

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

Tesi di Laurea Magistrale

**Monitoraggio strutturale di materiali compositi mediante una
tecnologia di rilevamento distribuito del campo di deformazione
basata su fibre ottiche**



Relatore

Prof. Davide Salvatore Paolino

Correlatori

Ing. Carlo Boursier Niutta,

Ing. Raffaele Ciardiello

Ing. Andrea Tridello

Candidato

Marta Alemanni

Anno Accademico 2023

Indice

1.	Introduzione	1
2.	Structural Health Monitoring	2
3.	I materiali compositi	4
3.1	Architetture della fase dispersa	6
3.2	Tecnologie di produzione dei materiali compositi a matrice polimerica	8
3.2.1	Processi manuali	8
3.2.2	Stampaggio in alta pressione.....	9
3.2.3	Tecnologie di formatura in bassa pressione in stampo aperto	9
3.2.4	Tecnologie di formatura per trasferimento di resina	10
3.2.5	Poltrusione	12
3.2.6	Filament winding	12
3.3	Considerazioni sulle proprietà meccaniche dei materiali compositi	12
4.	Analisi non distruttive per il monitoraggio della deformazione applicabili ai materiali compositi	14
4.1	I sensori ottici e la DIC	14
4.2	I sensori elettrici e gli estensimetri	15
4.3	Considerazioni sulle tecniche di analisi non distruttive	16
5.	Le fibre ottiche.....	17
6.	Tecniche di monitoraggio della deformazione basate su fibre ottiche.....	21
6.1	Sensori in fibra ottica basati sull'intensità della luce.....	21
6.2	Sensori in fibra ottica di tipo interferometrico	22
6.3	Sensori a reticolo di Bragg o FBG	23
6.4	Sensori in fibra ottica per il rilevamento distribuito	25
6.4.1	Riflettometro ottico a retrodiffusione.....	26
6.5	Criticità nell'utilizzo delle fibre ottiche per il monitoraggio strutturale	27
6.5.1	Il problema della dimensione delle fibre ottiche.....	28
6.5.2	Il problema del rivestimento	29
6.5.3	Il problema della manipolazione e della durabilità del sensore	34
6.5.4	Difficoltà nella fabbricazione di compositi con fibre ottiche incorporate.....	34
6.5.5	Il problema della temperatura	37
6.6	Il rilevamento distribuito in fibra ottica applicato al monitoraggio strutturale	38
7.	Introduzione alla parte sperimentale	40

8.	Materiali e metodi	41
8.1	Fibre ottiche	41
8.2	Fabbricazione dei provini con fibra ottica incorporata	41
8.3	Wazer	44
8.4	Luna ODiSi 6100	45
8.5	Splicing e fusion splicer	49
8.6	DIC	51
8.7	Estensimetri	53
8.8	IET	54
8.9	Zwick	55
8.10	Instron 8801	55
8.11	VHCF	56
9.	Risultati e discussione dei risultati	58
9.1	Prove meccaniche	58
9.1.1	Fibre ottiche con rivestimento in acrilato	60
9.1.2	Fibre ottiche con coating poliimmidico	67
9.2	Prove in temperatura	69
9.2.1	Prove in forno a temperatura controllata	69
9.2.2	Prove VHCF	71
10.	Conclusioni	76
11.	Bibliografia	78

Indice delle figure

Figura 3.1. Configurazioni dell'intreccio che caratterizza le diverse tipologie di tessuto [10].	7
Figura 3.2. Schema della fabbricazione per via manuale [7].	8
Figura 3.3. Stampaggio in alta pressione in stampo chiuso [7].	9
Figura 3.4. Formatura in bassa pressione (a) sotto vuoto; (b) in autoclave [7].	10
Figura 3.5. Schema del processo RTM [9].	11
Figura 3.6. Schema del processo di poltrusione [7].	12
Figura 3.7. Grafico sforzo-deformazione per un composito con fibre fragili e matrice duttile [7].	13
Figura 4.1. Sintesi delle principali tecniche di analisi non distruttive, con indicazione del meccanismo di danneggiamento rilevato e del range di applicabilità [11].	14
Figura 4.2. Funzionamento schematico della tecnica DIC [14].	15
Figura 4.3. Esempio di un estensimetro a lamina singola [15].	15
Figura 5.1. Cross-section di una fibra ottica per mettere in luce i costituenti [24].	18
Figura 5.2. Rappresentazione schematica della differenza tra fibre ottiche multimodali e monomodali, relativamente al numero di raggi che propagano all'interno del core [25].	18
Figura 5.3. Rappresentazione schematica del percorso della luce in una fibra ottica rispetto all'inclinazione del fascio [18].	19
Figura 5.4. Schematizzazione del metodo del doppio crogiolo (a) e della torre di filatura delle preforme (b) [18].	20
Figura 6.1. Principio di un sensore a microflessione [3].	22
Figura 6.2. Sensore EFPI basato su un tubicino capillare [23].	23
Figura 6.3. Schema del principio di funzionamento di una fibra a reticolo di Bragg [23].	24
Figura 6.4. Differenze tra (a) il rilevamento discreto di un FBG e (b) il rilevamento distribuito (DFOS) [30].	25
Figura 6.5. Effetto di retrodiffusione della luce in una fibra ottica [31].	26
Figura 6.6. Rappresentazione schematica della zona sensibile della fibra per il rilevamento mediante OBR [13].	27
Figura 6.7. Ingrandimento al microscopio delle interfacce del laminato con sensori incorporati [24].	28
Figura 6.8. (a) modulo elastico misurato per i quattro rivestimenti esaminati in funzione dell'attenuazione del segnale; (b) indice di rifrazione in funzione dell'attenuazione del segnale per gli stessi coating [36].	30
Figura 6.9. Attenuazione rispetto allo stress di flessione applicato per fibre con rivestimento in (a) acrilato <i>single-layer</i> , (b) poliimmide, (c) silicone [37].	32

Figura 6.10. Scivolamento tra fibra ottica e substrato (a) in assenza e (b) in presenza di un adesivo [38], [39].....	33
Figura 6.11. Andamento della deformazione misurata in funzione della posizione lungo la fibra ottica per tre rivestimenti a confronto [39].	33
Figura 6.12. (a) passaggio delle fibre ottiche attraverso i tessuti; (b) sigillatura dei forellini sul sacco a vuoto mediante nastro adesivo [35].	35
Figura 6.13. Rivestimento in PTFE realizzato da Kinet et al. [44]......	35
Figura 6.14. Connettori per l'uscita della fibra ottica [3], [44]......	36
Figura 6.15. Schema del metodo di accoppiamento non fisico [45]......	36
Figura 6.16. Sistema di posizionamento automatico delle fibre ottiche Airborne [3].	37
Figura 6.17. Schema del laminato realizzato da Zhu et al., in cui sono evidenziate le zone sensibili alla sola deformazione termica in quanto rivestite di PTFE [46]......	38
Figura 8.1. Strisce di prepreg ritagliate.....	42
Figura 8.2. Dettaglio di una fibra ottica infilata tra i layer di prepreg. Sulla superficie visibile verranno adagiati i due strati rimanenti.....	42
Figura 8.3. Alcuni passaggi del procedimento di fabbricazione dei provini: (a) posizionamento dei provini sul supporto e fissaggio delle fibre ottiche mediante scotch carta; (b) frapposizione di alcuni pezzettini di release film tra fibre ottiche e prepreg; (c) copertura dello stampo con il sacco e aspirazione dell'aria dalla valvola.....	43
Figura 8.4. Immagini della Wazer dall'esterno (a) e dall'interno durante un taglio (b) [50]......	44
Figura 8.5. Un'inclusione all'interno di questo provino ha provocato delaminazione durante il taglio.....	44
Figura 8.6. Fissaggio delle fibre ottiche sulla superficie del provino per proteggerle durante il taglio; (a) mediante sealant tape, (b) mediante scotch carta e sealant tape.	45
Figura 8.7. Componenti del sistema LUNA ODISI 6100. (a) software e interrogatore a 8 canali; (b) standoff cable; (c) modulo remoto; (d) sensore in fibra ottica standard di LUNA [51]......	46
Figura 8.8. Pigtail che permette di rendere sensibile la fibra ottica, con ingrandimento degli strati che lo costituiscono.	46
Figura 8.9. Possibili terminali per fibre ottiche.	47
Figura 8.10. Spettro ODFR di una fibra ottica con terminale Luna.....	48
Figura 8.11. Schermata di calibrazione dei sensori.....	49
Figura 8.12. Strumentazione per lo splicing: a sinistra la taglierina (<i>cleaver</i>) e a destra la splicer vera e propria.....	50
Figura 8.13. Disposizione delle fibre nella splicer prima della fusione.....	51

Figura 8.14. Immagini prese dalla microcamera della splicer durante il processo di fusione. (a) allineamento delle fibre; (b) fusione; (c) indicazione della perdita al termine della fusione.	51
Figura 8.15. Area di giunzione delle fibre (a) senza guaina, (b) con guaina protettiva.	51
Figura 8.16. Pattern di puntini realizzato sul provino.	52
Figura 8.17. Dettaglio delle camere e delle luci rivolte verso il provino.	52
Figura 8.18. Mappe di deformazione all’inizio (a) e alla fine (b) della prova. Si tratta di un test di trazione in cui il carico applicato ha raggiunto 6000 N.	53
Figura 8.19. Applicazione di un estensimetro a un provino con tutti i collegamenti.	54
Figura 8.20. Schema del metodo IET [20].	54
Figura 8.21. Zwick Roell Z050 utilizzata per le prove di trazione [54].	55
Figura 8.22. Instron 8801 utilizzata per le prove di trazione [55].	56
Figura 8.23. Campione utilizzato per le prove VHCF.	56
Figura 8.24. Posizionamento del campione per prove VHCF.	57
Figura 9.1. Rivestimento della zona di giunzione tra fibra ottica e terminale.	59
Figura 9.2. Campione sottoposto al rilevamento della deformazione durante una prova di trazione mediante fibre ottiche, estensimetri e DIC.	59
Figura 9.3. Schema dei due provini con fibra ottica esterna.	61
Figura 9.4. Andamento del modulo elastico lungo le fibre ottiche esterne in acrilato.	61
Figura 9.5. Ingrandimento del punto di minimo della curva di modulo elastico per visualizzare i riferimenti utilizzati per l’ottenimento di un valore di modulo elastico.	62
Figura 9.6. Schema della sezione di una fibra ottica indeformata a sinistra e sottoposta a una deformazione di trazione a destra. Nell’immagine di destra si vuole mettere in luce l’effetto di assorbimento della deformazione da parte del rivestimento acrilatico.	62
Figura 9.7. A sinistra, uno schema del provino sottoposto a trazione, con le specifiche di ciascun tratto di fibra incollato ad esso. A destra, l’andamento del modulo elastico rilevato da ciascun tratto di fibra ottica.	63
Figura 9.8. Effetto della lunghezza del tratto di fibra ottica interno al provino sul modulo elastico.	64
Figura 9.9. A sinistra, la fibra ottica attraversa i layer in maniera troppo verticale: la distorsione che ne deriva impedisce di avere un segnale di qualità. A destra invece la fibra è più inclinata, cosa che favorisce la sensibilità dello strumento.	64
Figura 9.10. Segnale di una fibra ottica che presenta una discontinuità in corrispondenza del segmento rosso verticale.	65
Figura 9.11. Schema dei tre provini con fibre ottiche interne in acrilato.	65

Figura 9.12. Effetto del posizionamento della fibra ottica (layer tra i quali si trova e punto di uscita dal provino).....	66
Figura 9.13. Andamento della deformazione rilevata da una fibra ottica con rivestimento in poliimmide interna al provino al termine di una prova di trazione.	67
Figura 9.14. Andamento della deformazione rilevata da una fibra ottica con rivestimento in poliimmide esterna al provino al termine di una prova di trazione.	68
Figura 9.15. Andamento del modulo elastico calcolato mediante fibre ottiche poliimmidiche.....	68
Figura 9.16. Variazione di temperatura registrata lungo la fibra ottica interna in acrilato alle tre temperature di riferimento.	70
Figura 9.17. Confronto tra le tre fibre ottiche esaminate relativo alla variazione di temperatura rilevata a 60°C.	70
Figura 9.18. Variazione di temperatura registrata da ogni punto della fibra ottica e dai due laser durante test VHCF a 1,3 V. I tratti nero e grigio sono quelli relativi ai due laser, mentre ciascuno dei tratti colorati corrisponde a un punto della fibra ottica.....	72
Figura 9.19. Variazione di temperatura registrata da ogni punto della fibra ottica e dai due laser durante test VHCF a 3 V (a) e 6 V (b). I tratti nero e grigio sono quelli relativi ai due laser, mentre ciascuno dei tratti colorati corrisponde a un punto della fibra ottica.....	72
Figura 9.20. Fotografia del ΔT rilevato dalla fibra in un istante della prova VHCF a 5 V, per mettere in evidenza come varia tale parametro lungo la fibra. Il tratto di fibra ottica interno al campione è riportato nell'ingrandimento a destra.....	73
Figura 9.21. ΔT rilevato dal laser (in nero) e da tre punti principali della fibra ottica durante test VHCF a (a) 1,7 V, (b) 5 V, (c) 6 V.	75

Indice delle tabelle

Tabella 3.1. Proprietà meccaniche di alcune delle fibre più comuni [9].....	6
Tabella 6.1 Modulo elastico calcolato da Yasmin Padilla et al. [36].....	30
Tabella 6.2. Indici di rifrazione a $\lambda=600$ nm dei costituenti delle fibre ottiche utilizzate. Il core è costituito da silice fusa e il cladding da silice drogata con fluoro [37].....	30
Tabella 8.1. Confronto tra le fibre ottiche utilizzate.	41
Tabella 9.1. Risultati delle prove meccaniche di trazione in termini di modulo elastico calcolato a partire dalle deformazioni rilevate con Luna.....	58
Tabella 9.2. Moduli elastici calcolati mediante estensimetri e DIC, utilizzati come valori teorici.	60
Tabella 9.3. Moduli elastici ricavati mediante fibre ottiche con rivestimento in acrilato.	60
Tabella 9.4. Moduli elastici ottenuti dai provini con fibre ottiche interne lunghe in acrilato.	66
Tabella 9.5. Risultati delle prove termiche per campione con fibra interna lunga in acrilato (N.B. i valori si riferiscono al tratto centrale della fibra) e con fibra corta in poliimmide.	71

1. Introduzione

Il presente lavoro di tesi nasce con l'obiettivo di fornire un'analisi dettagliata di una tecnologia di monitoraggio strutturale basata su fibre ottiche, che all'interno della sfera dei controlli non distruttivi di *Structural Health Monitoring* sta acquisendo un interesse via via maggiore. Lo scopo principale del lavoro consiste nel verificare l'applicabilità di questa tecnologia al rilevamento distribuito del campo di deformazione di provini in materiale composito (nello specifico con matrice epossidica e rinforzo in fibra di carbonio) utilizzando sensori fabbricati in autonomia. Il lavoro è stato sviluppato affrontando le maggiori criticità che caratterizzano questa tecnica, per analizzarne gli effetti che determinano sul sistema; si è inoltre cercato di comprendere e definire le configurazioni ottimali per l'applicazione del metodo di misura.

Per l'analisi delle deformazioni è stato adottato l'apparecchio denominato ODiSI 6100 commercializzato da Luna. Si tratta in poche parole di un *Optical Distributed Sensor Interrogator*, ossia un sistema che permette il rilevamento in alta definizione del campo di deformazione e di temperatura del componente sfruttando l'effetto di *Rayleigh Backscattering* della luce all'interno di opportune fibre ottiche. I sensori in fibra ottica sono stati fabbricati autonomamente, dunque senza ricorrere a quelli ufficiali di Luna. Tale tecnologia è stata testata su provini in materiale composito in quanto offrono la possibilità di incorporare la fibra ottica al loro interno, oltre che di effettuare rilevazioni superficiali, senza apportare modifiche rilevanti alla tecnica di fabbricazione.

Il presente elaborato è composto da una prima parte introduttiva volta a chiarire le motivazioni che stanno spingendo la ricerca verso questo tipo di tecnologia, specialmente per la classe dei materiali compositi. Dopo un breve discorso che riassume per sommi capi le caratteristiche principali di questi materiali, è riportato un resoconto relativo alle tecniche di misura delle deformazioni attualmente più diffuse, per illustrarne vantaggi e svantaggi e metterle a confronto con il rilevamento in fibra ottica. I principi di funzionamento di quest'ultima tecnologia verranno successivamente discussi nel dettaglio, ponendo particolare attenzione alle criticità connesse con il suo utilizzo. Nella parte sperimentale saranno affrontate una per una tali problematiche, determinandone cause ed effetti, in modo da individuare la configurazione del sistema di misura più efficace per ogni applicazione. Il lavoro si concluderà con una panoramica di quelli che possono essere gli sviluppi futuri della tecnologia.

2. Structural Health Monitoring

Lo sviluppo di tecnologie di rilevamento del campo di deformazione di un componente è alla base delle operazioni di controllo e monitoraggio del comportamento delle strutture durante il loro ciclo vita, per verificare che eventuali assestamenti o deformazioni non rappresentino un pericolo e per prevenire rotture catastrofiche. La disciplina che si occupa di queste valutazioni viene chiamata *Structural Health Monitoring* (SHM), e ha come obiettivo lo sviluppo di sistemi di controllo dello stato delle strutture che trasmettano informazioni dettagliate in tempo reale mediante sensori [1]. In sostanza, prevede l'integrazione permanente di questi sensori nella struttura di interesse per poterne effettuare costantemente una diagnosi completa, in modo da aumentarne la sicurezza e l'affidabilità. Uno dei punti di forza di questa disciplina, rispetto alla realizzazione periodica di controlli non distruttivi, è che offre la possibilità di fornire dati in tempo reale senza dover interrompere il funzionamento del componente, e inoltre non richiede operatori altamente qualificati per l'acquisizione e l'analisi dei dati [1]. Grazie all'implementazione di queste tecnologie sarà possibile eseguire interventi e opere di manutenzione mirati laddove sia necessaria la sostituzione o la riparazione di un componente, senza investire risorse e manodopera in operazioni non necessarie. Inoltre permettono di prolungare la vita del componente grazie al rilevamento del danno negli stadi preliminari e di effettuare una previsione della vita rimanente [2].

Parallelamente allo sviluppo di queste tecnologie, l'utilizzo dei materiali compositi ha subito negli ultimi anni una larghissima diffusione, soprattutto in strutture o componenti a elevate prestazioni. Infatti, in virtù del fatto che possono essere progettati modulandone le caratteristiche per la specifica applicazione, hanno acquisito un enorme interesse in svariati settori, da quello dei trasporti all'ambito edilizio [3]. Per loro natura, le proprietà di tali materiali, come ad esempio la relazione sforzo-deformazione, non seguono le leggi comuni alle altre categorie, inoltre la loro struttura è soggetta a fenomeni di danneggiamento specifici. Ciò comporta la necessità di adoperare tecniche di controllo ad hoc per il rilevamento del danno. Inoltre, come si può intuire, tanto più elevate sono le prestazioni richieste al materiale, tante più importante risulta il monitoraggio del funzionamento e dell'eventuale insorgenza di difetti, in modo da poter intervenire tempestivamente con una riparazione o sostituzione del pezzo. Oggi esistono innumerevoli tecnologie di analisi non distruttive che permettono di monitorare la qualità del componente durante la fabbricazione, rilevarne l'integrità strutturale in esercizio e individuare l'insorgenza di difetti senza intaccare le proprietà o la geometria della struttura, e dunque senza comprometterne il comportamento in esercizio. Dato il ruolo di fondamentale importanza che esse assumono nella prevenzione del cedimento, lo sviluppo di nuovi metodi di testing, o l'ottimizzazione di quelli esistenti, sono continuamente oggetto di studio approfondito. Nella messa a punto di una tecnica di controllo è fondamentale raggiungere un buon compromesso tra la qualità della misura e la ridotta complessità, insieme al basso costo, dell'apparecchiatura [4], [5]. Uno dei principali limiti che presenta buona parte delle tecnologie di analisi non distruttive è l'ingombro della strumentazione, che ne ostacola l'utilizzo in determinate applicazioni [3].

La sezione seguente comprende una breve spiegazione dei materiali compositi, con un focus su quelli a matrice polimerica e rinforzo fibroso, che negli ultimi 30 anni hanno acquisito un grande interesse grazie ai diversi vantaggi che li contraddistinguono: alto rapporto *strength-to-weight*, buona stabilità dimensionale, resistenza a corrosione e durabilità [2]. Nel capitolo successivo se ne approfondiscono la

struttura, le tecniche di fabbricazione e il comportamento meccanico, al fine di comprenderne a fondo le potenzialità.

3. I materiali compositi

La classe dei materiali compositi, in contrapposizione ai materiali convenzionali, è caratterizzata dal fatto di contenere materiali di sintesi, ossia progettati in tutti i dettagli allo scopo di garantire delle specifiche proprietà per una determinata applicazione. I materiali compositi infatti nascono per raggiungere quelle prestazioni, ad esempio in termini di resistenza specifica, che con un unico materiale non sarebbe possibile ottenere. L'esempio più tipico a questo proposito è la possibilità di coniugare la ridotta densità delle materie plastiche con la resistenza e l'alto carico di rottura degli acciai, oppure la durezza di un materiale ceramico con la duttilità delle leghe metalliche. In sostanza, l'efficacia dei compositi deriva dall'unione in un unico materiale di due fasi distinte che, seppur mantenendo inalterate le rispettive proprietà, lavorano in sintonia [6], [7].

Un materiale composito presenta almeno due fasi distinte, la matrice e il rinforzo, separate da un'interfaccia ben definita. La fase matrice, continua e omogenea, avvolge e protegge la seconda fase (detta fase dispersa o rinforzo) che può essere di tipo continuo (se in forma di fibre lunghe) o discontinuo (nel caso di fibre tagliate, whiskers o particelle). La matrice, come accennato, deve proteggere questa seconda fase da eventuali danneggiamenti, di tipo meccanico o ambientale, e mantenerla in posizione stabile. Il suo compito principale tuttavia è la trasmissione del carico cui è sottoposto il materiale al rinforzo, tramite l'interfaccia. Affinché ciò avvenga, è fondamentale che l'interfaccia sia progettata adeguatamente: il legame tra le due fasi deve consentire appunto la trasmissione del carico ma non deve essere troppo forte da comprometterne la tenacità.

La fase matrice può appartenere a tre categorie principali: polimeri, metalli, ceramici. Senza dubbio, le matrici polimeriche sono le più diffuse grazie al basso costo, alla ridotta densità e alla facilità con cui la resina può impregnare il rinforzo per realizzare il composito. Infatti il principale punto debole dei materiali compositi è l'alto costo di fabbricazione [6]: da questo punto di vista, i compositi a matrice polimerica sono i più semplici ed economici da realizzare, mentre i compositi a matrice metallica e ceramica sono riservati ad applicazioni in settori più di nicchia, dove la richiesta di componenti altamente performanti e le ridotte produttività giustificano la spesa.

Le matrici polimeriche, a seconda che siano di tipo termoplastico o termoindurente, possiedono caratteristiche differenti. Le resine termoplastiche sono costituite da catene lineari o ramificate interconnesse tra loro mediante legami deboli: questi possono essere scissi facilmente con un aumento di temperatura, che porta quindi alla transizione del materiale in fase liquida, ma si riformano tali e quali al raffreddamento senza provocare un'eccessiva degradazione delle catene. Al contrario, le resine termoindurenti presentano una microstruttura altamente reticolata, nella quale cioè le catene polimeriche sono unite da forti legami covalenti. Ciò rende la struttura alquanto rigida, infatti al riscaldamento questi polimeri arrivano a degradazione senza subire una transizione di fase. In linea generale, per componenti non rinforzati le resine termoplastiche sono preferite in quanto, grazie alla possibilità di fondere e risolidificare, possono essere riciclate o riutilizzate più volte, cosa che non è possibile per i termoindurenti (si noti comunque che tale processo di scissione e riformazione dei legami è reversibile ma un numero limitato di volte, in quanto ogni transizione comporta alcuni fenomeni degenerativi). Tuttavia in fase liquida

presentano una viscosità molto elevata, che rende piuttosto difficile il processo di impregnazione delle fibre se non in condizioni di alte pressioni e alte temperature. Per questo motivo le matrici polimeriche sono più comunemente di tipo termoindurente, e nello specifico le più utilizzate sono le resine poliestere, vinilestere, epossidiche, fenoliche [8]. I termoindurenti, grazie alla loro struttura rigida, presentano proprietà meccaniche decisamente superiori ai termoplastici, e inoltre sopportano temperature di utilizzo mediamente maggiori, sebbene una volta raggiunto il limite di temperatura degradino.

