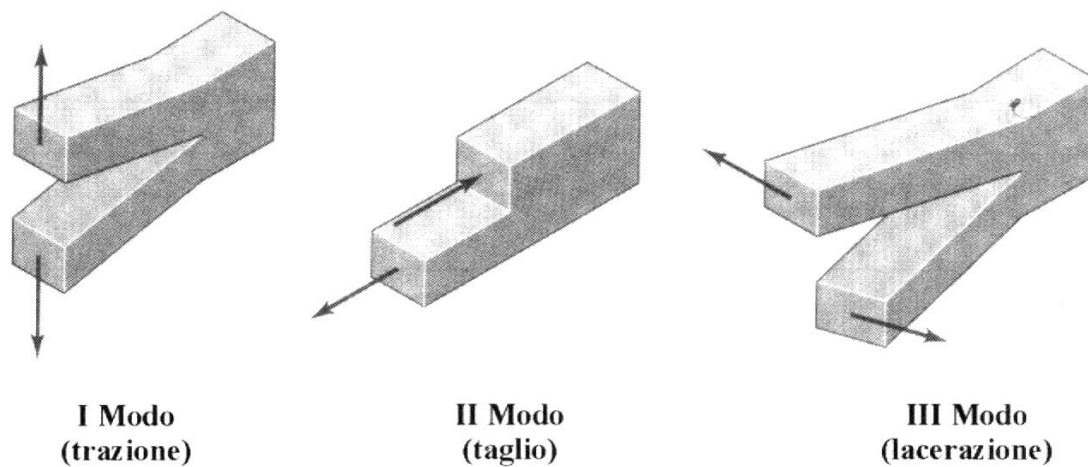


Figura 5 - Modalità di delaminazione

Le delaminazioni in modo II e III sono promosse dagli sforzi di taglio interlaminare, mentre le delaminazioni in modo I sono innescate dagli sforzi normali interlaminari.

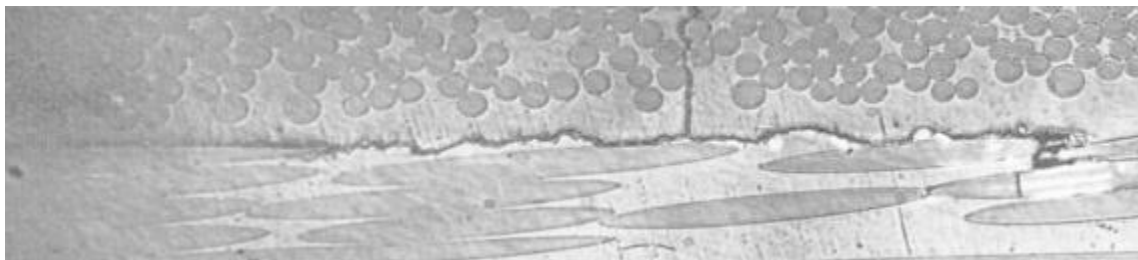


Figura 6 - Esempio di delaminazione innescata da una frattura trasversale nella matrice in un laminato in composito

2.4.2 Tolleranza al danno

Le varie tipologie di danno che si possono presentare in un composito sono difficilmente individuabili, dal momento che possono crearsi anche all'interno della struttura, rendendo necessario il ricorso a tecniche di controllo non distruttive, che tuttavia non sono sempre applicabili per motivi di accessibilità, e richiedono inoltre strumenti sofisticati.

Per evitare il verificarsi di questo tipo di problema, mantenendo allo stesso tempo un'adeguata efficienza della struttura, negli anni si è avuta un'evoluzione dei criteri di progetto per le strutture in composito, partendo

da criteri di tipo *Safe Life*, passando a quelli *Fail Safe* per arrivare infine a quelli di tipo *Damage Tolerant*.

La progettazione di tipo *Safe Life* prevede che la struttura resista per tutta la sua vita operativa senza rompersi. Questa filosofia di progetto viene applicata a componenti critici difficili da riparare perché non raggiungibili o non facilmente sostituibili. Questo obiettivo viene raggiunto applicando ampi margini di sicurezza, e comportano quindi una scarsa efficienza in termini di peso.

Una progettazione di tipo *Fail Safe* prevede che la struttura sia ridondante, ovvero costituita da più componenti in parallelo in maniera tale che, nel caso uno di questi venga danneggiato, il carico venga ridistribuito sugli altri, evitando il collasso della struttura. Strutture di questo tipo sono solitamente iperstatiche, e permettono di ottenere componenti più esili e leggeri rispetto agli equivalenti *Safe Life*. D'altra parte la struttura si complica, dal momento che bisogna prevedere più percorsi di carico alternativi in fase di progetto.

La progettazione secondo l'approccio *Damage Tolerant* prevede invece che il componente possa presentare, già in fase di produzione, dei difetti, e che si possa danneggiare durante la sua vita operativa, a patto che le sue caratteristiche meccaniche non degradino a tal punto da pregiudicare la sicurezza della struttura. Affinché un approccio di questo tipo sia attuabile praticamente, è necessario disporre di strumenti, numerici e analitici, in grado di prevedere la nucleazione e la propagazione del danno. Questi strumenti vanno affiancati a sistemi di monitoraggio dello stato di salute del pezzo, che permettano di individuare un danno in tempo reale oppure in occasione delle manutenzioni programmate.

Per il progetto di strutture in composito, un approccio *Damage Tolerant* non è ancora completamente applicabile, dal momento che non sono ancora disponibili strumenti di tipo predittivo sufficientemente affidabili.

La realizzazione di questi modelli risulta infatti estremamente difficile, a causa della particolare struttura del materiale. Una delle difficoltà principali deriva dalle diverse scale di osservazione e dalla possibilità di descrizione dei fenomeni di danneggiamento: possono essere utilizzate micro, meso e macroscale. La prima scala riguarda i dettagli della struttura eterogenea dei compositi: la singola fibra, l'interfaccia matrice-fibra, e così via. La terza è rilevante per l'analisi strutturale dell'intero laminato. La seconda è una scala intermedia che in un laminato può essere identificata come la scala di un singolo strato o l'interfaccia tra due plies. La scelta della scala di osservazione è strettamente legata al tipo di danno e, più in generale, ai meccanismi dissipativi che il modello proposto dovrebbe essere in grado di descrivere. L'utilizzo di modelli numerici in microscala è molto difficile se non impossibile per via delle grandi variabilità e incertezze legate sia al materiale che al processo tecnologico usato.

A causa dei costi computazionali, della mancanza di dati sperimentali completi e delle difficoltà legate alla descrizione dei processi di danneggiamento, è necessario ricorrere a modelli molto approssimati per descrivere il comportamento dei materiali compositi [22].

Viste queste difficoltà nella comprensione del danneggiamento dei materiali compositi e nella sua modellazione a fine predittivo, lo sviluppo di un sistema di SHM efficiente diventa essenziale per poter implementare una strategia di progetto *Damage Tolerant* anche per le strutture in composito.

3. FBG e sistemi di monitoraggio tramite fibre ottiche

3.1 Le fibre ottiche

Una volta portato a dimensioni micrometriche il vetro perde la sua caratteristica di fragilità e diventa un filo flessibile e robusto. Una fibra ottica si presenta proprio come un sottilissimo filo di materiale trasparente. In genere è realizzata in vetro o silicio fuso e, purché il materiale sia un dielettrico trasparente alla luce, può essere realizzata anche in plastica. La sua funzione è quella di trasportare energia luminosa in modo guidato.

Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche. Esse, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno la luce con perdite estremamente limitate. Vengono comunemente impiegate nelle telecomunicazioni come mezzo trasmissivo di segnali ottici anche su grandi distanze ovvero su rete di trasporto e nella fornitura di accessi di rete a banda larga cablata (dai 100 Mbit/s al Tbit/s).

Sono disponibili sotto forma di cavi, sono flessibili, immuni ai disturbi elettrici e alle condizioni atmosferiche più estreme, e poco sensibili a variazioni di temperatura. L'immunità della fibra ottica ai disturbi elettromagnetici deriva dal fatto che il materiale con cui sono realizzate è dielettrico. Per questo motivo i campi elettromagnetici non possono indurre correnti elettriche in essa e modificare la luce che la attraversa. Questa proprietà impedisce fenomeni di interferenza (diafonia) e non permette di prelevare il segnale dall'esterno (intercettazione).

Hanno un diametro del cladding solitamente di 125 micrometri (circa le dimensioni di un capello) e pesano molto poco: un chilometro di fibra ottica pesa meno di 2 kg, esclusa la guaina che la ricopre.

Le metodologie per produrre fibre ottiche sono la filatura diretta della fibra o da una preforma, che è quello maggiormente utilizzato.

3.1.1 Struttura

Ogni singola fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o core, e un mantello, o cladding, attorno ad esso. Il core presenta un diametro molto piccolo di circa 10 μm per le monomodali e 50 μm per le multimodali, mentre il cladding ha un diametro di circa 125 μm . I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso, il cladding deve avere un indice di rifrazione minore (tipicamente 1,475) rispetto al core (circa 1,5), in questo modo la propagazione del segnale ottico avviene nel nucleo per successive riflessioni sulla superficie di separazione tra core e cladding. Come ulteriore caratteristica il mantello deve avere uno spessore maggiore della lunghezza di smorzamento dell'onda evanescente (onda elettromagnetica piana non uniforme) caratteristica della luce trasmessa in modo da catturare la luce che non viene riflessa nel core. All'esterno della fibra è presente un doppio rivestimento polimerico: un rivestimento primario soffice, il buffer, necessario per evitare fenomeni di corrosione, per protezione da agenti esterni e per irrobustirla meccanicamente e una guaina protettiva, il jacket, che protegge la fibra dagli urti sia durante il processo di fabbricazione che nell'installazione, evita fenomeni di microflessione e porta ad un aumento del coefficiente di attenuazione.

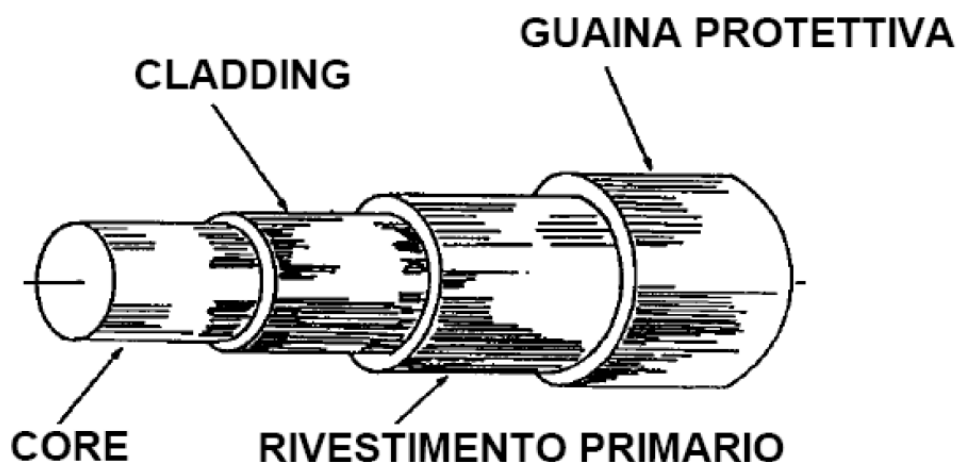


Figura 7 - Schema fibra ottica

La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare. La luce che entra nel core ad un certo angolo (angolo limite) si propaga mediante una serie di riflessioni sulla superficie di separazione tra i due materiali del core e del cladding.

Diversi tipi di fibre si distinguono per diametro del core, indici di rifrazione, caratteristiche del materiale, profilo di transizione dell'indice di rifrazione e drogaggio (aggiunta di piccole quantità di altri materiali per modificare le caratteristiche ottiche).

Il core e il cladding della fibra ottica possono essere realizzati in silice oppure in polimeri plastici:

- La fibra ottica in silice è composta da una singola fibra di vetro realizzata a partire da silice ultrapura, la quale viene ottenuta dalla reazione fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Nel silicio destinato alla produzione del core viene aggiunto del germanio (sotto forma di tetracloruro di germanio) in modo da aumentarne l'indice di rifrazione senza variarne l'attenuazione. Nella silice destinata al cladding, invece, viene aggiunto del boro, allo scopo di ridurre l'indice di rifrazione.

Il principale svantaggio delle fibre ottiche realizzate in silice è la loro fragilità. A causa del diametro estremamente ridotto esse hanno anche una piccola apertura numerica ($NA \approx 0.16$ - parametro che indica il massimo angolo utile per ricevere o emettere luce) e sono difficili da raccordare.

- Le fibre ottiche polimeriche sono costituite da materiale plastico e sono molto più facili da maneggiare rispetto alle fragili fibre in vetro. La dimensione del core è molto più grande (circa 1mm) rispetto alle fibre in silice, quindi garantiscono un'ampia capacità di trasmissione dei dati e un'apertura numerica più elevata con la possibilità di realizzare fibre multimodali. Tuttavia queste fibre presentano lo svantaggio di avere un'attenuazione abbastanza elevata e una scarsa resistenza termica.

3.1.2 Funzionamento

Un raggio luminoso che incide su una superficie di interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione differenti (ovvero diverso rapporto $n = c/v$ tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo), con $n_1 > n_2$, viene in parte riflesso e in parte trasmesso secondo la legge di Snell [8]:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1)$$

dove α è l'angolo di incidenza del raggio rispetto alla normale alla superficie di incidenza e β è l'angolo che il raggio rifratto forma con la stessa normale nel secondo mezzo.

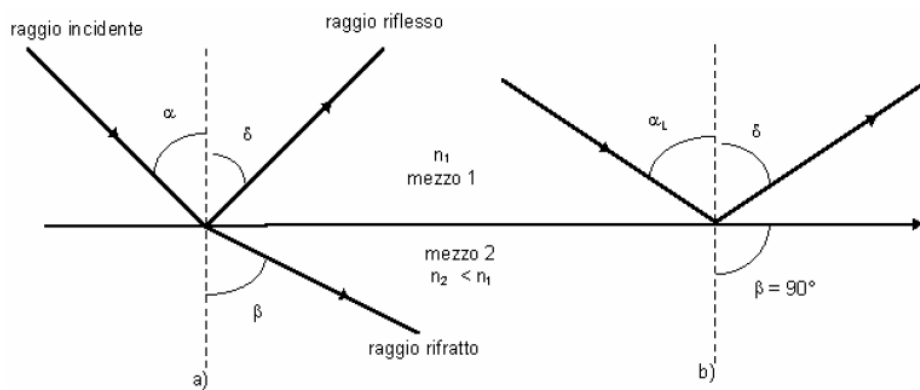


Figura 8 - Schema degli angoli di incidenza e di riflessione

Dato che $n_2 < n_1$, β tende ad aumentare al crescere di α fino a quando si arriva alla condizione in cui si ha $\beta = 90^\circ$ e assenza del raggio rifratto. In quest'ultima situazione si è in presenza del fenomeno di riflessione totale in cui l'angolo di incidenza oltre il quale si ha assenza di rifrazione è $\alpha_C = \arcsin(n_2/n_1)$, noto come angolo critico o limite.

La trasmissione della luce attraverso una fibra è quindi basata sul fenomeno della riflessione totale interna che si presenta quando la luce incide obliquamente sull'interfaccia tra due mezzi di diverso indice di rifrazione, con un angolo più grande dell'angolo critico.

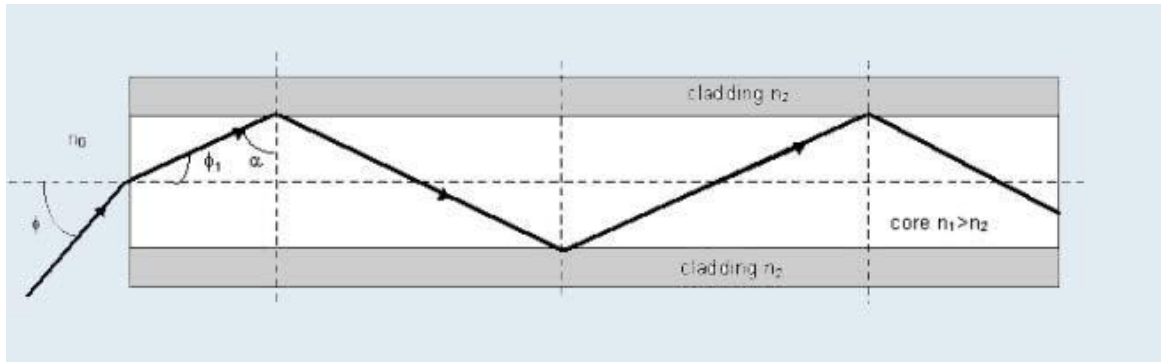


Figura 9 - Riflessione interna alla fibra

Affinché il generico raggio incida sempre, sulla discontinuità tra core e cladding, con angolo superiore al valore critico, è necessario che esso venga introdotto ad una estremità ottica entro un certo angolo di accettazione della fibra (ricavabile utilizzando sempre la legge di Snell):

$$\theta = ((n_2^2 - n_1^2)/n_0^2)^{1/2} \quad (2)$$

dove n_0 è l'indice di rifrazione del mezzo esterno. Un eventuale raggio iniettato nella fibra al di fuori del cono di accettazione, come si può notare dalla figura 10, andrà ad incidere sulla separazione core - cladding con angolo inferiore al valore critico e si disperderà nel mantello a seguito della rifrazione.

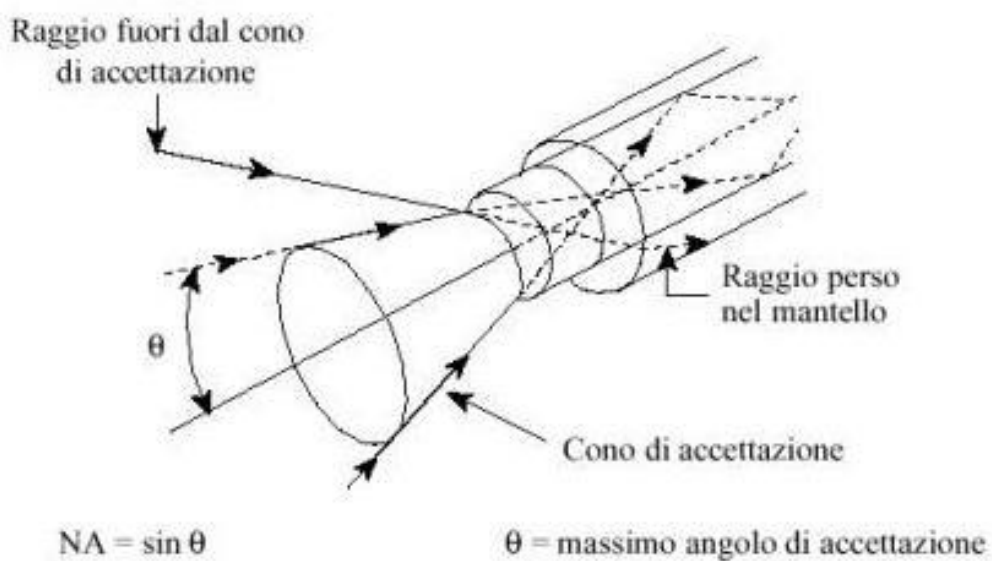


Figura 10 - Angolo di accettazione

3.1.3 Classificazione

Le fibre ottiche si possono classificare in:

- Monomodali

Le fibre monomodali con profilo d'indice di rifrazione a gradino presentano un profilo costante nel core, il cui diametro è molto ridotto (circa 4-10 μm), e decresce bruscamente con un gradino (step) nel cladding dove ancora rimane costante. Il diametro del cladding è in genere di 125 μm . Il termine "monomodale" deriva dal fatto che il raggio all'interno si propaga in un unico modo perché è costretto, dal diametro molto piccolo del core, a propagarsi quasi parallelamente all'asse della fibra.

Le fibre monomodali sono ampiamente utilizzate nelle telecomunicazioni grazie all'elevato tempo di vita, alle minime perdite di potenza ottica e all'assenza di dispersione modale (essendo la trasmissione monomodale).

- Multimodali

Questo tipo di fibre si differenziano dalle precedenti innanzitutto per le maggiori dimensioni: il diametro del core è di 50 μm e quello del cladding è di 125-150 μm . Inoltre il profilo dell'indice di rifrazione può essere a gradino (step-index) o graduale (graded-index).

Nelle fibre step-index l'indice di rifrazione è costante in tutto il core e decresce bruscamente nel cladding. In esse si manifesta notevolmente la dispersione modale per cui non trovano applicazione nelle telecomunicazioni. Infatti, raggi luminosi aventi la stessa lunghezza d'onda ma immessi nella fibra con diverso angolo d'incidenza (inferiore all'angolo di accettazione), si propagano con la medesima velocità all'interno della fibra ma attraverso percorsi a zig-zag di diversa lunghezza. Pertanto essi giungono a destinazione in tempi

diversi producendo un allargamento temporale dell'impulso luminoso trasmesso.

Nelle fibre graded-index, l'indice di rifrazione decresce gradualmente dal centro del core fino alla regione di separazione tra core e cladding. Il vantaggio di queste fibre è che i raggi che si avvicinano al cladding attraversano un mezzo che presenta un indice di rifrazione via via decrescente con una velocità più alta rispetto ai raggi che compiono un percorso più breve come, ad esempio, quelli orizzontali all'asse della fibra. In questo modo tutti i raggi dell'impulso di luce giungono quasi contemporaneamente limitando, così, la dispersione modale.

Il numero di modi di propagazione N_m per una fibra multimodale si può valutare con la seguente formula approssimata valida per $N_m \gg 1$ [7]:

$$N_m = 0,5 \cdot (\pi \cdot d \cdot NA/\lambda)^2 \quad (3)$$

dove d è il diametro del core, λ è la lunghezza d'onda della radiazione utilizzata e NA è l'apertura numerica della fibra.

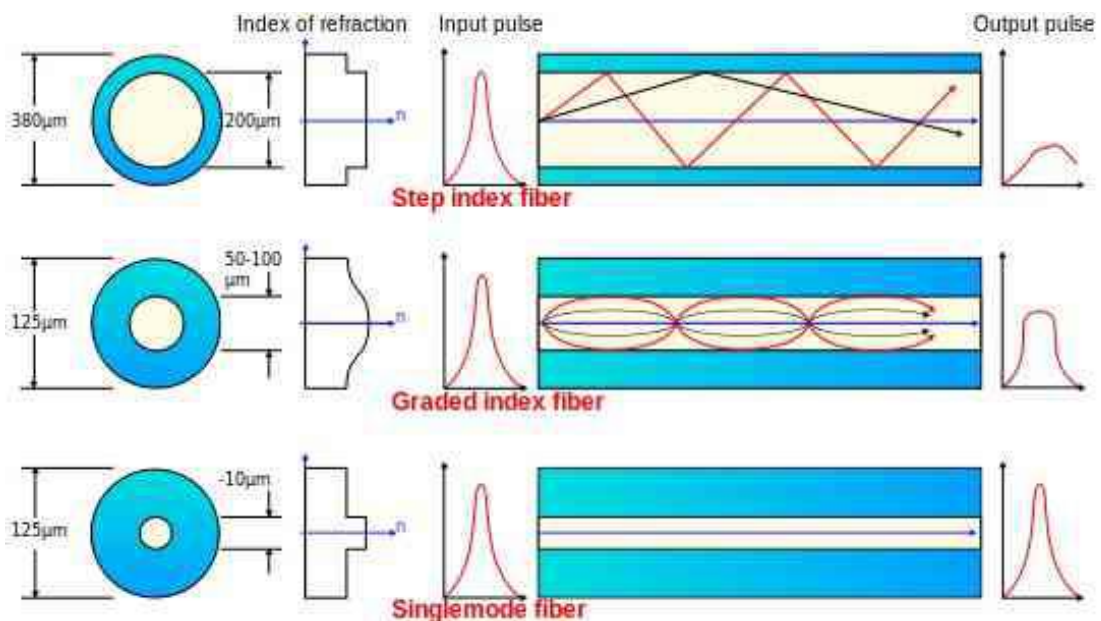


Figura 11 - Confronto tra fibre ottiche multimodali e monomodali

3.1.4 Problematiche relative alle fibre ottiche

Idealmente le fibre ottiche sono un mezzo di trasmissione perfetto. Infatti oltre a non risentire in nessun modo di disturbi elettromagnetici o di diafonia, se adeguatamente strutturate per garantire la riflessione totale del segnale d'ingresso, permettono di trasferire completamente la potenza in ingresso all'uscita con velocità di trasmissione molto elevata, ossia hanno distorsione e attenuazione molto basse.

Le perdite causate dalle fibre ottiche si possono classificare in quelle che deformano il segnale d'ingresso, causando dispersione, e in quelle che ne riducono la potenza, cioè che ne determinano l'attenuazione. Lo studio delle caratteristiche delle fibre ottiche è molto importante perché determina la capacità di trasmissione. Di seguito vengono descritte le problematiche che si possono riscontrare.

3.1.4.1 Attenuazione

Il rapporto tra la potenza ottica trasmessa e quella ricevuta, dopo una lunghezza di fibra di riferimento, definisce l'attenuazione della fibra stessa, che è una funzione della lunghezza d'onda, del tipo di fibra e delle eventuali sollecitazioni meccaniche che agiscono sulla fibra stessa. Le perdite per attenuazione possono essere raggruppate in due categorie:

- perdite dovute alla realizzazione tecnologica;
- perdite dovute all'interconnessione tra fibre ottiche.

In entrambi i casi si può fare un'ulteriore classificazione sulla base delle cause di attenuazione e distinguere quindi le cause di tipo intrinseco (non eliminabili) che dipendono dalle caratteristiche delle fibre e di tipo estrinseco (non eliminabili, ma migliorabili) che sono invece da ricondursi alla presenza di impurezze e possono essere ridotte affinando il processo produttivo. Questa classificazione è riportata nella tabella seguente:

Perdite dovute alla realizzazione tecnologica	Perdite dovute all'interconnessione tra fibre ottiche
Perdite intrinseche: <ul style="list-style-type: none"> • diffusione (Scattering Rayleing) • assorbimento 	Perdite intrinseche: <ul style="list-style-type: none"> • errori di dissasamento • errori di separazione • disallineamento angolare
Perdite estrinseche: <ul style="list-style-type: none"> • irradiazione • curvatura 	Perdite estrinseche: <ul style="list-style-type: none"> • differenza tra indici di rifrazione • differenza di NA • differenza tra i diametri del core

Tabella 1 - Perdite per attenuazione

L'attenuazione di una fibra viene in genere misurata con l'utilizzo del cosiddetto coefficiente di attenuazione ricavabile dalla seguente formula:

$$dB = 10\log_{10}(P_0/P) \quad (4)$$

dove P_0 è la potenza ottica immessa e P è la potenza ottica ricevuta.

Perdite per diffusione

E' un fenomeno di propagazione casuale del raggio luminoso a causa della disomogeneità della struttura che costituisce la fibra. Tali disomogeneità sono dovute a:

- anisotropia di polarizzazione
- fluttuazioni di densità del mezzo
- piccole irregolarità del mezzo ($\approx 0,1 * \lambda$)
- presenza di impurezze

Poiché i raggi diffusi presentano angoli diversi da quelli che garantiscono la riflessione totale nella fibra, escono dal core e si disperdono nel cladding.

In questo modo vengono causate perdite di energia sia verso il cladding sia verso la sorgente. Tali perdite non si possono eliminare, perché dipendono dal trattamento subito dal materiale durante la fase di lavorazione.

Assorbimento

L'assorbimento è un fenomeno dovuto fondamentalmente alla presenza di impurità nei materiali della fibra (ioni metallici di Fe ,Co ,Ni ,Cu ,Cr ,etc.) e ioni di acqua OH^- .

Questo fenomeno consiste nell'assorbimento totale o parziale dell'energia luminosa a livello molecolare da parte delle impurezze presenti nella fibra. Nonostante il sofisticato trattamento delle fibre per ottenere un elevato grado di purezza, esiste sempre una presenza residua di alcune sostanze che manifestano maggior assorbimento (picchi) a particolari lunghezze d'onda. Pertanto l'assorbimento risulta funzione della lunghezza d'onda.

Perdite per curvatura delle fibre (microbending)

Le fibre ottiche spesso sono sottoposte a sollecitazioni di tipo direzionale (curvature). Queste sollecitazioni provocano una dispersione del raggio incidente in quanto il corrispondente angolo α supera l'angolo di accettazione e si disperde in parte nel cladding.

Conseguenza di questo fatto è il cosiddetto mescolamento dei modi perché non tutti i raggi hanno angoli di riflessione uguali.

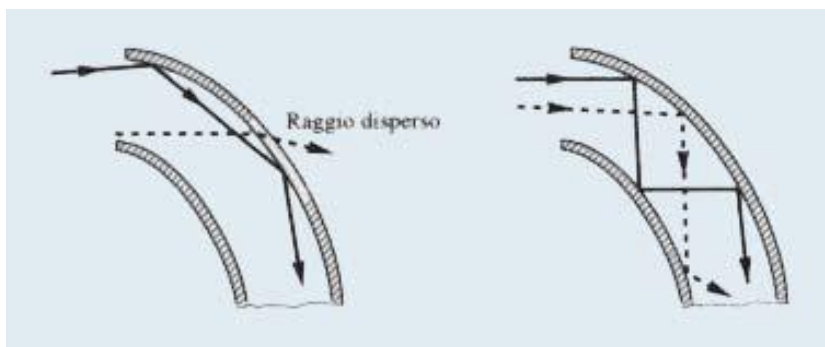


Figura 12 - Dispersione del segnale a causa di curvature eccessive

Perdite dovute all'interconnessione tra fibre

Le perdite delle connessioni tra fibre derivano da diversi fattori. L'interconnessione tra fibre ottiche è una fase molto importante e particolarmente delicata per la realizzazione di un collegamento. Le cause delle perdite sono dovute soprattutto alle diverse caratteristiche trasmissive

delle due fibre ottiche nel punto di connessione. Infatti possono esserci problemi per:

- differenza tra gli indici di rifrazione: determina delle perdite perché il raggio luminoso passando da un mezzo, avente indice di rifrazione n_1 , ad un mezzo avente indice di rifrazione n_2 , viene trasmesso soltanto in parte;
- differenza tra apertura numerica: si hanno perdite quando l'apertura numerica NA della fibra avente l'indice di rifrazione n_1 (relativa al lato sorgente) è maggiore dell'NA della fibra avente indice di rifrazione n_2 (relativa al lato ricevente);
- differenza tra i diametri del core: anche in questo caso si possono distinguere due casi: uno quando l'area della sezione del core della fibra lato sorgente è maggiore di quella del lato ricevente e l'altro in caso contrario.

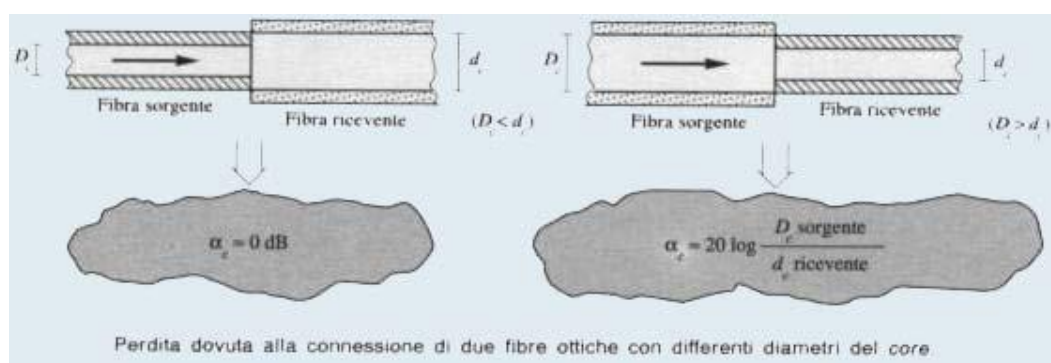


Figura 13 - Perdite dovute a diametri diversi dei core delle fibre interconnesse

- perdite per errori di disassamento o disallineamento assiale: tali perdite sono dovute alla non perfetta coincidenza degli assi del core o dei cavi ottici delle due fibre che si devono connettere.
- perdite per errori di separazione o accostamento: nel tentativo di connettere due fibre ottiche a volte si verifica un imperfetto contatto tra di esse. In altre parole le due fibre sono affacciate, ma non sono a contatto.

- perdite per errori di disallineamento angolare: si verificano nel caso in cui gli assi delle due fibre da connettere formano un angolo θ .

Imperfezioni nella fabbricazione

La perdita di segnale può essere dovuta anche a imperfezioni nella fabbricazione della fibra: particelle di polvere, micro vuoti e fessurazioni. Queste imperfezioni, se hanno dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda interferiscono producendo fenomeni di diffrazione, assorbimento, etc.

3.1.4.2 Dispersione

Vengono ora analizzate le principali cause di dispersione nelle fibre ottiche.

Dispersione modale

Fenomeno dovuto al fatto che il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato, ma secondo un numero finito di modi (derivanti dalla legge di Snell). Vi saranno modi attraverso i quali il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi (il primo caso limite è il modo che percorre la fibra ottica completamente dritto; il secondo caso limite è il raggio che entra nella fibra con angolo uguale all'angolo limite di accettazione, e deve quindi eseguire un numero molto alto di riflessioni). A causa di questo, la forma del segnale originario viene dilatata nel tempo e, se la frequenza è troppo alta, può arrivare a confondersi con l'impulso seguente (interferenza intersimbolica) impedendo di leggere il segnale originario. Per ovviare a questo inconveniente si possono utilizzare fibre multimodali graded-index (nelle quali l'indice di rifrazione varia con continuità dal centro del core fino al cladding) oppure fibre monomodali.

Dispersione cromatica

Fenomeno dovuto al fatto che la luce pura trasmessa in fibra dal trasmettitore non è perfettamente monocromatica ma si compone in realtà di fasci di luce di colore diverso, cioè con frequenze o lunghezza d'onda, e quindi velocità di

attraversamento, diverse. Si ha lo stesso problema visto precedentemente: può capitare che il fascio luminoso più veloce (di colore rosso) si confonda con il fascio luminoso più lento (di colore viola) dell'impulso inviato precedentemente, rendendo impossibile la decodifica del segnale originario. Per risolvere questo problema si utilizzano led monocromatici per trasmettere la luce.

Dispersione di polarizzazione

Fenomeno dovuto ad asimmetrie del core della fibra dovute a stress meccanici o imperfezioni della fibra stessa durante il processo di produzione che causano fenomeni di birifrangenza dell'onda elettromagnetica guidata. Ha caratteristiche tipiche di aleatorietà.

In generale la dispersione aumenta con la distanza dal trasmettitore.

3.2 Reticoli di Bragg in fibra ottica (FBG)

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

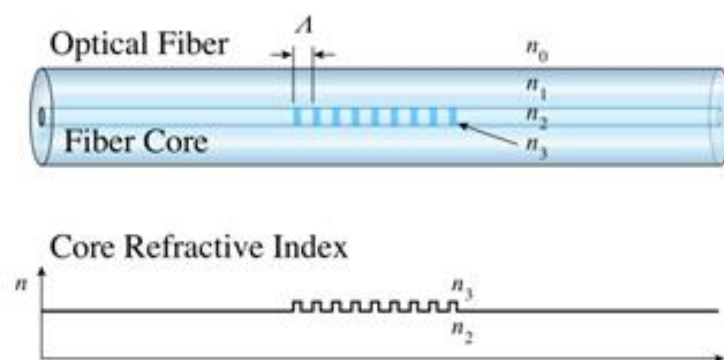


Figura 14 - Struttura FBG

Il tratto di fibra ottica modificato, il cui principio di funzionamento è illustrato in figura 15, si comporta come un filtro selettivo: quando il reticolo è illuminato con una sorgente luminosa a banda larga, dallo spettro della

radiazione trasmessa in uscita dal reticolo sono sottratte le componenti spettrali appartenenti ad una banda centrata su una lunghezza d'onda λ_B , detta lunghezza d'onda di Bragg. Le componenti spettrali eliminate dalla radiazione trasmessa sono riflesse dal reticolo verso la sorgente ripercorrendo la fibra ottica.

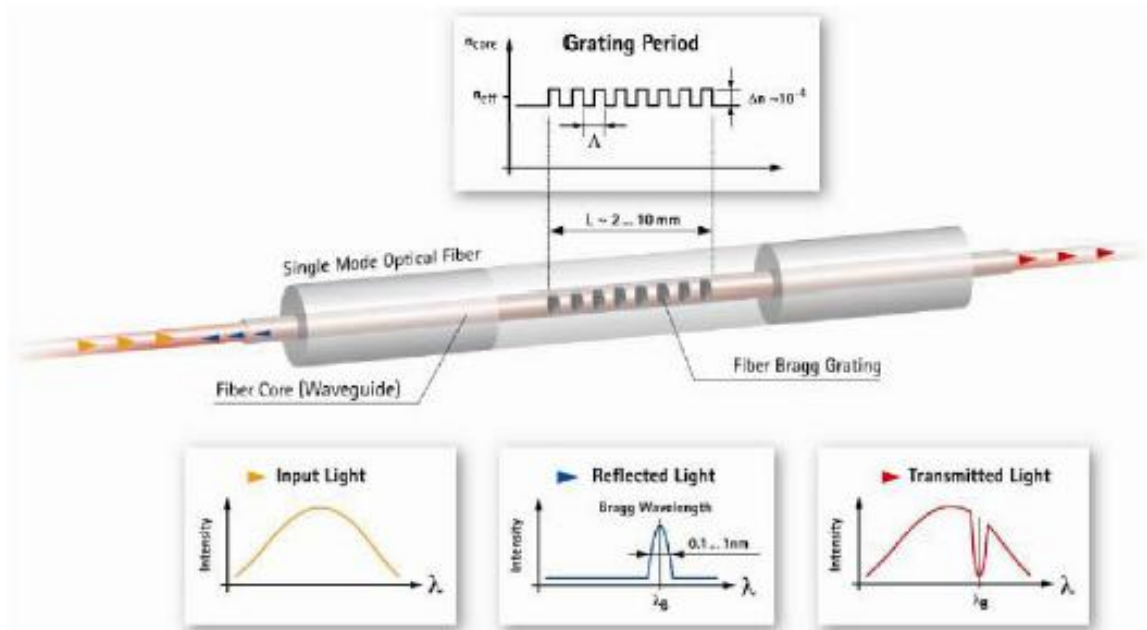


Figura 15 - Principio di funzionamento di un FBG: parte del segnale in ingresso viene riflesso verso la sorgente

In altre parole gli FBG si comportano come specchi dielettrici: riflettono una particolare lunghezza d'onda e trasmettono tutte le altre.

Uno specchio dielettrico è un tipo di specchio composto da sottili strati di materiale dielettrico, tipicamente depositati su un substrato di vetro o altro materiale ottico. Il loro funzionamento è basato sull'interferenza della luce riflessa dai differenti strati dielettrici. Gli specchi più semplici, consistono di una pila di strati ad alto indice di rifrazione intervallati da strati a basso indice di rifrazione.

Tramite una scelta accurata del tipo e dello spessore degli strati dielettrici è possibile progettare un rivestimento ottico avente specifiche riflettività per diverse lunghezze d'onda della luce.

Dunque in riflessione si troverà un segnale ottico a banda stretta centrato sulla λ_B , che vale:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (5)$$

con n_{eff} indice di rifrazione effettivo del nucleo della fibra (definito da $n_{eff} = n_{co} \sin\theta$ dove n_{co} è l'indice di rifrazione del nucleo e θ è l'angolo di incidenza della luce) e Λ periodo delle frange del reticolo. Questa equazione è nota come equazione fondamentale di Bragg.

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

Le lunghezze d'onda di Bragg λ_B sono scelte nel campo delle lunghezze d'onda delle telecomunicazioni fra 1500 nm e 1600 nm, ove è minima l'attenuazione nel silicio. Corrispondentemente, il periodo del reticolo Λ inscritto, che è la distanza spaziale fra due indici di modulazione adiacenti, spazia fra 510 nm e 550 nm.

L'equazione di Bragg implica che la lunghezza d'onda λ_B , subisca una variazione ad ogni alterazione delle proprietà fisiche o meccaniche del reticolo. L'applicazione di una deformazione provocherà ad esempio una variazione del passo del reticolo e dell'indice di rifrazione effettivo attraverso effetti ottici. In modo analogo il reticolo risponderà diversamente se soggetto a modifiche della temperatura.

Per questo motivo i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come sensori per la misura di deformazione e temperatura attraverso la variazione della lunghezza d'onda di Bragg.

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

3.2.1 Struttura del reticolo

La struttura dell'FBG può variare sia nell'indice di rifrazione sia nel periodo del reticolo.

I vari tipi di reticolo che si possono avere sono:

- *uniforme*, se il periodo non varia lungo la fibra;
- *chirped*, se il periodo non è uniforme;
- *tilted*, se la variazione è inclinata rispetto la normale alla fibra;
- *superstructured*, se la variazione d'indice è distribuita in superstrutture lungo la fibra.

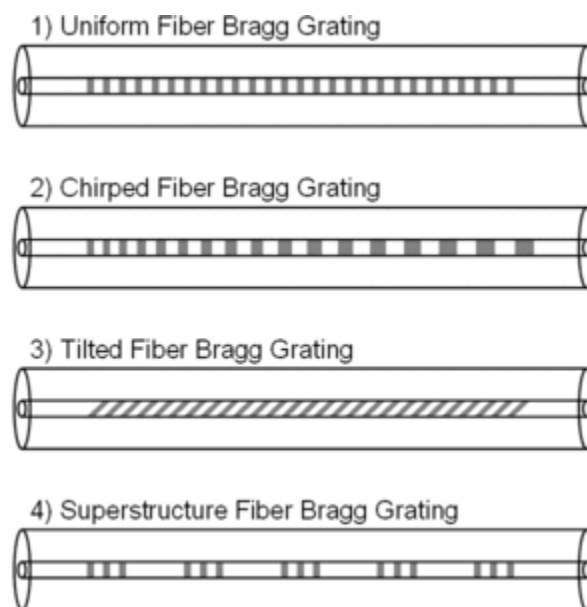


Figura 16 - Classificazione FBG in base alla variazione di periodo: 1) reticolo uniforme; 2) reticolo chirped; 3) reticolo inclinato; 4) reticolo superstructure

La variazione dell'indice di rifrazione può essere:

- *uniforme positiva*, se è costante per ogni periodo, con offset positivo;
- *gaussiana apodized*, se ha una forma longitudinale gaussiana, con offset positivo;
- *raised-cosine-apodized*, se ha una forma longitudinale a coseno rialzato, con offset nullo;
- *discrete phase shift*, se le due metà della struttura sono in opposizione di fase, con offset positivo.

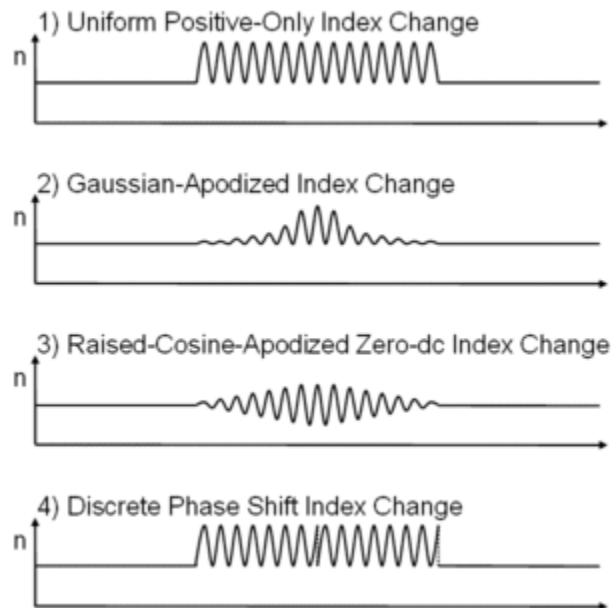


Figura 17 - Classificazione FBG in base alla variazione dell'indice di rifrazione

3.2.2 Fabbricazione

I reticoli di Bragg sono creati inscrivendo una variazione sistematica (periodica o aperiodica) dell'indice di rifrazione nel nucleo di un particolare tipo di fibra ottica utilizzando un laser UV [5][10][11].

Tecniche di fabbricazione avanzate sono essenziali per raggiungere una tecnologia di alta qualità e a basso costo. Una tecnica di costruzione ideale di un FBG dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- Flessibilità: riflettività e lunghezze d'onda centrali dovrebbero essere selezionabili per misure quasi-distribuite;
- Possibilità di produzione di massa economica: se gli FBG potessero essere prodotti ad alte velocità, sarebbero disponibili a basso costo;
- Buone qualità fisiche e ottiche: la resistenza meccanica di un FBG non dovrebbe diminuire dopo la fabbricazione, in relazione alla resistenza di una fibra di buona qualità. Una larghezza di banda ristretta e una piccola perdita di segnale, sono normalmente richieste per ottenere misure ad alta risoluzione;
- Buona ripetibilità: la ripetibilità di lunghezza d'onda centrale e riflettività dell'FBG dovrebbe essere sufficientemente buona, in modo

da rendere gli FBG degli strumenti standard, sotto la condizione di produzione di massa, senza necessità di calibrazione.

I principali processi utilizzati per la realizzazione di FBG sono:

- *Interferenza*: è stato il primo metodo ampiamente utilizzato per la realizzazione di reticoli di Bragg in fibra e utilizza l'interferenza di due fasci. Il laser UV viene suddiviso in due fasci che interferiscono l'un con l'altro creando una distribuzione periodica di intensità lungo il modello. L'indice di rifrazione della fibra fotosensibile varia secondo l'intensità della luce a cui è esposta. Questo metodo consente variazioni rapide e semplici della lunghezza d'onda di Bragg, che è direttamente collegata al periodo di interferenza ed è funzione dell'angolo di incidenza della luce laser. Tuttavia lo svantaggio di questo metodo è che la posizione e la spaziatura tra le frange di interferenza è molto sensibile all'allineamento ottico del sistema. Inoltre, il mantenimento di un adeguato contrasto tra le frange richiede una notevole stabilità meccanica e un buon isolamento dalle vibrazioni.

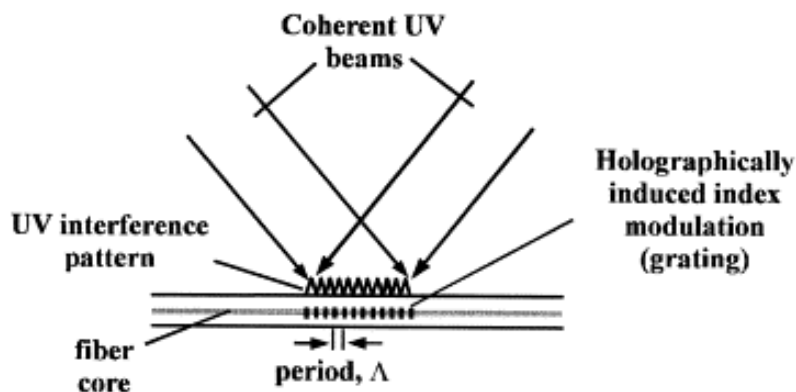


Figura 18 - Scrittura di un FBG per interferenza

- *Mascheratura fotografica*: tramite una mascheratura fotografica, si possono ottenere le caratteristiche del reticolo desiderate. La maschera viene posta tra la sorgente UV e la fibra fotosensibile. L'ombra della maschera fotografica determina così la struttura del reticolo, basata sull'intensità trasmessa dalla luce che raggiunge la fibra. Le maschere

fotografiche sono utilizzate, in modo specifico, per la realizzazione di reticoli di Bragg chirped, che non possono essere fabbricati con il metodo dell'interferenza.

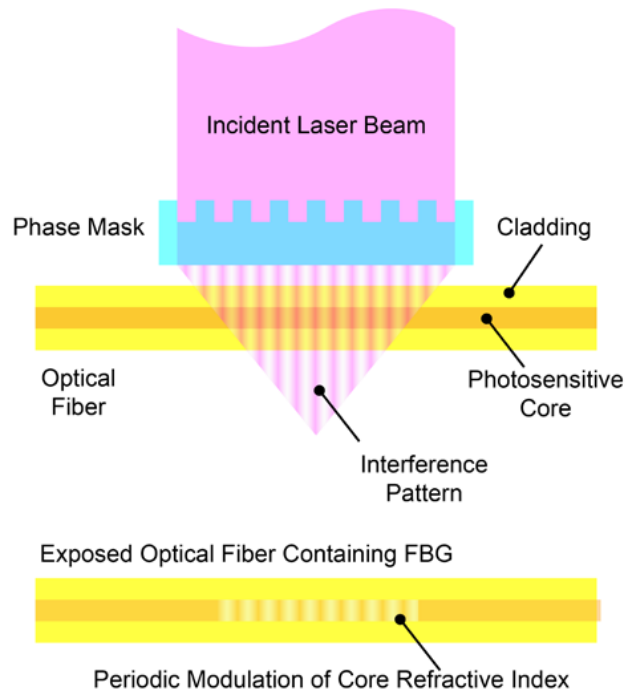


Figura 19 - Scrittura di un FBG mediante mascheratura fotografica

- *Point by point*: un singolo raggio UV viene usato per scrivere un reticolo in una fibra, punto per punto. Il laser ha un fascio ristretto uguale al periodo del reticolo. Questo metodo è applicabile alla fabbricazione di reticoli a lungo periodo e per i reticoli inclinati (tilted).

Il metodo da impiegare dipende dal tipo di reticolo da fabbricare. Normalmente nella fabbricazione di reticoli di Bragg in fibra viene usata una fibra in silice drogata con germanio, in modo che sia fotosensibile. Questo significa che l'indice di rifrazione del nucleo cambia in base all'esposizione alla luce UV. La variazione dipende dall'intensità e dalla durata dell'esposizione e dalla fotosensibilità della fibra. Per scrivere un reticolo di Bragg ad alta riflettività direttamente nella fibra il livello di drogaggio con germanio deve essere elevato. Tuttavia, possono essere utilizzate anche fibre standard se la loro fotosensibilità è aumentata mediante una pre-

impregnazione della fibra in idrogeno. Recentemente, reticoli di Bragg sono stati scritti in anche fibre polimeriche.

Originariamente, la realizzazione di fibre ottiche fotosensibili e la scrittura dei reticoli di Bragg in fibra, venivano svolte separatamente. Attualmente, le linee produttive creano le fibre a partire dalla preforma (vetro di forma opportuna che costituisce la base della fibra) e scrivono il reticolo in una singola fase. In questo modo si riducono tempi e costi necessari e risulta possibile la produzione di massa di reticoli di Bragg. La produzione di massa facilita la loro applicazioni in strutture intelligenti (*Smart Structures*) che utilizzano un grande numero di reticoli di Bragg in fibra, inseriti in una singola fibra.

3.2.3 Tipi di reticolo

Il termine “tipo” è, in questo contesto, riferito al meccanismo fotosensibile con cui le frange del reticolo vengono create nella fibra. I differenti metodi di creazione delle frange del reticolo hanno un effetto significativo sugli attributi che caratterizzeranno il mezzo ottico, in particolare sulla risposta in temperatura.

I tipi di FBG con diversi meccanismi fotosensibili del reticolo sono:

- I *reticoli di Tipo I o Standard* si formano in una fibra standard delle telecomunicazioni (silice con nucleo drogato al germanio) mediante un unico processo di assorbimento di fotoni UV. La radiazione UV interagisce solo coi difetti introdotti dal germanio, detti centri ossigeno-deficienti (germanium oxygen deficiency centers, GODC), in quanto essi possiedono bande di assorbimento attorno ai 244 nm. Lo spettro di riflessione del modo guidato risulta complementare al segnale in trasmissione e ciò indica che questo tipo di reticoli presentano perdite, per assorbimento o per riflessione nel mantello, irrilevanti. Inoltre, mostrano una variazione positiva dell'indice di

rifrazione e un decadimento in riflettività che dipende dalla temperatura.

La fotosensibilità richiesta per la formazione del Tipo I può essere incrementata attraverso un processo chiamato *hydrogen loading* (arricchimento di idrogeno), in cui la fibra ottica è esposta ad idrogeno ad alta pressione a temperatura ambiente. L'idrogeno penetra nella matrice vetrosa fino alla saturazione. In seguito, la radiazione UV porta alla dissociazione dell'idrogeno e alla formazione di difetti Si-OH o Ge-OH, che consentono variazioni d'indice maggiori.

- I *reticoli di Tipo II* sono scritti mediante un processo di ionizzazione multifotonica, per mezzo di un singolo impulso di sorgente laser UV ad una intensità di picco tale da superare la soglia di danneggiamento della silice. Per questo motivo sono detti *damage gratings*. Possono raggiungere una riflettività del 99%. Il Tipo II non presenta perdite per lunghezze d'onda più lunghe di quella di Bragg, mentre, a differenza del Tipo I, le più corte risultano fortemente accoppiate al mantello.

Tali reticoli sono stabili a temperature oltre i 1000 °C per qualche ora. Tuttavia, l'esposizione ad alta potenza produce strutture che soffrono di significanti perdite per scattering e caratterizzate da affidabilità e forza meccanica ridotte.

- I *reticoli Fs-IR* sono indotti da sorgenti laser IR con durata dell'impulso dell'ordine dei femtosecondi e intensità di picco molto elevata. La formazione avviene per mezzo di un processo di assorbimento/ionizzazione multifotonica non lineare che, a seconda dell'intensità dell'esposizione, porta alla compattazione del materiale e/o alla formazione di difetti. Oltre la soglia di intensità di ionizzazione I_{th} , il processo porta a fusione localizzata, compattazione del materiale e formazione di vuoti che causano un cambio d'indice, stabile fino al raggiungimento della temperatura di transizione del

materiale. Le caratteristiche di questa tipologia sono simili a quelle del Tipo II, con una importante differenza. La scarica indotta è rapidamente attenuata, cosicché non si verifichi una propagazione del “danno” oltre la zona irradiata. In tal modo le strutture realizzano una performance spettrale di gran lunga migliore rispetto al Tipo II. Al di sotto di I_{th} il processo porta alla formazione di difetti e alla compattazione di materiale simili al Tipo I.