La seconda fase, come già accennato, può presentare diverse forme, e la sua distribuzione nel materiale definisce l'architettura del composito. I rinforzi discontinui devono essere omogeneamente distribuiti all'interno della matrice per garantire proprietà isotrope al materiale, ma sono relativamente meno performanti dal punto di vista meccanico rispetto a un rinforzo lungo. I compositi con fibre lunghe o tessuti invece presentano proprietà generalmente anisotrope (in una o due direzioni), e il contenuto della seconda fase può raggiungere il 70%, mentre non supera il 50% se il rinforzo è discontinuo [6].

Gli accoppiamenti più diffusi per matrici polimeriche sono senza dubbio le fibre di vetro (GFRP, *Glass Fiber Reinforced Plastics*) e di carbonio (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Plastics*). Le fibre di vetro attraggono per via dell'elevata resistenza specifica che offrono a costi contenuti [9], e in aggiunta permettono di selezionare la composizione più adeguata per la specifica applicazione. Anche le fibre di carbonio sono caratterizzate da elevatissime proprietà meccaniche (da sole possono raggiungere moduli elastici di centinaia di GPa e resistenze a trazione in direzione longitudinale di qualche migliaio di MPa [7]). Inoltre, mantengono buone proprietà meccaniche in temperatura, sebbene subiscano fenomeni ossidativi già intorno a 400°C. Questi fenomeni sono facilmente prevenibili se la matrice è progettata in modo da sigillare completamente il rinforzo al suo interno. A livello microstrutturale, le fibre di carbonio sono costituite da alcune regioni cristalline in cui si riconoscono le strutture esagonali tipiche della grafite, sebbene allineate diversamente, immerse in regioni amorfe più estese. I piani cristallini, i cui atomi di carbonio sono legati in modo covalente, tendono a disporsi parallelamente all'asse della fibra incrementando rigidità e resistenza a rottura in questa direzione; viceversa, poiché tra piani basali sussistono legami deboli di Van der Waals la resistenza in direzione trasversale è decisamente inferiore. Ad esempio, per fibre che presentano un modulo elastico in direzione longitudinale di 1000 GPa, quello trasversale non supera i 35 GPa [6].

Esistono anche altre classi di fibre, come quelle aramidiche, che sono fibre sintetiche organiche caratterizzate da una densità molto bassa che determina alti valori di resistenza e modulo specifici. Il loro difetto principale è che la massima temperatura di impiego è limitata a causa della ridotta resistenza in temperatura e del coefficiente di dilatazione termica in direzione longitudinale negativo, che può portare allo scollamento dalla matrice [9]. Vi è poi una classe di fibre inorganiche, tra cui spiccano le fibre di boro, allumina e carburo di silicio. Esse mantengono elevate proprietà anche ad alte temperature, ma si tratta di fibre ad alta densità e costose da produrre. Molte di queste sono più indicate a operare con matrici metalliche o ceramiche piuttosto che polimeriche [9].

Le proprietà meccaniche di alcune delle fibre più comuni sono riassunte in tabella 3.1.

Tabella 3.1. Proprietà meccaniche di alcune delle fibre più comuni [9].

Materiale fibre	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo elastico (MPa)	Densità (g/cm³)	Resistenza specifica (m²/s²)	Modulo specifico (m²/s²)
Vetro E	3000	72400-76000	2,54	1,18	28,5
Vetro S	4600	84000-88000	2,48	1,85	35,5
Boro con anima in tungsteno	3500	410 000	2,60	1,35	158,0
Aramidiche	3600	130 000	1,48	2,43	87,0
Allumina policristallina	1400	380 000	3,70	0,37	103,0
Grafite da PAN ad alta resistenza	3500	228 000	1,78	1,96	128,0
Grafite ad alto modulo	2100	390 000	1,90	1,10	205,0
Grafite da pece	1500	345 000	2,02	0,85	171,0

3.1 Architetture della fase dispersa

Per semplificare la fabbricazione dei materiali compositi, è molto diffuso l'utilizzo di rinforzi in forma di mat, tessuti, preforme o pre-impregnati. Il mat è costituito da un insieme di fibre lunghe o tagliate disposte casualmente sul piano e tenute insieme da una sostanza apprettante che gli conferisce l'aspetto di un feltro [9]. Il tessuto al contrario è ottenuto intrecciando fasci di fibre secondo una geometria prestabilita: a seconda del numero di fibre costituenti la trama e l'ordito e del tipo di intreccio esso presenterà caratteristiche specifiche, in termini di drappabilità (ovvero la capacità di ricoprire una superficie) e rigidità [7]. In base all'alternanza dei filamenti di trama e ordito nella tessitura, si possono avere tessuti di diverso tipo (figura 3.1) [7], [9]:

- *plain-weave*, in cui trama e ordito sono alternati in modo regolare con spaziatura unitaria; tale tessitura favorisce la drappabilità del prodotto;
- *twill-weave*, in cui la periodicità tra trama e ordito è doppia;
- *n-satin-weave*, in cui è disposto un filo di trama ogni n fili di ordito.

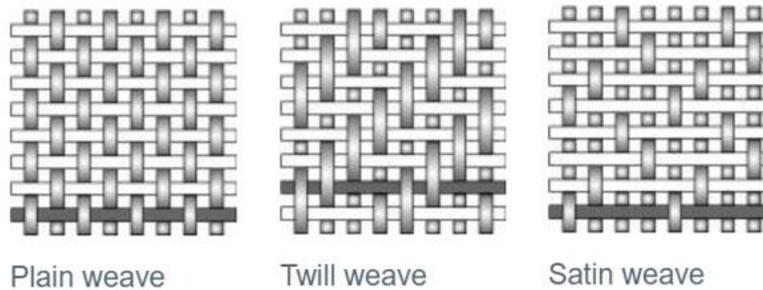


Figura 3.1. Configurazioni dell'intreccio che caratterizza le diverse tipologie di tessuto [10].

Per facilitare la maneggevolezza del rinforzo, spesso si predilige l'utilizzo di preforme o addirittura pre-impregnati. Le preforme [9] sono fogli di tessuto sovrapposti secondo un'architettura definita in termini di orientazione di ciascun foglio, e tenuti insieme da cuciture poste sui bordi. In questo caso si parla di preforme 2D, in quanto il loro aspetto è piano. È possibile realizzare anche preforme 3D, che presentano un ulteriore intreccio con fibre ortogonali al piano dei tessuti. Ottenere questo tipo di preforma richiede procedure complesse che innalzano il costo del manufatto, pertanto sono poco diffuse. Molto più comune invece è l'utilizzo dei cosiddetti prepreg, o pre-impregnati [9]: si tratta di semilavorati costituiti dalle fibre, disposte in modo unidirezionale o in forma di tessuto, già impregnate con l'esatta quantità di resina polimerica (non ancora reticolata) ma addizionata dell'agente reticolante. Vengono venduti in forma di rotoli di varia lunghezza protetti su entrambi i lati da un film polimerico con funzione distaccante. Questi rotoli vanno conservati a basse temperature (generalmente al di sotto dei -15°C) in quanto, una volta portati a temperatura ambiente, ha inizio la procedura di reticolazione della resina, che è un processo irreversibile. Al termine della reticolazione il materiale indurisce stabilmente nella forma conferitagli, ma questo processo di consolidamento, se lasciato avvenire a temperatura ambiente, è molto lento e pertanto va accelerato mediante uno specifico trattamento termico che dipende dalla resina (essa infatti è generalmente progettata in modo tale che se lasciata a temperatura ambiente la reticolazione si completi in circa 30 giorni). L'utilizzo dei pre-impregnati per la fabbricazione di materiali compositi rappresenta un costo più elevato rispetto ai tessuti, ma sono estremamente vantaggiosi in quanto permettono di velocizzare e semplificare la deposizione degli strati, garantiscono la ripetibilità del processo e i componenti ottenuti sono di alta qualità e spessore costante, grazie all'impregnazione uniforme della resina [9].

Come si può intuire, i compositi realizzati mediante tessuti o pre-impregnati vengono fabbricati per strati successivi: si chiama lamina un impilamento di strati con fibre unidirezionali orientate nella stessa direzione, mentre si parla di laminato quando i layer sono impilati in modo che le fibre presentino angoli di orientazione diversi [6]. Il difetto principale di una lamina è il fatto che in una qualunque direzione inclinata rispetto all'asse delle fibre la resistenza meccanica crolla, in quanto il carico viene sorretto dalla sola matrice. Molto spesso infatti è necessaria la presenza di strati con orientazione diversa per bilanciare la capacità di sostenere il carico in esercizio [6].

3.2 Tecnologie di produzione dei materiali compositi a matrice polimerica

Le tecnologie di fabbricazione per compositi a matrice polimerica prevedono la disposizione delle fibre o dei tessuti nella forma da conferire, l'eventuale impregnazione di resina e il trattamento di consolidamento. Solitamente il tipo di processo viene scelto in base alla tipologia di manufatto da realizzare: nello specifico, alcune tecnologie richiedono una buona dose di manodopera e pertanto possono essere impiegate solo per produzioni a livello di laboratorio o comunque ridotte; altre invece sono maggiormente automatizzabili e quindi adatte a produttività più elevate, sebbene richiedano alti investimenti per i macchinari.

3.2.1 Processi manuali

I processi di tipo manuale, in cui generalmente si utilizza uno stampo aperto, rappresentano la categoria più semplice da eseguire. Sul fondo dello stampo trattato con un opportuno agente distaccante viene disposto il rinforzo, generalmente in forma di mat o tessuto, per strati successivi. Sopra ogni strato viene colata la resina fusa, addizionata dell'agente reticolante nel caso di polimero termoindurente, che viene compressa e levigata con appositi strumenti. Questa azione di rullatura ha lo scopo di compattare gli strati rimuovendo l'aria tra di essi ed eliminando l'eccesso di resina. Una volta impilato il giusto numero di strati il materiale deve consolidare: nel caso in cui la matrice sia termoplastica è sufficiente un raffreddamento naturale, mentre la reticolazione di resine termoindurenti può essere facilitata mediante fonti di calore. Il manufatto che si ottiene può essere anche di grandi dimensioni, ma le proprietà meccaniche non sono eccelse per via dell'aria che resta intrappolata all'interno. Come si può intuire, è un processo lento che richiede un alto grado di manodopera e pertanto viene adottato solo per produrre poche componenti di forma specifica. Inoltre, la massima percentuale di fibre introducibile è ridotta al 25-30% in volume. È possibile modificare il processo deponendo strati di tessuto già impregnati con il giusto quantitativo di resina: in questo caso, le proprietà del composito sono leggermente migliori e la percentuale in volume di fibre può arrivare intorno al 35% [7]. La schematizzazione del processo è riportata in figura 3.2.

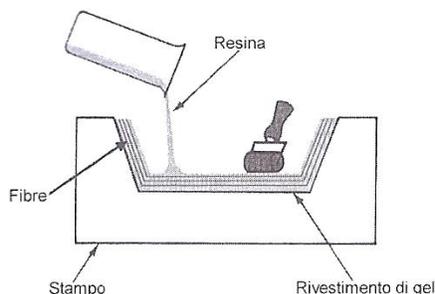


Figura 3.2. Schema della fabbricazione per via manuale [7].

Nel caso in cui si debba realizzare un composito con fibre corte, è disponibile una variante del metodo in cui la miscela di resina fusa + fibre corte viene spruzzata direttamente sullo stampo mediante un'apposita pistola. La pistola contiene un sistema ad aria compressa che aziona una lama rotante: questa taglia le fibre provenienti dalle bobine in spezzoni e le spruzza sulla superficie dello stampo insieme al giusto quantitativo di resina additivata. Ogni strato viene poi levigato manualmente come nel caso precedente. Questa variante può essere definita semimanuale in quanto l'operazione di spruzzatura è in parte automatizzabile [7].

Le tecnologie manuali possono anche essere realizzate in stampo chiuso: in questo caso è possibile conferire a entrambe le facce del componente una finitura controllata. Il serraggio tra le due metà dello stampo applica pressioni anche molto elevate, ma la loro distribuzione non è sufficientemente uniforme da permettere la realizzazione di forme complesse [9].

Nel complesso, le tecnologie di formatura di tipo manuale sono, come detto in precedenza, semplici da applicare e non richiedono costose attrezzature. I limiti principali riguardano la ripetibilità del processo, che non può essere garantita: ciò significa che non si può applicare a produzioni per le quali è necessario assicurare un alto livello di affidabilità. Oltretutto le proprietà meccaniche del manufatto, sebbene non raggiungano mai alti livelli, sono strettamente legate all'abilità e all'esperienza dell'operatore [7], [9].

3.2.2 Stampaggio in alta pressione

Le tecniche di stampaggio in alta pressione (figura 3.3) prevedono l'utilizzo di uno stampo metallico che applica pressioni di qualche decina di MPa (tipicamente tra 10 e 50) al materiale provocandone formatura e consolidamento. Il composito viene inserito nello stampo sottoforma di lamine di pre-impregnato oppure di pasta contenente fibre corte. Questa tecnologia è applicabile a livello industriale in quanto permette di avere elevate produttività. Una tipica applicazione è la realizzazione di pannelli per autoveicoli [7].

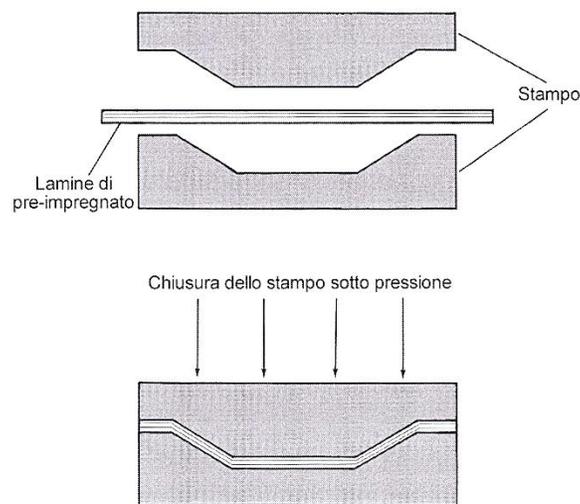


Figura 3.3. Stampaggio in alta pressione in stampo chiuso [7].

3.2.3 Tecnologie di formatura in bassa pressione in stampo aperto

In questa serie di tecniche, schematizzate in figura 3.4, la preforma è costituita da una serie di lamine impregnate o da layer di prepreg impilati. Viene appoggiata sulla superficie di uno stampo aperto e racchiusa in un sacco sigillato di materiale plastico, in cui verrà fatto il vuoto. Il sacco può aderire allo stampo o contenere completamente la preforma. In alternativa il processo può avvenire in autoclave. In ogni caso, l'interno del sacco viene portato sotto vuoto in modo da favorire l'adesione delle lamine eliminando le inclusioni d'aria, mentre un piccolo riscaldamento o una leggera sotto pressione aiutano il materiale ad aderire allo stampo assumendone la forma [7].

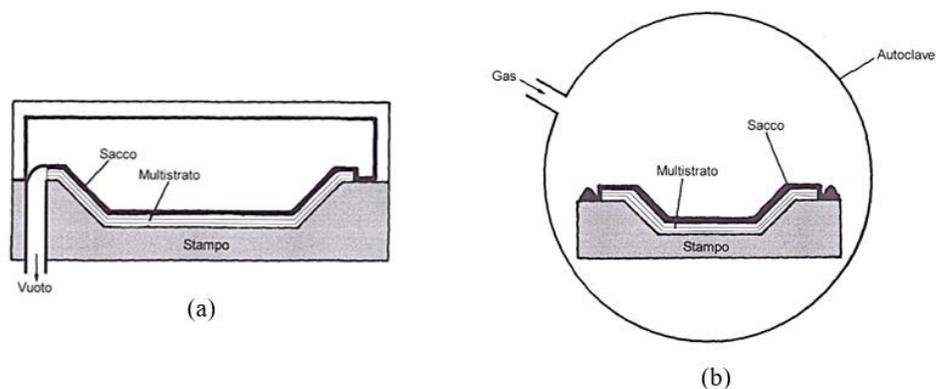


Figura 3.4. Formatura in bassa pressione (a) sotto vuoto; (b) in autoclave [7].

Una variante della tecnologia in bassa pressione che sfrutta il sacco da vuoto è la formatura in autoclave [9], che permette di ottenere proprietà meccaniche migliori in quanto assicura una maggior compattazione del laminato. In autoclave infatti il composito può essere soggetto a pressioni decisamente elevate distribuite in modo omogeneo, riducendo così al minimo la presenza di vuoti tra le lamine: ciò consente anche di utilizzare rapporti fibre/matrice più elevati. Si tratta però di un processo molto lungo, che quindi non è indicato per grandi volumi produttivi. È invece molto efficace per produzioni limitate di componenti di dimensioni ridotte che richiedono elevate proprietà meccaniche o di componenti con forma molto complessa. Va sottolineato il fatto che le resine processate per formatura in autoclave sono quasi sempre di tipo epossidico, in quanto presentano le migliori proprietà meccaniche da trasferire al composito. L'autoclave è un grosso recipiente metallico, termicamente isolato, di forma tubolare (con diametro massimo di 5-6 m e lunghezza massima di 18-20 m). Al suo interno circola un fluido caldo in pressione, generalmente CO₂, grazie al quale è possibile effettuare la compattazione e il processo di cura del manufatto. Il ciclo di cura può essere impostato a piacimento e viene monitorato mediante diversi sistemi di controllo. All'interno del forno si inserisce lo stampo sul quale sono disposti gli strati di prepreg racchiusi in un sacco da vuoto sigillato alla base dello stampo. L'autoclave viene quindi sigillata e portata in vuoto, dopodiché mette in circolo fluido pressurizzante e dà inizio al ciclo termico previsto [9]. La formatura in autoclave è un procedimento lungo e dispendioso, ma essendo quasi totalmente automatizzabile garantisce l'affidabilità e la ripetibilità della produzione. Si applica qualora siano richiesti bassi ritmi produttivi per ottenere componenti a elevate prestazioni [9].

3.2.4 Tecnologie di formatura per trasferimento di resina

Le tecnologie di formatura per trasferimento di resina [7], [9], che oggi vengono talvolta raggruppate sotto il nome di LCM (*Liquid Composite Molding*), sono processi che avvengono in bassa pressione in uno stampo chiuso, che solitamente può essere metallico oppure anch'esso in materiale composito: in quest'ultimo caso, poiché il riscaldamento della miscela non può essere troppo elevato, la reticolazione richiede lunghe tempistiche. I processi più diffusi appartenenti a questa categoria prendono il nome di RTM, *Resin Transfer Molding*, e prevedono per l'appunto l'iniezione di una resina in pressione all'interno della cavità dello stampo contenente le fibre (solitamente in forma di preforma). Con l'iniezione di resina l'aria presente nello stampo dovrebbe venire espulsa attraverso opportuni punti di sfiato, ma è possibile

coadiuvarne la fuoriuscita, specialmente nei casi più critici, mediante l'utilizzo di una pompa a vuoto che la aspira durante il processo. Questa variante del processo è denominata VARTM (*Vacuum Assisted RTM*) [7], [9]. Una volta completato il riempimento, che dura qualche minuto al massimo, la cavità viene sigillata per il tempo necessario a ottenere un buon grado di polimerizzazione della matrice. Il consolidamento verrà terminato su un supporto esterno dopo aver estratto il pezzo. In figura 3.5 è riportato lo schema del processo.

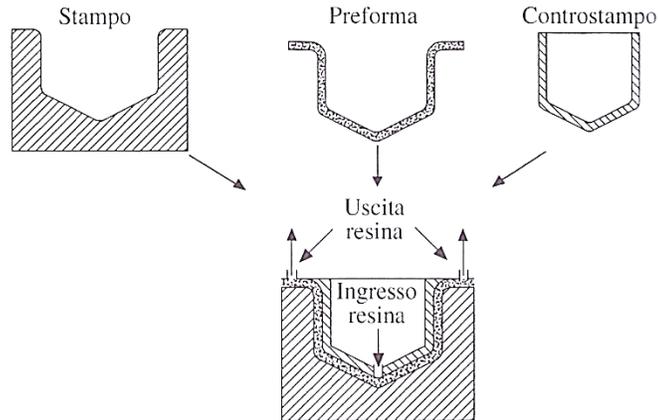


Figura 3.5. Schema del processo RTM [9].

In generale, i componenti ottenuti per RTM possono presentare una percentuale volumica di fibre che arriva al 50% (raggiungibile solo se il rinforzo viene depositato in forma tissutale) [7]. Tuttavia tanto più è alta la frazione di rinforzo tanto più difficile risulta la fase di impregnazione, che richiede pressioni molto elevate, e tanto meno deformabile risulta il prodotto. L'operazione di estrazione dallo stampo invece impone dei vincoli geometrici alle forme ottenibili: i pezzi ad esempio devono presentare angoli di sformo ed evitare spigoli vivi nei quali la distribuzione di resina e rinforzo non sarebbe uniforme [9]. Lo sviluppo di tecnologie di controllo e assistenza alla produzione degli ultimi anni ha spinto la diffusione dei processi di RTM, i quali hanno subito notevoli miglioramenti in termini di ottimizzazione del tempo ciclo, incremento delle proprietà e della qualità dei prodotti, riduzione dei costi di produzione. Il vantaggio principale di questa tecnologia è l'ampia versatilità dei prodotti ottenibili, in termini di forme, dimensioni, prestazioni, ecc. Anche l'ottenimento di componenti di grandi dimensioni o di forma complessa è possibile senza dover applicare pressioni eccessive. In generale, si può affermare che questa tecnica garantisca il miglior compromesso in termini di investimento nelle attrezzature, produttività e prestazioni [9].

Per abbattere ulteriormente il costo dell'attrezzatura, si può adottare un processo simile all'RTM denominato RIFT (*Resin Infusion under Flexible Tool*). In questo caso la preforma viene posizionata sempre sulla superficie dello stampo, ma lo stampo è aperto e la preforma viene sigillata mediante un sacco da vuoto. L'infusione di resina, in seguito all'aspirazione dell'aria, sfrutta una serie di distributori che dirigono il flusso verso il rinforzo, in direzione normale ad esso oppure seguendo un percorso misto normale e parallelo agli strati depositi. Grazie alla condizione di vuoto, l'infiltrazione del rinforzo può avvenire a pressione atmosferica [9].

3.2.5 Poltrusione

La poltrusione (figura 3.6) è un processo ad elevata produttività adottato a livello industriale per la produzione di manufatti continui a sezione costante come barre, tubi, ecc. Un fascio di fibre o un tessuto viene trasportato mediante rulli inizialmente in un bagno di resina fusa, di cui si impregna, e successivamente in uno stampo riscaldato in cui avviene la formatura e si attiva la reticolazione. Il consolidamento termina durante il successivo passaggio in un forno. La forma finale del componente viene conferita nel passaggio attraverso lo stampo, in cui subisce una trafilatura. Al termine del processo il manufatto passa in una zona di taglio dove ne vengono ricavati i prodotti finali [7], [9].

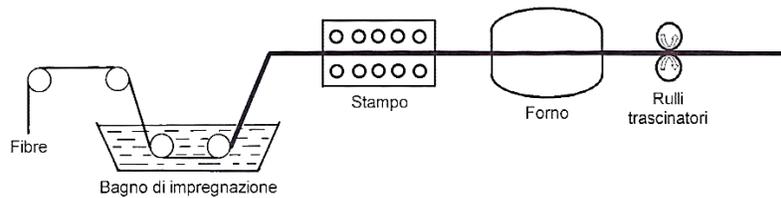


Figura 3.6. Schema del processo di poltrusione [7].

3.2.6 Filament winding

La realizzazione di manufatti di sezione cilindrica, o comunque assimilabili a solidi di rivoluzione, può sfruttare le tecniche di *filament winding* [7], [9]. Esse prevedono l'avvolgimento delle fibre impregnate di resina su un mandrino posto in rotazione seguendo diverse geometrie. Partire da fibre pre-impregnate permette di semplificare la linea produttiva, ma è anche possibile inserire a monte degli avvolgimenti un bagno di resina in cui far passare le fibre da impregnare, seguito da una serie di rulli che rimuovono l'eccesso di polimero e infine da un pettine per districare le fibre. L'avvolgimento per via umida è più critico in quanto c'è il rischio che piccole bolle d'aria formatesi nella vasca vengano trasferite alle fibre. Il moto del mandrino, in combinazione con l'orientazione delle fibre, determina il percorso di avvolgimento con il quale avviene la realizzazione del composito. Al termine dell'avvolgimento, che risulta piuttosto rapido, il componente viene sottoposto a un trattamento termico di consolidamento [7], [9].