Il vantaggio dell’approccio Fs-IR è che non è limitato alle fibre in silice fotosensibili. Inoltre la struttura è termicamente stabile fino alla temperatura di transizione del materiale, che nel caso della silice drogata è superiore ai 1000 °C.

- *I reticoli di Tipo In (IIA)* si notano in fibre altamente drogate al germanio non idrogenate. Durante la formazione si osserva che la riflessione inizialmente cresce, come per il Tipo I, poi diminuisce ed è seguita da un ulteriore aumento. Fisicamente, le frange crescono e poi diminuiscono in profondità; successivamente l’esposizione continuata comporta la crescita di un reticolo secondario che mostra uno shift verso il blu nella risposta spettrale, indicando una variazione negativa dell’indice di rifrazione.

In condizioni ottimali, questo tipo di struttura può essere fabbricata in maniera che sia stabile fino a 700 °C.

- *I reticoli Rigenerati.* Dopo la creazione di un reticolo di Tipo I, l’idrogeno che non ha contribuito alla reazione viene fatto fuoriuscire, per evitare formazione termica di idrossili, che diminuirebbero l’ampiezza finale della modulazione dell’indice di rifrazione. Il reticolo è inserito in un forno e si aumenta la temperatura da 20-25 °C ad approssimativamente 1000 °C. L’aumento di temperatura porta al decadimento del reticolo del Tipo I che è di conseguenza cancellato. A

seguito della cancellazione, cresce un nuovo reticolo, che dopo un primo decadimento, si stabilizza. Questo secondo reticolo è l'RFBG. La modulazione finale dell'indice di rifrazione del reticolo rigenerato dipende dal trattamento termico che precede quello a 1000 °C. L'ottimo di temperatura per un trattamento termico intermedio è di 600-700 °C.

3.2.4 Legame foto-termo-elastico

Come detto precedentemente, perturbazioni esterne possono provocare variazioni del periodo del reticolo di Bragg e dell'indice di rifrazione, andando conseguentemente a modificare la lunghezza d'onda di Bragg.

Differenziando l'equazione di Bragg risulta possibile scrivere la variazione di lunghezza d'onda di Bragg come segue [5]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} = \varepsilon_1 + \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} \quad (6)$$

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

Per meglio comprendere la dipendenza della variazione di lunghezza d'onda di Bragg a sollecitazioni meccaniche e termiche è possibile riscrivere l'equazione precedente come somma di tre contributi:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_B^\Lambda + \Delta\lambda_B^T + \Delta\lambda_B^\sigma \quad (7)$$

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

$$\Delta\lambda_B^\Lambda = \lambda_B \cdot \varepsilon_1 = \lambda_B (\varepsilon_1^\alpha + \varepsilon_1^\sigma) = \lambda_B (\alpha \cdot \Delta T + \varepsilon_1^\sigma) \quad (8)$$

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

I rimanenti due termini ($\Delta\lambda_B^T$ e $\Delta\lambda_B^\sigma$) rappresentano la variazione di lunghezza d'onda del reticolo di Bragg dovuta alla modifica dell'indice di rifrazione effettivo a causa di sollecitazioni termiche o meccaniche.

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

$$\Delta n_{eff} = -\frac{n_{eff}^3}{2} \left[p_{12}\varepsilon_1 + (p_{11} + p_{12})\varepsilon_2 - \left(\frac{2}{n_{eff}^3} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \right] \quad (9)$$

dove p_{11} e p_{12} sono i coefficienti di Pockel del tensore opto-elastico [5] e ε_2 è la deformazione del sensore lungo la deformazione radiale della fibra ottica.

I termini $\Delta\lambda_B^T$ e $\Delta\lambda_B^\sigma$ sono esprimibili come:

$$\Delta\lambda_B^T = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \quad (10)$$

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

Sostituendo queste espressioni nell'equazione che descrive la variazione di lunghezza d'onda di Bragg, si ottiene il legame foto-termo-elastico completo (12):

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

Tale relazione può essere semplificata introducendo alcune costanti:

- costante foto-elastica

$$p_e = \frac{n^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \quad (13)$$

- coefficiente termo ottico

$$\zeta = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (14)$$

dove ν rappresenta il coefficiente di Poisson della fibra ottica.

Il legame foto-termo-elastico può essere così riscritto:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e)\varepsilon_1 + \lambda_B (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (15)$$

3.3 FBG chirped

Il reticolo di Bragg chirped presenta una variazione monotona delle sue caratteristiche, ottenuta sia modificando la spaziatura delle singole frange, e quindi variando il periodo del reticolo (chirp), sia modificando l'indice di rifrazione del core.

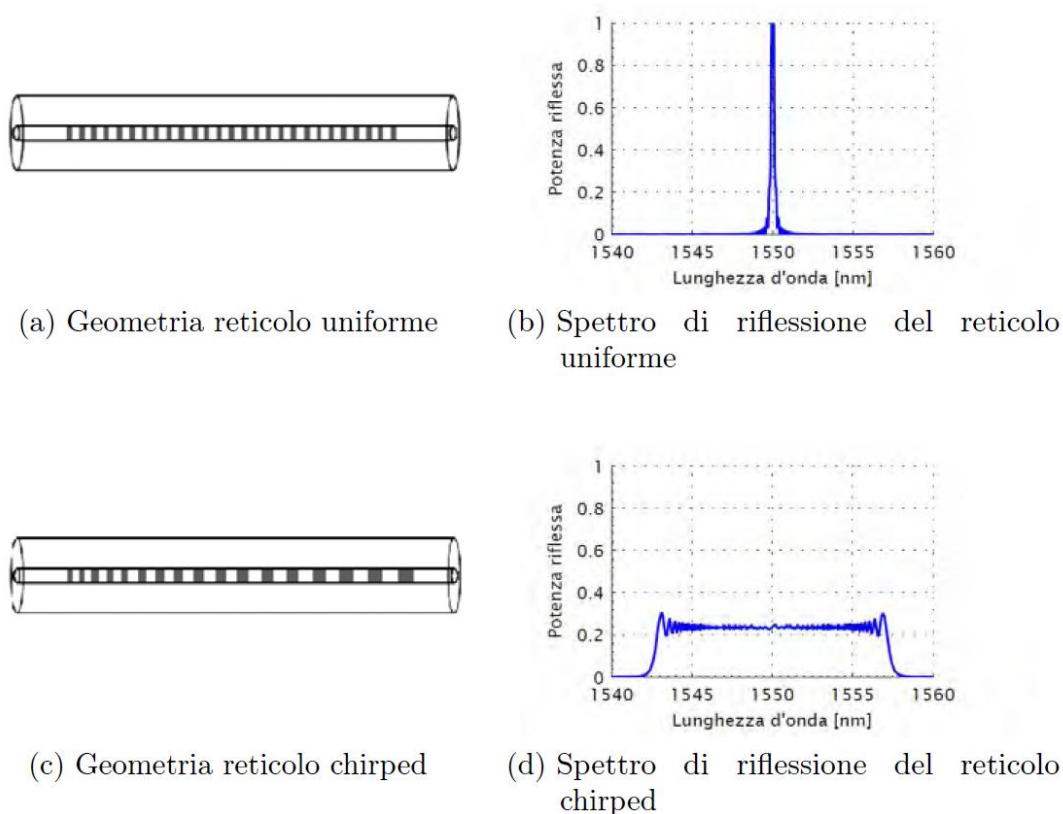


Figura 20 - Confronto tra un reticolo uniforme ed uno chirped [12]

I reticoli chirped danno luogo ad uno spettro allargato, dal momento che ogni frangia, avendo un periodo Λ_i diverso dalle altre, riflette una lunghezza d'onda λ_B differente. Questa caratteristica può essere sfruttata per ricostruire deformazioni con andamento arbitrario, in quanto esiste una relazione tra lunghezza d'onda e posizione sul sensore. Gli FBG chirped permettono di individuare sia fratture che delaminazioni all'interno del materiale.

Se si inserisce un sensore FBG all'interno di un laminato, lo spettro riflesso misurato presenta una valle in corrispondenza della posizione di una frattura. All'aumentare del numero delle fratture, le componenti attorno alla

lunghezza d'onda corrispondente alla posizione della frattura vengono disturbate. Quando la densità di frattura è vicina alla saturazione, lo spettro presenta talmente tante valli da rendere difficile identificare la posizione delle fratture. A tal proposito si veda la figura seguente [13].

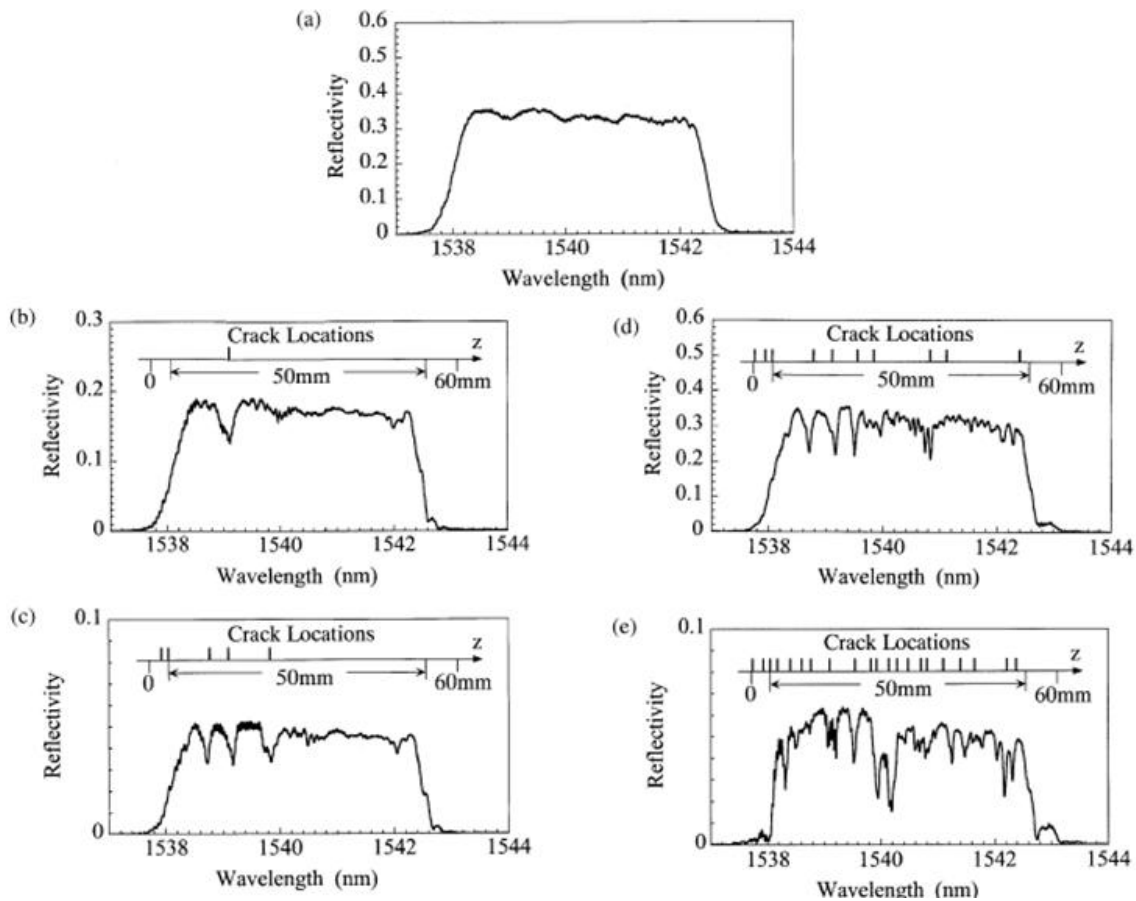


Figura 21 - Esempi di spettri di riflessione di un sensore chirped all'aumentare del numero di fratture all'interno di un laminato.

a) spettro a riposo; b) spettro identificante 1 frattura; c) 5 fratture; d) 10 fratture; e) 21 fratture

Un reticolo che possiede un chirp ha anche la proprietà di aggiungere dispersione (ovvero differenti lunghezze d'onda riflesse dal reticolo sono soggette a diversi ritardi) utilizzabile per la compensazione della dispersione cromatica. In figura 22 è mostrato uno schema di un reticolo chirped di lunghezza L_g e larghezza di banda $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$.

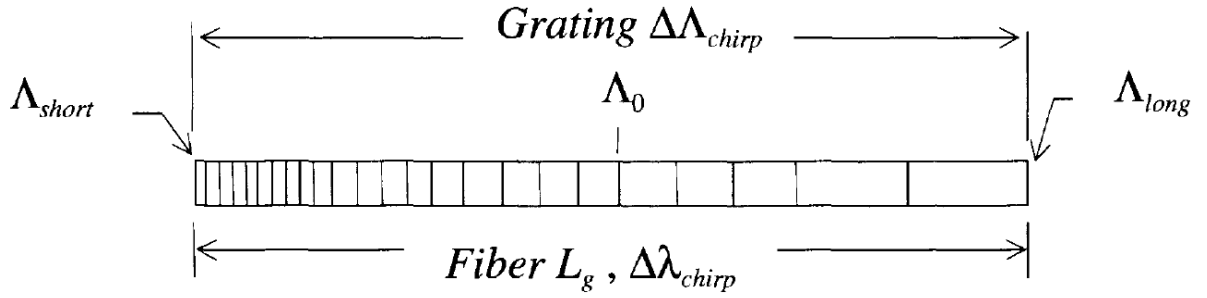


Figura 22 - Reticolo di Bragg chirped

Si può esprimere la larghezza di banda del reticolo chirped come [5]:

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{eff}(\Lambda_{long} - \Lambda_{short}) = 2n_{eff}\Delta\Lambda_{chirp} \quad (16)$$

dove $\Delta\Lambda_{chirp}$ rappresenta la variazione del passo del reticolo chirped.

La riflettività di un reticolo chirped è funzione della lunghezza d'onda, quindi la luce che entra positivamente nel reticolo (ovvero nel verso crescente della spaziatura tra le frange del reticolo) subisce un ritardo τ nella riflessione che può essere approssimativamente espresso come:

$$\tau(\lambda) = \frac{(\lambda_0 - \lambda) 2L_g}{\Delta\lambda_{chirp} v_g} \quad (17)$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda di Bragg al centro del reticolo e v_g è la velocità media delle componenti della luce nella fibra. Questa relazione è valida per valori di lunghezza d'onda λ compresi tra $2n_{eff}\Lambda_{short}$ e $2n_{eff}\Lambda_{long}$.

L'effetto del reticolo chirped è quello di disperdere la luce introducendo un ritardo massimo di $2L_g/v_g$ tra le lunghezze d'onda più corte e più lunghe riflesse. Questa dispersione viene usata per compensare la dispersione cromatica indotta nei sistemi di trasmissione in fibra ottica.

I parametri che influiscono sulle prestazioni di un reticolo di Bragg chirped in fibra per la compensazione della dispersione sono: la perdita di inserzione (causata da una riflettività $< 100\%$), la dispersione, la larghezza di banda, la modalità di polarizzazione della dispersione e le deviazioni dalla linearità delle varie componenti di cui è composta la luce.

4. Prove sperimentali

Sono state svolte due tipi di prove sperimentali: la prima ha l'obiettivo di valutare l'effetto dell'inserimento di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche di un laminato, mentre con la seconda si cerca di correlare la risposta rilevata dai sensori FBG chirped, posti all'interno di provini in composito e caratterizzati da due layup differenti, con il grado di danneggiamento e lo stato tensionale del materiale. Nella prima attività si sottoporranno a prove di flessione a 3 punti provini con diversa orientazione e posizione della fibra ottica al loro interno. Nella seconda attività i provini saranno sottoposti a test di trazione per acquisire la risposta dei sensori e, parallelamente, analizzata la loro microstruttura al fine di rilevare il danneggiamento interno del materiale.

Prima di descrivere nel dettaglio come sono state eseguite le prove, vengono elencati i materiali e le attrezzature utilizzati.

4.1 Materiali

4.1.1 Pre-pregs

I pre-pregs sono tessuti costituiti da fibre e resina in rapporto di peso dichiarato. Per evitare che rimangano zone con basso rapporto fibra/matrice, i pre-pregs sono prodotti con un eccesso di resina, che nel processo di cura verrà espulso grazie a temperatura e pressione e assorbito da materiali assorbenti che avvolgono il pezzo.

Per realizzare i provini sono stati usati due tipi di pre-pregs prodotti da Delta-Preg S.p.a.: un unidirezionale Tenax-J UTS50 F13 12K e un plain weave GG200P-DT120-42. Le loro caratteristiche tecniche sono riportate nelle immagini seguenti.

Si è optato per l'utilizzo di questi materiali per proseguire il lavoro svolto in passato, nel quale sono stati utilizzati altri tipi di sensori in fibra ottica

[14][15]. In questo modo sarà possibile un'eventuale confronto dei risultati per giudicare la bontà del sistema di monitoraggio utilizzato.



Toho Tenax Europe GmbH
 Boos-Fremely-Straße - 52525 Heinsberg - Germany
 Tel: +49 2452 97705-0 - Fax: +49 2452 97705-3199

Delta Preg Spa. Uninominale
 loc. Bonifica Del Tronto
 Via Log. Bonificia del Tronto
 64016 SANT EGIDIO ALLA VIBRATA
 ITALIEN

Date: 10.08.2012

Inspection certificate 3.1 / 201202016

(DIN EN 10204: 2005)

Tenax®-J UTS50 F13 12K 800tex

Subject: Vs Ordine 293/00 del 09.05.12

Order: 330332

Delivery note: 436614

Charge: 11431335_00006 Quantity: 912 kg

Lot - Nr. 110900810			
	unit	average value	C.V. (%)
Tensile Strength	MPa	4930,0	3,1
Tensile Modulus	GPa	241,0	1,1
Elongation at Break	%	2,04	3,2
Linear Density (without size)	tex	803,4	0,8
Size Level	%	1,00	9,9
Short Beam Shear Strength (ILSS)	MPa	103,0	-
Density	g/ccm	1,77	-
Filament Diameter	µm	6,9	-

Toho Tenax Europe GmbH
 Quality Control

Wim Caenen

Figura 23 - Scheda tecnica del pre-impregnato unidirezionale

Delta-Preg Spa
località Bonifica del Tronto
64016 Sant'Egidio alla Vibrata
(TE) Italia

telefono (39) 0861 815 106
fax (39) 0861 815 691
e-mail: info@delta-preg.it

SCHEDA TECNICA

Codice articolo PGG200P0142

Rev. 2 28 Apr 03

TESSUTO DI CARBONIO IMPREGNATO GG200P-DT120-42 (H 100 cm)

Caratteristiche generali del sistema resinoso:

Natura del formulato	Epossidico termoindurente tenacizzato
Temperatura di cura	115÷145°C (vedi ciclo raccomandato)
Gel Time a 120°C	8 ÷ 14 min
Tg dopo ciclo di cura	110÷115°C (1)
Flow	Controllato
Trasparenza	Molto buona
Stabilità all'ingiallimento	Molto buona
Autoadesività	Molto buona
Applicazioni indicate	Dove siano richiesti: alta resistenza all'impatto buona trasparenza alto livello di finitura superficiale

(1) Misurato con DSC – 20°C/min

Caratteristiche del tessuto impregnato:

Tipo di filato	Carbonio alta resistenza 3K
Stile di tessitura	Tela
Larghezza standard	1005 ± 5 mm (ad esclusione della cimosa)
Lunghezza standard	50 ± 5 m
Densità fili in ordito	4,8 ÷ 5,0 fili/cm
Densità fili in trama	4,8 ÷ 5,0 fili/cm
Peso areale fibra secca	190 ÷ 200 g/m ²
Contenuto di resina	42 ± 3 % in peso
Contenuto di volatili	< 0,6 % in peso (2)
Spessore nominale dello strato curato	0,223 mm (3)
Conservazione fuori frigo	minimo 30 gg. a temperatura ambiente
Conservazione in cella frigorifera	minimo 12 mesi a -18°C

(2) Misurato come perdita in peso dopo 15 min in forno ventilato a 160°C

(3) Valore indicativo, può variare in funzione dell'eventuale fuoriuscita di resina dal laminato e della porosità residua

I valori riportati in questa scheda tecnica sono solo indicativi e non devono essere intesi come specifica tecnica

Figura 24 - Scheda tecnica del pre-impregnato plain weave

4.1.2 Estensimetri

L'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche. Il principio di funzionamento degli estensimetri si basa sulla misura della variazione di resistenza elettrica dell'estensimetro stesso quando questo è sottoposto a deformazione. La misura di questa variazione ci indica il valore di deformazione dell'estensimetro e, di conseguenza, del pezzo al quale esso è solidamente collegato (incollato).

L'estensimetro è composto da tre parti principali:

- la parte attiva: la griglia di misura;
- i contatti che permettono di connettere la griglia all'amplificatore di misura;
- il supporto o base (generalmente un materiale polimerico) che permette di fissare l'estensimetro all'oggetto di misura. Su di esso sono anche presenti 4 riferimenti utili per il suo posizionamento sul componente.

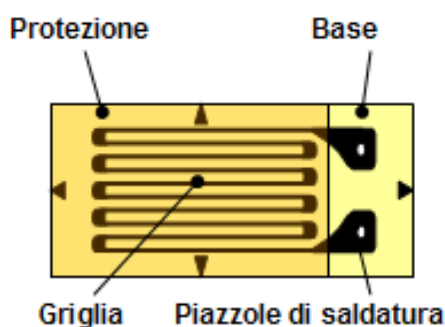


Figura 25 - Schema estensimetro

Gli estensimetri in dotazione al MasterLab e applicati ai provini dotati del sensore FBG hanno le seguenti caratteristiche:

Grid resistance [Ω]	Gage Factor @ 24°
350,0 \pm 0,3%	2,110 \pm 0,5%

Tabella 2 - Caratteristiche estensimetri usati

4.1.3 Fibre ottiche

Per la prima attività è stata usata una fibra ottica monomodale G 657A avente un diametro del cladding di $125,0 \pm 0,7 \mu\text{m}$ con rivestimento in kapton per un diametro complessivo di $250 \pm 15 \mu\text{m}$.

Nella seconda attività sono state utilizzate due tipi di fibre ottiche con reticolo di Bragg chirped. Le loro caratteristiche sono riportate nella tabella seguente:

Fibra	Lunghezza d'onda (nm)	Chirp rate (mm/cm)	Larghezza banda (nm)	SLSR (dB)	Riflettività
1	1549,802	5,8	10,903	21,38	95,26 %
2	1549,993	5,8	10,507	20,15	94,54 %

Tabella 3 - Caratteristiche FBG utilizzati

La fibra 1 è stata inserita nel laminato con tessuto plain weave mentre la fibra 2 nel tessuto unidirezionale.

4.2 Macchinari e strumenti

4.2.1 Pressa

Al MasterLab è in dotazione una pressa Italsigma FPF 100 (figura 26), una macchina universale servo idraulica per prova materiali progettata per un'ampia gamma di applicazioni. Queste tipologie di macchine permettono l'applicazione di carichi di trazione, compressione, flessione a provini o componenti.

Il sistema FPF è composto da un telaio di carico, un servo cilindro, una centralina idraulica e da un'elettronica di controllo e misura. Tale pressa permette di applicare un carico massimo di 100 kN e il cilindro presenta una corsa massima di 100 mm.

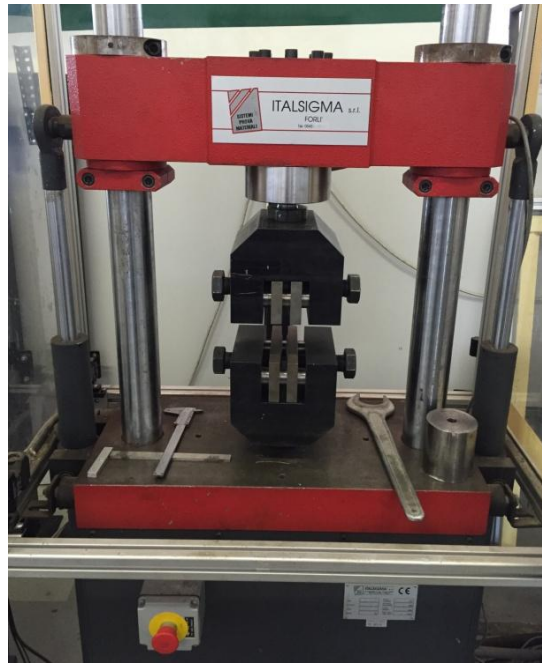


Figura 26 - Pressa Italsigma in dotazione al MasterLab

4.2.2 Autoclave

Al MasterLab è presente anche l'autoclave per la realizzazione di oggetti in materiale composito. Il suo sistema di controllo permette di gestire, attraverso uno schermo touchscreen, tutte le variabili del processo di cura: temperatura, pressione e vuoto. In particolare è possibile controllare i profili di pressione e temperatura durante il ciclo seguendo rampe di salita e discesa definite dalla loro entità, dal loro momento di applicazione e dai tempi di permanenza.



Figura 27 - Autoclave in dotazione al MasterLab

4.2.3 Interrogatore di sensori FBG

Tale strumento, realizzato dalla SestoSensor, è una sorgente laser che permette di interrogare i sensori FBG.



Figura 28 - Interrogatore sensori FBG

L'interrogatore utilizzato è dotato di 16 canali ai quali possono essere collegate le fibre ottiche opportunamente connettorizzate.

Attraverso un cavo Ethernet, l'interrogatore può essere collegato a un personal computer, grazie al quale, si può analizzare lo spettro degli FBG.

L'interrogatore dispone di un proprio indirizzo IP (smartfox004.local); collegandosi ad esso, è possibile gestire direttamente lo strumento attraverso il PC. Nell'immagine seguente è proposta una delle schermate di controllo che si possono visualizzare sul PC.

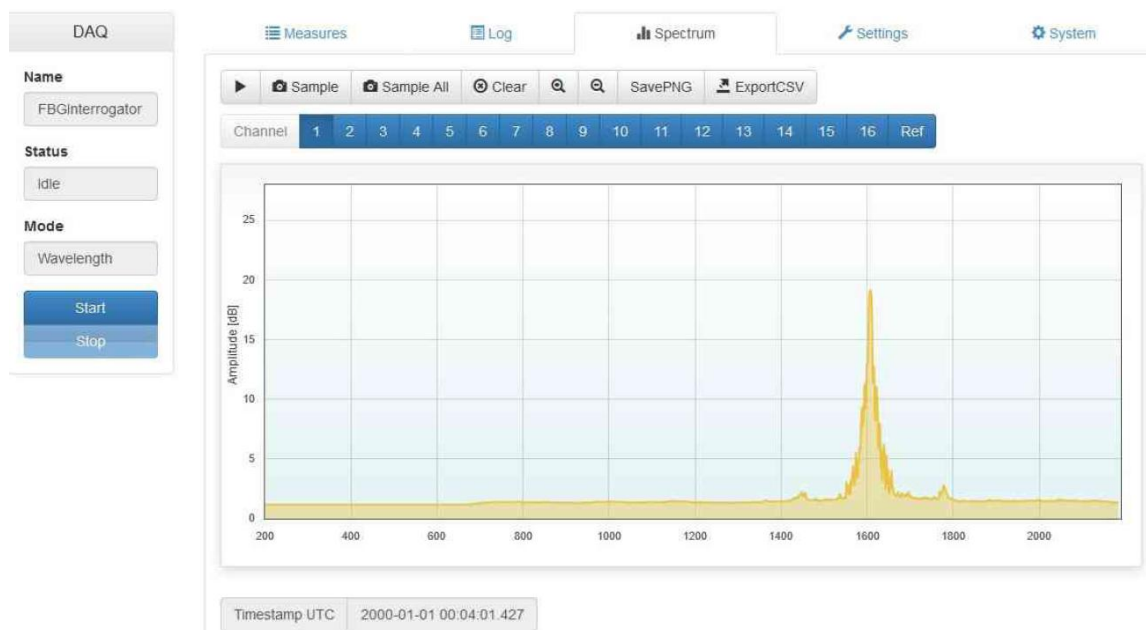


Figura 29 - Schermata di controllo dell'interrogatore

Nella pagina Measures è possibile leggere, in tempo reale, la lunghezza d'onda di picco, rilevata dall'interrogatore, mentre nella pagina Log si può tener traccia di tutte le lunghezze d'onda calcolate in precedenza. La pagina Spectrum (figura 29) permette di analizzare visivamente ed in tempo reale lo spettro captato dall'interrogatore, consentendo di apprezzare il comportamento dello spettro quando l'FBG è sottoposto a deformazioni. Tramite i comandi Sample e SampleAll è possibile campionare lo spettro in un dato istante di tempo. Successivamente è possibile salvare un'immagine dello spettro, oppure salvare il file CSV dello spettro. Il file CSV (comma-separated values) non è altro che un file di testo che, se importato in un foglio di calcolo, presenta una colonna con le lunghezze d'onda misurate dallo spettro e una colonna con le ampiezze (in Decibel) dello spettro. Ponendo le lunghezze d'onda su un asse X e le ampiezze su un asse Y, si può ricostruire lo spettro.

4.2.4 Giuntatrice

Strumento che serve per collegare la fibra ottica presente all'interno dei provini con altre fibre ottiche dotate, ad una estremità, di un connettore compatibile con l'interrogatore dei sensori della SestoSensor.

Questo strumento permette anche di applicare le guaine termoretraibili con rinforzo in metallo, che servono per proteggere la zona in cui le fibre sono state unite, in quanto è dotato di una piccola cella che consente di riscaldare la guaina facendola restringere e aderire alla fibra.



Figura 30 – Giuntatrice

4.2.5 Strain Indicator

Strumento in dotazione al MasterLab che permette di visualizzare le deformazioni lette dagli estensimetri.

Tale strumento va regolato impostando il Gage Factor sul valore proprio dell'estensimetro montato e annullando il valore della deformazione letta quando l'estensimetro è a riposo.

Il Gage Factor è il fattore di trasduzione che esprime la sensibilità dell'estensimetro. L'incremento di resistenza dell'estensimetro viene espresso come rapporto tra la variazione di resistenza e la resistenza totale del filo e fornisce la misura della deformazione localmente prodotta nel provino.



Figura 31 - Strain indicator

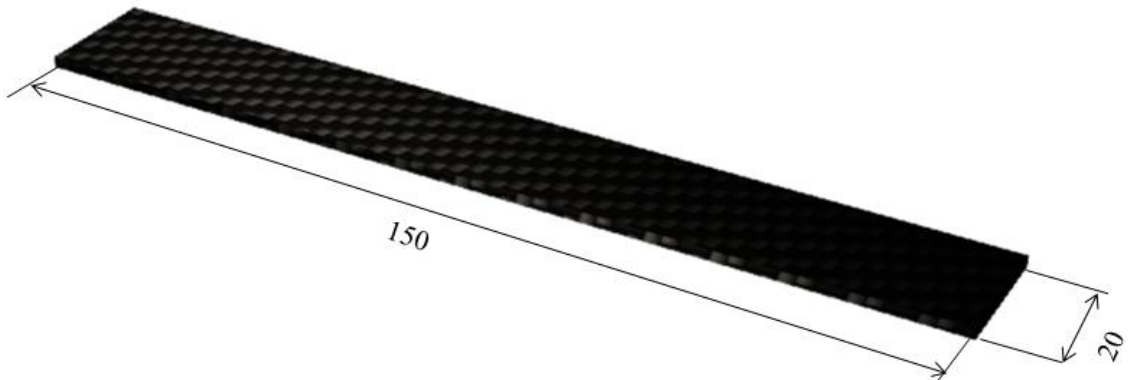
4.3 Svolgimento prove

4.3.1 Laminazione provini ed embedding delle fibre ottiche

L'obiettivo della prima attività è quello di realizzare 4 piastre 180x180 mm laminando 8 strati di tessuto di plain weave. Una piastra sarà laminata priva di fibre ottiche mentre nelle altre tre verranno disposte al loro interno le fibre ottiche in diverse orientazioni e posizioni. Da ciascuna piastra saranno poi ricavati 6 provini su cui si effettueranno prove di flessione a 3 punti.

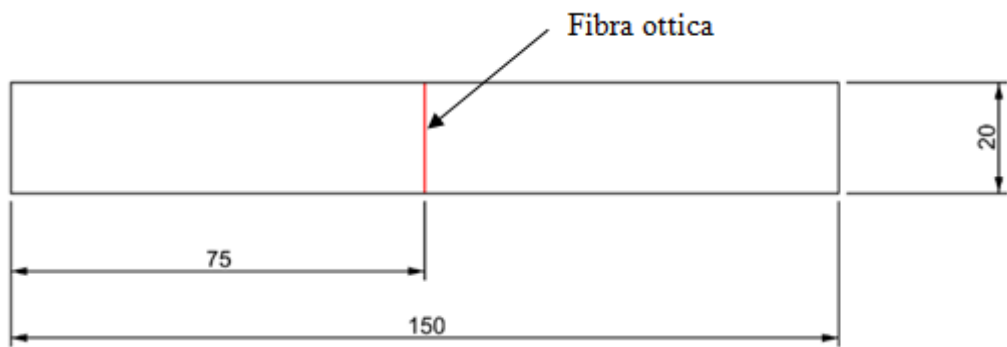
Nello schema seguente sono riportate le dimensioni nominali dei provini, la loro quantità, la nomenclatura adottata per identificarli, e la posizione e orientazione della fibra.

- Senza fibra



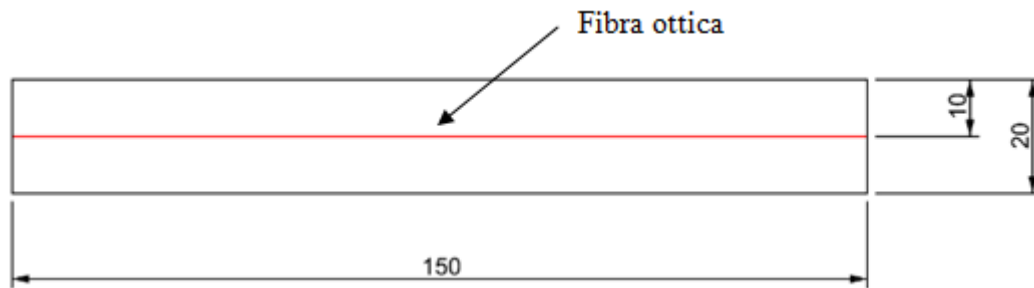
Posizione fibra ottica	Serie	Quantità
No fibra	A	6

- Fibra orientata perpendicolarmente all'asse del provino



Posizione fibra ottica	Serie	Quantità
Al centro	B	6
Prima dell'ultimo strato	D	3
Sotto il primo strato	E	3

- Fibra orientata lungo l'asse delle provino



Posizione fibra ottica	<p>Al centro</p>	<p>Sotto il primo strato</p>
Serie	C	F
Quantità	3	3

Durante l'inglobamento delle fibre ottiche, occorre tenerle opportunamente pretensionate e fissate nella posizione voluta. Successivamente è possibile deporre una nuova pelle del laminato facendo attenzione a non modificare la posizione della fibra.

Le fibre ottiche sono state allineate con le direzioni delle fibre del tessuto.



Figura 32 - Laminati pronto per il ciclo di cura

L'obiettivo della seconda attività è di realizzare 4 piastre 130x130 mm, due con il pre-preg unidirezionale e due con il tessuto plain weave, dalle quali si ricaveranno i provini sui quali andranno eseguite le prove di trazione. Da ogni piastra si ricavano 5 provini, per un totale di 20 dei quali solo due saranno dotati dei sensori FBG. La geometria e le dimensioni dei provini che si vogliono ottenere sono illustrate nell'immagine seguente:

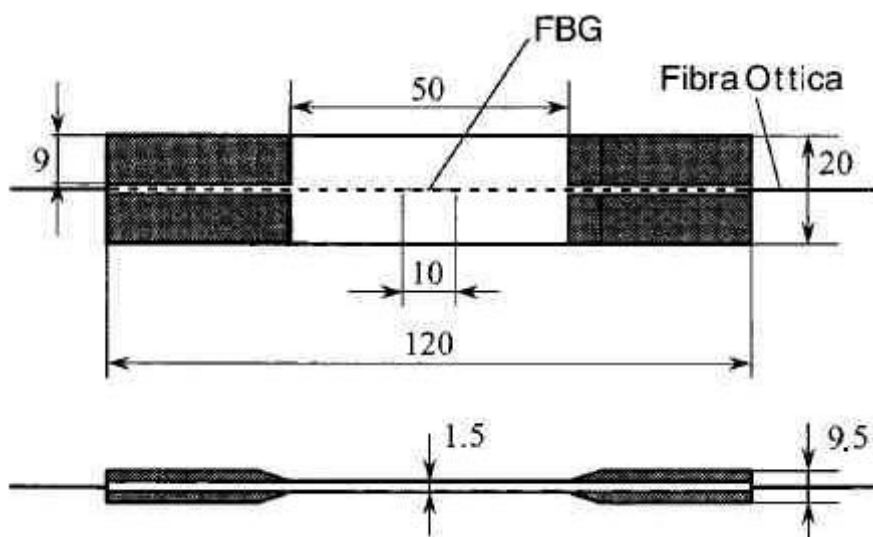


Figura 33 - Geometria e dimensioni nominali dei provini

Le dimensioni mostrate sono da intendere come indicative in quanto, per provini di dimensioni ridotte, è facile ottenere minime differenze tra un provino e l'altro.

Dati gli spessori dei pre-pregs, per ottenere uno spessore di circa 1,5 mm sono stati sovrapposti 5 strati di unidirezionale e 7 di plain weave. L'unidirezionale è stato laminato secondo una stratificazione cross-ply, con i due strati esterni orientati a 0° e il cuore di 3 strati orientati a 90° . Questo tipo di stratificazione permette di osservare con facilità le fratture trasversali che si manifestano negli strati a 90° . In questo modo sarà più facile monitorare il danneggiamento del materiale.

Prima di inserire la fibra ottica nel laminato è necessario inserire una guaina in teflon ai suoi estremi e rimuovere il rivestimento protettivo in kapton dalla zona in cui è presente il reticolo. La prima operazione permette di proteggere

la fibra nella zona di uscita del laminato in quanto, durante il ciclo di cura, tali zone sono soggette a forti tensioni. La seconda operazione consente di ottenere un reticolo più sensibile alle tensioni che agiscono su di esso, con lo svantaggio di rendere molto più fragile la fibra.

Per rimuovere il kapton dalla fibra è necessario immergere la zona in cui è presente il reticolo in acido solforico ad alta concentrazione (quello usato ha una concentrazione del 96%) riscaldato. Data la pericolosità dell'acido, tale operazione è stata eseguita all'interno di una cappa aspirante prendendo le dovute precauzioni. Durante questa fase e quella successiva dell'inserimento (embedding) nel laminato, occorre maneggiare con molta cura la fibra per via della sua fragilità.

L'inglobamento delle fibre ottiche all'interno di un materiale composito comporta difficoltà aggiuntive: i problemi principali sono rappresentati dalla bassa resistenza delle fibre ottiche agli sforzi di taglio e dalla necessità di effettuare un corretto posizionamento delle fibre ottiche affinché sia ottenibile la misura della grandezza desiderata.

Il processo di inglobamento delle fibre ottiche è il seguente:

- la fibra, opportunamente pretensionata, viene fissata in corrispondenza della lamina in cui si è deciso di posizionare i sensori prestando attenzione a collocare il sensore FBG nella sezione centrale della lamina, in modo da limitare i possibili effetti di bordo e avere una distribuzione uniforme del carico;
- gli estremi della fibra ottica, protetti dalla guaina in teflon, devono essere posizionati all'interno del laminato per una lunghezza di circa 10 mm;
- gli estremi delle guaine poste all'interno del laminato vengono vincolate, tramite della resina epossidica a presa rapida, alla fibra ottica occludendo gli estremi del capillare ed eliminando così la possibilità che la resina del laminato penetri per capillarità all'interno

della guaina durante il ciclo di cura, modificando le caratteristiche meccaniche della fibra ottica;

- una nuova pelle del laminato può ora essere deposta sopra la fibra ottica prestando attenzione affinché l'allineamento iniziale non venga modificato.

Le fibre ottiche sono state inserite prima dell'ultimo strato di materiale, in modo da poter laminare i precedenti strati senza dover prendere particolari precauzioni per non danneggiare e/o spostare la fibra ottica. Nel caso del pre-preg unidirezionale, il sensore FBG è stato orientato nella direzione delle fibre a 0° . Data la simmetria del tessuto plain weave, il sensore è stato allineato con la direzione di una fibra al centro della piastra.

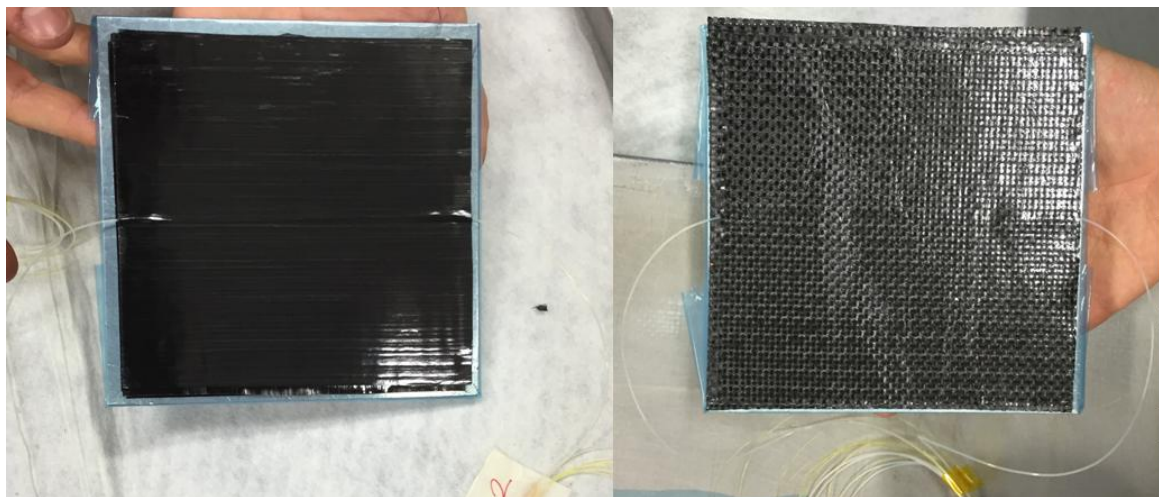


Figura 34 - Laminati con fibra ottica

Prima di preparare il sacco a vuoto, sono state prese ulteriori precauzioni al fine di non danneggiare la fibra ottica. Le fibre ottiche sono state avvolte su se stesse e successivamente con del film distaccante onde evitare che della resina fuoriuscita dal laminato durante il ciclo di cura potesse incollarle tra di loro e/o allo stampo. I laminati, con all'interno le fibre, sono stati appoggiati su una grande lastra di alluminio, ricoperta da film distaccante, in modo da poter contenere le fibre ottiche. Come controstampo sono state usate due lastre, anch'esse in alluminio, di dimensioni simili alle piastre che si vogliono ottenere. Come ulteriore precauzione, sono stati posti dei cordoni di

adesivo sigillante intorno alle fibre per proteggerle dal flusso di resina. Il tutto è stato poi ricoperto con un altro strato di film distaccante.

Nelle successive figure è presentato il laminato pronto per essere sigillato e successivamente curato.



Figura 35 - Laminati pronti per il ciclo di cura



Figura 36 - Dettaglio del sistema di protezione della fibra ottica

4.3.2 Cura in autoclave

Prima di curare i laminati, occorre preparare il sacco a vuoto (vacuum bag). Per prima cosa si avvolge stampo e controstampo con il bleeder, un materiale sintetico molto poroso che ha lo scopo di favorire la circolazione dell'aria aspirata dalla pompa a vuoto, l'espulsione dei composti gassosi/volatili che si sviluppano durante la reazione di polimerizzazione, di assorbire la resina in eccesso e proteggere il sacco da eventuali spigoli di stampo e controstampo che potrebbero romperlo.

Successivamente è stato applicato un sigillante, un cordone di materiale sintetico, sui bordi dello stampo dopo averli accuratamente puliti e sgrassati. Infine si ricopre il tutto con un film di materiale plastico che avvolge tutti gli elementi ed a cui è stata applicata la valvola per la pompa a vuoto. Esso, insieme al sigillante, dovrà garantire la tenuta ermetica del sacco.

Una volta preparato il sacco, lo si collega alla pompa a vuoto e si verifica che non vi siano perdite.

Ora il componente è pronto per il ciclo di cura in autoclave.

La termocoppia, che tiene sotto controllo la temperatura del laminato, è stata posta a contatto con altre due lamine di alluminio, uguali a quelle usate per stampo e controstampo, in quanto l'inerzia termica è governata dallo stampo, dato che il pezzo che si vuole realizzare è di piccolo spessore.



Figura 37 - Sacco pronto per il ciclo di cura

Al fine di preservare le fibre ottiche all'interno dei laminati, è stato applicato un ciclo di cura meno severo rispetto a quello consigliato nella scheda tecnica dai produttori dei pre-pregs. Il ciclo di cura utilizzato per realizzare le piastre prevede le seguenti fasi:

- riscaldamento a $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ fino a 90°C
- applicazione di pressione a $0.2 \text{ bar}/\text{min}$ fino a 3bar
- mantenimento temperatura e pressione per 10 ore
- raffreddamento a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ fino a 40°C
- rilascio della pressione a $1 \text{ bar}/\text{min}$ fino a pressione atmosferica
- mantenimento del vuoto durante tutto il ciclo

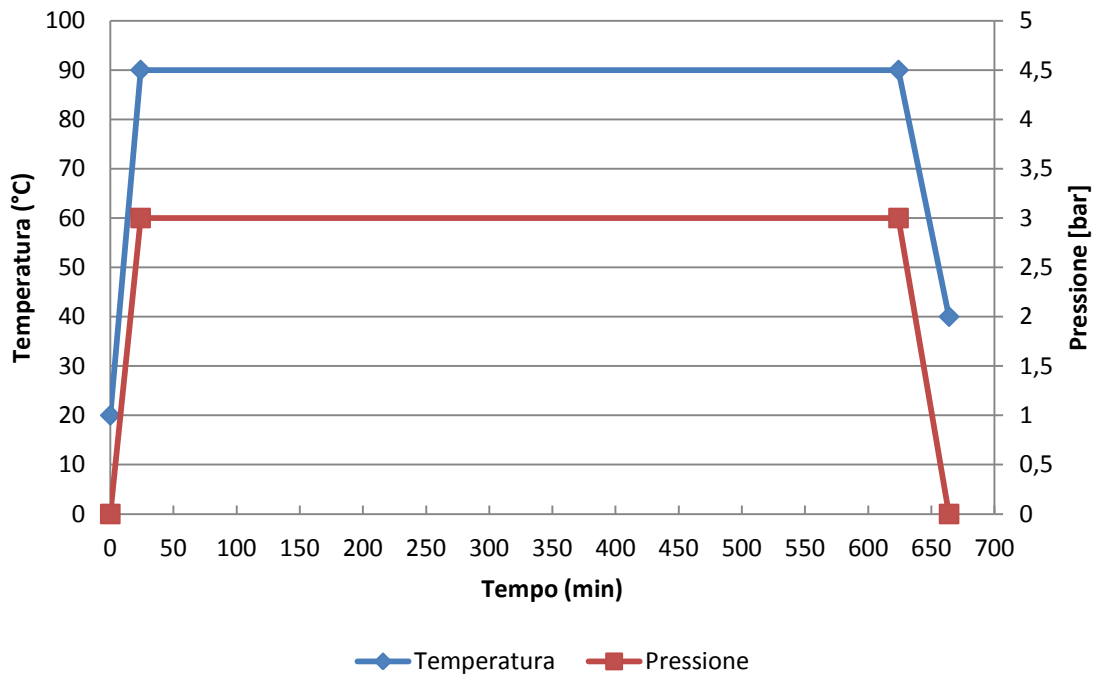


Figura 38 - Ciclo di cura

4.3.3 Taglio dei provini

Per ottenere i provini è necessario tagliare le lastre. Il taglio viene fatto con una sega circolare con disco diamantato raffreddato ad acqua. Vengono inoltre eliminate le parti di resina in eccesso portando i provini alle dimensioni nominali.

Prima di effettuare tale operazione, sono stati tracciati, con un pennarello bianco, i contorni dei provini sulle piastre in carbonio tenendo presente uno spessore di taglio di 3mm.

Al fine di proteggere le fibre ottiche durante le operazioni di trasporto e di taglio, evitando che rimangano impigliate nel disco e/o tagliate per sbaglio, sono state avvolte su se stesse e posizionate in piccoli sacchetti supportati da lamine di alluminio.

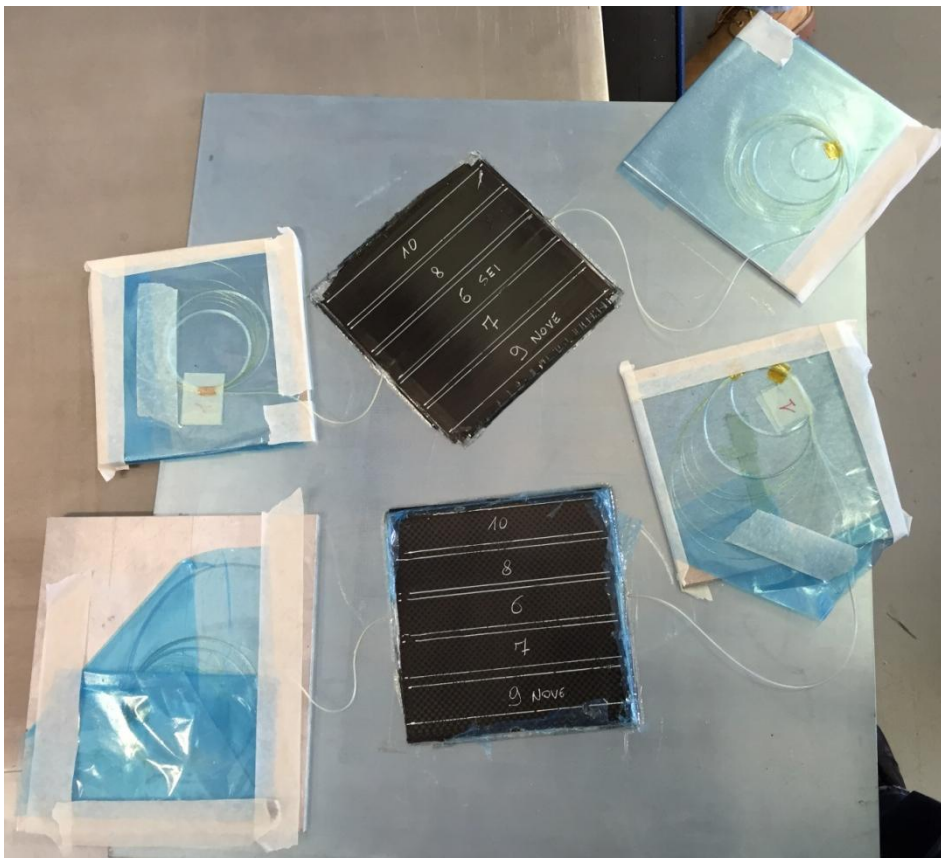


Figura 39 - Laminati estratti dagli stampi pronti per l'operazione di taglio

Dalle misure effettuate risulta che le differenze tra le dimensioni reali dei provini destinati ai test di trazione e quelle nominali sono irrilevanti, mentre le dimensioni effettive dei provini destinati alle prove di flessione sono riportate nella seguente tabella:

Provino	Lunghezza [mm] ± 0,5	Larghezza [mm] ± 0,05	Spessore [mm] ± 0,05
A1	151,0	21,20	1,80
A2	150,0	21,00	1,80
A3	151,0	21,10	1,80
A4	151,0	20,90	1,80
A5	151,0	20,55	1,80
A6	151,0	20,25	1,80
B1	151,0	21,00	1,80
B2	151,0	20,80	1,80
B3	152,0	20,75	1,80
B4	151,0	20,45	1,80
B5	151,5	20,80	1,80
B6	152,0	21,00	1,80
C1	150,5	20,80	1,80
C2	151,0	21,25	1,80
C3	150,5	21,10	1,80
D1	151,5	21,45	1,80
D2	152,0	21,00	1,80
D3	151,0	20,60	1,80
E1	151,0	20,25	1,80
E2	151,0	20,60	1,80
E3	151,0	20,65	1,80
F1	151,0	20,50	1,80
F2	151,0	21,20	1,80
F3	151,0	20,90	1,80

Tabella 4 - Dimensioni effettive dei provini per prove di flessione a 3 punti

4.3.4 Applicazione dei tab

Dopo aver ottenuto i provini dai laminati, bisogna applicare i tab, ovvero delle piccole lastre, in alluminio alle loro estremità. La funzione dei tab è quella di fornire una superficie per l'afferraggio nella pressa. I tab devono prevedere uno smusso (in questo caso di 45°) nella zona interna per ridurre la concentrazione di tensioni.

Le caratteristiche che i tab devono avere per prove di trazione sono riportate nella tabella 5 (riportata dalla normativa D3039/D3039M - 14 [24]).

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ⁴
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Tabella 5 - Requisiti di un provino che deve essere sottoposto a test di trazione

I tab utilizzati hanno uno spessore di 4 mm.

Prima di applicare i tab devono essere eseguite alcune operazioni fondamentali per una buona riuscita dell'incollaggio. Per prima cosa occorre carteggiare con carta abrasiva fine le superfici, sia dei tabs che dei provini, che andranno incollate. Successivamente si devono decapare, ovvero pulire, le superfici per mezzo di un apposito sgrassatore facendo attenzione a non sporcarle nuovamente. Ora sono pronte per l'applicazione della resina bi-componente (Loctite 9466 A&B Hysol) che incollerà i tab ai provini. Tale resina presenta una resistenza a taglio di 25-30 kN e necessita, alla temperatura presente in laboratorio (circa 20°C), di almeno 24 ore per una completa polimerizzazione.