3.3 Considerazioni sulle proprietà meccaniche dei materiali compositi

È necessario effettuare alcune semplici osservazioni riguardo il comportamento meccanico della classe dei materiali compositi in quanto, per via della loro struttura, non è assimilabile a quello dei materiali tradizionali. Infatti, fibre e matrice possiedono proprietà molto differenti, ma all'interno del materiale si trovano a lavorare sinergicamente grazie ai legami interfacciali. Inoltre, le relazioni che legano le costanti elastiche per solidi isotropi non sono valide nella maggior parte dei compositi che presentano una forte anisotropia (in una o due direzioni), pertanto sono stati elaborati una serie di modelli che ne descrivono il comportamento in determinate condizioni [7]. La difficoltà più grande nella ricerca di modelli analitici è il fatto che il comportamento del composito (in termini di modulo elastico, resistenza a trazione, ecc.) è legato alla direzione di applicazione del carico rispetto all'orientazione delle fibre: l'azione di rafforzamento delle fibre è infatti tanto più efficace quanto più sono parallele al carico, mentre sforzi perpendicolari alle fibre,

o peggio, alle lamine, sono estremamente critici. Generalmente i laminati sono progettati affinché in esercizio non subiscano sforzi perpendicolari alle lamine, che ne provocherebbero lo scollamento. Se invece si desidera garantire una certa resistenza anche in questa direzione, l'unica possibilità sono le preforme di tessuti 3D, nominate in precedenza (cap. 3.2.1). Ad ogni modo, questi materiali sono comunemente progettati, e quindi testati, per sostenere carichi paralleli alle lamine di tessuto.

Per le finalità di questo progetto di tesi i test sui provini in materiale composito sono stati effettuati esclusivamente in campo elastico, senza arrivare a rottura. Come si vede dal grafico sottostante (figura 3.7), la curva caratteristica sforzo-deformazione di un materiale composito con matrice polimerica e fibre lunghe è un ibrido tra quella della matrice, con un tratto elastico contenuto e un lungo arco plastico, e quella delle fibre, caratterizzate dall'andamento dei materiali fragili (alto modulo elastico, elevato carico di rottura ma deformazione plastica pressoché assente). Il tratto elastico del composito in ogni caso è di tipo lineare con pendenza intermedia tra quelle dei costituenti. L'andamento della seconda parte della curva invece può essere diverso a seconda del meccanismo di rottura che interviene, il quale dipende, oltre che dal tipo di sollecitazione, da fattori quali le proprietà meccaniche di fibre e matrice, l'architettura della fase dispersa, il legame interfacciale tra le due fasi, ecc. [7].

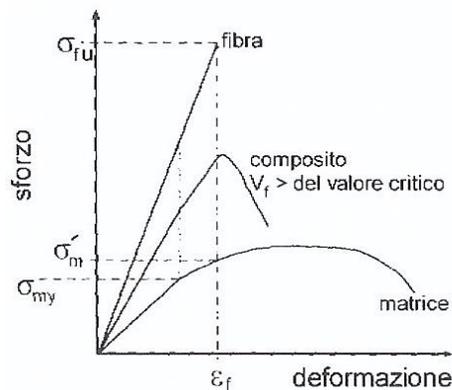


Figura 3.7. Grafico sforzo-deformazione per un composito con fibre fragili e matrice duttile [7].

Come si vede dal grafico, proprietà meccaniche come il modulo elastico e il carico limite di rottura sono valori intermedi tra quelli delle due fasi costituenti. Tale comportamento è valido anche per altre proprietà, tra cui il modulo di taglio e il coefficiente di Poisson in campo meccanico o più in generale la densità. Sono state sviluppate numerose relazioni analitiche che consentono di calcolare questi valori per il composito in questione in base all'architettura del materiale, alla forma e alla disposizione della fase dispersa (specialmente alla sua orientazione rispetto al carico) e alla frazione volumica della seconda fase nel materiale.

4. Analisi non distruttive per il monitoraggio della deformazione applicabili ai materiali compositi

Il primo passo verso l'ottenimento di strutture "intelligenti", in grado di reagire ai segnali e trasmettere dati sul proprio stato, consiste nello sviluppo di sensori di monitoraggio permanente accurati e affidabili, che possono essere facilmente integrati in queste strutture senza danneggiarle. In ottica di controlli non distruttivi applicabili ai materiali compositi, sul mercato sono disponibili diverse possibilità [3]: tra le più comuni vi sono i controlli vibrazionali, ottici, acustici, termici, le ispezioni radiografiche ecc. La figura 4.1 riassume le caratteristiche delle principali tipologie di controlli non distruttivi, in termini di tipologia e dimensione del danno che possono rilevare.

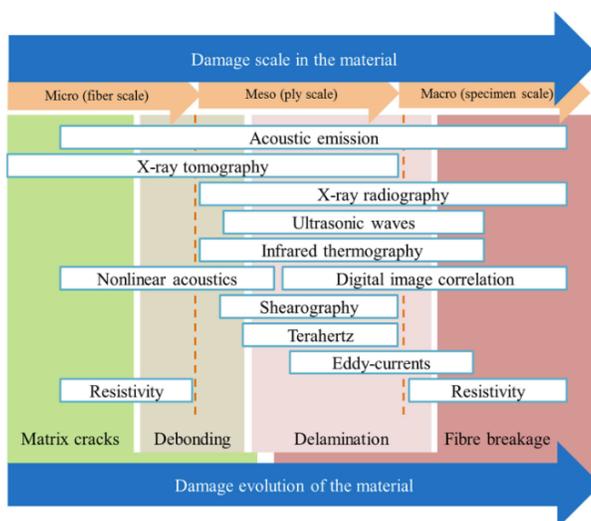


Figura 4.1. Sintesi delle principali tecniche di analisi non distruttive, con indicazione del meccanismo di danneggiamento rilevato e del range di applicabilità [11].

Volendo focalizzarsi sul monitoraggio esclusivo della deformazione, le principali tecniche sinora adottate per i materiali compositi sono la DIC e la misurazione per mezzo di estensimetri. Queste due tecniche, ora brevemente descritte, verranno sfruttate durante la sperimentazione per verificare la correttezza dei dati ottenuti mediante le fibre ottiche.

4.1 I sensori ottici e la DIC

La *Digital Image Correlation* (DIC) è una delle tecniche non distruttive più diffuse per l'analisi del campo di deformazione applicata a provini in materiale composito durante le prove in laboratorio. In breve, la misura prevede l'applicazione di un pattern di puntini con disposizione randomica sulla superficie del campione in modo che una fotocamera ottica possa registrare le modifiche che subisce durante la prova meccanica. Un apposito software rielabora le immagini della videocamera per costruire, mediante funzioni di correlazione, le cosiddette mappe di deformazione, ossia immagini che riportano lo spostamento dei vari punti del campione al procedere della prova [12]. Questa tecnica permette di visualizzare le aree di

concentrazione delle tensioni superficiali, ove potrebbe insorgere un difetto (figura 4.2) [11]. Il suo limite principale tuttavia è che l'ottenimento di misure accurate è limitato al campo laboratoriale, mentre non è adatta al monitoraggio permanente e non è facilmente applicabile a strutture reali [13].

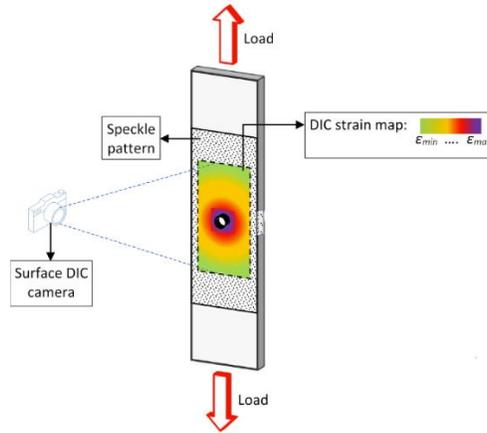


Figura 4.2. Funzionamento schematico della tecnica DIC [14].

4.2 I sensori elettrici e gli estensimetri

Esistono innumerevoli tipologie di sensori elettrici che differiscono per la proprietà fisica che controllano (capacità, induttanza, resistenza, ecc.) e quella che misurano (pressione, forza, deformazione, ecc.) [5]. Si può affermare che per l'alto livello di sviluppo i dispositivi a resistenza siano i più largamente diffusi. Il principio di funzionamento degli estensimetri a resistenza per la misura della deformazione (o *strain gauges*) è che una variazione della lunghezza di un materiale conduttore o semiconduttore ne determina una variazione della resistenza ai suoi capi. Questi dispositivi sono infatti costituiti da un pattern a lamina metallica supportato da un substrato flessibile e isolante, che può essere incollato al materiale da testare e si deforma con esso. La resistenza elettrica dell'estensimetro viene misurata con precisione mediante un circuito a ponte di Wheatstone e permette di quantificare la deformazione del materiale e di conseguenza l'entità della sollecitazione subita [4]. Una tipologia molto semplice di estensimetro è riportata in figura 4.3.

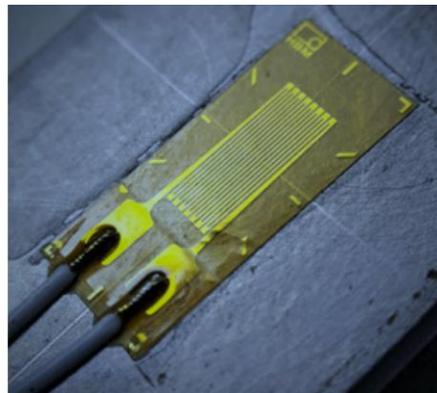


Figura 4.3. Esempio di un estensimetro a lamina singola [15].

Uno dei punti deboli di questi dispositivi è il fatto che sono estremamente localizzati, cioè tanto più sensibili quanto più sono vicini alla zona da monitorare. Di conseguenza è necessario conoscere a monte dell'applicazione la zona di maggior concentrazione delle tensioni, in modo che possano essere collocati in corrispondenza di essa [13]. Inoltre per salvaguardare l'accuratezza della misura è consigliato selezionare con attenzione il tipo di sensore in base alla compatibilità con la struttura e alla dimensione, in quanto lo scarso legame con il substrato o il diverso coefficiente di dilatazione termica possono influire sui dati raccolti [5], [16].

In generale comunque si tratta di una tecnologia ben consolidata, e la corretta installazione permette di ottenere risultati accurati, tuttavia la loro applicazione a strutture reali presenta alcuni ostacoli [4]:

- Sono limitati a deformazioni superficiali;
- Non possono essere incorporati nei compositi per via delle dimensioni eccessive;
- Sono sensibili a scariche elettriche e a interferenze elettromagnetiche;
- Sono soggetti a degrado durante l'esercizio a lungo termine in presenza di fatica;
- Per le connessioni richiedono cavi elettrici di collegamento.

4.3 Considerazioni sulle tecniche di analisi non distruttive

Una difficoltà che si incontra con la maggior parte delle "classiche" tecnologie di analisi non distruttive è che non esiste uno standard riconosciuto per quantificare in maniera completa e univoca il danneggiamento subito dal composito: ogni misura consente di ricavare alcuni fattori ma ne trascurava altri, rendendo necessario combinare più tecniche per ottenere una diagnosi esauriente. In più, l'ottenimento di una diagnosi completa diventa tanto più difficile quanto più complessa è la struttura da analizzare: al di fuori dell'ambiente laboratoriale infatti molte tecnologie non sono applicabili, o lo sono con grandi limitazioni [11]. È in questo panorama che, a partire dagli anni '90, l'evolversi della tecnologia di fabbricazione delle fibre ottiche che le rende disponibili a basso costo fa sì che emergano i vantaggi di questo materiale nell'ambito dei controlli non distruttivi e del monitoraggio permanente [17].

5. Le fibre ottiche

Le fibre ottiche sono filamenti vetrosi di lunghezza ipoteticamente infinita che sono in grado di trasmettere un segnale guidando la luce al loro interno. La particolarità di questi elementi è il fatto che mentre il vetro in forma massiva è un materiale intrinsecamente fragile, se viene prodotto in forma di filamenti di diametro inferiore al decimo di millimetro risulta particolarmente flessibile, con deciso miglioramento delle sue proprietà meccaniche [18]. Secondo la teoria della frattura fragile di Griffith (anni '20) [19], la fragilità dei materiali ceramici, tra cui il vetro, è dovuta essenzialmente alla distribuzione randomica e inevitabile di difetti al loro interno, i quali, quando il materiale è sottoposto a uno stress meccanico, fungono da centri di concentrazione delle tensioni amplificando quella percepita dal materiale in quel punto, e pertanto promuovono la nucleazione di cricche, che propagano rapidamente all'interno del materiale determinando una rottura improvvisa e quindi catastrofica. La teoria di Weibull (1939) [20], che è la più diffusa per descrivere la frattura nei materiali fragili, è una teoria probabilistica, nel senso che associa la resistenza a rottura del materiale con la probabilità di trovare al suo interno un difetto che per forma e/o dimensioni potrebbe scatenare l'innesco di una cricca e provocarne la frattura. Questa probabilità è strettamente legata alla dimensione dell'oggetto considerato, in quanto in un volume maggiore la presenza di difetti di dimensioni critiche è statisticamente più probabile. Da qui il grande vantaggio di produrre il vetro in forma di fibre: le sezioni così ridotte fanno crollare drasticamente la probabilità di incontrare un grosso difetto interno, e ciò ne incrementa considerevolmente la resistenza meccanica, al punto da rendere questi oggetti relativamente flessibili. Il limite di rottura a trazione di una fibra di vetro può infatti raggiungere i 1000 MPa, valore superiore di almeno 10-15 volte rispetto al vetro in forma massiva [21].

La capacità della fibra ottica di trasmettere la luce al suo interno invece è legata all'indice di rifrazione n , definito come

$$n = \frac{c}{v} \quad (5.1)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto e v la velocità della luce nel mezzo considerato (il vetro in questo caso). Per il vetro si considera un indice di rifrazione medio pari a 1,5, che significa che è in grado di trasmettere la luce a una velocità pari ai 2/3 della velocità della luce nel vuoto. Dunque, oltre alla rapidità di trasmissione del segnale, il vetro è un materiale ideale per questa applicazione in quanto immune a interferenze elettromagnetiche, stabile in temperatura e inerte alla maggior parte degli agenti chimici (a eccezione del solo HF), flessibile nella composizione chimica e realizzabile su larga scala in maniera piuttosto economica [18]. L'immunità alle interferenze elettromagnetiche ne permette l'utilizzo anche in ambienti dove i classici sensori elettronici non potrebbero essere adoperati se non con estreme (e costose) misure protettive, mentre l'inertia chimica rende le fibre ottiche utilizzabili anche in ambienti altamente corrosivi [22].

La luce viene guidata all'interno della fibra ottica secondo il principio di riflessione interna totale (*Total Internal Reflection*, TIR): un raggio luminoso viene completamente riflesso all'interno di un mezzo finto che l'interfaccia su cui incide lo separa da un altro mezzo con indice di rifrazione inferiore rispetto a quello di propagazione, e che l'angolo di incidenza sia maggiore di un certo angolo critico. Per questo motivo la

fibra ottica è composta internamente da un nucleo, il *core*, con diametro nell'ordine di qualche decina di μm , ed esternamente da un mantello chiamato *cladding*, il cui diametro misura generalmente intorno a 125 μm . Per il principio di riflessione interna totale, le composizioni chimiche di core e cladding vanno selezionate in modo che tra i rispettivi indici di rifrazione (n) sussista la relazione $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$. Il cladding, oltre a confinare la luce all'interno del core minimizzandone la dispersione, ha anche una funzione protettiva del nucleo dall'assorbimento di contaminanti esterni [23]. Questa struttura viene poi ulteriormente avvolta all'interno di un coating polimerico protettivo, che la rende più maneggevole e flessibile, portando il diametro esterno intorno a 150 - 250 μm . Un ingrandimento al microscopio ottico della sezione trasversale di una fibra ottica è riportato in figura 5.1.

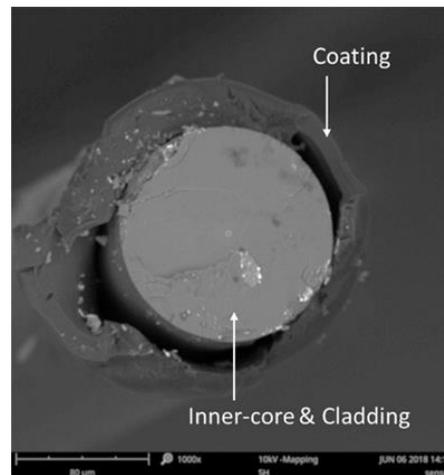


Figura 5.1. Cross-section di una fibra ottica per mettere in luce i costituenti [24].

In base al tipo di core, le fibre ottiche possono appartenere a due categorie principali (figura 5.2): nelle fibre multimodali (le più diffuse) il core permette il passaggio simultaneo di più modi della luce a una data lunghezza d'onda, riuscendo quindi a trasmettere più tipologie di dati. Viceversa, nelle fibre monomodali il core ha un diametro più piccolo (8-10 μm anziché 50-60 μm) e quindi permette il passaggio di un unico modo di propagazione della luce, che tende ad allineare al suo interno in modo che non rimbalzi sulle pareti [25]. In una fibra monomodale l'attenuazione del segnale è estremamente bassa, ma ciò comporta anche un costo maggiore; viceversa, nella multimodale i modi di ordine superiore tendono a disperdersi nel cladding man mano che propagano lungo la fibra [21].

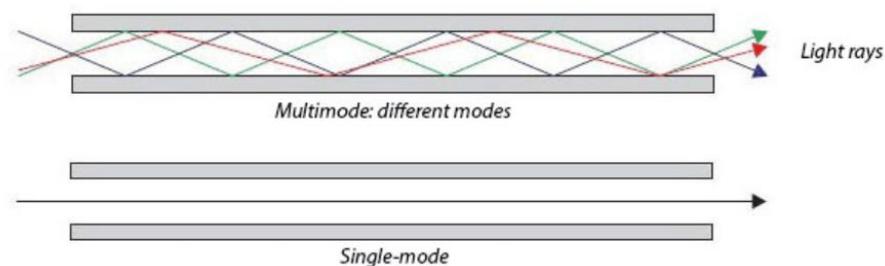


Figura 5.2. Rappresentazione schematica della differenza tra fibre ottiche multimodali e monomodali, relativamente al numero di raggi che propagano all'interno del core [25].

Per valutare l'angolo critico di riflessione θ_c , si fa riferimento alla Legge di Snell applicata all'interfaccia core/cladding:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (5.2)$$

In cui con i pedici "1" e "2" si indicano rispettivamente il core e il cladding della fibra ottica. Geometricamente si può vedere che per $\theta_1 = \theta_c$ si ha $\theta_2 = \pi/2$, pertanto la Legge di Snell per l'interfaccia core/cladding si riduce a:

$$n_1 \text{sen} \theta_c = n_2 \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} \right) = n_2 \quad (5.3)$$

da cui è possibile derivare un angolo limite di incidenza pari a

$$\theta_{lim} = \arcsen \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (5.4)$$

oltre il quale la radiazione è totalmente riflessa, e dunque confinata all'interno del core. Lo schema in figura 5.3 riassume queste considerazioni sull'angolo di incidenza.

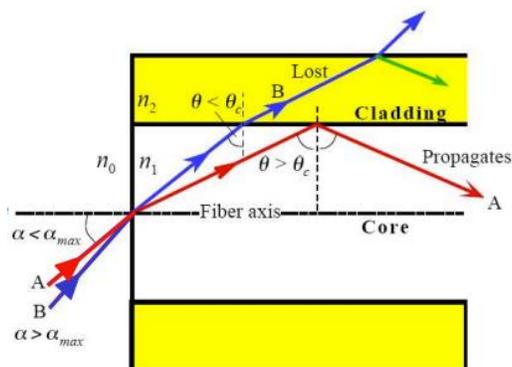


Figura 5.3. Rappresentazione schematica del percorso della luce in una fibra ottica rispetto all'inclinazione del fascio [18].

Come anticipato in precedenza, uno dei vantaggi dell'utilizzo del vetro come materiale per fibre ottiche è la flessibilità che permette di avere in termini di composizione chimica. Ciò è molto utile in quanto la scelta del materiale per core e cladding non deve tener conto solamente delle imposizioni sull'indice di rifrazione e sull'angolo di incidenza, ma è altrettanto importante che i coefficienti di dilatazione termica dei due materiali siano quanto più possibile simili per non incorrere in distacchi né nell'insorgenza di tensioni residue, e che tra le rispettive temperature di transizione vetrosa intercorra la relazione (5.5) per garantire adesione all'interfaccia [18]:

$$T_{g,cladding} < T_{g,core} \quad (5.5)$$

Esistono diversi metodi di fabbricazione di una fibra ottica [18], [26], accomunati dalla necessità, per ottenere un buon prodotto, di partire da materie prime a elevatissima purezza. Il metodo del doppio crogiolo

(figura 5.4a), che implica una filatura diretta della fibra, prevede la fusione di due paste di vetro a composizione chimica diversa, una per il core e una per il cladding, che verranno colate all'interno di due crogioli concentrici. Alla base di questi vi è un punto d'incontro dal quale è possibile avviare la filatura della fibra. Le altre tecniche, maggiormente utilizzate, prevedono di partire da una preforma, ossia da una replica della fibra ottica in scala maggiore che viene filata in una torre di filatura (figura 5.4b). Questo sistema presenta un mandrino rotante al quale viene fissata un'estremità della preforma e un forno tubolare entro il quale cade l'altra estremità, in modo che il riscaldamento cui è sottoposta ne permetta la filatura. A valle di un sistema laser di controllo del diametro è presente il tamburo di avvolgimento della fibra ottica. Il rivestimento polimerico viene impresso immergendo la fibra in un bagno contenente il monomero, che viene sottoposto a polimerizzazione mediante radiazione UV.

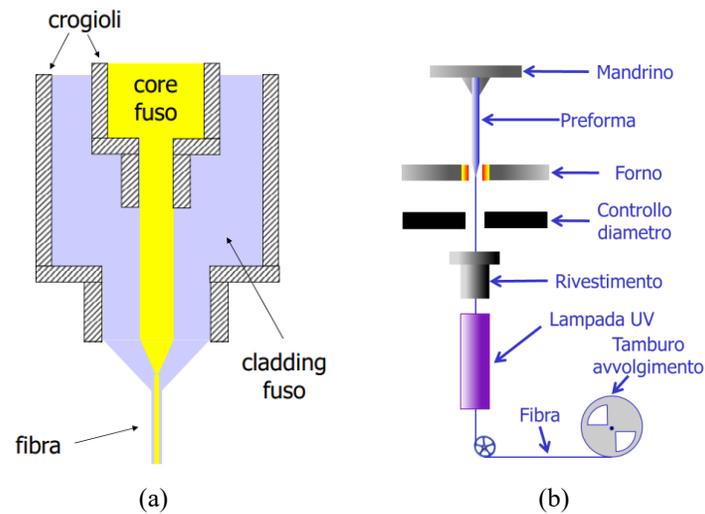


Figura 5.4. Schematizzazione del metodo del doppio crogiolo (a) e della torre di filatura delle preforme (b) [18].

6. Tecniche di monitoraggio della deformazione basate su fibre ottiche

L'evoluzione subita dalle fibre ottiche per l'industria delle telecomunicazioni ha portato negli anni a ottenere un prodotto di elevata purezza (ossia con perdite di segnale quasi nulle) a costi competitivi per la produzione di massa. Come conseguenza il campo d'azione delle fibre ottiche è stato allargato a vari settori, tra i quali spicca il monitoraggio delle deformazioni [4], [27]. Il loro successo in questo campo è legato a numerosi punti di forza che distinguono questi sensori da quelli convenzionali [23]:

- Sono facili da integrare nelle strutture, specialmente se in materiale composito, grazie alla ridotta sezione;
- Sono elettricamente isolanti;
- Sono immuni alle interferenze elettromagnetiche e alle onde radio;
- Sono leggeri e robusti;
- Sono immuni ad attacchi chimici, per cui sono utilizzabili in ambienti aggressivi;
- Sono altamente sensibili;
- Permettono di effettuare multiplexing del segnale;
- Permettono di rilevare un buon numero di variabili, tra cui deformazione e temperatura.