Per garantire un buon incollaggio è stato posto sopra ai provini un peso che garantisse una sufficiente pressione sulla resina. Onde evitare che della resina fuoriuscisse ed incollasse altri oggetti, sono stati posti, tra i provini e il peso e tra i provini e il piano di lavoro, uno strato di film distaccante.

4.3.5 Lucidatura provini

Per riuscire ad osservare i provini al microscopio è necessario levigare e lucidare la superficie che si desidera analizzare. A tal proposito i provini destinati ai test di trazione sono stati lucidati usando una macchina a disco rotante con dischi abrasivi a diversa granulometria (figura 40). Si è partiti con dischi a grana grossa, che erodono molto materiale senza raggiungere una finitura elevata, per poi passare a dischi con grana fine, che permettono di ottenere una finitura via via sempre migliore.

Step	FEPA P Paper	Micron [μm]
1	P80	201
2	P180	82
3	P320	46.2 ± 1.5
4	P600	25.8 ± 1
5	P1200	15.3 ± 1
6	P2500	8.4 ± 0.5

Tabella 6 - Step di levigatura e caratteristiche dei dischi abrasivi utilizzati

Per ottenere una finitura a specchio perfettamente liscia, su ulteriori due dischi, su cui è presente un apposito panno, si mette una soluzione con particelle di allumina di granulometria, rispettivamente, $1 \div 3 \mu\text{m}$ e $0,05 \mu\text{m}$.

In ogni passata, tranne quella con gli ultimi due dischi, viene utilizzata dell'acqua per evacuare il materiale abraso e raffreddare i dischi e il provino.

I provini destinati alle prove di flessione sono stati levigati con disco P180 al fine di rendere le superficie di taglio più uniformi.



Figura 40 - Macchina a disco rotante usata per la lucidatura dei provini

4.3.6 Applicazione estensimetri

Gli estensimetri vengono fissati ai provini tramite incollaggio. Prima di questa fase è necessario compiere alcune operazioni: per prima cosa occorre carteggiare usando carta abrasiva e una soluzione acida la zona in cui si desidera applicare l'estensimetro, successivamente usando una matita si traccia/incide, nella medesima zona, una croce che servirà per posizionare lo strumento di misura. Ora occorre pulire la superficie, muovendosi dall'interno verso l'esterno, con una soluzione neutra avendo cura di rimuovere la grafite lasciata dalla matita. Si preleva l'estensimetro dalla sua confezione con delle pinzette e lo si deposita su un nastro adesivo trasparente dal lato che non andrà incollato. Il nastro adesivo serve come protezione e per posizionare al meglio l'estensimetro senza toccarlo con le mani, evitando così di contaminare la superficie di incollaggio. Si può ora posizionare il nastro adesivo con l'estensimetro sul componente allineando i riferimenti presenti su di esso con la croce fatta in precedenza. Provare ad alzare

delicatamente il nastro verificando che l'estensimetro mantenga la posizione. Se l'estensimetro risulta posizionato correttamente, si solleva da un lato il nastro adesivo e si applica un goccia di colla sulla superficie. Dopo l'applicazione della colla, distendere il nastro sul pezzo e passare un dito dalla zona della piega verso il centro dell'estensimetro, in modo da spremere fuori la colla. Infine occorre esercitare una pressione energica e il più possibile uniforme e costante per circa 1 minuto.

Si può ora rimuovere delicatamente il nastro adesivo e stagnare i connettori nelle apposite piazzole. Prima di applicare il protettivo occorre verificare il corretto funzionamento del ponte. Ora l'estensimetro è pronto all'uso.

Gli estensimetri sono stati applicati solamente sui due provini con sensore FBG.

4.3.7 Connettorizzazione delle fibre ottiche

L'unione di due fibre ottiche è un'operazione molto delicata in quanto, nel punto di giunzione, le perdite dovranno essere ridotte al minimo.

Questa operazione è necessaria per poter collegare le fibre ottiche contenenti i sensori all'interrogatore, in quanto si uniscono a tali fibre un ulteriore tratto di fibra che presenta, ad un estremo, l'adeguato connettore per lo strumento. L'interrogatore della SestoSensor richiede connettori in fibra ottica FC/APC. Prima di poter unire le due fibre, è necessario rimuovere da esse alcuni centimetri di rivestimento. Per quanto riguarda la fibra contenente il reticolo di Bragg, il kapton agli estremi della fibra viene rimosso immergendola in acido solforico riscaldato, come fatto in precedenza durante la fase di embedding. Il jacket della fibra con il connettore può essere rimosso con una pinza sbuccia filo.

Una volta rimosso il rivestimento, le fibre devono essere portate allo stesso diametro con apposito strumento e opportunamente tranciate mediante il cleaver al fine di ridurre il più possibile le perdite di trasmissione e rendere

le superfici delle fibre che andranno a contatto perfettamente piane. Infine le zone prive di rivestimento vanno pulite con alcool denaturato.

A questo punto, le due fibre possono essere inserite nella giuntatrice che attraverso un laser ne individua la posizione, le allinea e le salda assieme.

Al termine dell'operazione, lo strumento indicherà il valore della perdita di segnale che si ha nella fibra per via della giunzione.

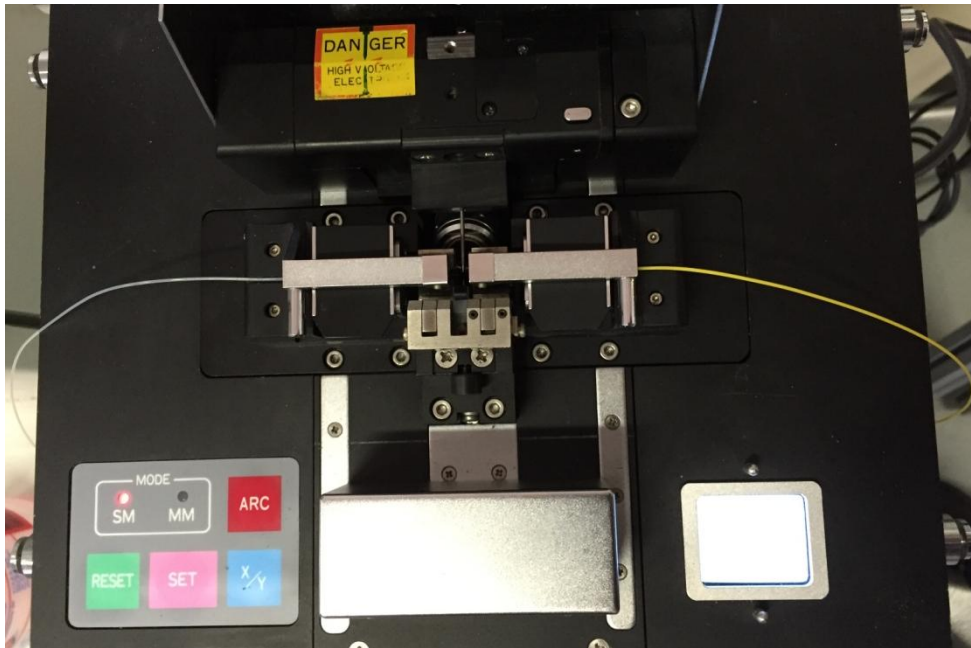


Figura 41 - Giunzione di due fibre

Una volta che le fibre sono connesse, la giunzione viene protetta da una guaina termo-restringente, che riscaldandola, si restringe, aderendo attorno alle fibre. Questa operazione avviene in un'apposita cella riscaldante della giuntatrice.



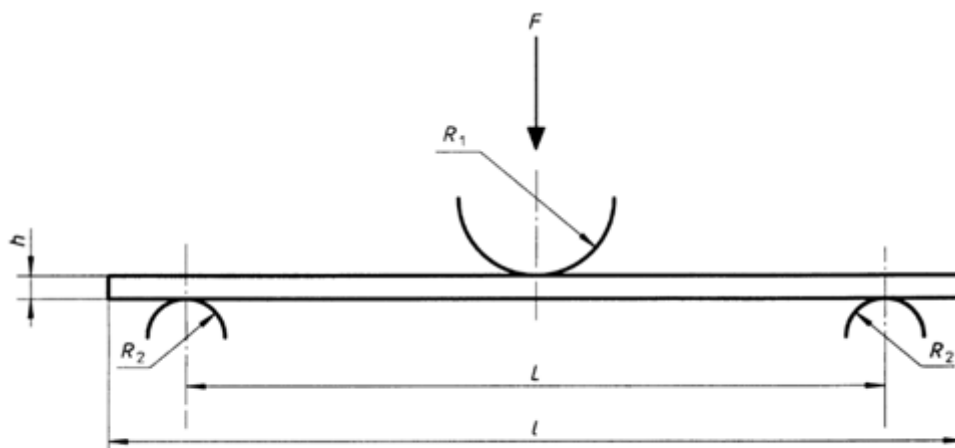
Figura 42 - Applicazione della guaina protettiva

4.3.8 Prove di flessione a 3 punti

Su ogni provino sono state eseguite prove di flessione a 3 punti per valutare l'effetto della presenza di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche di un laminato.

Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento e la pressa è stata impostata ad una velocità di avanzamento di 0,1 mm/s (circa 6 mm/min) con una frequenza di campionamento di 5 Hz.

Nella figura seguente viene riportato lo schema e i parametri della prova:



$$l=150 \text{ mm} \quad L=120 \text{ mm} \quad h=1,8 \text{ mm} \quad R_1=5 \text{ mm} \quad R_2=2 \text{ mm}$$

Figura 43 - Schema flessione a 3 punti e parametri della prova



Figura 44 - Provino montato sulla pressa per la prova di flessione a 3 punti

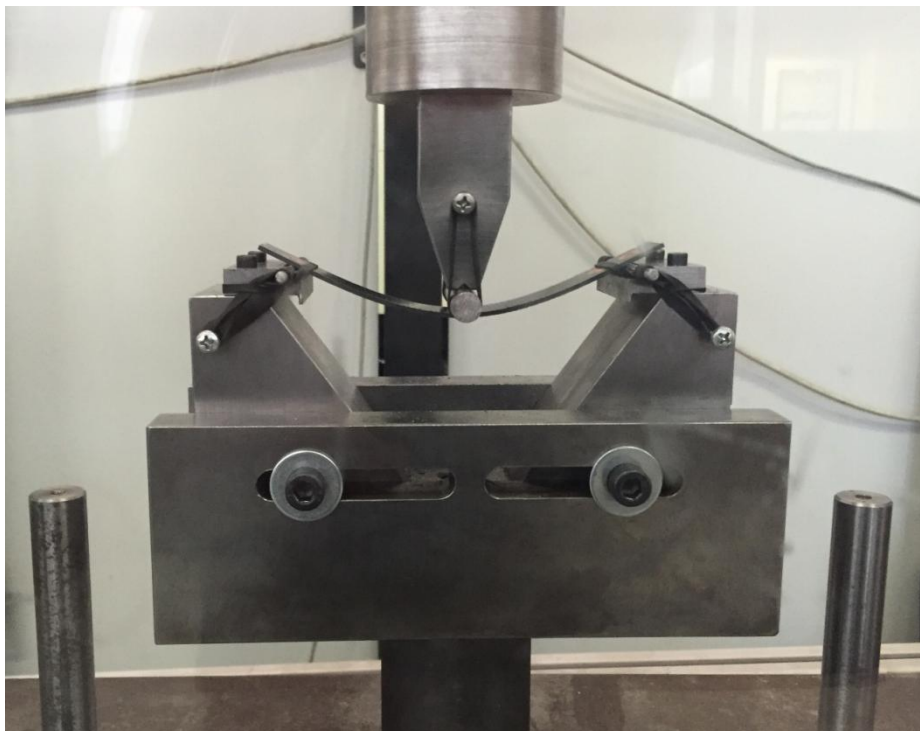


Figura 45 - Flessione del provino durante la prova

4.3.9 Test di trazione e analisi strutturale sui provini non strumentati

Su ogni provino non strumentato sono stati eseguiti test di trazione al fine di valutare il loro danneggiamento attraverso l'individuazione del numero di fratture presenti.

I provini sono stati serrati nella pressa con una distanza tra gli afferraggi di 6,5 cm. I test sono stati eseguiti in controllo di spostamento e la pressa è stata impostata ad una velocità di 0,008 mm/s (circa 0,5 mm/min) con una frequenza di campionamento di 5 Hz.

Ogni test è stato fermato a determinati step di carico al fine di poter smontare il provino e analizzare la sua struttura interna al microscopio per conteggiare le fratture presenti. Le cricche sono state rilevate su entrambi i lati del provino al fine di ottenere un valore della densità di frattura più preciso.

Tutti i provini sono stati caricati fino a rottura, salvo scollaggio dei tabs, con lo scopo di raccogliere il maggior numero di informazioni.

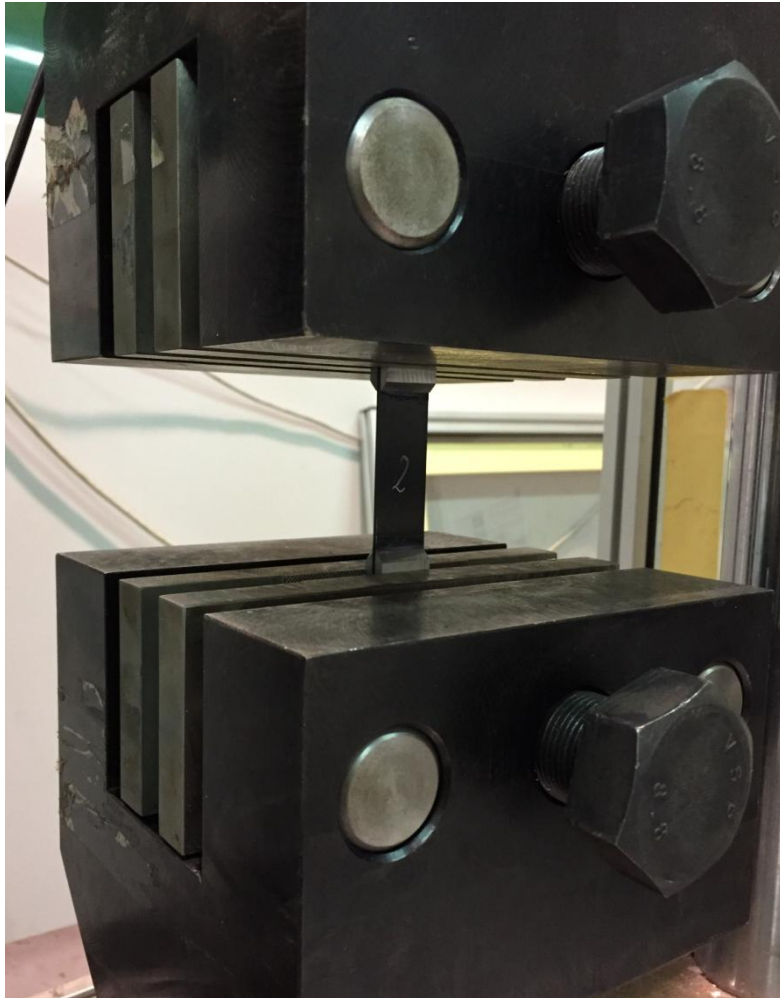


Figura 46 - Provino montato sulla pressa

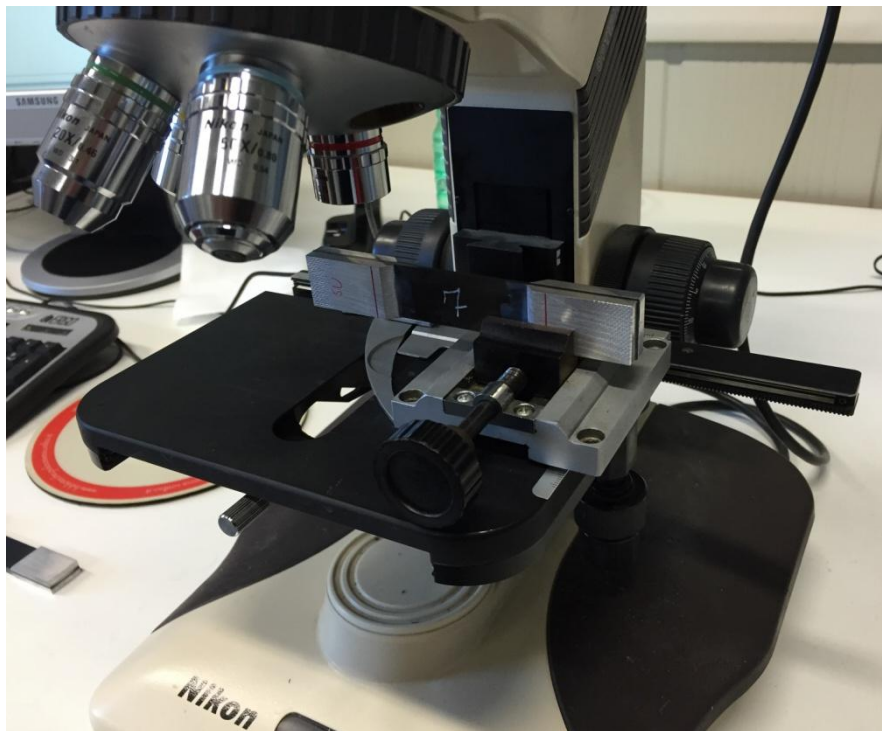


Figura 47 – Analisi di un provino al microscopio

4.3.10 Test di trazione sui provini strumentati

Dopo aver eseguito i test di trazione e analizzato i provini privi di fibra ottica, si è passati ai test sui provini strumentati con sensore FBG ed estensimetro.

La distanza tra gli afferraggi e i parametri con cui è stata settata la pressa sono gli stessi dei test precedenti. Attraverso l'estensimetro ci si è inoltre assicurati che dopo il montaggio del provino sulla pressa la deformazione misurata fosse nulla. Ad ogni step di carico sono stati registrati la deformazione misurata dall'estensimetro e lo spettro fornito dall'FBG. Per effettuare le misure, la fibra ottica è stata collegata all'interrogatore e, questo, al PC.

Lo spettro è stato registrato in condizioni di riposo, ovvero quando il provino è montato tra gli afferraggi della pressa ma non è ancora stato caricato, e in condizioni di carico, ovvero quando il provino è sottoposto ad uno sforzo di trazione. La misura dello spettro è stata effettuata mettendo in pausa la pressa ai carichi prefissati, garantendo, quindi, che il provino rimanesse in trazione. Su questo tipo di procedimento c'è da fare una piccola precisazione: mettendo in pausa la pressa, ad esempio a 10 kN, questa non rimane perfettamente ferma a quel carico, ma oscilla attorno a tale valore, perciò la misura dello spettro non è mai stata effettuata esattamente ai carichi indicati. Inoltre anche lo spettro registrato dall'interrogatore non è fisso ma oscilla leggermente, questo vuol dire che, a seconda dell'istante in cui esso viene "congelato" (in modo da salvarne i dati), potrebbe essere lievemente diverso da quello visibile, ad esempio, sempre a 10 kN. Queste discrepanze, tra misure realizzabili idealmente e misure effettuate nella pratica, sono in realtà assolutamente trascurabili ma per completezza si è voluto specificarle.

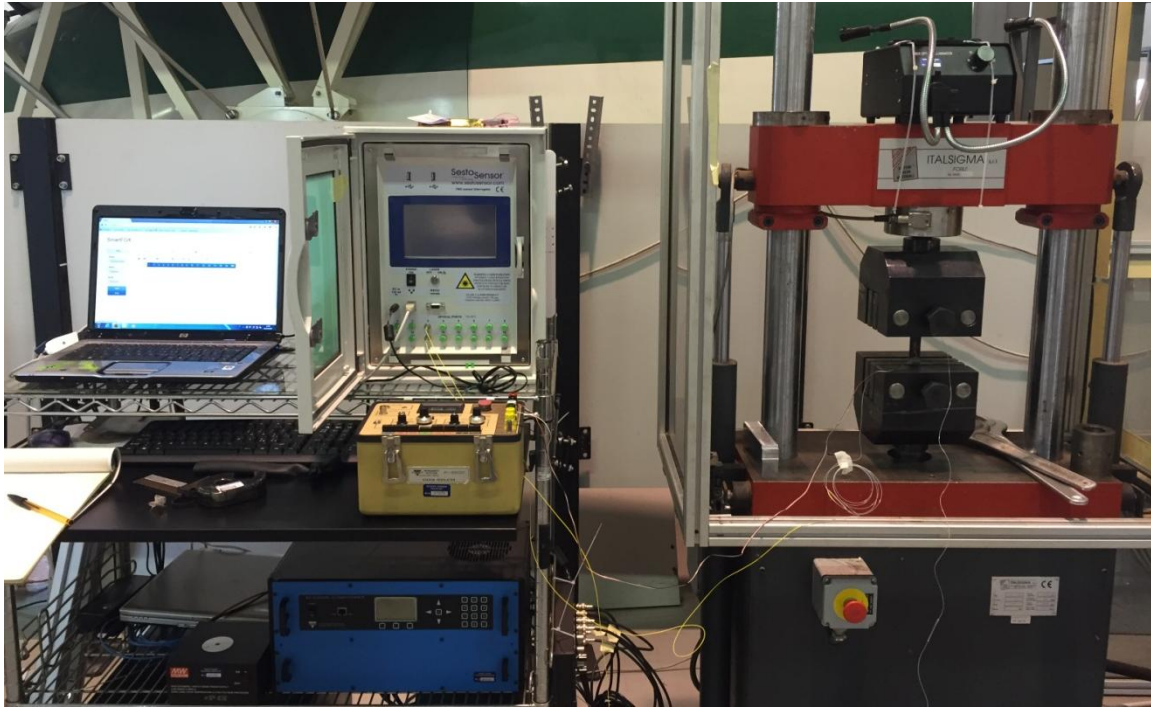


Figura 48 - Sistema di misura

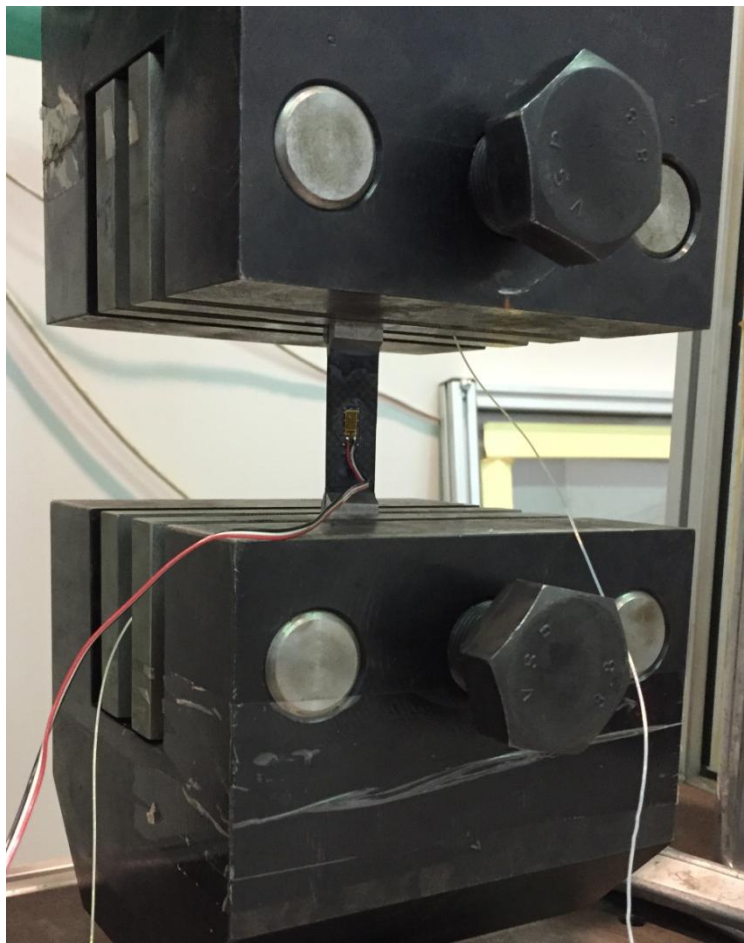


Figura 49 - Provino strumentato montato sulla pressa

5. Analisi dei risultati

In questa sezione vengono presentati e analizzati i risultati ottenuti durante le prove sperimentali.

5.1 Prove di flessione a 3 punti

L'obiettivo di queste prove era di verificare l'influenza della presenza di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche dei provini.

Ogni provino è stato portato a rottura in modo da avere, dai dati della pressa, il valore del carico massimo e dello spostamento massimo nella mezzzeria sopportato dal provino.

Nella seguente tabella vengono riportati tali valori:

Provino	Carico [N]	Spostamento [mm]	Variazione % carico	Variazione % spostamento
A1	-229,45	23,50		
A2	-231,05	23,32		
A3	-234,11	22,07		
A4	-233,96	23,13		
A5	-218,67	22,51		
A6	-214,79	23,17		
Valor medio A	-227,00	22,95	0	0
B1	-219,86	27,87		
B2	-214,21	26,73		
B3	-216,68	27,28		
B4	-203,02	24,55		
B5	-219,74	27,13		
B6	-216,24	29,99		
Valor medio B	-214,96	27,26	-5,31	18,77
C1	-201,42	27,62		
C2	-212,32	26,60		
C3	-233,52	26,38		
Valor medio C	-215,76	26,87	-4,95	17,06
D1	-186,75	23,10		

D2	-190,97	22,37		
D3	-198,51	25,49		
Valor medio D	-192,08	23,65	-15,39	3,07
E1	-169,30	19,06		
E2	-174,40	19,94		
E3	-167,69	21,83		
Valor medio E	-170,46	20,28	-24,91	-11,65
F1	-209,70	25,85		
F2	-215,81	26,81		
F3	-209,13	28,36		
Valor medio F	-211,55	27,01	-6,81	17,68

Tabella 7 - Dati delle prove di flessione a 3 punti

La serie A, ovvero i provini senza fibra ottica, è stata presa come riferimento con cui confrontare i risultati ottenuti dalle altre serie.

Per quanto riguarda l'influenza sul carico massimo, come si può vedere dai dati ottenuti, i provini delle serie D ed E, ovvero quelli con la fibra posta in direzione ortogonale all'asse del provino, rispettivamente prima dell'ultimo strato e sotto il primo strato, risentono notevolmente della presenza della fibra ottica. Nei restanti provini si osserva una diminuzione di circa il 5% dal valore del carico massimo medio dei provini privi di fibra ottica.