I sensori per il rilevamento in fibra ottica si possono suddividere in due categorie principali: intrinseci ed estrinseci. Nei sensori estrinseci la fibra ottica viene sfruttata esclusivamente per il trasporto della luce, la quale viene poi elaborata da un dispositivo ottico esterno. In un sensore intrinseco, al contrario, la zona sensibile è parte della fibra stessa, nel senso che una perturbazione a livello macroscopico della fibra influenza le caratteristiche della luce al suo interno [23]. Vengono ora riportate le principali tipologie di sensori in fibra ottica.

6.1 Sensori in fibra ottica basati sull'intensità della luce

La tipologia più semplice di sensori in fibra ottica è quella dei sensori IBFO (*Intensity Based Fiber Optic*) [27], che è stata la prima ad essere adoperata. Esistono varie configurazioni di questi dispositivi, accomunate dal fatto che misurano l'intensità della luce nella fibra a seguito di una riflessione (dovuta per esempio a un'apertura del core) o a seguito di una piccola deflessione, che determina una perdita di segnale (*microbending loss*). Questo tipo di sensore è stato sfruttato in alcuni esperimenti [4] per monitorare l'avanzamento del trattamento di cura dei materiali compositi, in quanto, secondo la legge di Fresnel, l'intensità della luce riflessa dalla punta della fibra è proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo circostante, che varia con l'avanzare della polimerizzazione. In tutti i casi si tratta di dispositivi semplici e di basso costo, ma sono stati quasi del tutto abbandonati in quanto piccole fluttuazioni di intensità della sorgente luminosa provocano gravi errori e imprecisioni nella misura [4], [27].

Una classe di sensori *intensity-based* sono quelli a microflessione, nei quali la fibra ottica è contenuta in un sistema, ad esempio nel mezzo di due piastre scanalate, che genera su di essa una serie di piccole ondulazioni fisiche (con raggi di curvatura nell'ordine del micrometro) a causa delle quali si verifica una perdita di intensità del segnale luminoso correlabile con diversi parametri (deformazione e temperatura, ma

anche pressione, accelerazione ecc.) [3], [23]. Una rappresentazione schematica di questi sensori è riportata in figura 6.1.

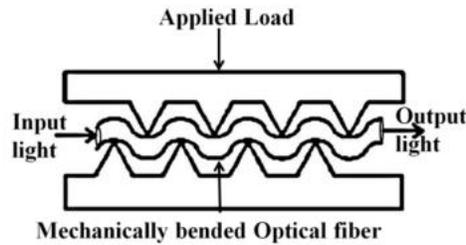


Figura 6.1. Principio di un sensore a microflessione [3].

Si può applicare questo principio anche a una fibra ottica inserita direttamente tra i layer di un composito: in questo caso, fenomeni come delaminazione o criccatura generano quelle corrugazioni che si traducono in microflessioni sulla fibra ottica, con conseguente attenuazione del segnale in uscita [3]. Questo tipo di sensore è comunque poco utilizzato per via della scarsa precisione di misura, che non permette di effettuare valutazioni accurate del campo tensionale del materiale [3].

6.2 Sensori in fibra ottica di tipo interferometrico

Un'altra tipologia di sensori in fibra ottica sfrutta la modulazione di fase di un fascio luminoso monocromatico: il principio di base è che la riflessione di questa luce interferisce con il fascio originale o con un fascio di riferimento, creando un pattern di interferenza. La peculiarità di questi dispositivi, che all'atto pratico non sono altro che interferometri, è che rilevano spostamenti con altissima precisione (si parla di una sensibilità di 10 nm [4]), che annovera questa tecnica tra le più accurate per le misurazioni in laboratorio. Il dispositivo più diffuso basato sul principio della modulazione di fase è l'interferometro estrinseco di Fabry-Perot (EFPI, *Extrinsic Fabry-Perot Interferometer*), schematizzato in figura 6.2. Il dispositivo EFPI è costituito da due spezzoni di fibra ottica inseriti all'interno di un tubicino capillare di vetro, tra i cui estremi viene lasciato libero un piccolo spazio. Le fibre ottiche vengono saldate agli estremi del tubicino di vetro per fusione termica. Per effettuare la misura si rileva l'interferenza generata tra le due superfici parallele all'interno della cavità dai fasci di luce riflessi e trasmessi [3], [23]. Infatti la lunghezza della cavità del sensore varia sotto l'applicazione di un carico esterno e a livello microscopico si traduce in una differenza di fase della luce riflessa o trasmessa. Ciò significa che l'interferometro, misurando lo shift della lunghezza d'onda della luce, può risalire all'entità della deformazione applicata [3]. Nonostante l'elevata sensibilità, questo tipo di dispositivo permette di inserire un solo sensore per fibra e quindi non consente di effettuare multiplexing. Inoltre si tratta di un sistema molto complesso, e per questi motivi il suo utilizzo è limitato [4].

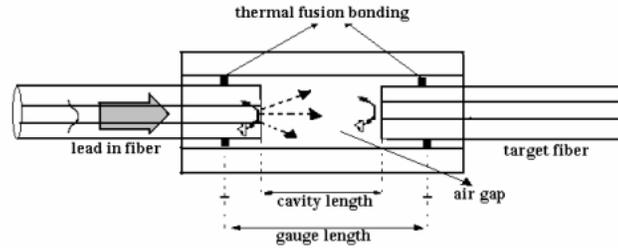


Figura 6.2. Sensore EFPI basato su un tubicino capillare [23].

6.3 Sensori a reticolo di Bragg o FBG

Sin dalla loro scoperta, all'inizio degli anni '90, grande attenzione è stata data ai sensori a reticolo di Bragg (*Fibre Bragg Gratings*, o FBG) per le loro potenzialità [4]. Si ottengono creando lungo il core della fibra ottica locali alterazioni dell'indice di rifrazione mediante la realizzazione di incisioni con radiazioni UV o una sorgente laser pulsata [28]. Nel momento in cui un fascio di luce convogliato all'interno del core della fibra ottica interagisce con il reticolo di Bragg, la porzione di spettro centrata sulla lunghezza d'onda che rispetta la condizione di Bragg verrà riflessa, mentre le altre lunghezze d'onda verranno trasmesse lungo la fibra (figura 6.3). La porzione di luce riflessa, proporzionale alla spaziatura tra le incisioni, è individuata appunto dall'equazione di Bragg (6.1):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (6.1)$$

dove λ_B è la lunghezza d'onda di Bragg (quella che subisce riflessione), n_{eff} è l'indice di rifrazione effettivo del core della fibra e Λ è il periodo del reticolo di Bragg, relativo alla microstruttura della fibra [27], [28]. Quando la struttura è soggetta a una deformazione assiale, λ_B subirà uno shift relativo alla variazione del periodo del reticolo, pertanto dal suo valore è possibile risalire all'entità della deformazione. Un carico termico invece può essere rilevato perché influenza l'indice di rifrazione della fibra ottica, mentre l'effetto di dilatazione termica è relativamente trascurabile [29].

Un vantaggio importante di questo tipo di sensori è la possibilità di effettuare multiplexing [29]: su una stessa fibra è possibile inscrivere un certo numero di reticoli di Bragg per effettuare misurazioni diverse o per le stesse misurazioni ma in posizioni diverse. Per motivi tecnologici, il numero massimo di sensori inscrivibili all'interno di una fibra è generalmente limitato dalle perdite della fibra ottica (si parla mediamente di 100 sensori per fibra). Inoltre il processo di aggiunta di un sensore è piuttosto costoso, fattore che ne limita l'utilizzo in alcune applicazioni industriali [24]. Come già accennato, i sensori FBG sono sensibili alle deformazioni termiche, pertanto per ottenere misure accurate della deformazione meccanica tale contributo dev'essere adeguatamente compensato [4].

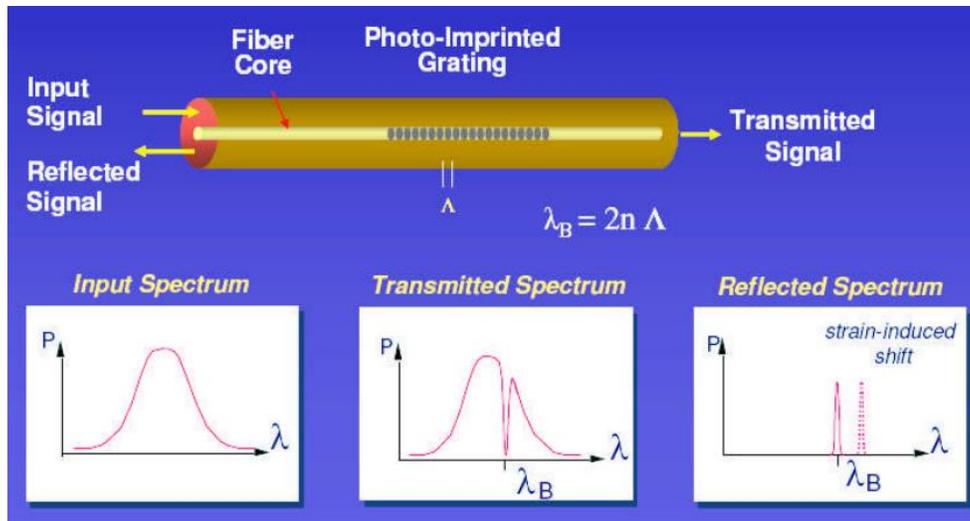


Figura 6.3. Schema del principio di funzionamento di una fibra a reticolo di Bragg [23].

In generale gli FBG offrono numerosi vantaggi, oltre a quelli che accomunano i dispositivi in fibra ottica [4]:

- Permettono di correlare direttamente lunghezza d'onda e deformazione;
- Non richiedono ricalibrazione;
- Trasmettono il segnale per lunghe distanze senza perdite;
- Permettono di incorporare più sensori su una stessa linea di misura;
- Sono stabili sul lungo periodo, anche in condizioni ambientali ostili;
- Grazie alla taglia ridotta possono essere inglobati all'interno di strutture composite senza creare vuoti o stress residui.

Gli FBG dunque permettono di monitorare il comportamento della struttura attraverso un certo numero di punti, che dovrebbero essere sufficientemente rappresentativi del comportamento della stessa. Il loro limite principale è proprio questo [30]: i dati che se ne ricavano sono relativi a posizioni discrete lungo la fibra, e per quanto possano essere ravvicinati i sensori per aumentare la risoluzione, inevitabilmente si perdono informazioni circa il comportamento globale della struttura. Per applicazioni critiche, questo potrebbe rappresentare un grosso problema, anche perché la realizzazione di numerose incisioni in un piccolo tratto di fibra comporta un deciso aumento dei costi oltre che alcuni problemi tecnologici. Questo è il principale motivo per cui ben presto ci si è spostati verso una tecnologia basata sulle fibre ottiche caratterizzata da misurazioni distribuite e non più discrete (*Distributed Fiber Optic Sensors, DFOS*) [30]. Questa innovazione ha permesso di mantenere tutti i vantaggi offerti dalle fibre ottiche e in aggiunta raccogliere un segnale continuo e costante, come mostrato in figura 6.4.

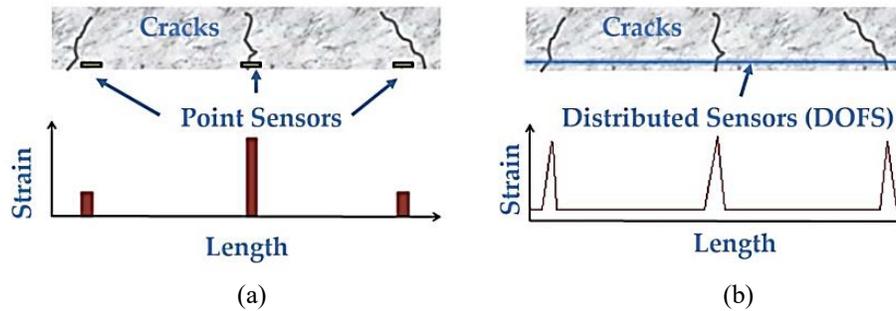


Figura 6.4. Differenze tra (a) il rilevamento discreto di un FBG e (b) il rilevamento distribuito (DFOS) [30].

6.4 Sensori in fibra ottica per il rilevamento distribuito

In una fibra ottica adibita al rilevamento distribuito, le principali tipologie di scattering della luce che si possono sfruttare per rilevare la deformazione sono tre:

- 1) Scattering di Raman;
- 2) Scattering di Brillouin;
- 3) Scattering di Rayleigh.

Lo scattering di Raman [31] è un fenomeno dovuto a processi anelastici: gli atomi del vetro assorbono l'energia dei fotoni incidenti rilasciando di conseguenza altri fotoni di energia maggiore o minore rispetto a quelli incidenti. La differenza di energia viene rilevata come una differenza nella lunghezza d'onda della luce scatterata, che in una certa misura dipende anche dalla temperatura. Per questo da un lato è possibile sfruttare questo fenomeno per misure distribuite sensibili alle variazioni di temperatura, ma dall'altro non è adatto a impieghi nel settore dell'ingegneria civile, dove le oscillazioni termiche non sono controllabili [31].

Anche lo scattering di Brillouin [31] si basa su un'interazione anelastica tra la luce indotta nella fibra e le onde acustiche presenti al suo interno. Gli atomi della fibra infatti sono soggetti a vibrazioni (a causa delle onde acustiche che si ripercuotono lungo la fibra) che dipendono dalle condizioni fisiche di temperatura e deformazione della fibra ottica. Queste vibrazioni provocano nella luce uno spostamento di frequenza per effetto Doppler, che può essere rilevato per diffusione. Al contrario del precedente, poiché permette di effettuare misure in un range molto esteso (fino a diversi km), è estremamente adatto per il settore civile [31].

Lo scattering di Rayleigh [31] invece è un fenomeno elastico che ha a che fare con impurezze di dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda della luce, che provocano una riduzione dell'intensità del fascio retrodiffuso senza influenzarne la fase o la lunghezza d'onda. Sebbene il suo range di misura sia di soli 70 m, è caratterizzato da un'elevatissima risoluzione spaziale (inferiore al mm) e da basse perdite di segnale (0,2 dB/km [32]). Grazie a queste proprietà permette di monitorare con precisione fenomeni come il processo di formazione delle cricche.

6.4.1 Riflettometro ottico a retrodiffusione

Il sistema di lettura ed elaborazione dei dati di un rilevamento distribuito in fibra ottica sfruttando il backscattering di Rayleigh è chiamato OBR (*Optical Backscatter Reflectometer*, riflettometro ottico a retrodiffusione). Il suo principio di funzionamento è piuttosto semplice. Esso invia un fascio di luce laser all'interno del core di una fibra ottica, il quale presenta una serie di impurezze naturali lungo la sua estensione che nonostante la purezza delle materie prime e le tecnologie di fabbricazione più avanzate sono inevitabilmente presenti. Tali difetti provocano la riflessione di parte della luce (figura 6.5), che torna verso la sorgente creando un certo pattern di riflessione. Questo pattern rappresenta sostanzialmente l'impronta digitale della fibra ottica, e insieme al tempo impiegato dalla luce nel suo percorso viene memorizzato dal sistema come schema di riferimento.

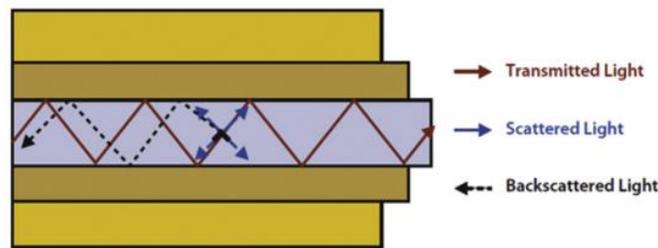


Figura 6.5. Effetto di retrodiffusione della luce in una fibra ottica [31].

Nel momento in cui la fibra è sottoposta a sollecitazioni meccaniche che la deformano, la posizione dei centri di scatter (le impurezze) cambierà, ottenendo di conseguenza un pattern di riflessione leggermente diverso dall'originale. Il confronto tra i due modelli permette di quantificare l'entità della deformazione subita lungo l'intera estensione della fibra. Lo spostamento relativo della lunghezza d'onda causato dalla deformazione e dalle variazioni di temperatura può essere espresso come [32]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left\{ 1 - \left(\frac{n_{eff}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \Delta\varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn_{eff}}{dT} \right)}{n_{eff}} \right] \Delta T \quad (6.2)$$

dove n_{eff} è l'indice di rifrazione della fibra, $\Delta\varepsilon$ è la variazione di deformazione meccanica, p_{11} e p_{12} sono i coefficienti di Pockel del materiale della fibra, ν è il coefficiente di Poisson e α è il coefficiente di espansione termica del materiale. Ciò significa che misurando lo shift relativo della lunghezza d'onda tra la condizione indeformata e quella deformata è possibile dedurre la variazione di lunghezza che subisce la fibra, sia per effetto meccanico che per effetto termico [32]. L'utente, prima di effettuare la misura, impone arbitrariamente un valore di *gage pitch*, ossia della spaziatura tra i punti di rilevamento della fibra (figura 6.6). Il numero di punti di rilevamento quindi dipende da questo valore e dalla lunghezza della fibra. Ovviamente, tanto più alto è il *gage pitch* tanto meno precisa è la misura, in quanto i dati tendono a un livellamento; viceversa, un *gage pitch* troppo basso favorisce la dispersione dei risultati, poiché amplifica il rumore di fondo [13]. Ciò significa che nel misurare alti gradienti di deformazione è necessario equilibrare

accuratezza e dispersione dei risultati. Il rumore di fondo è anche legato a disomogeneità del materiale testato e alla posizione delle fibre ottiche rispetto al rinforzo [13].

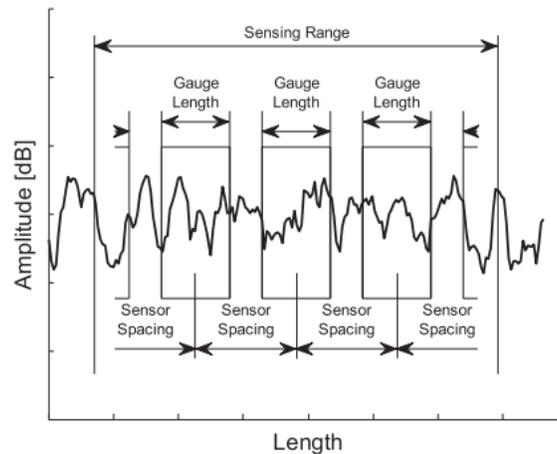


Figura 6.6. Rappresentazione schematica della zona sensibile della fibra per il rilevamento mediante OBR [13].

Storicamente, nel settore delle telecomunicazioni, l'analisi dei dati da riflettometria veniva eseguita nel dominio del tempo (*Optical Time Domain Reflectometry*, OTDR) [31], sfruttando cioè il ritardo temporale nel ritorno della luce per avere informazioni relative in primo luogo alla posizione dei centri di scattering, e di conseguenza al loro spostamento durante la misura, e in secondo luogo alle condizioni della fibra ottica, legate all'intensità della luce retrodiffusa. Era quindi sufficiente analizzare le riduzioni di intensità della luce in relazione al ritardo con cui arrivava all'apparato di acquisizione del segnale per poi paragonare il tutto con le condizioni di riferimento del sistema [31]. Tuttavia, il fatto di basarsi sull'intensità della luce rappresenta una limitazione in termini di risoluzione spaziale, che non supera 0,1-1 m [2], [32]: per aumentare la risoluzione infatti è necessario ridurre l'ampiezza dell'impulso e di conseguenza l'energia, amplificando il rumore di fondo e quindi rendendo la tecnica difficile da gestire [31]. Tra le varie soluzioni per incrementare la risoluzione spaziale senza abbassare l'energia della luce rilevata, una molto efficace è l'utilizzo della riflettometria ottica nel dominio della frequenza (OFDR, *Optical Frequency Domain Reflectometry*) [31]. In questo modo è possibile ottenere una sensibilità estremamente elevata, con una risoluzione fino a 1 μm e 0,1°C per decine di metri di fibra ottica [31]. Il rilevamento distribuito in fibra ottica, combinando i vantaggi dello scattering di Rayleigh alla riflettometria nel dominio della frequenza, diventa estremamente interessante in termini di alta risoluzione spaziale, facilità di integrazione nelle strutture composite, basso costo dei sensori (realizzati con fibre ottiche commercialmente disponibili a basso costo), elevata sensibilità della misura e rilevamento della deformazione lungo l'intera estensione della fibra [24]. Non a caso, l'apparecchiatura Luna ODiSi utilizzata per il progetto è basata su questo effetto [31].

6.5 Criticità nell'utilizzo delle fibre ottiche per il monitoraggio strutturale

Il monitoraggio della deformazione mediante fibre ottiche è una tecnica che a livello teorico può essere considerata relativamente semplice, ma all'atto pratico l'applicazione a componenti fisici presenta alcune

insidie da conoscere per evitare di incorrere in misurazioni errate. Alcune di queste criticità vengono discusse qui di seguito.

6.5.1 Il problema della dimensione delle fibre ottiche

Il difetto principale delle fibre ottiche è che senza un adeguato rivestimento polimerico risultano estremamente fragili durante la manipolazione. Tuttavia, l'aggiunta di un rivestimento esterno comporta inevitabilmente un aumento del diametro della fibra ottica, di almeno un ordine di grandezza rispetto alle più comuni fibre di rinforzo. Le fibre ottiche più utilizzate a livello commerciale presentano infatti diametri tra 125 e 230 μm [3], mentre le fibre di rinforzo in carbonio o in vetro più comuni si aggirano intorno ai 5-10 μm di diametro [13]. Ciò implica che incorporare una fibra ottica all'interno di un laminato potrebbe generare una discontinuità non indifferente a livello di concentrazione delle tensioni. Diversi studi [28] negli anni passati hanno affrontato questo problema, e sono giunti alla conclusione che le fibre ottiche più comuni inducono una leggera distorsione nel materiale, la cui entità dipende dal tipo di laminato (es. se unidirezionale, tessuto intrecciato ecc.) e dalla loro orientazione rispetto alle fibre di rinforzo, ma non modificano in modo sostanziale la distribuzione degli stress nel materiale (specialmente se parallele alla direzione di carico).

Ulteriori problematiche ampiamente analizzate, relative all'introduzione delle fibre nel laminato, sono la potenziale riduzione delle proprietà meccaniche e l'aumento della probabilità di frattura del composito a causa del diametro delle fibre. A questo proposito, da alcuni studi [3], [28], [33], [34] è emerso che una fibra ottica parallela a una lamina il cui rinforzo si trova nella stessa direzione non influenza in modo sostanziale la resistenza del laminato, ma si è visto che al crescere dell'angolo tra fibra ottica e rinforzo la diminuzione delle proprietà meccaniche risulta via via più evidente [3], [35]. Ciò è in parte dovuto al fatto che fibre ottiche ortogonali alla direzione del rinforzo possono portare alla formazione delle caratteristiche tasche di resina durante il processo di cura, che potrebbero provocare, a seconda della direzione del carico, un cedimento prematuro per delaminazione [3], [5]. La figura 6.7 è un'immagine al microscopio in cui si vede l'effetto di tre fibre ottiche all'interno di un laminato: quella più in alto si trova all'interfaccia $[0^\circ/45^\circ]$, quella centrale alla $[0^\circ/0^\circ]$ e quella inferiore, che determina una tasca di resina molto allargata, all'interfaccia $[90^\circ/45^\circ]$. La fibra all'interfaccia $[0^\circ/0^\circ]$ mostra l'area di contatto con le lamine più estesa [24].

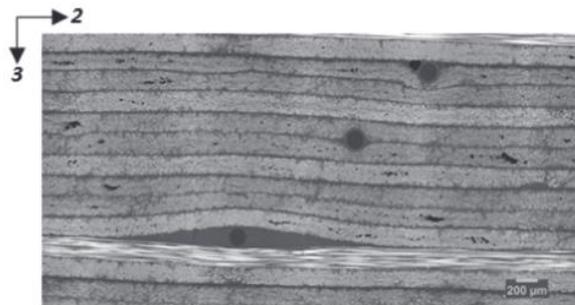


Figura 6.7. Ingrandimento al microscopio delle interfacce del laminato con sensori incorporati [24].

L'orientazione delle fibre ottiche rispetto alle fibre di rinforzo ne influenza anche la modalità di frattura. Da studi sperimentali infatti [34] emerge che la resistenza a fatica di fibre incorporate tra due layer $[0^\circ/0^\circ]$ è inferiore rispetto alle stesse fibre incorporate tra due layer $[90^\circ/90^\circ]$: nel primo caso infatti il danneggiamento della fibra inizia a livello dei suoi difetti interni, mentre nel secondo caso è dovuto a cricche nella matrice che causano concentrazione delle tensioni e attraversano la fibra.

Diversi test condotti in laboratorio negli ultimi anni tuttavia hanno dimostrato che per una bassa densità di fibre ottiche l'effetto sulle proprietà meccaniche è irrilevante, e la fibra ottica non influenza il degrado a lungo termine della struttura né nella direzione longitudinale né nella direzione trasversale [3].

6.5.2 Il problema del rivestimento

Il coating polimerico che avvolge la fibra, oltre a essere determinante nella protezione di quest'ultima, agisce come vettore per il trasferimento delle deformazioni dal materiale al core della fibra. Un buon rivestimento dovrebbe possedere quindi due requisiti fondamentali: conferire una buona elasticità alla fibra ottica, in modo da poterla maneggiare senza che si spezzi, e trasferire adeguatamente la deformazione del substrato al core interno. A seconda del campo di applicazione delle fibre ottiche è possibile selezionare il materiale di rivestimento più adeguato (es. acrilato, poliimmide, silicone...). Nell'ambito del rilevamento delle deformazioni sono stati portati avanti alcuni studi di confronto tra i diversi materiali per selezionare il più adatto [36–39].

Uno dei materiali di rivestimento più diffusi è l'acrilato [36]: si può trovare sia nella forma *double coated acrylate coating* che *single coated acrylate coating*. Il primo tipo consiste in un doppio strato di oligomeri di uretano-acrilato induriti per via UV, uno interno molto elastico e uno esterno più rigido. L'acrilato per rivestimento singolo invece è generalmente di tipo epossidico e presenta una rigidità intermedia tra i due layer del caso precedente. Al contrario dell'acrilato, i coating poliimmidici [36] induriscono per via termica; ciò implica che a seconda del ciclo termico impostato le proprietà ottiche e meccaniche di questo rivestimento possano variare considerevolmente. Solitamente tuttavia si tratta di un materiale altamente rigido. Altre possibilità sono il silicone (polimetilsilossano) [36], che essendo una gomma presenta un'elasticità piuttosto accentuata, e il rivestimento ORMOCER[®] (abbreviazione per *Organic Modified Ceramics*) [40]. Si tratta di un materiale ibrido, sviluppato da Fraunhofer ISC [41] composto da una struttura ossidica inorganica nella quale dei gruppi organici vengono sostituiti o legati per cross-linking. Le procedure di sintesi di questo materiale sono molto complesse. Il network inorganico a base silice è fondamentale per garantire durezza e stabilità termica e chimica, mentre i gruppi organici permettono di funzionalizzare la struttura a seconda dell'applicazione cui è destinata.

Lo studio di Yasmin Padilla et al. [36] mette a confronto, per ciascun rivestimento preso in esame, il modulo elastico e l'indice di rifrazione con l'attenuazione del segnale lungo la fibra ottica. I moduli di Young sono ricavati indirettamente a partire da una nanoindentazione, e i valori ottenuti per ciascun coating sono riportati nella tabella 6.1, dalla quale emerge il fatto che la poliimmide è in assoluto il più rigido. Nella tabella 6.2 invece sono riportati, per gli stessi materiali, gli indici di rifrazione di ogni componente della fibra ottica [37].

Tabella 6.1 Modulo elastico calcolato da Yasmin Padilla et al. [36].

Material	E [MPa]
Double-coated acrylate*	2079 ± 46
Single-coated acrylate	6.70 ± 0.70
Polyimide	4861 ± 182
Silicone	4.90 ± 0.01

*il valore è riferito al solo strato esterno

Tabella 6.2. Indici di rifrazione a $\lambda=600$ nm dei costituenti delle fibre ottiche utilizzate. Il core è costituito da silice fusa e il cladding da silice drogata con fluoro [37].

Coating material	Refractive indexes at $\lambda = 600$ nm		
	Core	Cladding	Coating
Primary coating acrylate	1.458	1.442	1.540
Secondary coating acrylate	1.458	1.442	1.505 (I) 1.541 (II)
Flourine doped acrylate	1.458	1.442	1.414
Polyimide	1.458	1.442	1.7
Silicone	1.458	1.442	1.409

Le figure 6.8a e b invece correlano rispettivamente il modulo elastico e l'indice di rifrazione del coating all'attenuazione del segnale lungo la fibra ottica [36].

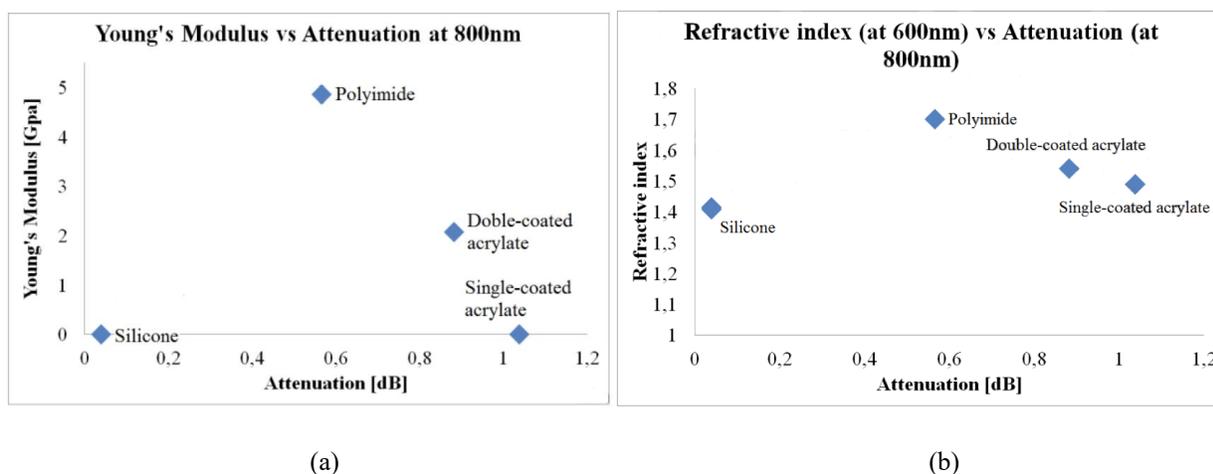
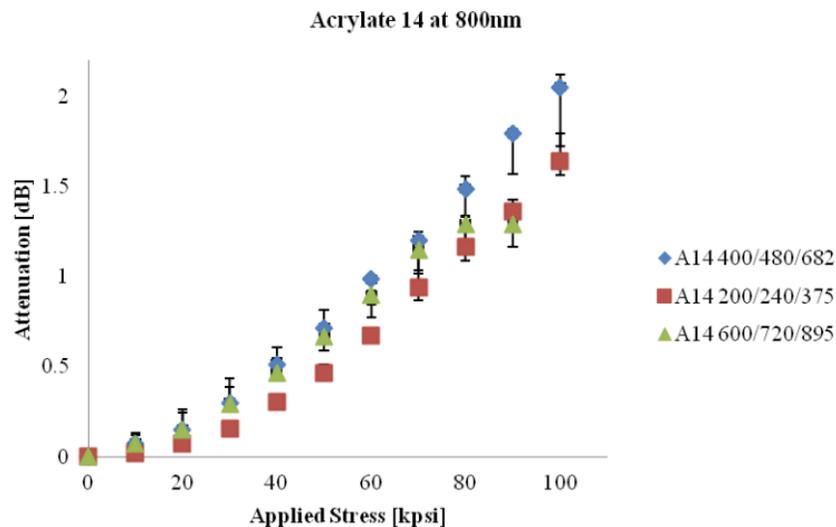


Figura 6.8. (a) modulo elastico misurato per i quattro rivestimenti esaminati in funzione dell'attenuazione del segnale; (b) indice di rifrazione in funzione dell'attenuazione del segnale per gli stessi coating [36].

Da queste figure si possono estrapolare diverse considerazioni [36]. Innanzitutto, dal confronto tra le immagini emerge il fatto che in materiali di rivestimento con basso indice di rifrazione, come il silicone, l'attenuazione del segnale è molto scarsa. Viceversa, per i rivestimenti con indice di rifrazione maggiore, tanto più alto è il modulo elastico tanto minore è l'attenuazione. Quest'effetto è dovuto alla correlazione tra l'indice di rifrazione del coating e quello del cladding: quando l'indice del coating è inferiore a quello del cladding (come nel caso del silicone), i modi dispersi della luce sono in gran parte riflessi dal coating e possono ritornare al core: in questo modo le perdite per microflessione sono minime, indipendentemente dal modulo elastico del rivestimento. Nella situazione opposta, in cui l'indice di rifrazione del coating è maggiore rispetto a quello del cladding, per lo stesso principio di riflessione i modi dispersi che viaggiano nel cladding vengono assorbiti e confinati all'interno del coating: questo fenomeno determina l'attenuazione del segnale che si riscontra, e che incrementa esponenzialmente con la piegatura della fibra (si parla infatti di *microbending losses*, o perdite per microflessione) [36]. In questa condizione la rigidità del rivestimento è determinante nell'influenzare l'attenuazione del segnale: maggiore è il modulo di Young della fibra, minore è la probabilità di formazione di *microbendings* all'interfaccia coating-cladding [36]. I rivestimenti in *dual-acrylate* presentano un indice di rifrazione molto vicino a quello del cladding: i modi dispersi della luce pertanto vengono intrappolati nello strato esterno e non tornano al core. La poliimmide invece presenta un indice di rifrazione fra i più elevati, che quindi si discosta molto da quello del cladding: anche in questo caso si riscontra il fenomeno di attenuazione del segnale a causa della dispersione dei modi nel coating, ma grazie all'elevata rigidità della fibra la formazione di micropiegature è notevolmente ridotta, pertanto l'attenuazione del segnale è inferiore del 30% rispetto agli acrilati [36]. Questo fenomeno è messo in evidenza dal confronto dei grafici in figura 6.9, in cui è riportata l'attenuazione del segnale in funzione di una tensione di flessione applicata alla fibra ottica: per rivestimenti con indice di rifrazione maggiore del cladding (acrilato e poliimmide) è ben riconoscibile l'andamento esponenziale delle perdite, mentre per i siliconi non c'è correlazione tra i due fenomeni [37].



(a)

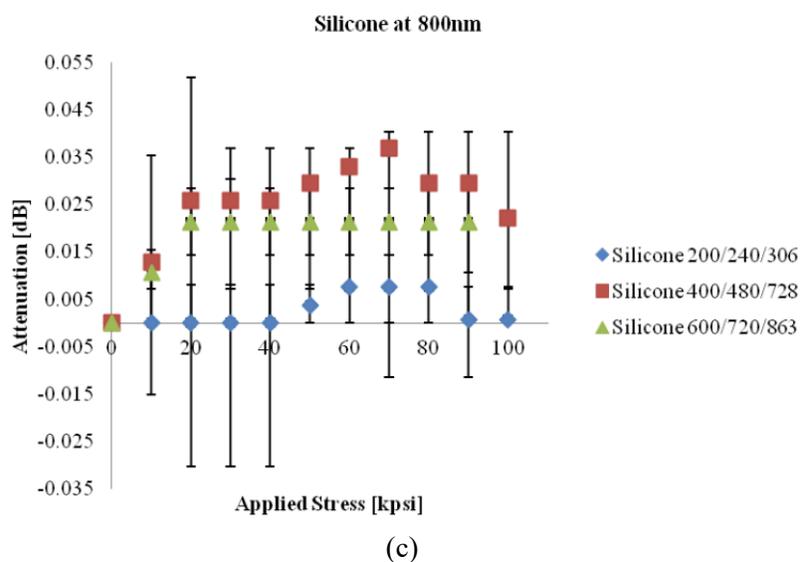
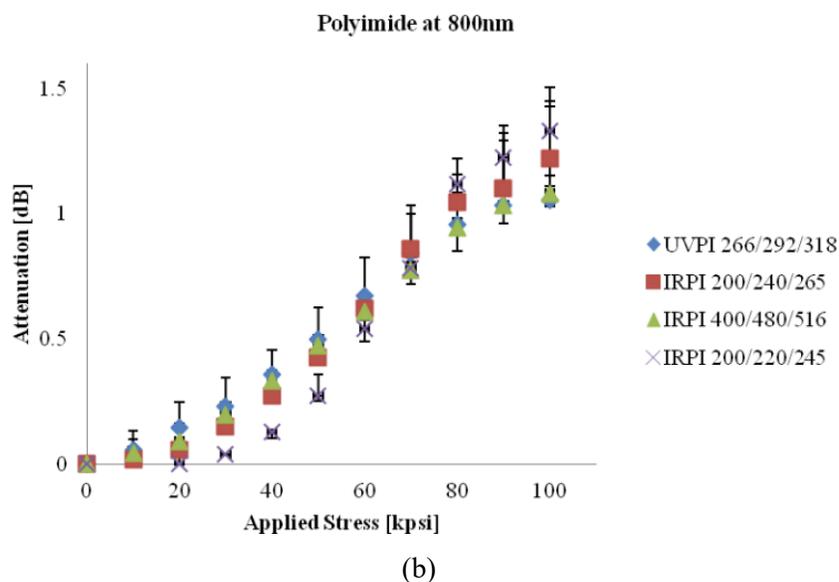


Figura 6.9. Attenuazione rispetto allo stress di flessione applicato per fibre con rivestimento in (a) acrilato *single-layer*, (b) poliimmide, (c) silicone [37].

Per visualizzare l'influenza di queste proprietà nell'ambito della misura delle deformazioni, si può far riferimento alle considerazioni di Weisbrich et al. [38], [39], che operano un confronto tra fibre con rivestimento in acrilato e poliimmidico per la misura delle deformazioni di materiali rispettivamente cementizi e metallici. Nel primo caso le fibre ottiche sono interne ai provini, mentre nel secondo caso incollate sulla superficie: l'ipotesi di base è che il coating (e se presente la sostanza adesiva), essendo frapposti tra il substrato e la parte vetrosa della fibra ottica, possano assorbire o comunque alterare parte della deformazione da trasmettere a quest'ultima (figura 6.10).

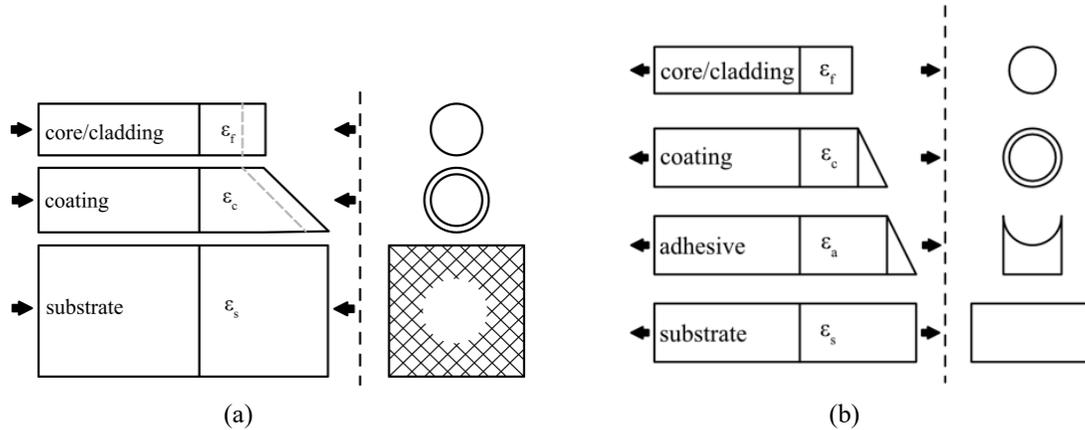


Figura 6.10. Scivolamento tra fibra ottica e substrato (a) in assenza e (b) in presenza di un adesivo [38], [39].

Viene dimostrato che mentre l'effetto di diverse tipologie di adesivi di uso comune è pressoché irrilevante, il materiale di rivestimento invece esercita un'azione determinante nel trasferimento della deformazione. In particolare, i rivestimenti acrilatici determinano un effetto di smorzamento della deformazione, più evidente alle estremità della fibra, che impedisce la lettura dei dati corretti. Questo effetto si verifica sia per fibra esterna (figura 6.11) che per fibra interna, e in quest'ultimo caso viene stimato che per leggere la deformazione corretta bisogna escludere le misurazioni effettuate nei primi 40 mm di fibra immersa [38]. Tale fenomeno viene attribuito a uno scivolamento tra il coating e il cladding della fibra ottica, che come si vede in figura 6.11, nel caso della poliimmide e dell'ORMOCER[®] è praticamente assente [38], [39].

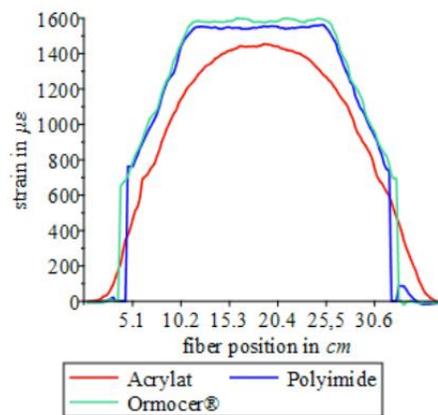


Figura 6.11. Andamento della deformazione misurata in funzione della posizione lungo la fibra ottica per tre rivestimenti a confronto [39].

Un approccio alternativo per compensare l'effetto di smorzamento della deformazione da parte del rivestimento consiste nel valutare l'errore nel trasferimento della deformazione, ed eventualmente sviluppare un modello in grado di compensarlo. In Wang et al. [42] sono riportati e messi a confronto alcuni modelli sviluppati con questo obiettivo, i quali tengono conto di proprietà meccaniche e geometriche dei costituenti della fibra ottica. In quest'ottica, viene analizzato il processo di trasferimento della deformazione alla fibra ottica come un effetto delle tensioni di taglio che si sviluppano alle interfacce substrato-coating e

coating-cladding. Durante il processo, l'elasticità del coating provoca l'assorbimento di una certa porzione di questa deformazione (che dipende anche dal legame con il substrato), compromettendo la veridicità della misura [48]. A livello pratico, spesso si cerca di lavorare in condizioni per le quali l'errore di trasferimento della deformazione rappresenti una quantità molto piccola e quindi trascurabile [42].

6.5.3 Il problema della manipolazione e della durabilità del sensore

Un difetto che accomuna FBG e DFOS è il fatto che si tratta di sistemi estremamente fragili, che non possono essere riparati o sostituiti in opera, soprattutto se incorporati all'interno della struttura [43]. Per ovviare a questo problema sono stati proposti in letteratura innumerevoli artifici volti a rinforzare l'involucro della fibra senza compromettere la precisione di misura. Un esempio di questo genere applicato da Grave et al. [13] è l'applicazione di un ulteriore rivestimento termoplastico al tratto di fibra esterno al campione per garantire una protezione aggiuntiva da possibili danneggiamenti.

Al momento tuttavia, per applicazioni pratiche, il guasto prematuro dei sensori in fibra ottica è un fenomeno ancora molto comune. Secondo quanto riportato da Wang et al. [42] buona parte dei sensori installati hanno una durata massima di 5 anni, un ciclo vita decisamente breve rispetto a quello della struttura. In più, i sensori incorporati all'interno del componente non sono riparabili o sostituibili, motivo per cui è necessario affinare gli studi sulla durata e sulle prestazioni a lungo termine. Una delle cause principali di danneggiamento del sensore è lo scollamento interfacciale dal substrato, che inficia l'affidabilità della misura. Tale fenomeno può essere previsto, ma in tal caso è necessario sviluppare un modello che permetta di modificare opportunamente la teoria di trasferimento dell'errore con il progredire della vita del sensore [42]. Le cause dello scollamento del sensore sono principalmente gli sforzi di taglio mediante i quali avviene il trasferimento delle deformazioni. Quando tali sollecitazioni raggiungono un valor critico è possibile che si verifichi un locale distacco, che nel caso di fibra interna al materiale è molto difficile da riparare e porta a una perdita immediata di accuratezza nel trasferimento della deformazione [42].

6.5.4 Difficoltà nella fabbricazione di compositi con fibre ottiche incorporate

A livello di laboratorio, le maggiori criticità si presentano nella fase di incorporazione delle fibre ottiche all'interno del laminato e della loro gestione durante il processo di cura. Senza dubbio, la fabbricazione del composito a partire da prepreg anziché con infusione di resina riduce il rischio di rottura delle fibre e semplifica il procedimento, ma in letteratura vi sono esempi di fabbricazione con entrambi i metodi. In [35], ad esempio, è stata adottata la tecnica dell'infusione sottovuoto per ottenere compositi a matrice epossidica rinforzati con fibre vetro. Le fibre ottiche uscenti dal materiale, per proteggerle durante l'infusione, sono state fatte passare attraverso tutti i teli di copertura, compreso il sacco da vuoto, sigillando successivamente i forellini di passaggio con del nastro adesivo (figura 6.12).

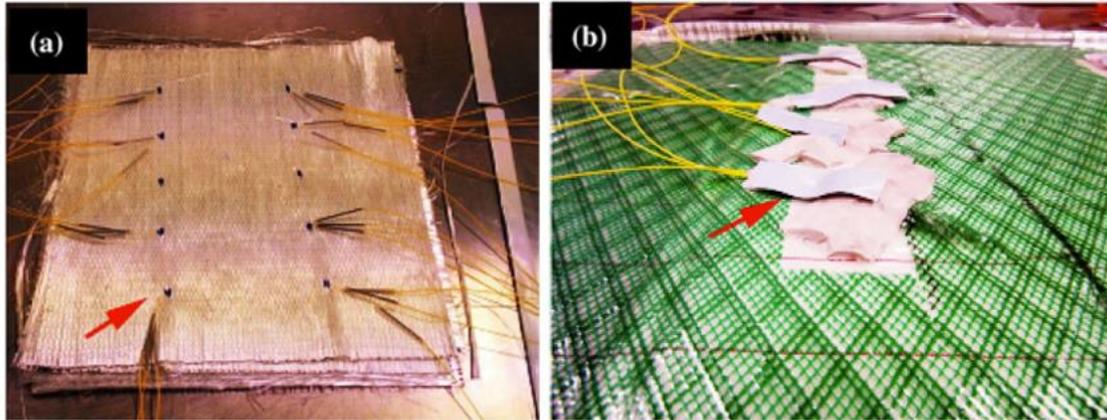


Figura 6.12. (a) passaggio delle fibre ottiche attraverso i tessuti; (b) sigillatura dei forellini sul sacco a vuoto mediante nastro adesivo [35].

La stessa tecnica di infusione è stata adottata da Rufai et al. [2], che hanno pensato di sopperire fragilità del punto di uscita dal composito applicando intorno alla fibra un rivestimento in PTFE di diametro 0,6 mm, mentre l'altro estremo della fibra viene lasciato all'interno del materiale. Il tubicino capillare di rivestimento va ovviamente sigillato per evitare che la resina vi fluisca all'interno durante l'infusione. Anche Kinet et al. [44] propongono l'utilizzo di un sottile rivestimento in teflon per proteggere la parte di fibra in uscita dal laminato (figura 6.13), questa volta realizzato per prepreg layup. Tsai et al. invece [24] utilizzano del tape, sia durante la cura che durante le prove meccaniche.

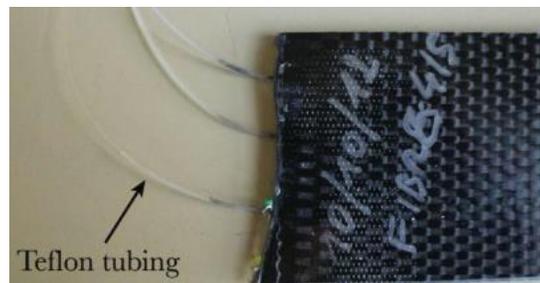


Figura 6.13. Rivestimento in PTFE realizzato da Kinet et al. [44].

Per salvaguardare l'estremo della fibra in uscita dal materiale, una soluzione che a livello industriale sembra promettente è di proteggerlo con un connettore personalizzato (figura 6.14). Questa soluzione però infragilisce il bordo del materiale e lo rende soggetto a delaminazione [3]. I connettori progettati per essere posizionati sulla superficie del laminato invece obbligano la fibra a prendere una curvatura molto drastica, che può provocare importanti perdite di segnale (figura 6.14 b) [44].