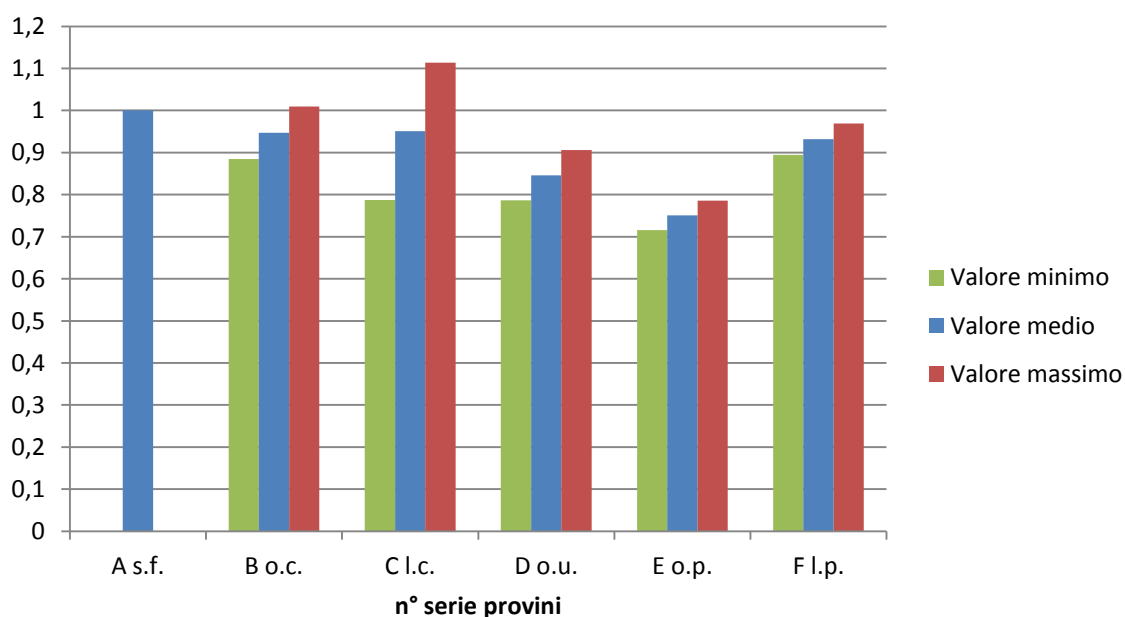


Figura 50 - Variazione carico dal valore di riferimento

Analizzando la freccia massima nella mezzeria del provino si può osservare che i provini della serie D non hanno subito variazioni molto rilevanti, mentre i provini delle serie B, C ed F, ovvero quelli che presentano la fibra ottica, rispettivamente, in direzione ortogonale all'asse del provino al centro dello stesso e lungo l'asse del provino al centro e al di sotto del primo strato, mostrano incrementi di circa il 18%. Infine la serie E presenta una diminuzione di circa il 12%.

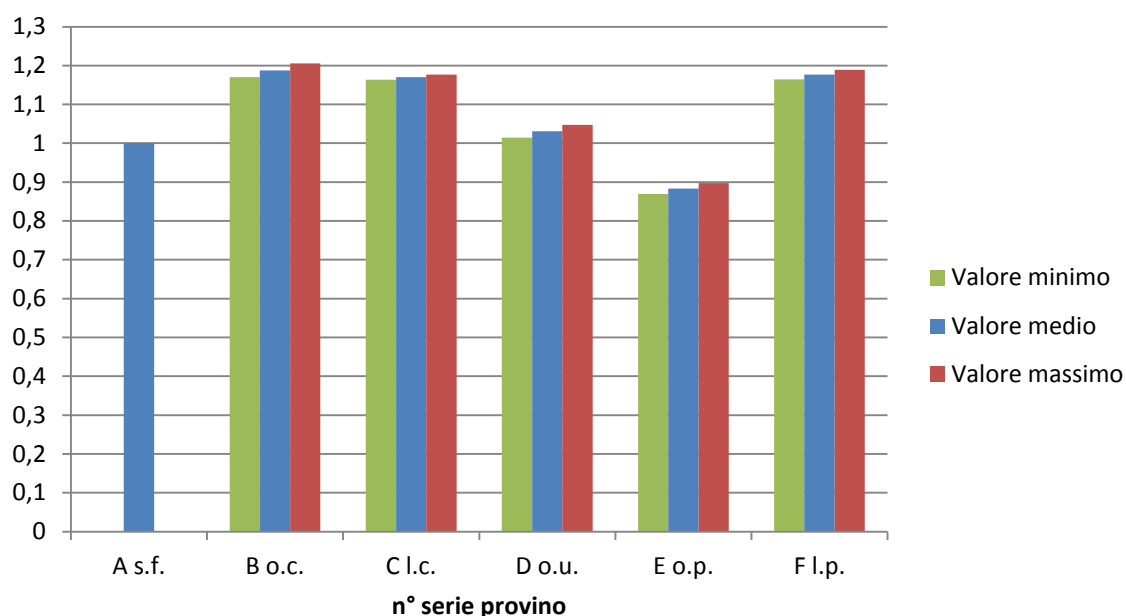


Figura 51 - Variazione freccia dal valore di riferimento

Osservando i provini dopo la prova si può notare che si sono rotti in maniera diversa: i provini delle serie A, B, C, D ed F presentano zone più o meno ampie di delaminazione prima della rottura finale mentre la serie E presenta una netta rottura a taglio di tutte le fibre del laminato. Inoltre i provini A1, A3, A6, D1 e D2 risultano delaminati ma ancora integri, ovvero non spezzati in due parti come accaduto a tutti gli altri.



Figura 52 - Rotture provini a seguito della prova di flessione a 3 punti

5.2 Densità di frattura nei provini in unidirezionale (UD)

L'obiettivo principale dei test di trazione sui provini non strumentati era di verificare l'insorgere e lo svilupparsi di fratture al loro interno al fine di poter calcolare la densità di frattura.

La densità di frattura è definita come il numero di fratture trasversali per unità di lunghezza lungo la direzione del carico. Questo parametro sarà poi usato per correlare la presenza di difetti visivi al segnale rilevato dall'FBG in modo da poter usare quest'ultimo per una diagnosi dei difetti interni ad un componente.

La particolare stratificazione con cui sono stati realizzati i provini consente di avere una certa resistenza a trazione garantita dai due strati esterni a 0° e, in minima parte, dalla resistenza della resina epossidica presente nei 3 strati centrali a 90° . Nel contempo, questa conformazione determina una struttura interna scarsamente resistente a trazione e soggetta al formarsi di fratture trasversali che si propagano lungo tutti e tre gli strati a 90° .

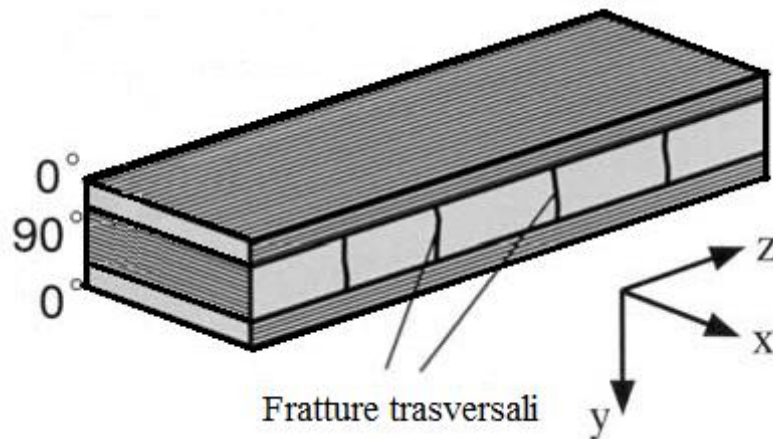


Figura 53 - Schema provino in UD ed esempi di fratture trasversali

Ad ogni step di applicazione del carico il provino è stato smontato dalla pressa e, tramite analisi al microscopio, sono state contate le fratture presenti su entrambe le superfici laterali.

Il valore medio delle due rilevazioni è stato utilizzato per calcolare la densità di frattura, per la quale si è considerata una lunghezza utile di 6,5 cm, pari alla distanza tra gli afferraggi della pressa. Al di fuori di questa zona sono state rilevate qualche frattura in procinto alla rottura dei provini.

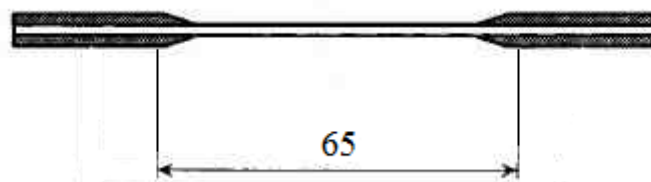


Figura 54 - Lunghezza utile per il calcolo della densità di frattura

Le analisi al microscopio sono state inizialmente effettuate ogni 2 kN, poi al sopraggiungere di un numero rilevante di cricche, sono state effettuate ogni kN. Le prime prove sono state eseguite a partire da 4kN poi, data la non presenza di fratture, da 6 kN ed infine da 8kN.

Nella figura seguente è mostrato l'andamento della densità di frattura in funzione della tensione applicata.

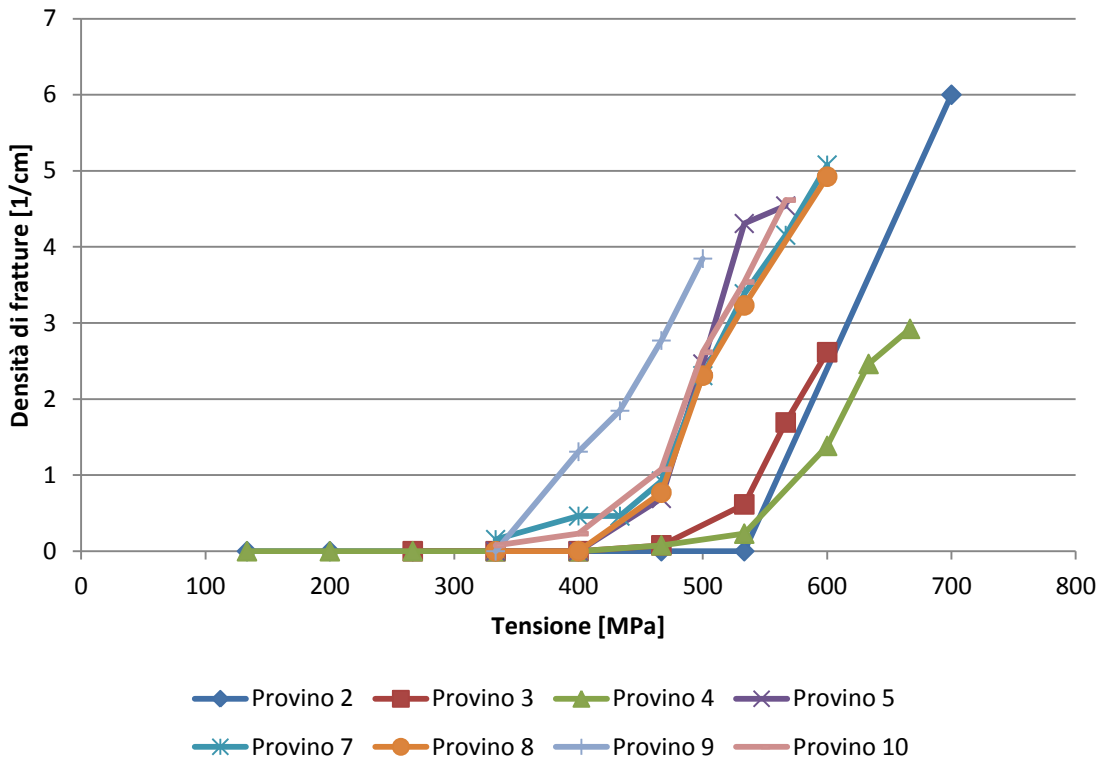


Figura 55 - Densità di frattura provini in UD

Dal grafico si può chiaramente notare un andamento crescente del numero di fratture all'aumentare del carico. Inoltre si può osservare che, per ogni provino, non compaiono fratture fino ad una tensione di circa 350 MPa. Questo permette di ritenere che fino a circa il 50% del carico di rottura il materiale sia intatto, salvo poi, presentare difetti via via crescenti quando si supera questo valore di soglia. Occorre precisare che non sempre nello step tra un carico e il successivo si è passati da contare 0 fratture a contarne 1, ma spesso ad un carico, ad esempio di 12 kN, non si notavano cricche mentre alla successiva analisi a 14 kN se ne contavano già 3-4.

5.2.1 Analisi al microscopio

In questa sezione vengono mostrate alcune micrografie dei provini in UD. In figura 56 è mostrato un provino non ancora sottoposto ai test di trazione e quindi privo di difetti strutturali.

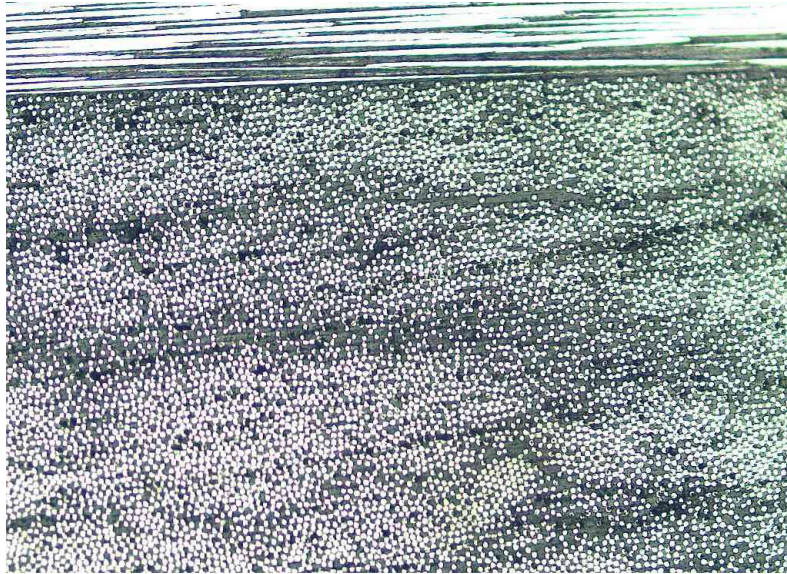


Figura 56 - Ingrandimento 10X di un provino in UD non danneggiato

Si può chiaramente notare l'interfaccia tra lo strato delle fibre a 0° (in alto) e quelli a 90° . Nello strato in alto è possibile vedere le fibre longitudinali che corrono per l'intera lunghezza del provino mentre negli strati a 90° si vedono le singole fibre all'interno della matrice. Si possono notare anche zone in cui vi è una maggior presenza di resina e altre in cui il rapporto fibre/matrice è molto più elevato. Questo è dovuto al fatto che durante il processo di cura la resina si muove all'interno del laminato.

In figura 57 è possibile osservare come si presenta un frattura trasversale al microscopio.

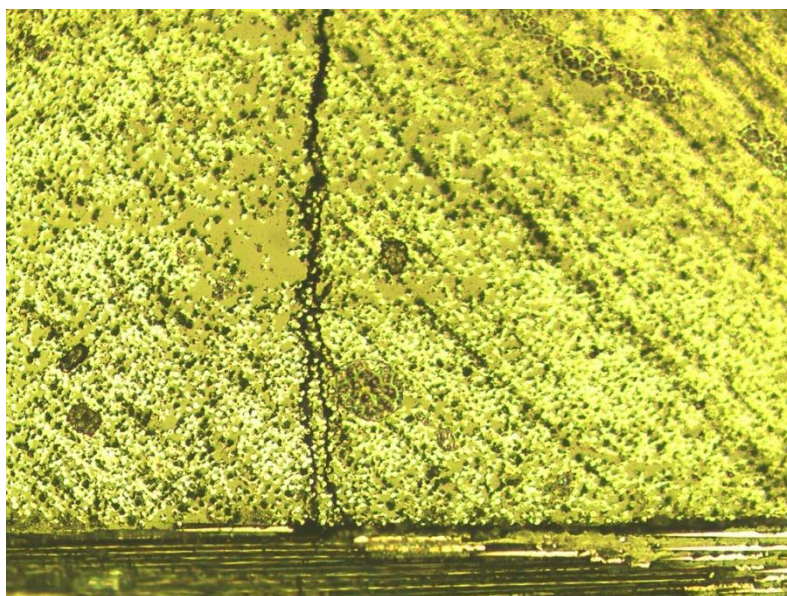


Figura 57 - Ingrandimento 10X di una frattura trasversale

La frattura appare come una linea scura, che indica quindi la presenza di molta resina, che attraversa tutti gli strati a 90° e termina all'interfaccia tra le fibre a 0° e quelle a 90° . Gli strati a 0° resistono decisamente di più allo sforzo di trazione avendo le fibre orientate nella stessa direzione di applicazione del carico. Affinché la frattura si propaghi anche nello strato a 0° , le fibre dovrebbero essere strappate, ma questo richiederebbe forze decisamente elevate che non possono essere raggiunte perché il provino, per la struttura che ha, giunge a rottura ben prima.

Nella parte inferiore della figura è possibile notare anche un inizio di delaminazione all'interfaccia tra le fibre a 0° e quelle a 90° .

In figura 58 è mostrato un ingrandimento di una frattura trasversale.

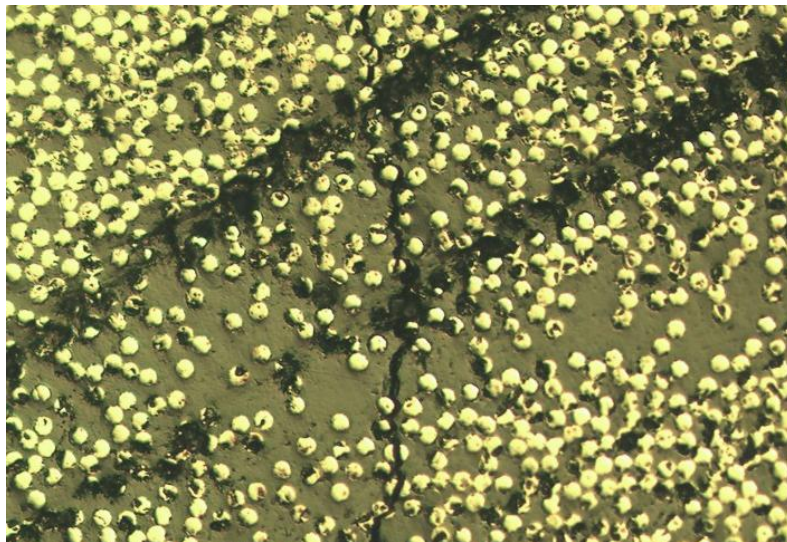


Figura 58 - Ingrandimento 20X di una frattura trasversale

In figura 59 è mostrato un provino dopo la rottura.

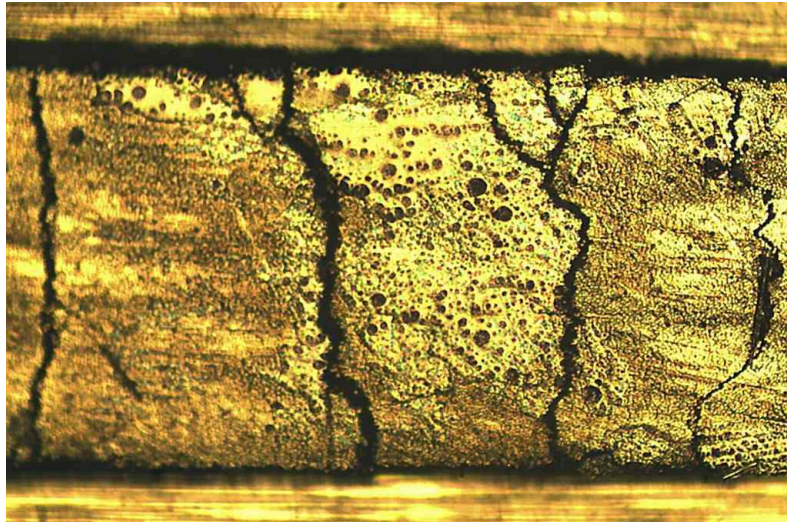


Figura 59 - Fratture trasversali e delaminazione all'interfaccia delle fibre 0°/90° alla rottura del provino

5.3 Analisi degli spettri del provino in UD

5.3.1 Analisi degli spettri a riposo

Prima di iniziare la prova di trazione e dopo certi step di carico sono stati registrati gli spettri in condizioni di deformazione nulla. Nelle immagini seguenti sono raffigurati gli spettri misurati.

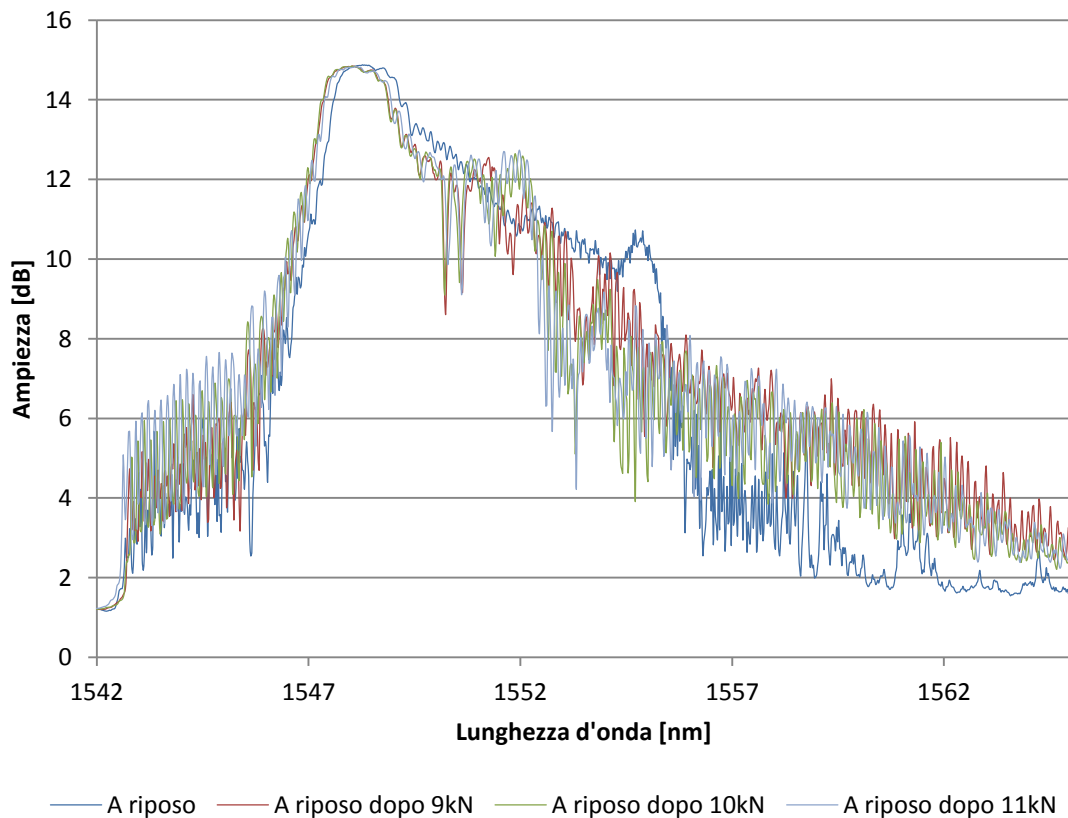


Figura 60 - Spettri a riposo provino in UD

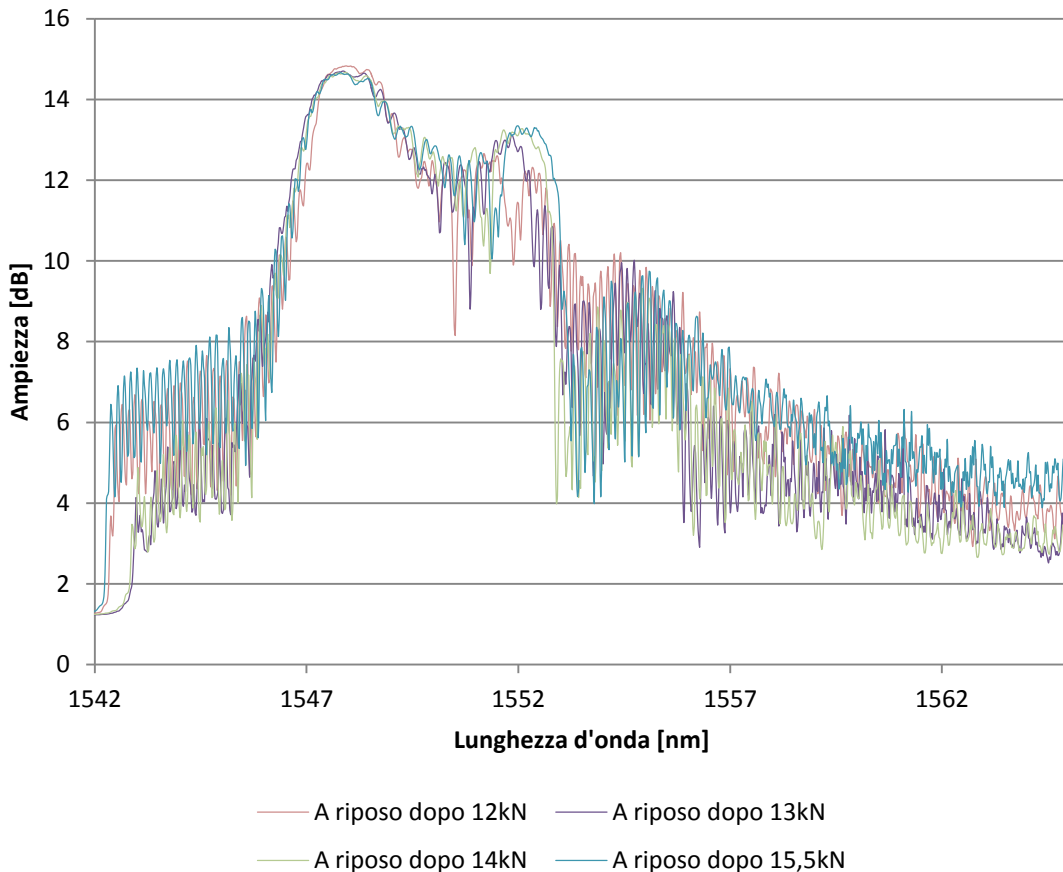


Figura 61 - Spettri a riposo provini in UD

Dai grafici è possibile notare che lo spettro rilevato dopo i vari step di carico è molto simile a quello a riposo, ovvero quello misurato prima di iniziare la prova di trazione. All'aumentare dei carichi la forma dello spettro non varia di molto anche se risulta via via sempre più distorto ai lati della campana principale. Negli spettri misurati dopo gli step di carico a 13, 14 e 15,5 kN, è visibile anche una campana secondaria di ampiezza di poco inferiore a quella principale. Dall'analisi microstrutturale effettuata sui provini non strumentati è possibile identificare questo intervallo di carico come quello in cui si presentano le prime fratture.

Dopo il successivo step di carico non è più stato possibile rilevare lo spettro a riposo probabilmente a causa del danneggiamento o della rottura del reticolo dell'FBG. Il fatto che questo accada esattamente appena si manifestano le prime fratture interne al provino è un indizio in più per affermare che è proprio la loro presenza a determinare un danneggiamento

della fibra. Si tenga inoltre presente che la fibra ottica è stata posta all'interfaccia tra le fibre a 0° e a 90° proprio per risultare sensibile alla presenza di fratture. Il contatto, da una parte, con le fibre a 0° e, dall'altra, con le fibre a 90° , determina tensioni non esclusivamente lungo una direzione, a causa proprio del tipo di stratificazione. Tensioni di questo tipo possono portare alla situazione in esame.

5.3.2 Analisi degli spettri sotto carico

Le figura seguenti mostrano gli spettri sotto carico registrati mettendo la pressa in pausa a determinati step di carico.