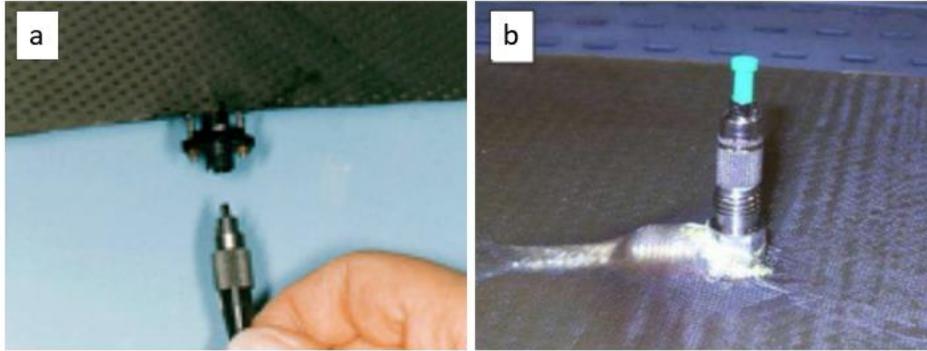


Figura 6.14. Connettori per l'uscita della fibra ottica [3], [44].

Un approccio molto particolare denominato *free-spacing coupling* che è in fase di studio da diversi anni prevede di accoppiare il sensore esterno e la fibra ottica incorporata in maniera indiretta [45]. In sostanza, consiste nel saldare un'estremità della fibra ottica che verrà incorporata nel materiale a una porzione di fibra che presenta un core più largo e una superficie inclinata a 45° : attraverso un'apertura nel materiale, il fascio di luce incide sulla superficie a specchio e viene proiettato lungo il resto della fibra, come mostrato in figura 6.15. Idealmente si ottiene una connessione snella e flessibile che non ostacola nessuna lavorazione post-cura del laminato; ma si tratta di una tecnica molto complessa, soprattutto per quanto riguarda la realizzazione della superficie riflettente e del foro che deve attraversare il laminato senza danneggiare la fibra all'interno.

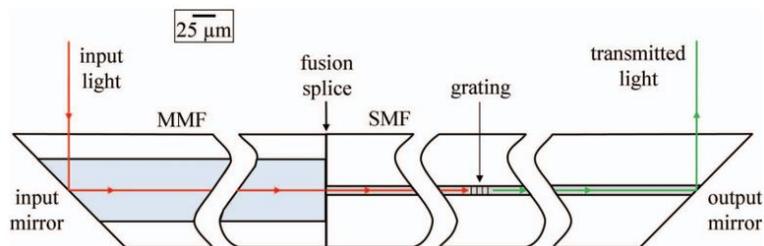


Figura 6.15. Schema del metodo di accoppiamento non fisico [45].

Infine, a livello industriale è necessario mettere a punto un sistema automatico di posizionamento delle fibre ottiche che si integri perfettamente nella linea produttiva dei compositi. Aziende come Airborne hanno introdotto questo sistema di posizionamento automatico, rappresentato in figura 6.16, che controlla precarico, posizione e allineamento delle fibre ottiche. Al momento il limite più importante alla diffusione di queste tecnologie è la difficoltà nell'assicurare ripetibilità al processo di posizionamento, e inoltre le zone più delicate della fibra (ad esempio quelle di splicing) possono essere compromesse [3].

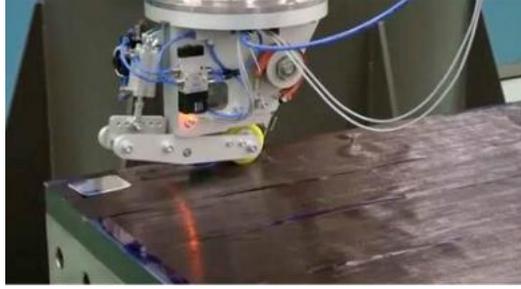


Figura 6.16. Sistema di posizionamento automatico delle fibre ottiche Airborne [3].

6.5.5 Il problema della temperatura

Sebbene le fibre ottiche permettano di monitorare lo stato di una struttura, comprese eventuali fratture, deformazioni o scollamenti, questi sensori sono molto sensibili anche alle variazioni di temperatura, rischiando quindi di compromettere la misura della deformazione meccanica in alcune situazioni. Questa proprietà è più critica quando si trovano a operare in quegli ambienti soggetti a repentine variazioni di temperatura, come turbine eoliche o alcuni componenti di veicoli aerei [46]. Per questo motivo è da molto tempo che a livello di ricerca si lavora per implementare metodi che permettano di discriminare la misura della temperatura da quella della deformazione. I primi tentativi spesso implicavano la cooperazione di almeno due fibre ottiche, con le quali utilizzare tecniche di *detection* differenti (ad esempio combinando scattering Raman e Brillouin, FBG con sensori diversi, oppure con parametri di sensibilità diversi) [46]. Ovviamente l'utilizzo di più fibre che funzionano in modo diverso complica non poco il sistema.

Gorshkov et al. ad esempio [47], combinano due tecniche di rilevamento: lo scattering di tipo Rayleigh e di tipo Raman. Rispetto a Rayleigh infatti, la deformazione della fibra ottica provoca uno shift dello spettro rispetto alla posizione iniziale proporzionale allo stimolo esterno (che sia meccanico o termico). Nello scattering Raman invece la potenza del segnale rilevato dipende significativamente dalla temperatura della fibra, mentre la sensibilità alla deformazione meccanica è più debole.

Una soluzione proposta da Zhu et al. [46], applicabile ai laminati compositi, prevede di incollare su una lamina di prepreg la fibra ottica disposta a serpentina, per poi ricoprirla con le restanti lamine. L'idea è che alcune zone di questa fibra siano sensibili alla deformazione effettiva del materiale (meccanica e termica), mentre altre zone, quelle nelle fasce colorate in rosso nella figura 6.17, siano sensibili esclusivamente alle variazioni di temperatura. Per ottenere questa condizione, le zone corrispondenti sono state rivestite di teflon in modo da non aderire fisicamente alle lamine e dunque essere svincolate dalla deformazione meccanica del componente. Questa soluzione tuttavia crea delle discontinuità non indifferenti all'interno del laminato.

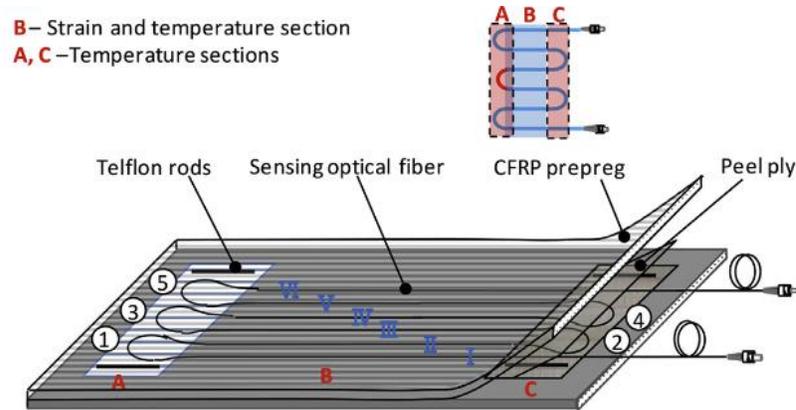


Figura 6.17. Schema del laminato realizzato da Zhu et al., in cui sono evidenziate le zone sensibili alla sola deformazione termica in quanto rivestite di PTFE [46].

Kinet et al. [44] riportano una serie di proposte messe a punto per gli FBG, che portano a risultati abbastanza buoni ma spesso richiedono una tecnologia complessa e costosa o una strumentazione molto ingombrante. Un esempio è l'utilizzo di sensori iscritti in fibre con diversa composizione chimica, in quanto tale caratteristica influenza la sensibilità dei sensori; purtroppo però lo splicing ne può compromettere l'integrità. In alternativa è possibile inscrivere due reticoli di Bragg sulla stessa fibra ma a lunghezze d'onda diverse per avere una diversa sensibilità alla deformazione: la tecnologia richiesta per eseguire questa operazione tuttavia è molto costosa. Anche l'utilizzo di fibre particolari, ad esempio che mantengono lo stato di polimerizzazione, è una via percorribile ma estremamente complessa e dispendiosa, mentre l'incapsulamento di alcuni tratti della fibra è una procedura che richiede molto tempo e infragilisce la fibra. La tecnica testata da Kinet et al. [44] per la separazione dei contributi prevede di utilizzare due sensori FBG, uno dei quali incapsulato in un tubicino di vetro capillare per non aderire al campione ed essere quindi immune alla deformazione meccanica.

6.6 Il rilevamento distribuito in fibra ottica applicato al monitoraggio strutturale

La rilevazione del campo di deformazione di strutture reali mediante l'utilizzo di fibre ottiche è una tecnologia relativamente recente ma alquanto promettente per il futuro.

A differenza dei sensori più comuni a livello commerciale, le fibre ottiche permettono di monitorare una serie di parametri, tra cui deformazione, temperatura, pressione, umidità, vibrazioni, emissioni acustiche e alcune tipologie di danneggiamento come il degrado chimico e la frattura [22]. Inoltre si tratta di sensori leggeri e flessibili, che pertanto si possono adattare a strutture con profili complessi o possono essere incorporati al loro interno. Il coating polimerico invece impedisce attacchi corrosivi ed è elettricamente isolante, consentendo quindi di utilizzare la fibra anche su superfici elettrificate [48]. Un vantaggio molto interessante in ottica di SHM è la possibilità di effettuare un rilevamento distribuito, ossia di raccogliere informazioni contemporaneamente da tutta la lunghezza della fibra e quindi per tutta la dimensione della struttura da monitorare. In aggiunta, il monitoraggio avviene in tempo reale, cosa che permette di intervenire nel minor tempo possibile nel caso in cui si identifichi un principio di danneggiamento [48].

Tra le criticità che sono state illustrate da Fernando [22] riguardo le fibre ottiche, si possono elencare:

- Costi: rispetto ai sensori tradizionali come estensimetri e termocoppie il costo dell'apparato di misura con fibre ottiche risulta fuori scala, sebbene possa essere in parte ridimensionato fabbricando in autonomia le fibre ottiche sensitive.
- Interpretazione dei dati: il segnale che la fibra rimanda indietro in output è fortemente influenzato da moltissimi fattori (meccanici, termici, chimico-ambientali, ecc.) pertanto è necessario trovare un modo efficace per epurare la misura di interesse, come può essere la deformazione, dai contributi esterni.
- Resistenza e durabilità del sistema: maneggiare le fibre ottiche, nonostante il rivestimento polimerico, è sempre un'operazione delicata, che infatti ha sollevato diverse problematiche in fase sperimentale. In aggiunta a ciò, al momento non ci sono ancora dati sufficienti che ne dimostrino la stabilità a lungo termine, gli effetti di danneggiamento per fenomeni ambientali ecc., fattori su cui dovrà convergere la ricerca nel prossimo futuro anche perché non esistono ancora metodi di riparazione di una fibra danneggiata, soprattutto se incorporata nella struttura.

Il problema del costo, apparentemente elevato, di questi sistemi rispetto a quelli elettronici sarà molto probabilmente presto superato grazie alle numerose innovazioni in campo optoelettronico e ai rapidi sviluppi dei dispositivi fotonici, trainati dalla crescita dell'industria delle telecomunicazioni [32]. L'influenza della misura da parte di fattori esterni invece è una caratteristica della maggior parte delle tecnologie di SHM: nel caso delle fibre ottiche però, l'inglobamento all'interno della struttura può limitare notevolmente questi effetti.

7. Introduzione alla parte sperimentale

Il lavoro sperimentale è stato portato avanti su diversi fronti, per analizzare diversi aspetti della tecnologia in esame. Come già accennato infatti, uno dei vantaggi dell'applicazione delle fibre ottiche alla misura delle deformazioni di materiali compositi è che le fibre possono essere sia incollate sulla superficie del materiale sia incorporate all'interno, tra le lamine. Entrambi i metodi di applicazione presentano alcuni punti a favore e alcuni svantaggi. L'incollaggio sulla superficie esterna del provino è sicuramente più semplice da effettuare, ma è necessario che sia eseguito mediante una colla o un tape che non si frapponga tra fibra e materiale influenzando il trasferimento della deformazione. Inoltre le deformazioni, meccaniche o termiche, che vengono rilevate sono esclusivamente di tipo superficiale. In ottica di applicazioni a strutture reali, questa soluzione non presenta particolare interesse, in quanto una fibra esterna alla struttura è maggiormente esposta a danneggiamenti di tipo ambientale [35]. Incorporare la fibra all'interno del materiale invece, oltre a garantire una buona protezione della fibra, permette anche di rilevare con precisione maggiore il campo deformativo interno. In questo caso però si deve progettare con attenzione il processo di realizzazione del componente, compreso il ciclo di cura. Infatti, una frattura della fibra, anche in esercizio, la rende inutilizzabile per futuri rilevamenti.

Le prove sperimentali realizzate sono sia di tipo meccanico che di tipo termico, e in entrambi i casi si è cercato di valutare l'efficacia del rilevamento in fibra ottica utilizzando sensori autoprodotti. Per raggiungere questo obiettivo sono state testate diverse configurazioni del sistema provino-sensore, in modo da comprendere l'effetto di alcuni fattori sull'affidabilità della misura e definire la configurazione migliore in ottica di monitoraggio strutturale applicato ai materiali compositi. Tra i fattori presi in esame figurano la disposizione della fibra ottica (interna o esterna al provino), il materiale di rivestimento della fibra, il tipo di terminale e l'effetto della lunghezza del tratto di fibra ottica adeso al provino. Per la validazione dei risultati sperimentali ci si è affidati a un confronto con le tecnologie a oggi più diffuse per il controllo non distruttivo del campo di deformazione, che sono gli estensimetri e la DIC (come discusso nel cap. 4).

8. Materiali e metodi

In questa sezione viene descritta in dettaglio la strumentazione utilizzata, i materiali scelti e vengono riportati i procedimenti attuati nel corso del lavoro.

8.1 Fibre ottiche

Sono state utilizzate due diverse tipologie di fibre ottiche:

- Le fibre *single-mode* G.657.A1 di Optokon, costituite da un rivestimento di tipo *dual acrylate UV-cured*;
- Le fibre SM1550P di Thorlabs, che presentano un sottile rivestimento poliimmidico.

La tabella 8.1 mette a confronto le caratteristiche delle due fibre citate.

Tabella 8.1. Confronto tra le fibre ottiche utilizzate.

Property	G.657.A1 (Optokon)	SM1550P (Thorlabs)
Core material	Germanium doped silica	Germanium doped silica
Cladding material	Pure silica	Pure silica
Coating material	Dual layer of UV-cured acrylate	Polyimide
Core diameter (μm)	-	9 ± 0.5
Cladding diameter (μm)	125 ± 0.7	125 ± 2
Coating diameter (μm)	242 ± 5	145 ± 5
Effective group index of refraction at 1550 nm	1.468	1.458*
Maximum attenuation at 1550 nm (dB/km)	≤ 0.40	≤ 0.7

*valore ricavato da letteratura in quanto non fornito sul datasheet

Le fibre in acrilato sono interamente trasparenti. Rispetto alle altre, al tatto risultano maggiormente flessibili, mentre quelle rivestite in poliimmide risultano più sottili e fragili durante la manipolazione.

8.2 Fabbricazione dei provini con fibra ottica incorporata

Per le prove sperimentali sono stati utilizzati otto provini di trazione a sezione rettangolare di dimensioni 210 x 25 x 1,7 mm. Essi sono stati prodotti mediante tecnica prepreg-layup utilizzando 4 layer di pre-impregnato di tipo *twill-weave* con matrice epossidica e rinforzo in fibra di carbonio (il modello XC110 di Easy Composites). Questo materiale, costituito da filamenti con orientazione 0-90 intrecciati con periodicità 2x2, presenta uno spessore di 0,66 mm che diventano 0,45 mm a seguito del consolidamento, e un contenuto di resina pari al 38% in peso [49]. La fabbricazione dei provini con fibra ottica incorporata all'interno ha richiesto alcuni tentativi per mettere a punto la tecnica migliore. Inizialmente, dai rotoli di prepreg conservati a bassa temperatura si ritagliano le strisce, 4 per ogni provino (figura 8.1), delle dimensioni

teoriche dei campioni con un eccesso di 5 mm per lato, da poter rifilare successivamente a macchina per ottenere bordi regolari.



Figura 8.1. Strisce di prepreg ritagliate.

A questo punto si prepara lo stampo, costituito da una lastra di vetro di supporto su cui si delimita la zona di lavoro mediante quattro strisce di *sealant tape*, e all'interno di quest'area si distribuisce con una spugnetta uno strato di cera che fungerà da distaccante per i provini. Una volta che la cera è seccata, vengono adagiati su di essa i primi due layer di ogni campione, sovrapposti in modo da far coincidere l'orientamento del rinforzo. Gli altri due layer invece vengono incollati tra loro per poi infilare una o più fibre ottiche, (precedentemente ripulite con isopropanolo) tra le maglie del tessuto, in modo che fuoriescano dalla faccia superiore (figura 8.2).



Figura 8.2. Dettaglio di una fibra ottica infilata tra i layer di prepreg. Sulla superficie visibile verranno adagiati i due strati rimanenti.

A questo punto, tensionando le fibre ottiche, si adagiano i layer con le fibre su quelli senza fibre e si pressa manualmente l'impilamento. Dopo aver eseguito questa operazione per tutti i provini, le fibre ottiche fuoriuscenti dal materiale vanno ricoperte con un velo di distaccante (nuovamente cera) e fissate al supporto mediante alcuni pezzettini di scotch carta (figura 8.3a). Nelle zone in cui le fibre ottiche sono in contatto con i prepreg, si inseriscono dei ritagli di *release paper* tra la fibra e il tessuto (figura 8.3b), un film distaccante molto performante che impedisce l'adesione della fibra al provino durante la cura. Vengono quindi posizionati sullo stampo il *peel-ply*, un tessuto poroso di Nylon 66 che consente la fuoriuscita dal laminato di aria e sostanze volatili durante l'applicazione del vuoto e migliora la finitura superficiale del materiale; il *breather*, un tessuto che facilita lo sfiato dell'aria intrappolata nel materiale durante la cura e si impregna con l'eccesso di resina allontanandola dai provini; la valvola per l'aspirazione dell'aria sopra il *breather* e infine il sacco da vuoto, che deve aderire saldamente al sealant tape (figura 8.3c). La valvola deve essere collegata mediante un tubo di gomma alla pompa a vuoto per l'aspirazione dell'aria, e una volta assicuratisi che la pressione interna è stabile, si sigilla il tubo mediante una morsa e la lastra può essere infornata per il ciclo di cura. Il ciclo, della durata di circa 18 ore, prevede una prima rampa termica molto lenta fino a 70°C, un periodo di stazionamento a questa temperatura, un successivo incremento fino a 85°C con stazionamento e infine una discesa molto lenta fino a temperatura ambiente.

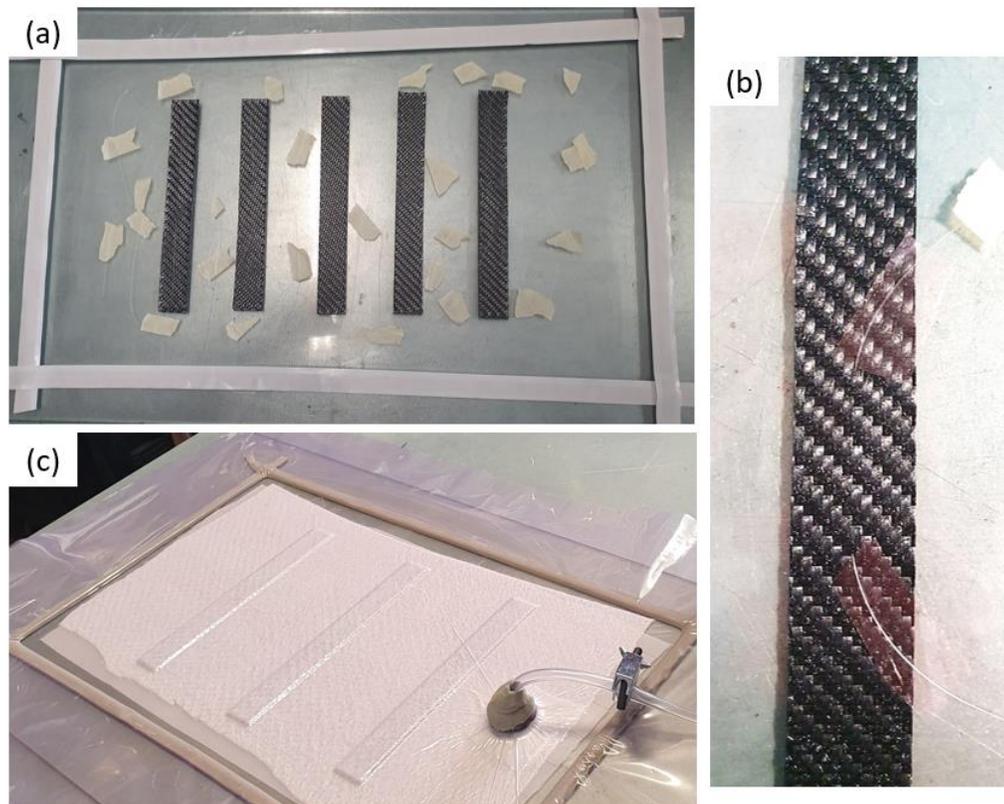


Figura 8.3. Alcuni passaggi del procedimento di fabbricazione dei provini: (a) posizionamento dei provini sul supporto e fissaggio delle fibre ottiche mediante scotch carta; (b) fraposizione di alcuni pezzettini di release film tra fibre ottiche e prepreg; (c) copertura dello stampo con il sacco e aspirazione dell'aria dalla valvola.

8.3 Wazer

Il taglio dei provini a valle del ciclo di cura è stato effettuato per getto d'acqua nella Wazer V1.5 (figura 8.4). Questa macchina presenta un supporto scanalato in polipropilene (il *cut bed*) sul quale vanno posizionati e fissati mediante viti i componenti da tagliare. Un ugello veicola il getto di acqua e materiale abrasivo lungo la geometria da tagliare (figura 8.4b). I parametri di processo e la geometria di taglio vanno impostati con un apposito software e importati all'interno della macchina mediante una scheda SD. Questi parametri, tra cui vi sono il tipo di materiale da lavorare e un'indicazione del suo spessore, permettono alla macchina di regolare la potenza del getto e la quantità di abrasivo al suo interno, oltre alla velocità di movimento della testina, che determina la finitura del bordo ottenuto.



Figura 8.4. Immagini della Wazer dall'esterno (a) e dall'interno durante un taglio (b) [50].

Nel caso in cui la fabbricazione dei provini con il metodo prepreg layup non sia stata meticolosa e tra i layer siano presenti inclusioni di qualunque tipo, è possibile che alcune particelle di abrasivo trovino un'intercapedine in cui infilarci durante il taglio, provocando delaminazione a partire da quel punto. Un esempio di quanto detto è riportato in figura 8.5.



Figura 8.5. Un'inclusione all'interno di questo provino ha provocato delaminazione durante il taglio.

Il taglio dei provini con fibre ottiche incorporate può essere effettuato solo nel caso in cui queste escano dalla superficie superiore, e non dal bordo. Per salvaguardare le fibre ottiche durante il taglio, queste in un primo momento sono state fissate all'interno della superficie del provino mediante dei piccoli pezzettini di sealant tape, che non si scolla a contatto con l'acqua e non le danneggia (figura 8.6a). Questa soluzione tuttavia in diverse occasioni ha portato alla rottura delle fibre nella fase di rimozione del tape. In presenza di fibre con coating poliimmidico, molto più delicate di quelle in acrilato, si è preferito fissare le fibre con pezzettini di scotch carta e adoperare il sealant tape per fissare lo scotch al provino (figura 8.6b). In questo modo è stato più facile salvaguardare le fibre ottiche. Eventuali disomogeneità del bordo dovute a imprecisioni del taglio sono state rifinite con carteggiature o con il dremel.

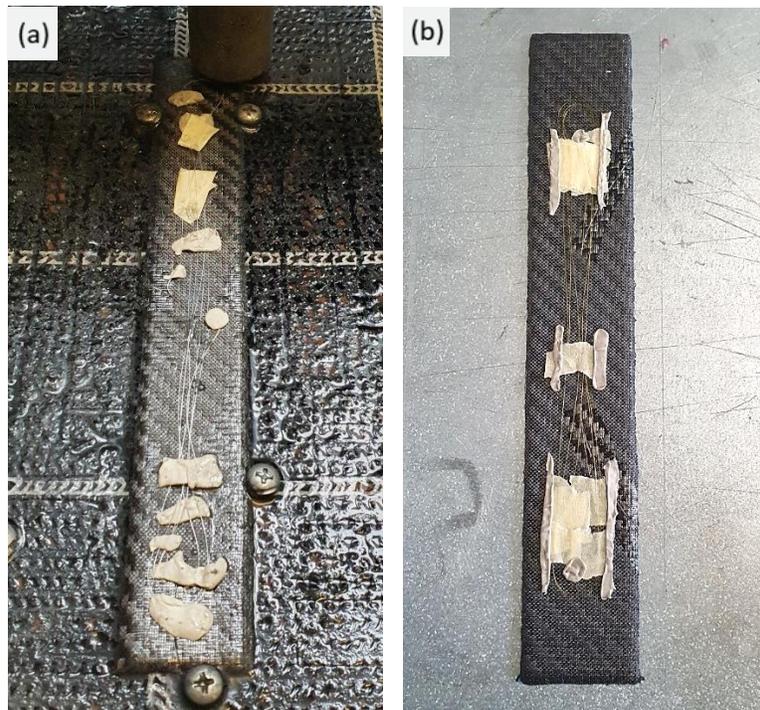


Figura 8.6. Fissaggio delle fibre ottiche sulla superficie del provino per proteggerle durante il taglio; (a) mediante sealant tape, (b) mediante scotch carta e sealant tape.

8.4 Luna ODiSi 6100

La strumentazione utilizzata per la misura delle deformazioni consiste nel sistema ODiSi 6100 di Luna, costituito da un interrogatore, che è l'elaboratore vero e proprio dei dati, collegato mediante un cavo di supporto da una parte al modulo remoto, che a sua volta si interfaccia con il sensore, e dall'altra a un computer di interfaccia con l'utente. Il segnale luminoso in arrivo dalla fibra ottica raggiunge quindi il modulo remoto che lo converte in un linguaggio accessibile all'interrogatore, dove viene rielaborato. Le informazioni ricavate sono in ultima istanza processate da un software e restituite all'operatore in forma grafica. I componenti del sistema si possono visualizzare in figura 8.7.

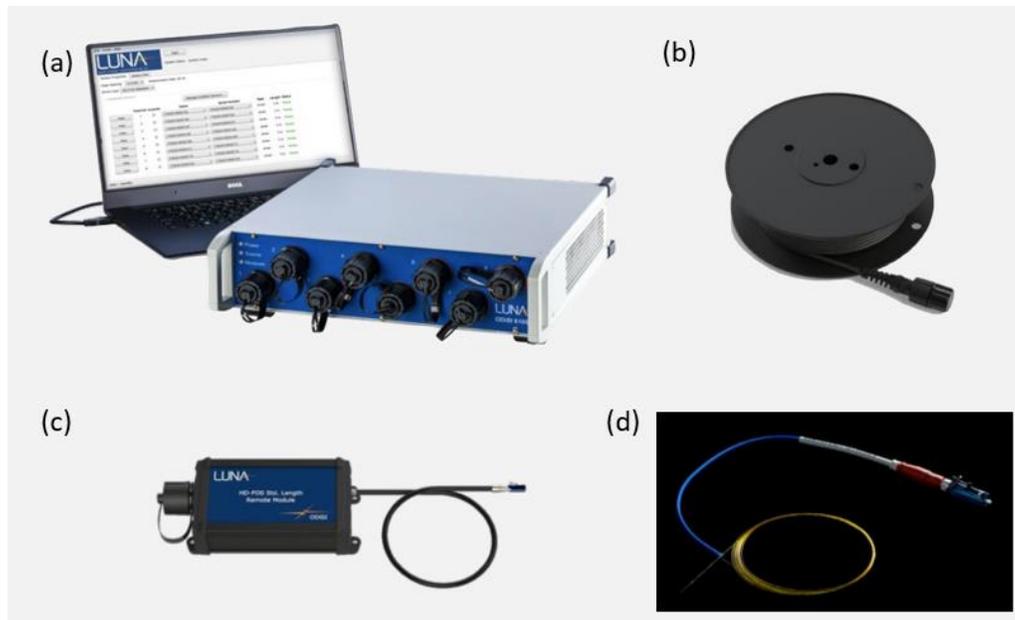


Figura 8.7. Componenti del sistema LUNA ODiSI 6100. (a) software e interrogatore a 8 canali; (b) standoff cable; (c) modulo remoto; (d) sensore in fibra ottica standard di LUNA [51].

Il modulo remoto è una scatola adibita alla lettura delle informazioni trasportate dalla fibra e alla loro trasmissione all'elaboratore. La fibra ottica sensibile, per poter trasmettere correttamente le informazioni al modulo remoto, deve presentare un apposito connettore a un estremo e una buona terminazione all'altro. Riguardo il connettore, se non si acquistano le fibre originali commercializzate da Luna che ne sono già provviste (ma che sono estremamente costose), è necessario saldare all'estremo della fibra il *pigtail* (figura 8.8), anch'esso una fibra ottica rinforzata con due coating (uno interno più sottile e uno esterno che raggiunge 900 μm di spessore) predisposta alla connessione al modulo remoto. Lo splicing delle fibre viene effettuato per fusione all'arco elettrico utilizzando l'apposita strumentazione Fujikura 90S+, descritta nel paragrafo seguente.

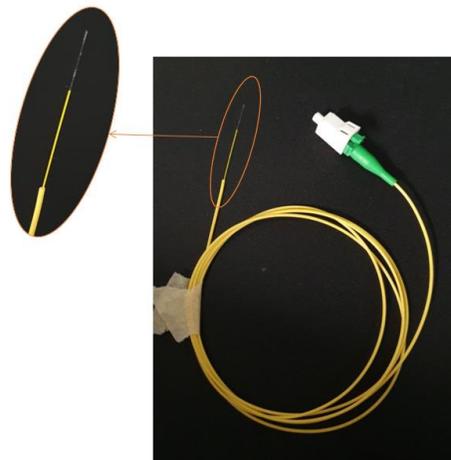


Figura 8.8. Pigtail che permette di rendere sensibile la fibra ottica, con ingrandimento degli strati che lo costituiscono.

Anche la terminazione della fibra ottica rappresenta un elemento di fondamentale importanza per l'ottenimento di misurazioni accurate. È infatti necessario che il segnale in transito nella fibra ottica identifichi con precisione il punto finale di quest'ultima, in corrispondenza del quale deve disperdersi in maniera sufficientemente drastica. In alternativa ai terminali standard di Luna, è possibile saldare alla fibra ottica lo spezzone di una fibra coreless abbastanza lungo da disperdere il segnale o più semplicemente può essere sufficiente realizzare un nodo molto stretto all'estremo della fibra, fissato ad esempio con dello scotch (figura 8.9).

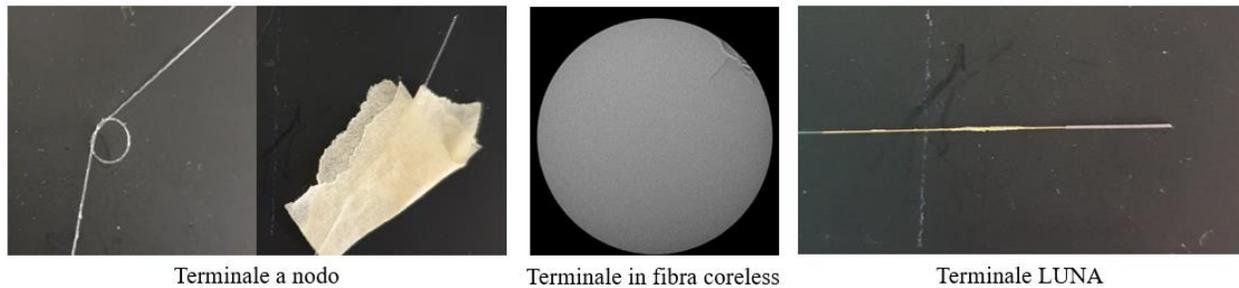


Figura 8.9. Possibili terminali per fibre ottiche.

La fibra coreless utilizzata per i terminali è la FG125LA di Thorlabs [52], costituita da un rivestimento in acrilato di diametro $250\ \mu\text{m}$, mentre il diametro del cladding equivale a quello delle altre fibre adoperate ($125\ \mu\text{m}$). La fibra coreless è studiata invertendo il principio di riflessione interna totale (cap. 5): il suo coating presenta un indice di rifrazione maggiore del cladding, in modo da minimizzare i punti di riflessione della luce e favorirne la dispersione al suo interno.

All'atto pratico, una volta eseguite tutte le connessioni tra interrogatore, modulo remoto, connettore e computer, si può avviare il sistema. Se la fibra connessa non è di quelle standard di Luna, che possiedono in dotazione una chiavetta USB con la key di riconoscimento, va effettuata un'operazione di identificazione della fibra in cui ne viene mappata la struttura per registrare il pattern di riferimento. La figura 8.10 mostra l'esempio di uno spettro di frequenza di una fibra ottica sensibile ma libera dal provino.

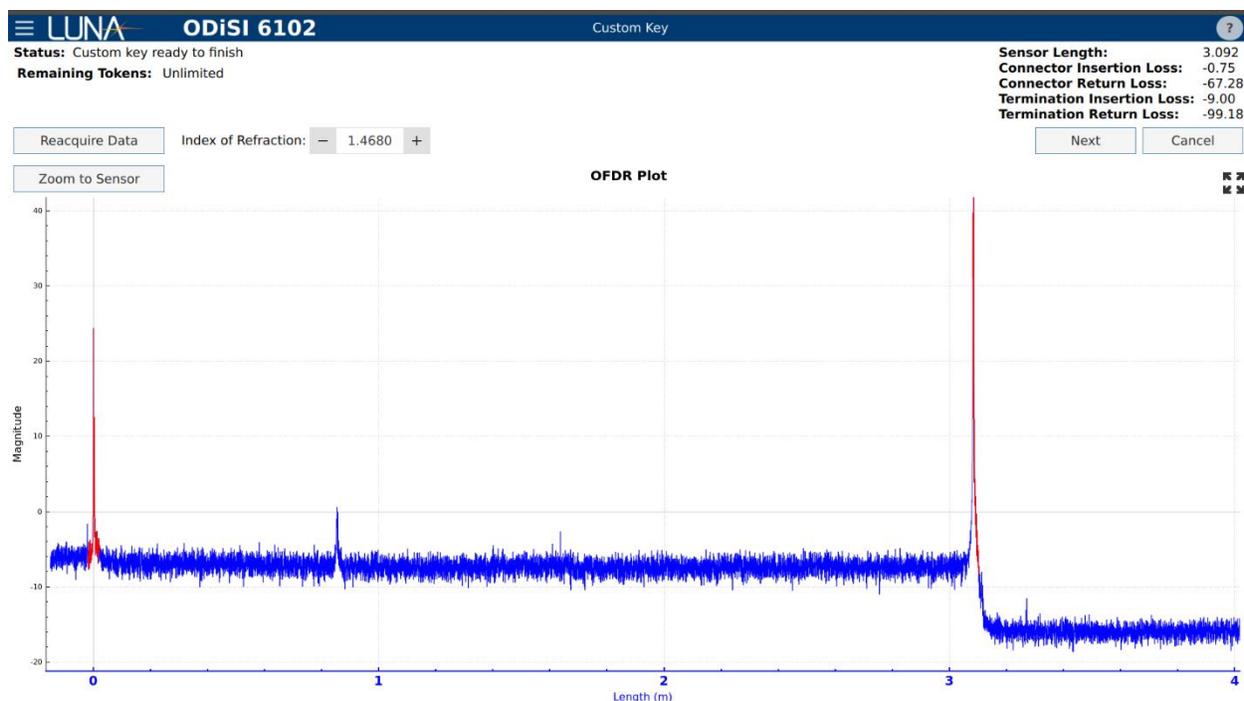


Figura 8.10. Spettro ODFR di una fibra ottica con terminale Luna.

I due picchi rossi in figura 8.10 rappresentano i punti iniziale e finale di questa fibra (dal connettore al terminale), mentre a destra del secondo picco, quello relativo al terminale, lo spettro diventa rumore di fondo. Affinché il segnale sia chiaro e definito, tra la frequenza della fibra e il rumore di fondo devono esserci almeno 5 dB di differenza. Il grande vantaggio di adoperare un sistema di questo tipo è che la misura è distribuita, ossia si raccolgono dati lungo tutta la sua estensione. Nella schermata di calibrazione successiva (figura 8.11), è possibile impostare i valori dei coefficienti che traducono la frequenza in GHz del segnale lungo la fibra in unità di deformazione ($\mu\epsilon$) o di temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Per la maggior parte delle fibre ottiche in commercio, la relazione frequenza-deformazione è lineare secondo il coefficiente b in figura 8.11. Per la temperatura invece l'andamento rispetto alla frequenza è lineare solo in prossimità della temperatura ambiente, mentre lontano da questo range è necessario operare una calibrazione della fibra ottica per determinare gli altri coefficienti.

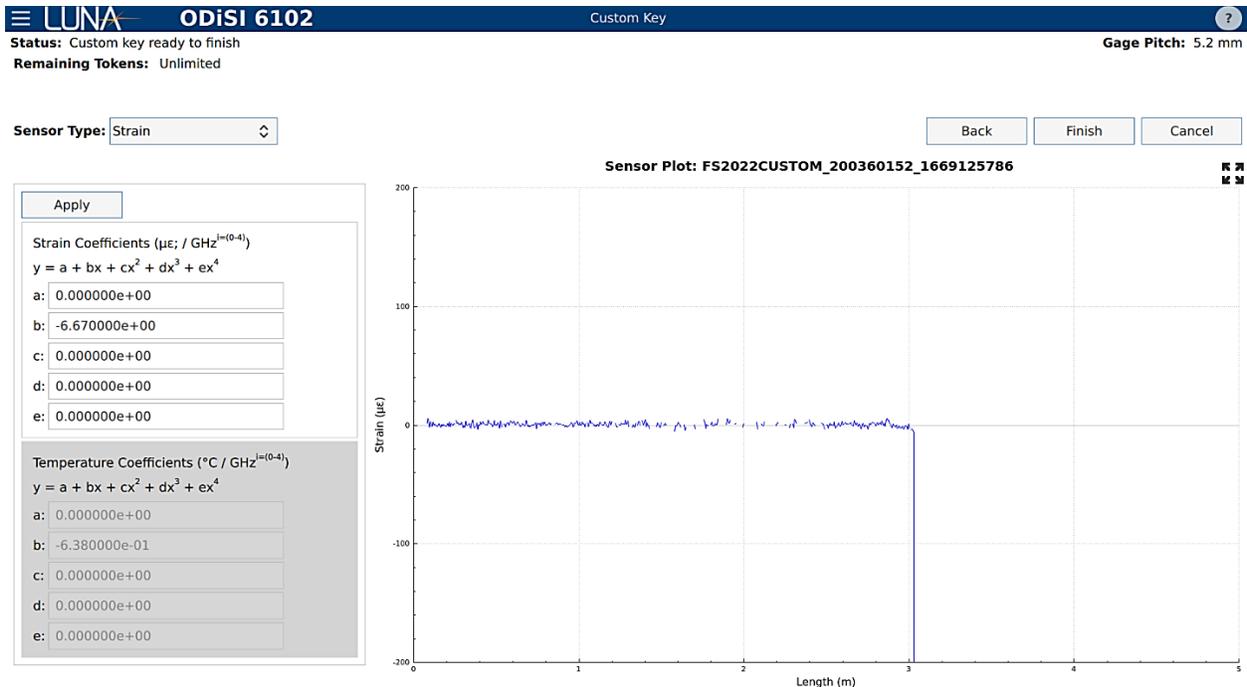


Figura 8.11. Schermata di calibrazione dei sensori.

Un parametro importante da settare a monte della misura è il gage pitch: si tratta della lunghezza del passo tra un rilevamento e il successivo all'interno della fibra. Nel caso in esame è possibile scegliere una delle seguenti opzioni: 2,6 mm, 1,3 mm, 0,65 mm (la sensibilità dello strumento può quindi essere sub-millimetrica). A ogni valore di gage pitch corrisponde una specifica frequenza di acquisizione, rispettivamente 250, 125 e 62,5 Hz, il cui valore può essere ulteriormente dimezzato operando in modalità “*Full Optimisation*”. Lavorare con questa modalità di acquisizione permette di ottenere un segnale output di alta qualità, mentre la modalità “*Maximum Rate*” velocizza il processo di acquisizione dei dati [53]. Prima di iniziare ogni misurazione si effettua una taratura dello strumento, in modo da salvare la condizione di partenza. La prova vera e propria invece viene registrata e salvata dal sistema in formato TSV, ossia sotto forma di tabelle le cui colonne corrispondono ai punti della fibra ove si acquisisce la deformazione (spaziati di un valore corrispondente al gage pitch impostato) e le righe agli istanti di tempo in cui si è stato registrato quel valore, che dipendono dalla frequenza di acquisizione. I valori di deformazione sono dati in $\mu\epsilon$, unità di misura che corrisponde al valore adimensionale della deformazione $\times 10^6$.

8.5 Splicing e fusion splicer

Lo *splicing* è quell'operazione di fusione localizzata che permette di giuntare permanentemente le estremità di due fibre ottiche. Nel caso in esame, per eseguire tale operazione tra la fibra ottica, il pigtail e il terminale, si utilizza la strumentazione Fujikura 90S+, i cui componenti principali sono riportati in figura 8.12.



Figura 8.12. Strumentazione per lo splicing: a sinistra la taglierina (*cleaver*) e a destra la splicer vera e propria.

Gli estremi delle due fibre da unire vanno inizialmente “svestiti” del coating polimerico con delle classiche pinze da elettricista in modo da esporre la porzione vetrosa (circa 2 cm per parte). Per ottenere una buona giunzione, le superfici da fondere devono essere perfettamente piatte e scevre da impurezze di alcun tipo, pertanto si prende la prima fibra e la si inserisce in un’apposita taglierina (vedi figura 8.12) che realizza un taglio netto e piatto dell’estremità; dopodiché la si pulisce accuratamente con una salvietta imbevuta di alcol isopropilico e la si colloca nel dispositivo di splicing, avendo cura di posizionare l’estremità leggermente all’esterno rispetto agli elettrodi (figura 8.13). Con l’estremo dell’altra fibra si ripetono gli stessi passaggi e si posiziona anch’essa nella splicer, in modo che le due terminazioni scoperte si “guardino”. All’avvio della procedura di fusione, che è possibile visualizzare dall’esterno grazie a una microcamera (figura 8.14), la macchina esegue automaticamente l’allineamento delle fibre, le porta a contatto e fa scoccare l’arco elettrico che le salda reciprocamente. Al termine del processo, che dura pochi secondi, il sistema fornisce in automatico la perdita di frequenza determinata dalla giunzione (accettabile nell’ordine di qualche centesimo di dB). L’operazione non parte se la pulizia di una fibra è insufficiente o se il taglio non è stato ben eseguito. Quando si estraggono le fibre, che a questo punto sono un filamento unico (figura 8.15a), è possibile osservare una piccola discontinuità in corrispondenza del punto di giunzione. Poiché questo punto è una debolezza, e si trova in una zona scoperta dal rivestimento, è consigliato proteggere quest’area collocando in corrispondenza di essa una guaina termorestringente (figura 8.15b), che con lo stesso apparecchio può essere riscaldata e leggermente compressa in modo da aderire alla fibra.



Figura 8.13. Disposizione delle fibre nella splicer prima della fusione.



Figura 8.14. Immagini prese dalla microcamera della splicer durante il processo di fusione. (a) allineamento delle fibre; (b) fusione; (c) indicazione della perdita al termine della fusione.

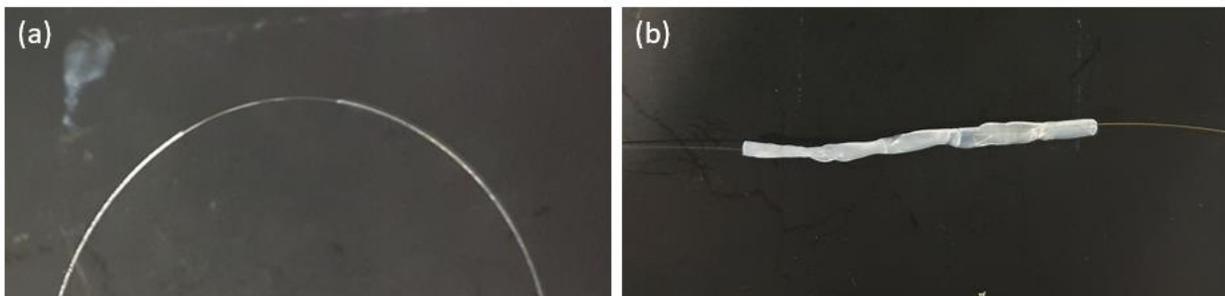


Figura 8.15. Area di giunzione delle fibre (a) senza guaina, (b) con guaina protettiva.

8.6 DIC

La strumentazione impiegata per eseguire la *digital image correlation* è estremamente complessa. Comprende due videocamere da rivolgere verso il lato del provino rivestito del pattern di *speckles* (figura 8.16) quando questo è fissato tra gli afferraggi della macchina di trazione nella posizione di partenza. Queste videocamere vanno regolate in termini di fuoco e zoom seguendo un processo di calibrazione che consenta

loro di mettere bene a fuoco la zona di interesse del provino, con l'aiuto di luci da fotografo per la corretta illuminazione (figura 8.17).



Figura 8.16. Pattern di puntini realizzato sul provino.



Figura 8.17. Dettaglio delle camere e delle luci rivolte verso il provino.

Il software permette di esportare durante la misura una serie di immagini che mostrano la deformazione rilevata punto per punto in scala cromatica (figura 8.18). Ciascuna immagine è relativa a un istante di tempo durante la prova.

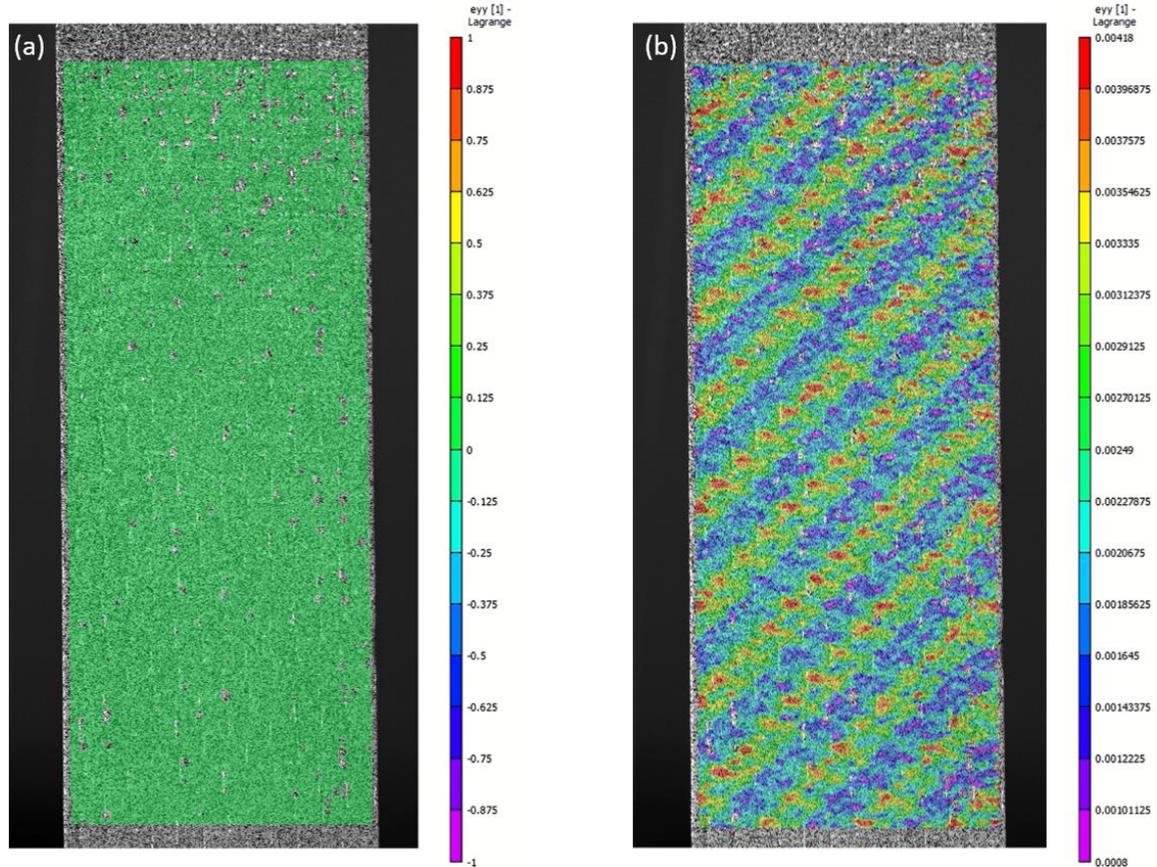


Figura 8.18. Mappe di deformazione all’inizio (a) e alla fine (b) della prova. Si tratta di un test di trazione in cui il carico applicato ha raggiunto 6000 N.