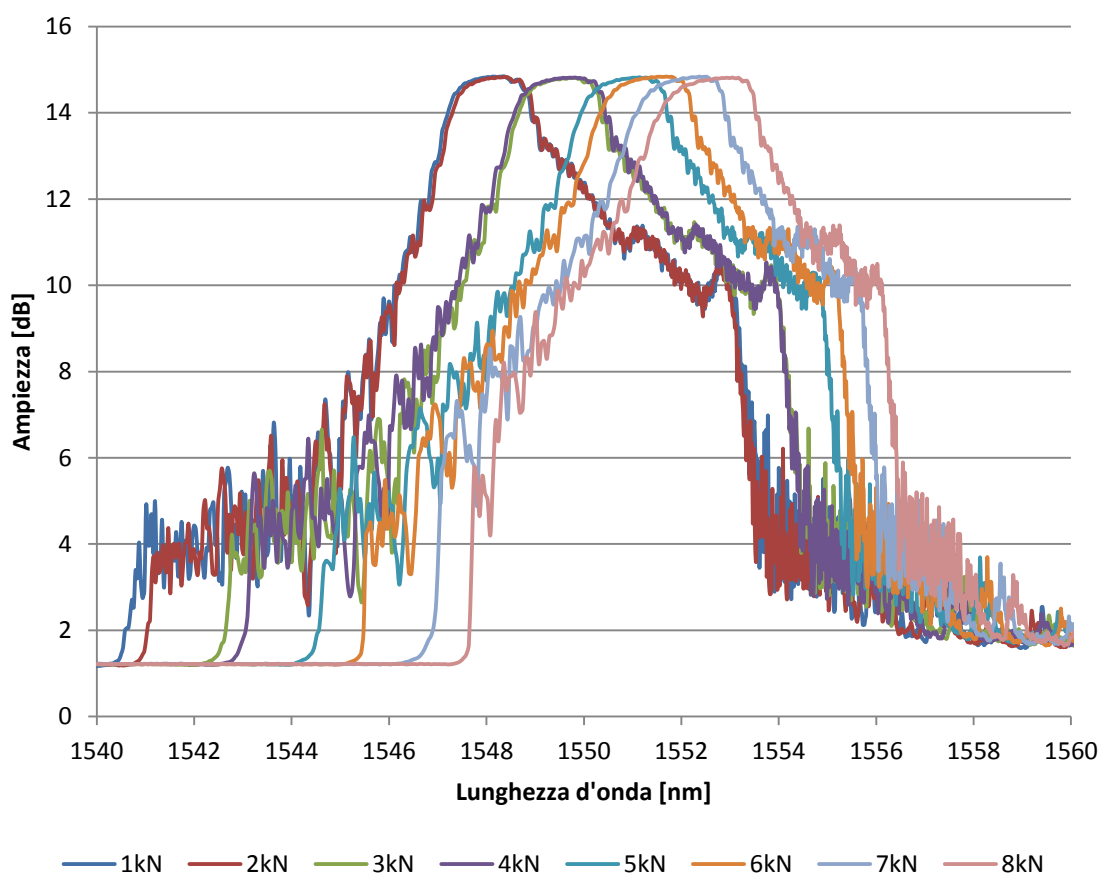


Figura 62 - Spettri sotto carico provini in UD

Come è possibile osservare, fino ad un carico di 8kN la forma degli spettri è molto simile tra loro e analoga a quella a riposo. La campana è ben visibile, non compaiono picchi secondari e, al di fuori della campana, sono presenti piccoli disturbi del segnale.

All'aumentare del carico applicato, la campana si sposta verso lunghezze d'onda maggiori, in accordo con le ipotesi teoriche secondo cui una deformazione positiva, relativa ad un carico di trazione, porta ad un aumento della lunghezza d'onda di Bragg. Visivamente l'incremento sembra essere abbastanza lineare in funzione del carico negli spettri delle prove tra i 5 e gli 8 kN.

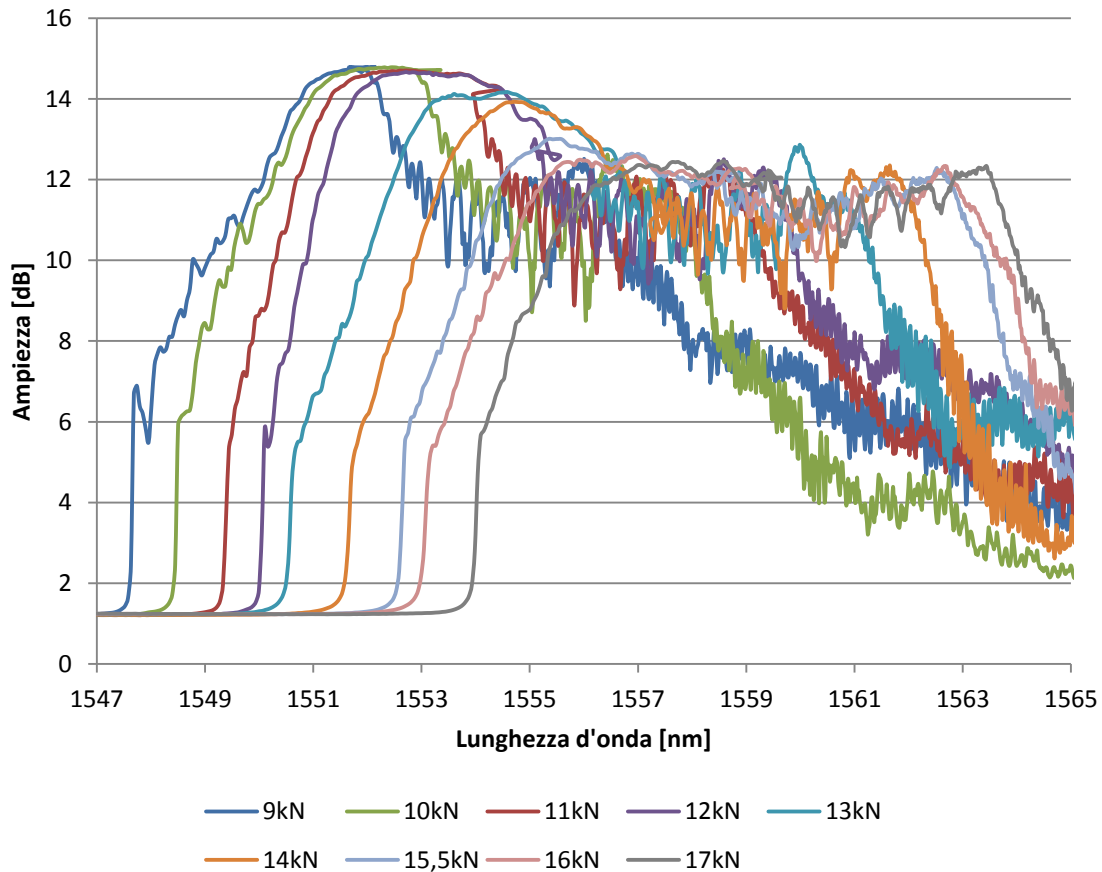
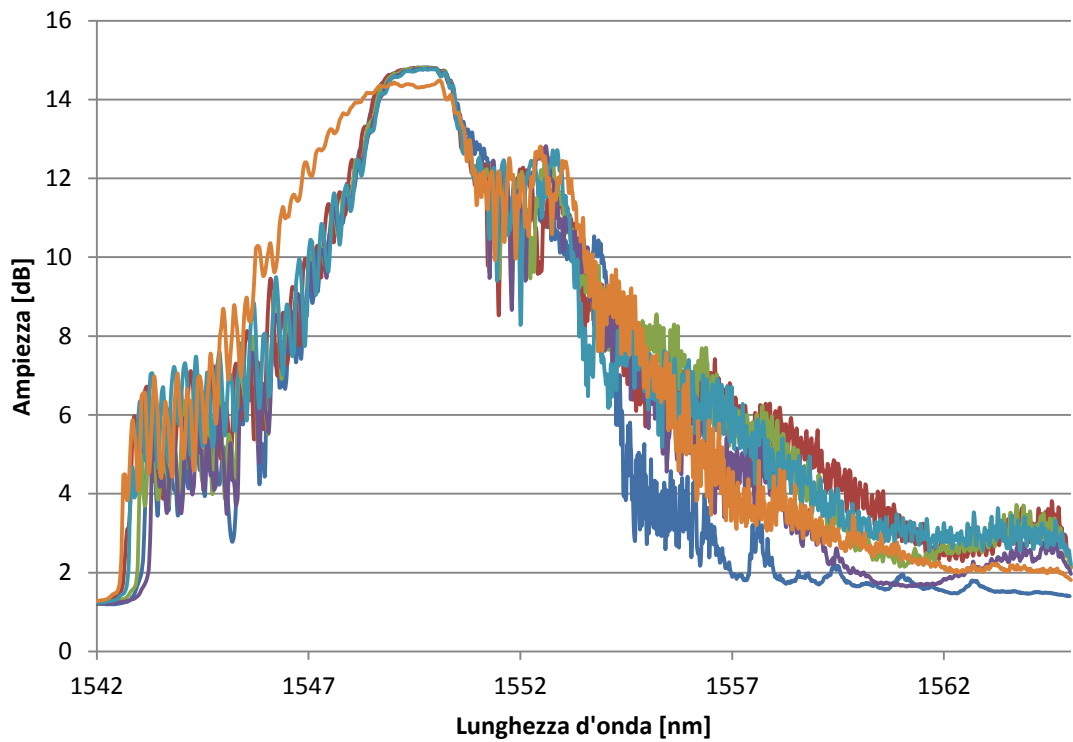


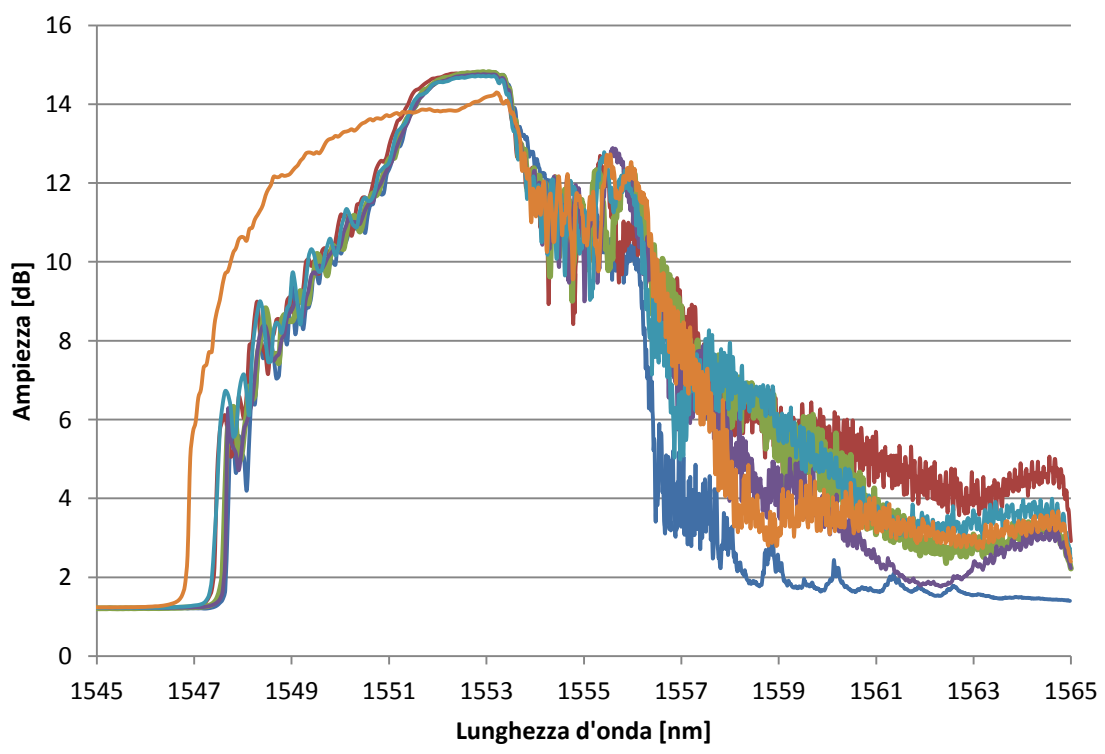
Figura 63 - Spettri sotto carico provini in UD

Aumentando il carico la campana è via via sempre meno distinguibile fino ad arrivare, per carichi superiori ai 14 kN, a non essere più visibile per via del segnale molto disturbato.

Nelle successive figure vengono mostrati gli spettri, relativi ad un determinato carico, registrati nelle fasi di carico successive allo scarico necessario per misurare lo spettro a riposo.



— 4kN — 4kN dopo 9 — 4kN dopo 10
 — 4kN dopo 11 — 4kN dopo 12 — 4kN dopo 13



— 8kN — 8kN dopo 9 — 8kN dopo 10
 — 8kN dopo 11 — 8kN dopo 12 — 8kN dopo 13

Figura 64 - Spettri provini in UD dopo le fasi di scarico e carico

Come è possibile osservare la forma e l'ampiezza della campana, a seguito delle successive fasi di carico e scarico, rimane pressoché uguale. Da uno step al successivo si notano piccoli aumenti del disturbo ai lati della campana. Nell'ultimo step rappresentato si nota una forma più allargata e disturbata della campana dovuto, come detto in precedenza, al manifestarsi delle prime fratture.

5.4 Analisi della microstruttura dei provini in PW

La struttura dei provini in tessuto è molto diversa e più complessa rispetto a quella dei provini in unidirezionale. Nelle figure successive sono mostrate alcune micrografie dei provini in PW nelle quali si possono notare chiaramente le differenze tra i due materiali.

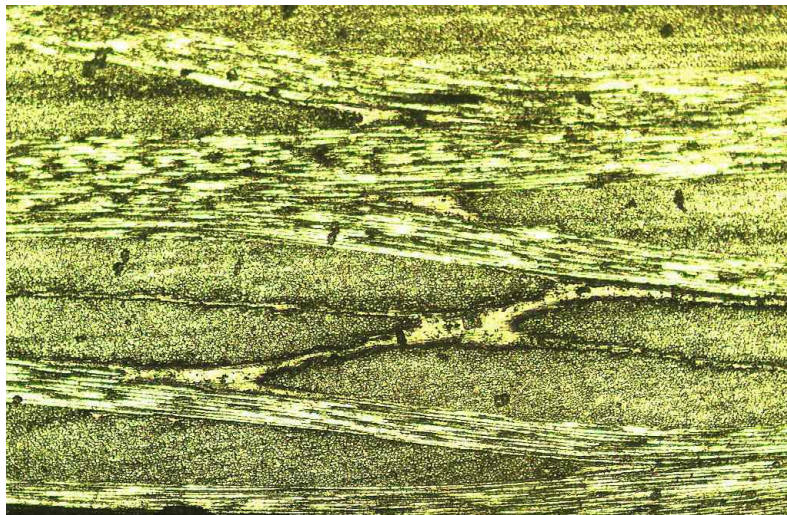


Figura 65 - Ingrandimento 10X di un provino in PW



Figura 66 - Micrografia 10X di un provino in PW

Le foto mostrano la struttura più “disordinata”, tipica di un plain weave, in cui le fibre a 0° e 90° sono intrecciate. Si possono infatti notare le fibre a 0° avere un andamento ondulato lungo il provino. Questo perché si trovano, alternativamente, sopra e sotto alle fibre a 90° . Si possono anche osservare delle particolari zone in cui è presente una predominanza di resina. Durante le analisi al microscopio, dopo i vari step di carico, non sono state osservate variazioni rilevanti nella microstruttura del laminto.

La particolare struttura di questo materiale sembra portare ad una sostanziale impossibilità nel correlare il comportamento dello spettro riflesso dal sensore FBG alla eventuale presenza di difetti nel materiale e al loro sviluppo. L'analisi dello spettro si propone quindi di ipotizzare una correlazione tra le due cose, come è stato fatto per il provino in UD.

Nella figura 67 si può osservare una frattura osservata in un provino dopo la rottura.

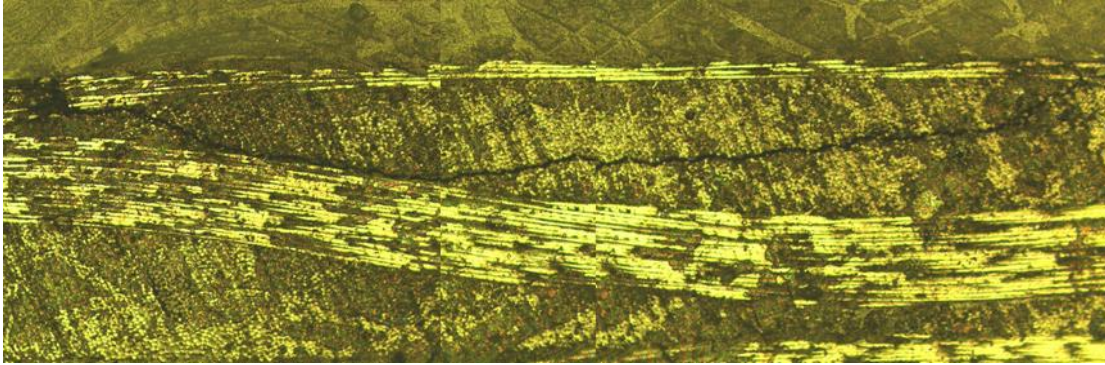


Figura 67 - Frattura interna di un provino in PW dopo la rottura

5.5 Caratteristica meccanica dei provini in PW

Data l'impossibilità di correlare il danneggiamento con il numero di fratture presenti all'interno dei provini, si è deciso di ottenere la caratteristica meccanica al fine di analizzare il comportamento del materiale.

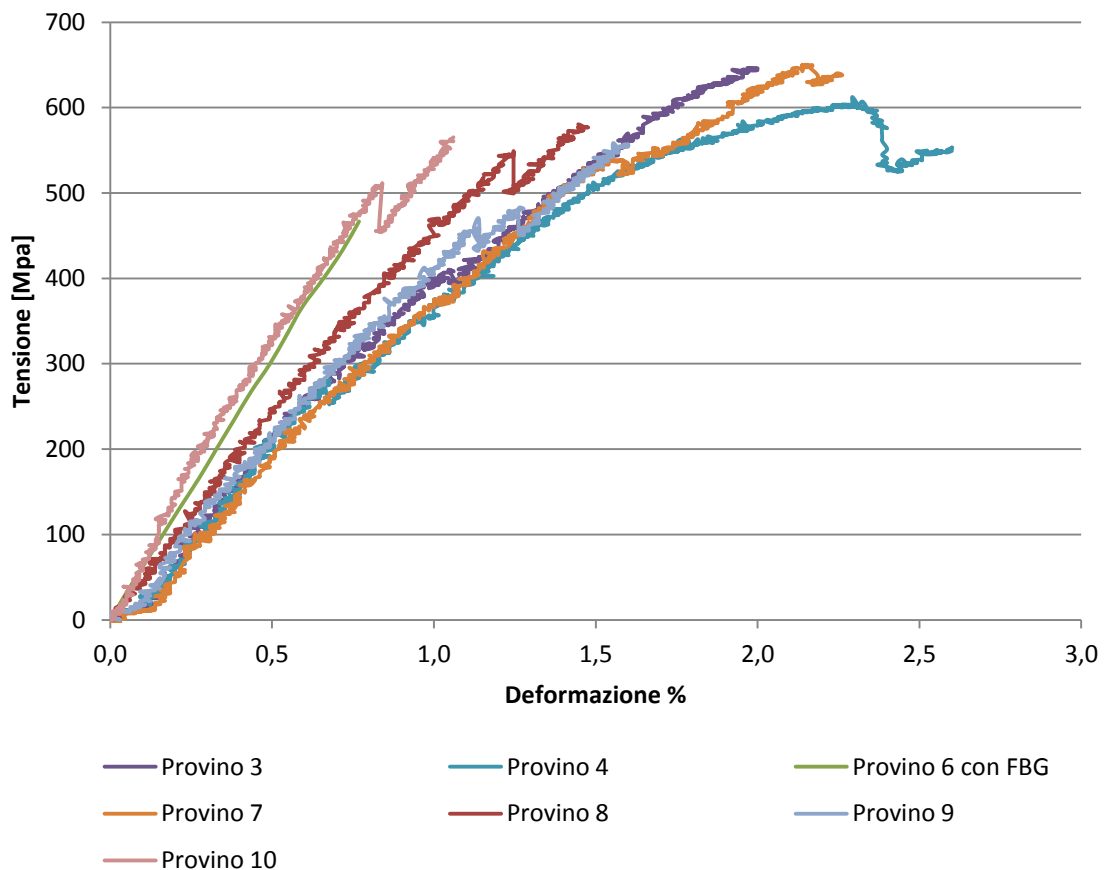


Figura 68 - Caratteristica meccanica provini in PW

I valori graficati sono stati ottenuti dai file CSV forniti dal software di controllo della pressa mentre i valori relativi al provino con fibra sono stati

presi dalle misure dell'estensimetro. Questo spiega le piccole differenze tra le curve: innanzitutto, anche l'estensimetro può registrare deformazioni non del tutto corrette ma i valori forniti dal software della pressa sono sicuramente meno attendibili. Questo perché tali punti sono frutto di misurazioni effettuate sugli afferraggi che sono soggetti a tutti i giochi presenti nella macchina con la conseguenza di avere letture di allungamento meno precise. Ovviamente, i punti che compongono la curva relativa al provino con FBG, sono molti di meno, rispetto agli altri (la frequenza di campionamento della pressa era impostata a 5 Hz); inoltre, il provino con FBG, non è stato portato a rottura.

Alla luce di questi fatti, le caratteristiche meccaniche dei provini, risultano comunque molto simili e in linea con le caratteristiche del materiale: i materiali compositi hanno un comportamento quasi esclusivamente elastico fino a rottura.

5.6 Analisi degli spettri del provino in PW

Prima di iniziare i test di trazione sul provino sono stati verificati, per mezzo dell'interrogatore, entrambi i capi della fibra contenente il sensore FBG. Gli spettri misurati risultano diversi, ma quasi complementari, e presentano disturbi ai lati della campana principale. Questo potrebbe significare che il reticolo di Bragg si è danneggiato, o probabilmente rotto, nella fase di embedding o durante il ciclo di cura ma riesce comunque a riflettere parte del segnale che gli viene mandato. La presenza dei disturbi, invece, può essere dovuta a zone in cui la fibra ottica risulta danneggiata.

Nell'analisi seguente si è pertanto deciso di registrare gli spettri di entrambi i capi del sensore.

5.6.1 Analisi degli spettri a riposo

Con le stesse modalità utilizzate per il provino in UD, sono stati registrati gli spettri a riposo del provino in PW. Nelle immagini seguenti sono raffigurati gli spettri misurati.

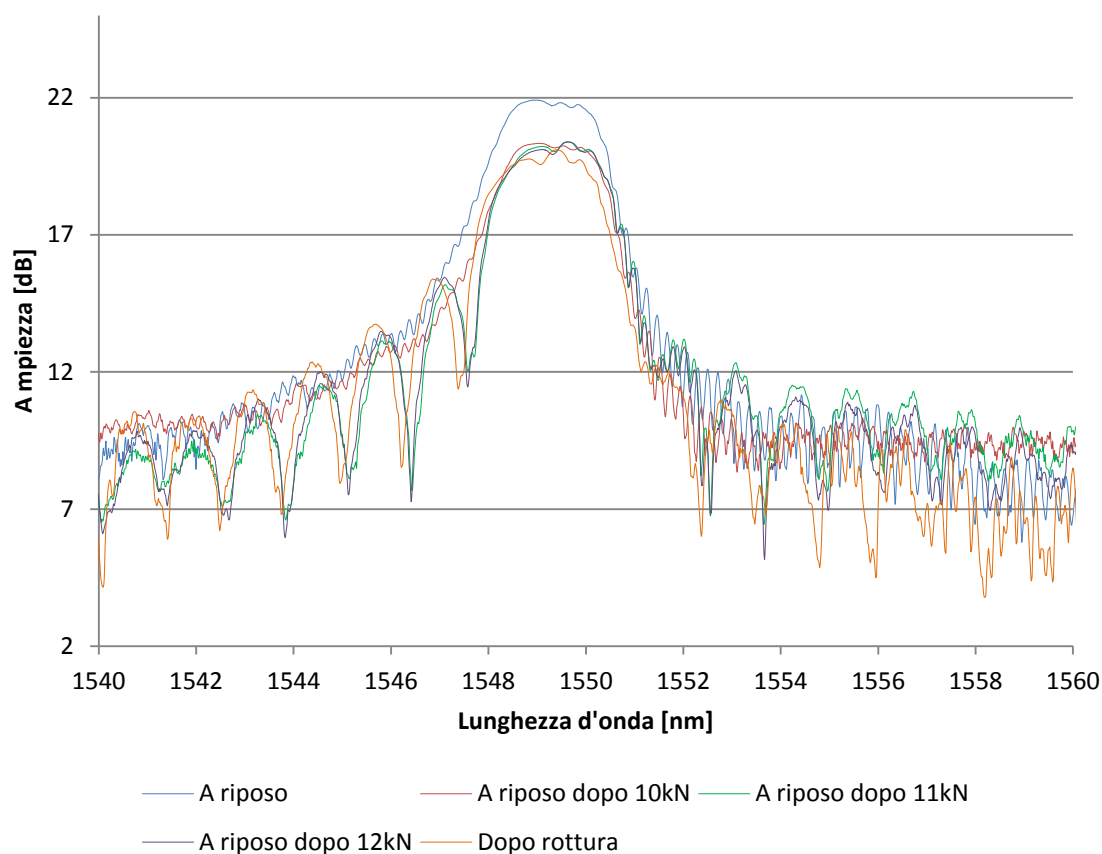


Figura 69 - Spettri a riposo del provino in PW misurati dall'estremo 1 dell'FBG

Dai grafici è possibile notare che lo spettro rilevato dopo lo step di carico di 10 kN è molto simile a quello a riposo, ovvero quello misurato prima di iniziare la prova di trazione. L'unica differenza che si nota chiaramente è che lo spettro dopo i 10 kN, così come i successivi, presenta un'ampiezza massima della campana inferiore.

All'aumentare dei carichi la forma dello spettro non varia di molto anche se risulta più distorto presentando tante piccole campane ai lati di quella principale.

Rispetto agli spettri ottenuti per il provino in UD, quelli in PW presentano ampiezze dei picchi superiori.

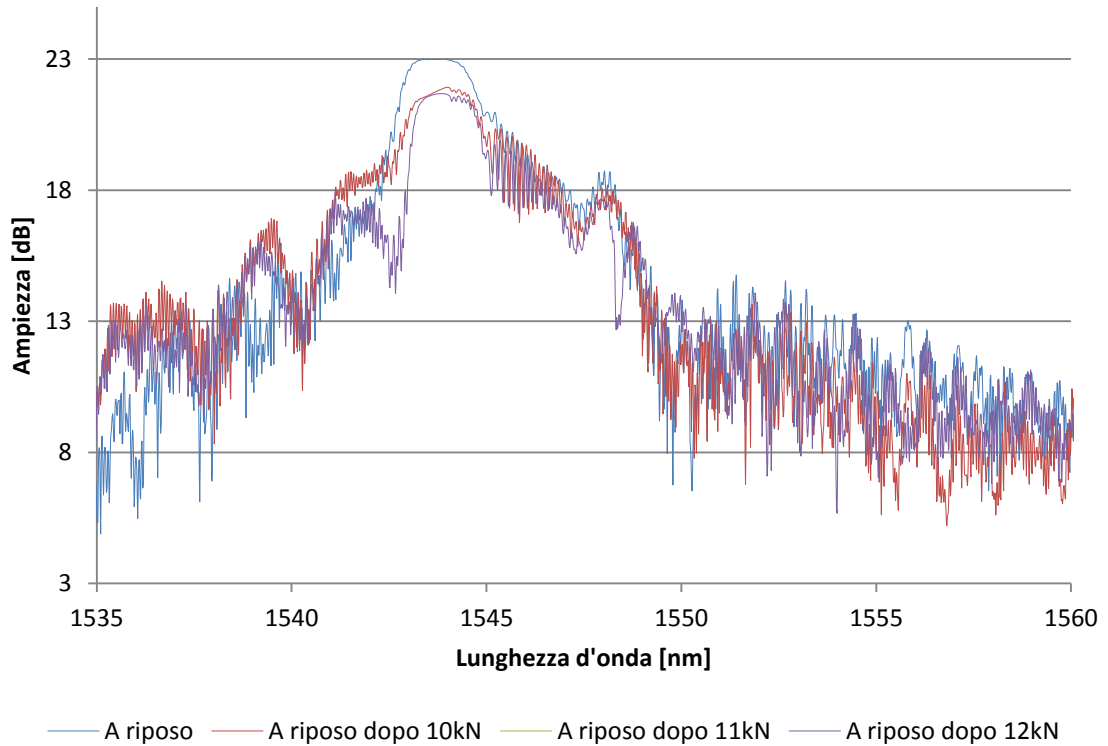


Figura 70 - Spettri a riposo del provino in PW misurati dall'estremo 2 dell'FBG

5.6.2 Analisi degli spettri sotto carico

Nelle figure seguenti sono mostrati gli spettri rilevati ai vari step di carico.

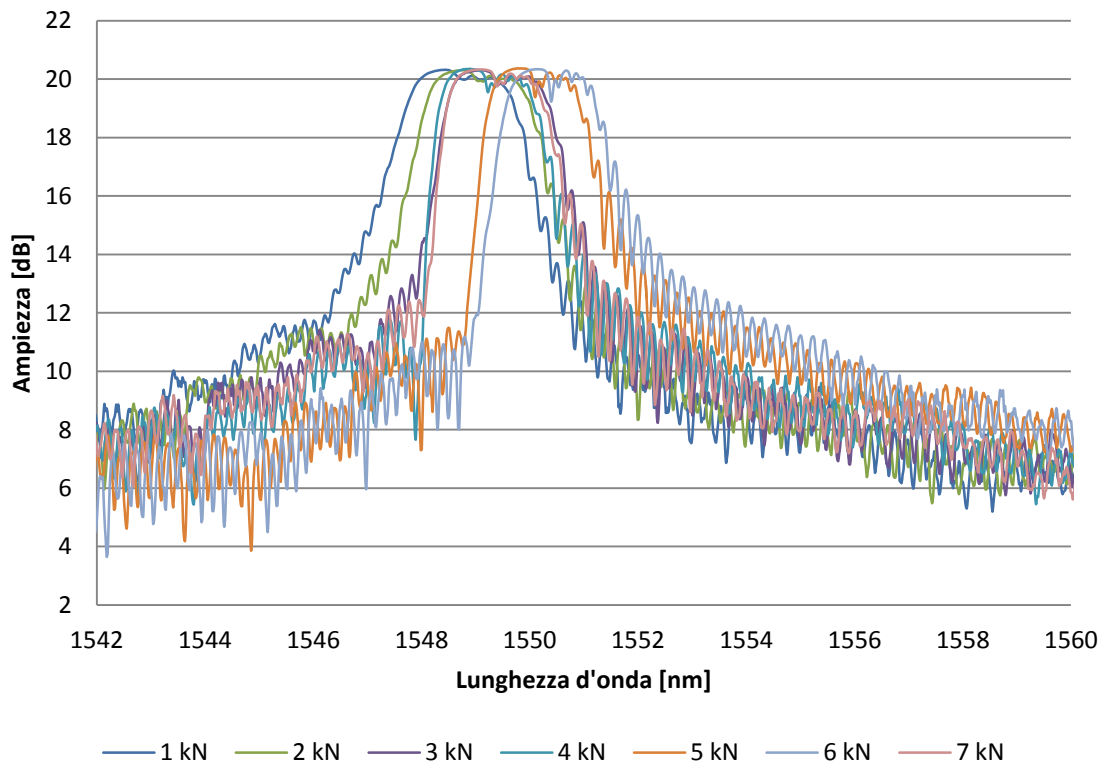


Figura 71 - Spettri sotto carico del provino in PW misurati dall'estremo 1

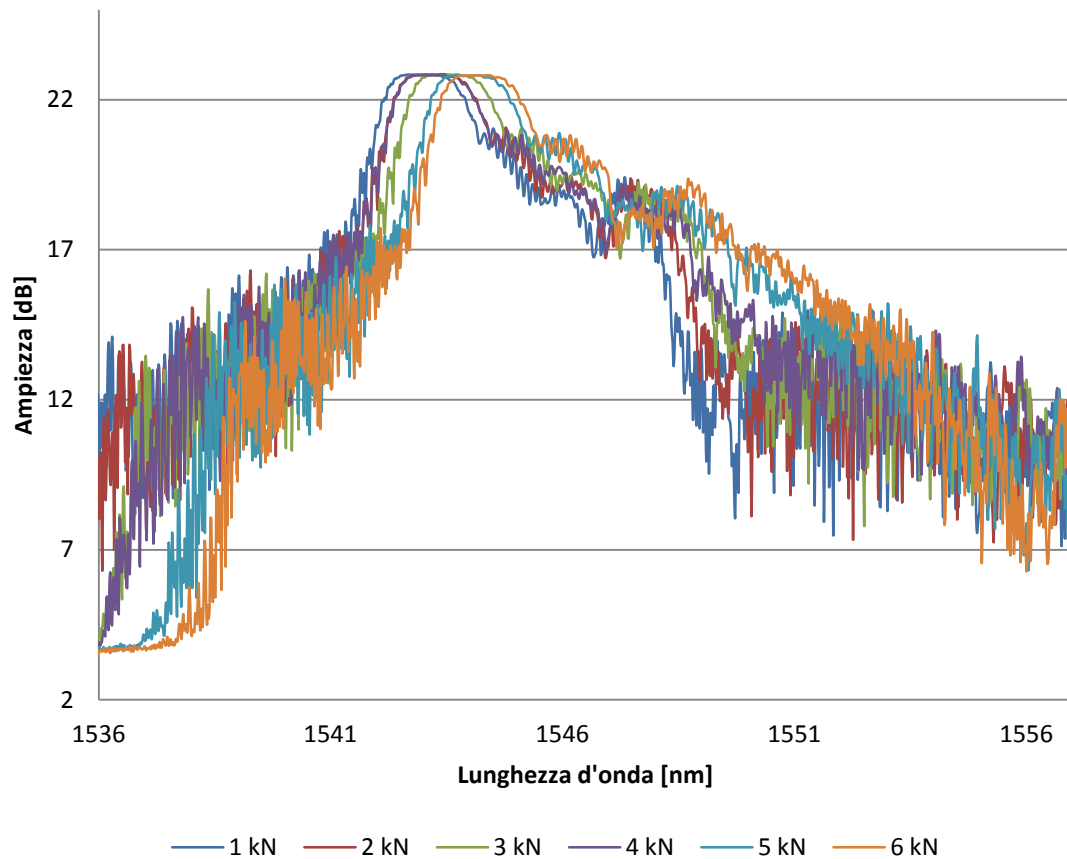


Figura 72 - Spettri sotto carico del provino in PW misurati dall'estremo 2

Durante l'applicazione del carico, gli spettri registrati mostrano un aspetto leggermente diverso da quello mostrato a riposo. La campana risulta leggermente più stretta e con un valore di picco inferiore. La forma dello spettro si mantiene molto simile all'aumentare del carico con la campana che si sposta verso lunghezze d'onda maggiori. Si possono osservare anche disturbi via via crescenti ai lati della campana.

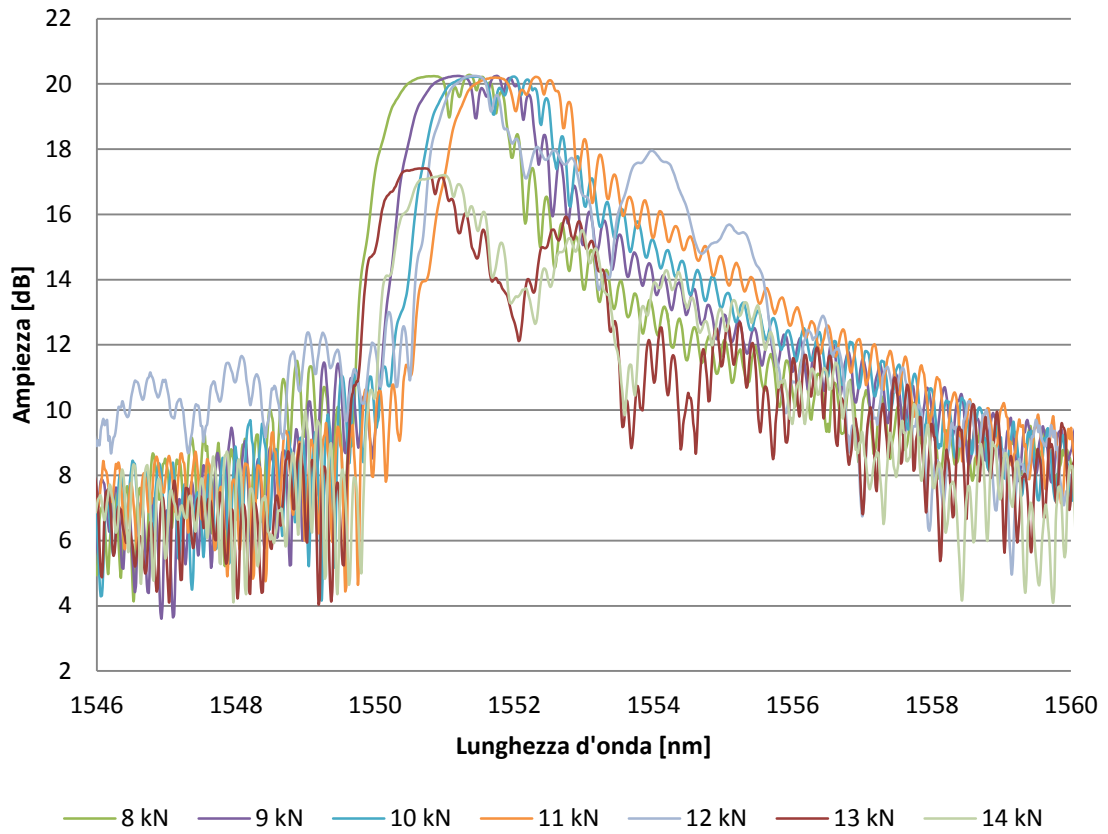


Figura 73 - Spettri sotto carico del provino in PW misurati dall'estremo 1

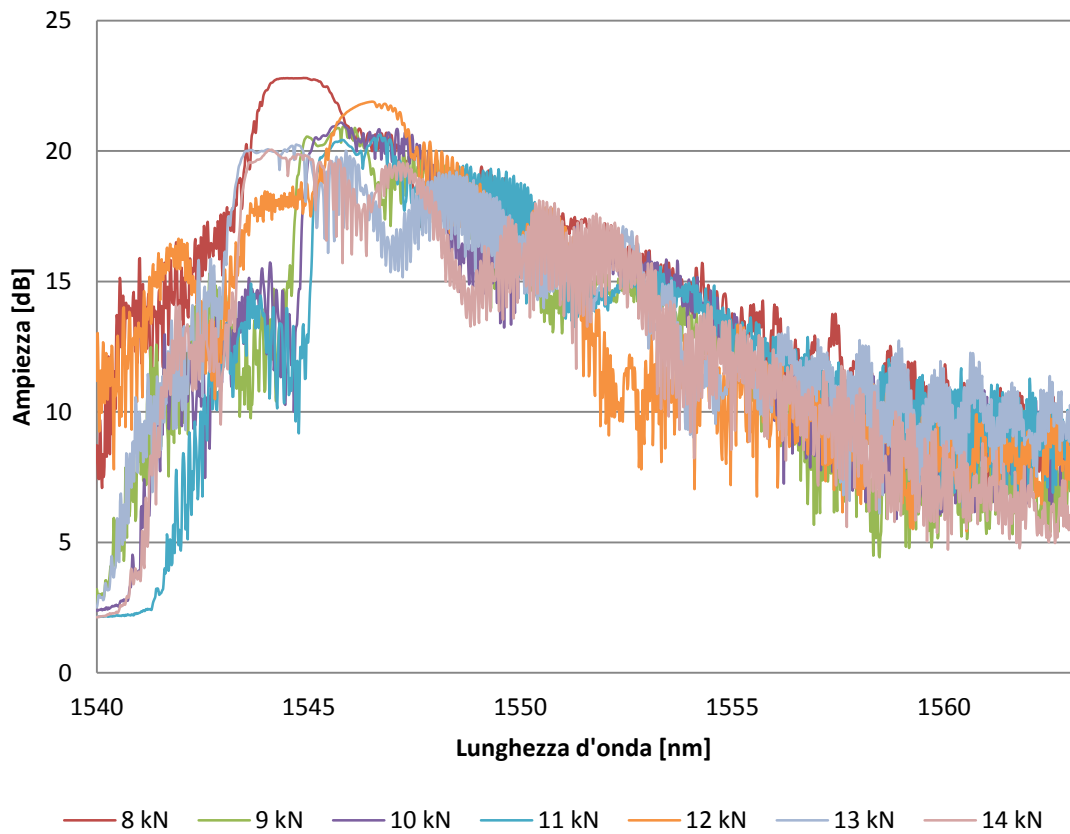


Figura 74 - Spettri sotto carico del provino in PW misurati dall'estremo 2

A partire da 8 kN, lo spettro risulta sempre più disturbato soprattutto sul lato sinistro della campana. Da 12 kN gli spettri cominciano a deformarsi presentando delle particolari ondulazioni a sinistra e a destra della campana. È possibile osservare che tra gli 11 kN e i 12 kN sia lo spettro a riposo che quello sotto carico avvertono un cambiamento.

Nelle ultime due rilevazioni a 13 e 14 kN lo spettro si presenta molto disturbato con la campana che non è quasi più distinguibile. Questo può essere dovuto al fatto che il reticolo è talmente deformato da non riflettere quasi più il segnale.

5.7 Risposta del sensore alla deformazione

In questo paragrafo viene analizzato il funzionamento dei sensori FBG come estensimetri. È noto che gli FBG, di fatto, sono estensimetri ottici, ma è stato ritenuto utile valutarne l'efficacia, avendo a disposizione i dati forniti da un estensimetro elettrico. Inoltre, la possibilità di avere due materiali diversi, ha permesso un confronto del comportamento delle due fibre ottiche inserite al loro interno. Nella tabella seguente, sono riassunte le lunghezze d'onda di Bragg misurate a riposo λ_0 per le due fibre ottiche. E' stata poi letta dagli spettri la lunghezza d'onda di Bragg ai vari carichi e, tramite la deformazione ε fornita dall'estensimetro e la nota relazione:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = C_S \cdot \varepsilon$$

è stato calcolato C_S , ovvero lo Strain Coefficient, qui chiamato Gage Factor, in analogia al gage factor dell'estensimetro. Infine sono stati calcolati il valore medio del Gage Factor e la variazione percentuale di ogni valore da quello medio.

Provino	Carico [kN]	λ_0 [nm]	λ_{picco} [nm]	Gage factor	Gage factor medio	Variazione %
UD	3	1548,00	1549,84	0,688	0,730	-4,15
	4	1548,00	1550,34	0,663		-6,67
	5	1548,00	1551,24	0,745		1,58
	6	1548,00	1551,79	0,735		0,54
	7	1548,01	1552,47	0,747		1,73
	8	1548,01	1553,16	0,760		3,07
	9	1550,86	1556,11	0,691		-3,81
	10	1550,86	1556,92	0,721		-0,87
	11	1550,86	1558,00	0,773		4,29
	12	1550,70	1558,02	0,730		0,03
	13	1550,84	1559,44	0,772		4,26
PW	2	1548,73	1549,75	0,612	0,668	-5,58
	3	1548,89	1550,65	0,701		3,28
	4	1548,88	1550,97	0,617		-5,10
	5	1548,88	1551,53	0,621		-4,69
	6	1548,88	1551,99	0,612		-5,59
	7	1548,88	1552,78	0,660		-0,79
	8	1548,74	1553,47	0,704		3,60
	9	1548,74	1554,15	0,708		4,03
	10	1548,74	1554,75	0,712		4,44
	11	1548,81	1555,57	0,735		6,73
	12	1548,94	1556,12	0,704		3,60
	13	1548,74	1556,43	0,691		2,33
	14	1548,74	1555,95	0,605		-6,28

Tabella 8 - Gage Factor delle fibre ottiche

In entrambi i casi il Gage Factor ha variazioni percentuali dal valore medio molto contenute con differenze massime del 6-7%. Le variazioni più ampie possono essere dovute a piccoli errori di lettura del valore di picco della lunghezza d'onda.

I dati riportati mostrano che gli FBG si comportano molto bene come estensimetri, consentendo quindi un utilizzo pratico dove fossero più appetibili dei classici estensimetri.

6. Conclusioni

Gli obiettivi di questa tesi sono quelli di verificare il funzionamento e l'affidabilità dei sensori FBG chirped nel misurare la risposta sotto carico e di valutare il danneggiamento interno ad un laminato CFRP.

Per raggiungere tali scopi sono stati realizzati diversi provini, strumentati e non, utilizzando due pre-preg diversi: un unidirezionale (UD) e un tessuto plain weave (PW). Con una parte dei provini non strumentati sono state effettuate prove con la finalità di verificare l'invasività e l'effetto delle fibre ottiche sulle caratteristiche meccaniche del materiale e di analizzare la microstruttura dei laminati per osservare l'insorgere e lo svilupparsi di difetti e fratture interne in modo da poter in seguito correlare il segnale rilevato dal sensore FBG con il danneggiamento.

I risultati ottenuti dalle prove di flessione a 3 punti hanno mostrato un impatto minimo, dell'ordine del 5-7%, sul carico massimo e benefici sulla freccia massima, con incrementi dell'ordine del 18%, nei provini aventi la fibra ottica orientata lungo il loro asse. I provini con la fibra posizionata ortogonalmente all'asse degli stessi hanno presentato effetti negativi molto più rilevanti sui precedenti parametri.

La struttura e la sequenza di laminazione dei provini in UD ha permesso di poter osservare semplicemente la presenza e l'evoluzione di fratture all'interno del materiale. I dati raccolti hanno consentito di correlare la densità di frattura con la tensione applicata. Questo non è stato possibile farlo con i provini in PW in quanto, per via di una struttura più complessa, intrecciata e irregolare, non è stato possibile osservare lo svilupparsi di evidenti danni all'aumentare del carico applicato.

Dai test di trazione effettuati sui provini strumentati è stato possibile verificare il comportamento e l'affidabilità dei sensori FBG. In prima analisi dalla misura della lunghezza d'onda di Bragg è possibile ottenere

informazioni relative alla tensione che sopporta e alla deformazione che subisce il sensore, anche se il laminato è danneggiato. Dal calcolo dello Strain Gauge si ha avuto conferma di questa proprietà che candida gli FBG a valida alternativa all'uso degli estensimetri elettrici nella misurazione delle deformazioni.

Non è stato però possibile valutare correttamente il danneggiamento del materiale dall'analisi degli spettri misurati in quanto il segnale presentava troppo rumore. Questo ha anche impedito di sfruttare a pieno le potenzialità degli FBG chirped: non è stato infatti possibile correlare lo spettro con la posizione delle fratture all'interno dei provini. L'analisi dei segnali ha comunque fornito una valutazione qualitativa del danno interno ai laminati: con il presentarsi delle prime fratture si sono infatti osservate variazioni della forma e aumenti dei disturbi negli spettri rilevati sia a riposo e che sotto carico.

Gli aspetti più critici che sono stati incontrati e che andranno migliorati riguardano la rimozione del cladding in kapton dal sensore FBG e la presenza di rumore nel segnale. In merito al primo punto, sarebbe necessario avere processi più affidabili, semplici e veloci che riducano anche il rischio di rottura della fibra, che privata del suo rivestimento risulta molto più fragile. Per ridurre i disturbi occorre cercare soluzioni per garantire una migliore protezione della fibra ottica nelle zone in cui esce dal laminato e per posizionarla al meglio nel sacco a vuoto onde evitare che il sovrapporsi dei suoi avvolgimenti possano creare delle deformazioni permanenti in seguito all'applicazione della pressione di cura.

Sicuramente con più esperienza, con la possibilità di eseguire più prove e con una maggiore cura nelle procedure di embedding del sensore FBG, si possono ottenere spettri più puliti e facili da interpretare anche in ottica futura di sistemi automatizzati di interrogazione e diagnostica.

7. Bibliografia

- [1] I. Herszberg, M. K. Bannister, H. C. H. Li, R. S. Thomson, C. White - Structural Health Monitoring for advanced composite structures - Cooperative Research Centre for Advanced Composite Structures Limited;
- [2] R. P. Eukema - Embedding Technologies of FBG Sensors in Composites: Technologies, Applications and Practical Use - National Aerospace Laboratory NLR, Structures Testing & Evaluation Department (AVTH);
- [3] Chang FK, editor - Structural health monitoring - Lancaster: DESTEchnol Publications;
- [4] V. Giurgiutiu, C. Soutis - Enhanced Composites Integrity through Structural Health Monitoring - Appl Compos Mater (2012);
- [5] Raman Kashyap - Fiber Bragg Gratings - Academic Press;
- [6] Govind P. Agrawal - Fiber Optic Communication Systems, 3^a ed. - New York, Wiley-Interscience;
- [7] A. Macella, A. Licciulli - Fibre ottiche - Università degli studi di Lecce;
- [8] Stefano Chiozzini - Sviluppo di un sistema di monitoraggio dello stato di deformazione di un albero da imbarcazione in materiale composito tramite Reticoli di Bragg in fibra ottica - Tesi di Laurea;
- [9] A. Cusano, G. Breglio, M. Giordano, A. Calabrò, L. Nicolais, A. Cutolo - Fiber Optic Sensing System for Smart Materials and Structures - Department of Electronic and Telecommunications Engineering, University of Naples Federico II;
- [10] B. A. Tahir et al. - Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application - Journal of Optoelectronics and Advanced Material, vol. 8, 2006;

- [11] N.Singh et al. - Fiber Bragg grating writing using phase mask technology -Journal of Scientific and Industrial Research;
- [12] Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka, N. Takeda - Detection of transverse cracks in CFRP laminates using embedded fiber Bragg grating sensor - University of Tokyo;
- [13] Y. Okabe, R. Tsuji, N. Takeda - Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites - University of Tokyo;
- [14] Michael Argelli - Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica - Tesi di Laurea;
- [15] Amina Frozzi - Applicazione di reticoli di Bragg per il monitoraggio della deformazione di strutture in materiali compositi prodotti tramite la tecnologia in autoclave - Tesi di Laurea;
- [16] G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini - Tecnologie e materiali aerospaziali - Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale - Politecnico di Milano;
- [17] S. J. Mihailov - Fiber Bragg grating sensors for harsh environments - Sensors, 2012;
- [18] Y. Wang, B. Han, D.W. Kim, A. Bar-Cohen and P. Joseph. - Integrated measurement technique for curing process-dependent mechanical properties of polymeric materials using Fiber Bragg Grating - Society for Experimental Mechanics;
- [19] R. Hui, M. O'Sullivan - Fiber Optic Measurement Techniques - Elsevier Academic Press;
- [20] S. Yashiro, T. Okabe, N. Takeda. - Damage identification in a holed CFRP laminate using a chirped fiber Bragg grating sensor - University of Tokyo;

- [21] J. Palaniappan, H. Wang, S. L. Ogin, A. Thorne, G. T. Reed, S. C. Tjin - Use of conventional and chirped optical fiber Bragg gratings to detect matrix cracking damage in composite materials - Journal of Physics;
- [22] A. Corigliano - Damage and fracture mechanics techniques for composite structures - Politecnico di Milano;
- [23] SestoSensor - Manuale d'uso dell'interrogatore di sensori FBG;
- [24] Normativa D3039/D3039M – 14;
- [25] www.ribacomposites.it

8. Ringraziamenti

Ce l'ho fatta! Oggi 19 marzo 2015 “festa del papà” questo traguardo non potrei che dedicarlo al mio babbo Mauro che, dopo un periodo non certo facile, questa gioia gli era dovuta. Possa in qualche modo questo mio gesto gratificarlo dei tanti sacrifici che sta facendo. Idem per la mia mamma Monica, a lei va un grazie più speciale perché mi ha sempre sostenuto e incoraggiato. In questi anni si è adoperata in tutti i modi per darmi tutto l'aiuto possibile per farmi portare a termine i miei studi con tranquillità e senza farmi mai mancare nulla. Non vi ringrazierò mai abbastanza per tutto questo.

Un grazie lo devo ai miei nonni, premurosi e sempre presenti, testimoni dell'impegno che ho dato dal primo all'ultimo esame. Grazie a zia Luisa sempre attenta e interessata ad ogni mio progresso, grazie anche ai miei zii, cugini e parenti sempre complimentosi dei miei avanzamenti. Una dedica sentita la rivolgo a zio Ettore e a zia Lora che non ci sono più e a cui io tenevo moltissimo; quasi sicuramente oggi sarebbero stati fieri di me.

Doveroso è il grazie rivolto al professor Lorenzo Donati e agli ingegneri Paolo Proli e Francesco Rondina che mi hanno seguito durante lo sviluppo di questa attività di ricerca. Per finire e non certo per sminuirli nell'ordine di importanza, un grazie sincero va a tutti i miei amici: Bruno, Marco, Daniele, Gian Luca, Mhervin, Lukas, Brando e Luca che hanno condiviso con me questa esperienza. Quasi dimenticavo di ringraziare anche Emanuele, Francesca, Luana, Melissa, Jessica, Matteo e Marcello che mi hanno regalato spesso e volentieri momenti di svago e spensieratezza nei pochi ritagli di tempo libero. Sono grato anche ad Andrea, Gianluca e Rahul amici e compagni di lavoro nell'esperienza all'Imola Gomme.

Concludo dedicando le ultime righe a Bruno, non solo un compagno con cui, oltre allo studio, ho condiviso le difficoltà, i viaggi in treno, in autobus, in

auto e soprattutto le merende, ma un vero amico (insieme a Marco) nei momenti che contano. La sua simpatia e il suo carisma sono stati motivo di stimolo e incoraggiamento per il raggiungimento di un obiettivo comune. Grazie infinite a tutti voi che avete condiviso con me questo lavoro, spero di avervi reso orgogliosi di me.

Maicol

Forlì, 19 marzo 2015