Come si può vedere dalla figura 8.18, per bassi carichi la deformazione sulla superficie del provino risente degli effetti locali dovuti alla posizione delle maglie: quelle trasversali mostrano una deformazione maggiore rispetto a quelle longitudinali.

8.7 Estensimetri

Di estensimetri esistono numerose tipologie, che differiscono principalmente per forma e dimensione. Per questo progetto ne sono state impiegate due: una da 6x6 mm e una più piccola da 3x3 mm. Per incollare questi sensori ai provini, è stata in primo luogo carteggiata con grammatura fine la zona di applicazione e pulita dai residui mediante acetone. Per aiutarsi nel posizionamento è stato impiegato dello scotch mentre per l’incollaggio è stata adoperata una colla cianoacrilatica. La parte “sensibile” dell’estensimetro è una griglietta che non dev’essere danneggiata durante questo processo. Al di sotto dell’estensimetro si posiziona, seguendo lo stesso procedimento, un connettore metallico al quale verranno effettivamente saldati i cavi, in modo da non danneggiare il sensore durante l’operazione. Il sensore e il connettore vengono messi in contatto mediante fili di rame, come si può vedere in figura 8.19. Una volta che il provino è montato sulla *testing machine* si collegano i cavi ai rispettivi contatti mediante una saldatura in stagno.

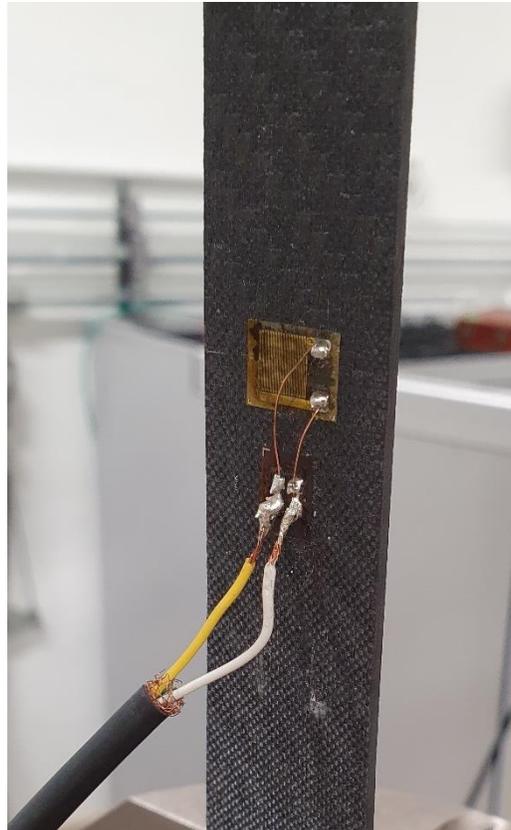


Figura 8.19. Applicazione di un estensimetro a un provino con tutti i collegamenti.

8.8 IET

Una prima verifica del modulo elastico dei provini in esame è stata eseguita mediante tecnica IET (*Impulse Extraction Technique*) [20]. Si tratta di un metodo non distruttivo, schematizzato in figura 8.20, che prevede la stimolazione del campione (di geometria semplice) mediante un impulso molto breve e localizzato in un punto preciso della sua superficie. In un altro punto del campione va posizionato un microfono per rilevare le onde vibrazionali che si propagano attraverso di esso. Questo segnale viene amplificato ed elaborato per mezzo di un software che calcola la frequenza naturale di risonanza del provino, mediante la quale (note la massa e la geometria) è possibile risalire al modulo elastico.

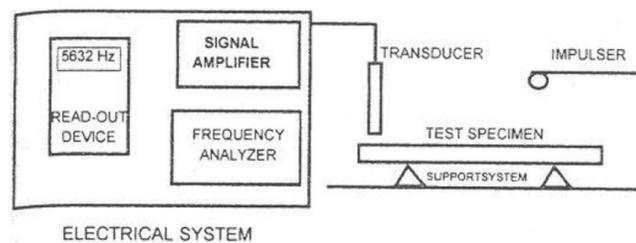


Figura 8.20. Schema del metodo IET [20].

8.9 Zwick

Il primo macchinario utilizzato per le prove di trazione è la Zwick Roell Z050 (figura 8.21), che si tratta di una versione “ridotta” delle classiche *tensile testing machines* in quanto consente di applicare carichi limitati (in questo caso fino a 50 kN). Poiché consente di effettuare diverse tipologie di prove (trazione, compressione, flessione), in dotazione vi è una tipologia di afferraggio specifica per ciascuna di esse. In aggiunta, è possibile acquisire la deformazione del tratto centrale del provino mediante un sistema ottico a luce laser, che monitora lo spostamento di una serie di punti identificati sulla superficie del campione. Questa macchina è stata utilizzata unitamente al sistema Luna per effettuare alcuni test di trazione in campo elastico durante i quali monitorare la deformazione dei provini con le fibre ottiche. Tali prove sono state eseguite a velocità di 0,5 o 1 mm/min impostando un carico limite pari a 5000 N.



Figura 8.21. Zwick Roell Z050 utilizzata per le prove di trazione [54].

8.10 Instron 8801

Una parte delle prove di trazione in campo elastico sono state eseguite con la Instron 8801 (figura 8.22), una macchina simile alla precedente ma basata su un sistema di funzionamento servoidraulico anziché elettromeccanico, che le permette di raggiungere un carico massimo di 100 kN.



Figura 8.22. Instron 8801 utilizzata per le prove di trazione [55].

8.11 VHCF

Per approfondire le potenzialità del sistema Luna, oltre all'aspetto meccanico, si è sperimentata un'applicazione in cui sfruttare le fibre ottiche per rilevare deformazioni termiche. A questo proposito, è stata utilizzata l'apparecchiatura per test VHCF (*Very High Cycle Fatigue*) disponibile presso i laboratori del Politecnico di Torino. Si tratta di una macchina a ultrasuoni che può imprimere al campione frequenze di vibrazione fino a 20 kHz, permettendo quindi di realizzare in tempi contenuti prove di fatica ad alto numero di cicli. Le vibrazioni inducono un riscaldamento interno dovuto allo smorzamento del materiale, fenomeno che per un composito può essere deleterio in quanto potrebbe alterarne le proprietà, soprattutto della fase matrice. Affinché i risultati di prove VHCF eseguite su compositi siano affidabili, è necessario monitorare attentamente la temperatura della prova. La strumentazione è corredata di due sensori laser con i quali controllare la temperatura superficiale, mentre la fibra ottica potrebbe essere molto utile per monitorare la temperatura interna. Per questa prova è stato utilizzato un provino a sezione costante (barretta) di dimensioni 156x15x1,7 mm, avente al suo interno una fibra longitudinale con rivestimento poliimmidico (figura 8.23). Il tratto di fibra interno al provino misura circa 53 mm, ed è stata saldata a un terminale di tipo coreless. Le dimensioni del campione sono fissate per rispettare la condizione sulla frequenza di risonanza, che dev'essere intorno a 20 kHz.



Figura 8.23. Campione utilizzato per le prove VHCF.

Il provino viene posizionato come in figura 8.24: esso dev'essere vincolato al sostegno mediante una colla Loctite HY 4070 solo nella porzione superiore, in modo da essere libero di vibrare. L'intensità dell'oscillazione viene regolata impostando a monte del test un valore di tensione, la quale verrà convertita in frequenze ultrasoniche. Il provino durante la prova è soggetto a tensioni con rapporto pari a -1, ossia con tensione media nulla, pertanto la deformazione rilevata dalla fibra ottica è dovuta esclusivamente al riscaldamento del materiale. Le prove sono state eseguite impostando una frequenza di test pari a 20 kHz, mentre la frequenza di acquisizione era nell'ordine dei 30 Hz.



Figura 8.24. Posizionamento del campione per prove VHCF.

9. Risultati e discussione dei risultati

La parte sperimentale comprende due macrosezioni in cui è stato ripartito il lavoro: le prove meccaniche e le prove termiche, che verranno affrontate separatamente in questa discussione.

9.1 Prove meccaniche

Per i test meccanici i provini in esame sono stati sottoposti a prove trazione in controllo di deformazione, impostando una velocità di allungamento pari a 1 mm/min e interrompendo la prova al raggiungimento di un carico limite pari a 5000 N. In tutti i casi la fibra ottica è stata posizionata al centro del provino in direzione longitudinale rispetto alla direzione di carico. Il software di Luna raccoglie dalle fibre ottiche un gran numero di dati per ogni prova, dunque per minimizzare gli sfarfallii della misura e snellire la quantità di dati da processare si è scelto di considerare per ogni punto della fibra la retta sforzo-deformazione che lo caratterizza, ricavando i dati di forza dalla *tensile machine* e quelli di deformazione da Luna. La pendenza delle rette così ottenute altro non è che il modulo elastico del provino registrato localmente dal tratto di fibra corrispondente. Poiché tutti i materiali testati sono omogenei nella direzione di trazione, ci si aspetta che ciascun punto della fibra ottica registri, durante la prova, la stessa deformazione, e di conseguenza si possa risalire allo stesso modulo elastico per tutto il provino.

In tabella 9.1 sono stati raccolti e suddivisi tutti i risultati, in termini di modulo elastico, delle prove sperimentali effettuate, suddivisi secondo la configurazione della fibra ottica sul provino. Di seguito verrà discusso l'effetto di ogni fattore che compare in essa.

Tabella 9.1. Risultati delle prove meccaniche di trazione in termini di modulo elastico calcolato a partire dalle deformazioni rilevate con Luna.

Tipo di fibra	Coating	Lunghezza fibra (mm)	E sperimentale terminale a nodo (GPa)	E sperimentale terminale Luna/coreless (GPa)	E riferimento (GPa)
esterna	acrilato	40	92.73	157.26	58 (IET), 56.8 - 58.3 (DIC), 56.2 - 58.3 (SG)
		100	-	61.74	
	poliimmide	55	-	58.67	
	nessuno	32	58.95	53.83	
interna	acrilato	44	126.96	-	
		154 - 225	56.16	57.55	
	poliimmide	51	-	61.05	
	nessuno	-	(difficoltà nella realizzazione dei provini)		

Il motivo per cui i moduli calcolati sono stati suddivisi in due colonne in base al terminale utilizzato è un aspetto un po' difficile da visualizzare focalizzandosi esclusivamente sui risultati, ma i terminali a nodo non sono sempre efficaci nella dispersione della luce, pertanto molto spesso provocano un abbassamento della qualità del segnale nella fibra ottica rendendo difficile la misura. L'efficacia di un terminale a nodo infatti è fortemente legata alla dimensione del nodo stesso: tanto più è piccolo, tanto migliore risulta la

terminazione. La realizzazione di un nodo efficace tuttavia non è sempre possibile, e quando ciò non avviene la qualità della misura risulta impoverita, ovvero si perde sensibilità. Inoltre può accadere che tale terminale non sia sufficiente a creare una dispersione del segnale superiore ai 5 dB, impedendo la corretta taratura del sensore. Questi effetti non si manifestano invece con terminali Luna o di tipo coreless. Per quanto riguarda questi ultimi, la loro efficacia è legata a due aspetti. Il primo è la lunghezza: nei datasheet del sistema ODiSi [53] viene specificato che sono sufficienti 10 cm di fibra coreless per ottenere un buon terminale, mentre l'azienda produttrice (Thorlabs [52]) indica almeno 25 cm. In ogni caso, tanto più lungo è il tratto di fibra coreless, tanto più efficace risulta la terminazione nel disperdere il segnale. Il secondo aspetto da prendere in considerazione invece riguarda il punto di giunzione: se in corrispondenza di esso è presente un tratto (anche molto piccolo) di fibra ottica non rivestita, buona parte del fascio di luce che dal core del sensore raggiunge la terminazione viene riflesso dal cladding e si disperde all'esterno. Per evitare questo fenomeno è sufficiente rivestire la zona di giunzione in seguito ad essa con una guaina polimerica di qualunque tipo, purché riflettente al passaggio di luce (figura 9.1).



Figura 9.1. Rivestimento della zona di giunzione tra fibra ottica e terminale.

Per quanto riguarda l'ultima colonna della tabella 9.1, avendo scelto di elaborare i dati di Luna in funzione del modulo elastico era indispensabile trovare un valore di modulo di riferimento cui attenersi per verificare l'attendibilità del sistema. In un primo momento è stato calcolato mediante tecnica IET un modulo pari a 58 GPa, ma questo valore è stato verificato successivamente mediante prove di trazione in cui la lettura delle deformazioni è stata eseguita da estensimetri e/o DIC in contemporanea con Luna. In figura 9.2 è riportato un provino in cui i tre metodi di misura sono stati applicati contemporaneamente: nei pressi degli afferraggi si possono osservare i punti di uscita delle fibre ottiche dal provino, sulla superficie sono presenti due estensimetri (uno da 6 e uno da 3 mm) mentre sullo sfondo sono visibili le camere della DIC.



Figura 9.2. Campione sottoposto al rilevamento della deformazione durante una prova di trazione mediante fibre ottiche, estensimetri e DIC.

Per il confronto sono stati utilizzati, oltre a quello in figura 9.2, altri due provini: uno di essi è stato sottoposto esclusivamente a DIC mentre sull'altro è stato posizionato un solo estensimetro da 6 mm. In conclusione, da estensimetri e DIC sono stati ottenuti i valori di modulo elastico riportati in tabella 9.2, mentre i risultati ottenuti mediante le fibre ottiche verranno discussi successivamente.

Tabella 9.2. Moduli elastici calcolati mediante estensimetri e DIC, utilizzati come valori teorici.

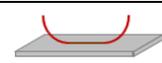
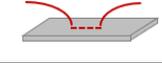
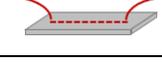
Provino	E DIC (GPa)	E estensimetro 6 mm (GPa)	E estensimetro 3 mm (GPa)
1	58,3	-	-
2	56,8	58,3	62,1
3	-	57,2	-

Dall'analisi di quanto riportato in tabella 9.2, si può affermare che ci sia concordanza tra i moduli ottenuti, e che questi siano in accordo con il valore teorico calcolato mediante IET. L'unico valore che si discosta dagli altri è quello calcolato con l'estensimetro da 3 mm sul secondo provino: bisogna ricordare infatti che gli estensimetri calcolano un valore di deformazione superficiale localizzato, e questo era posizionato prevalentemente su una maglia disposta longitudinalmente, che quindi risente di una deformazione minore rispetto alla media del provino. Questa quantità non è quindi da prendere in considerazione per il confronto con le fibre ottiche, in quanto influenzata dalla posizione locale dell'estensimetro.

9.1.1 Fibre ottiche con rivestimento in acrilato

Le prime fibre ottiche ad essere testate sono state quelle in acrilato, i cui moduli vengono riportati in tabella 9.3 per agevolarne la consultazione.

Tabella 9.3. Moduli elastici ricavati mediante fibre ottiche con rivestimento in acrilato.

	Posizione fibra	Lunghezza fibra (mm)	E sperimentale terminale a nodo (GPa)	E sperimentale terminale Luna/coreless (GPa)	E riferimento (GPa)
	Esterna	40	92.73	157.26	58 (IET), 56.8 - 58.3 (DIC), 56.2 - 58.3 (SG)
		100	-	61.74	
	Interna	44	126.96	-	
		150 - 225	56.16	57.55	

La metodologia più semplice per verificare il funzionamento di una fibra ottica è l'incollaggio sulla superficie del provino, che è stato eseguito sui primi due campioni per tratti di diversa lunghezza: circa 50 mm sul primo e 100 mm sul secondo. I due provini utilizzati sono riportati schematicamente in figura 9.3. Dai test di trazione effettuati si possono estrapolare grafici come quello in figura 9.4: esso riporta

l'andamento del modulo elastico ricavato dalla deformazione del provino lungo il tratto di fibra ottica a contatto con quest'ultimo.



Figura 9.3. Schema dei due provini con fibra ottica esterna.

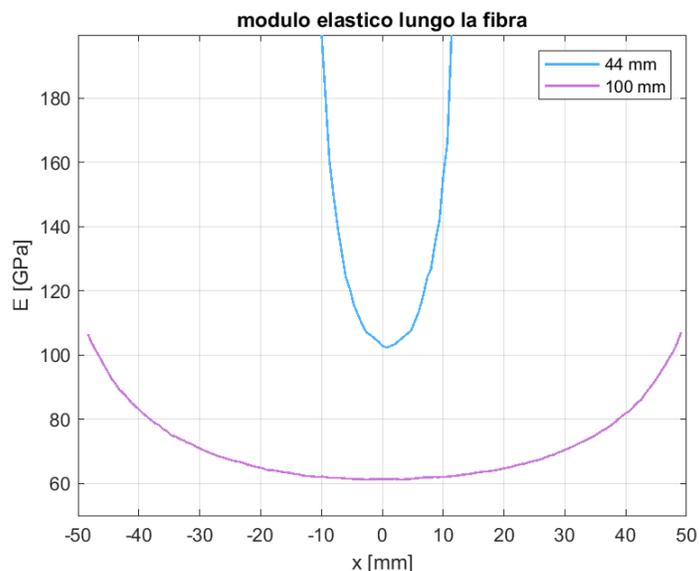


Figura 9.4. Andamento del modulo elastico lungo le fibre ottiche esterne in acrilato.

La considerazione più evidente che emerge dal grafico è che la deformazione letta dalla fibra ottica non è concorde per tutti i punti: in particolare, alle estremità della fibra si legge un modulo molto elevato, sintomo del rilevamento di una deformazione molto bassa. Questo andamento “a U” è caratteristico delle fibre ottiche rivestite in acrilato, che come discusso nel cap. 6.5.2, assorbono parte della deformazione. I valori indicati in tabella 9.3, a causa proprio dell'andamento a U, sono stati ottenuti considerando il valor medio dei punti racchiusi tra il minimo della curva, che è il punto centrale della fibra, e il 2% in più di questo valor minimo (figura 9.5). Il tratto considerato in questo modo rappresenta in tutti i casi circa il 20% della lunghezza di fibra ottica immersa nel materiale.

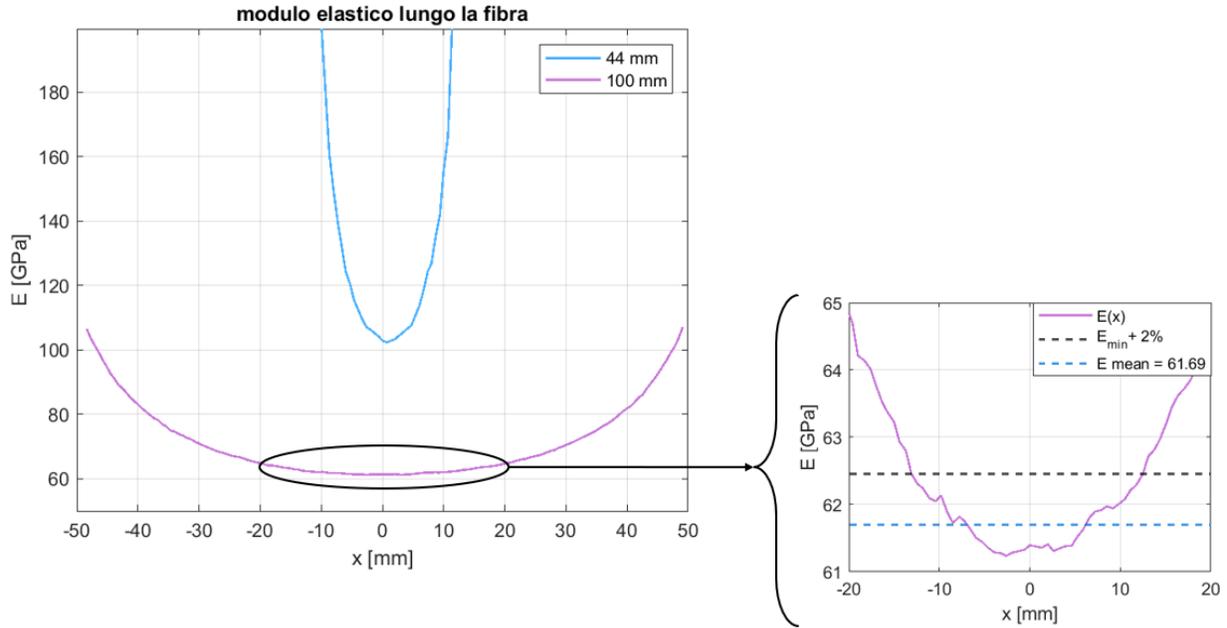


Figura 9.5. Ingrandimento del punto di minimo della curva di modulo elastico per visualizzare i riferimenti utilizzati per l'ottenimento di un valore di modulo elastico.

Un'ulteriore considerazione che emerge dalla tabella 9.3 è che la lunghezza del tratto di fibra ottica adesivo al provino ha influenza sulla misura: le fibre più lunghe infatti raggiungono valori di modulo più bassi, che quindi si avvicinano a quelli teorici. Ciò implica quindi che l'utilizzo di queste fibre è possibile solo se la lunghezza di contatto con il substrato è sufficientemente estesa da compensare l'effetto di assorbimento della deformazione da parte del coating. Questo concetto, per maggior chiarezza, è stato schematizzato in figura 9.6.

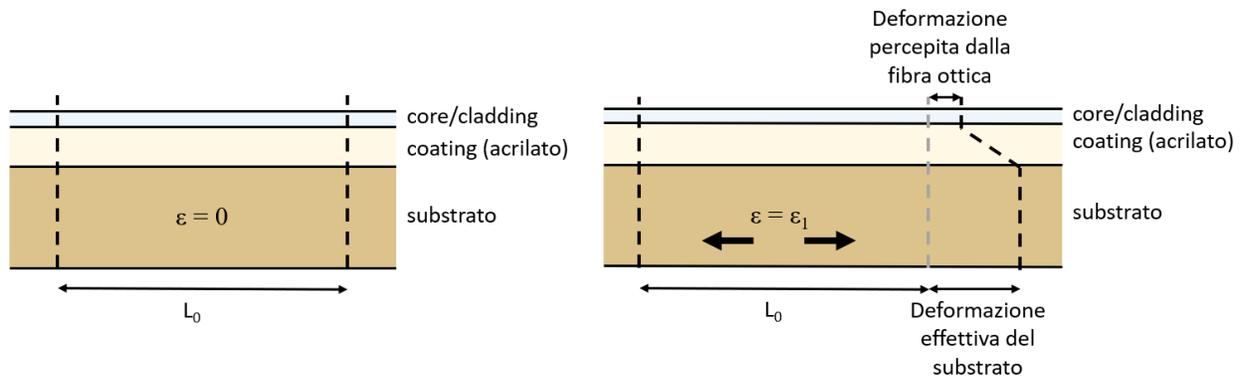


Figura 9.6. Schema della sezione di una fibra ottica indeformata a sinistra e sottoposta a una deformazione di trazione a destra. Nell'immagine di destra si vuole mettere in luce l'effetto di assorbimento della deformazione da parte del rivestimento acrilatico.

Per evidenziare che questo difetto fosse dovuto al rivestimento della fibra ottica, è stato realizzato un test di trazione incollando su un provino tre segmenti di fibra ottica, due normali con coating e un terzo senza

coating. Tra i primi due tratti, la differenza è il tipo di colla utilizzata: una Loctite HY 4070 per il primo e il super attack della Loctite per il secondo e per quello senza coating. In figura 9.7 si può vedere un grafico rappresentativo dell'andamento dei moduli elastici in queste prove. La considerazione fondamentale riguarda la fibra senza coating: nonostante sia "corta" come le altre, essa registra valori abbastanza coerenti di modulo elastico, e soprattutto non presenta l'andamento a U tipico dell'acrilato. Tra le due colle invece la differenza non è sostanziale: entrambe sono di tipo cianoacrilato e pertanto sono adatte per la misura.

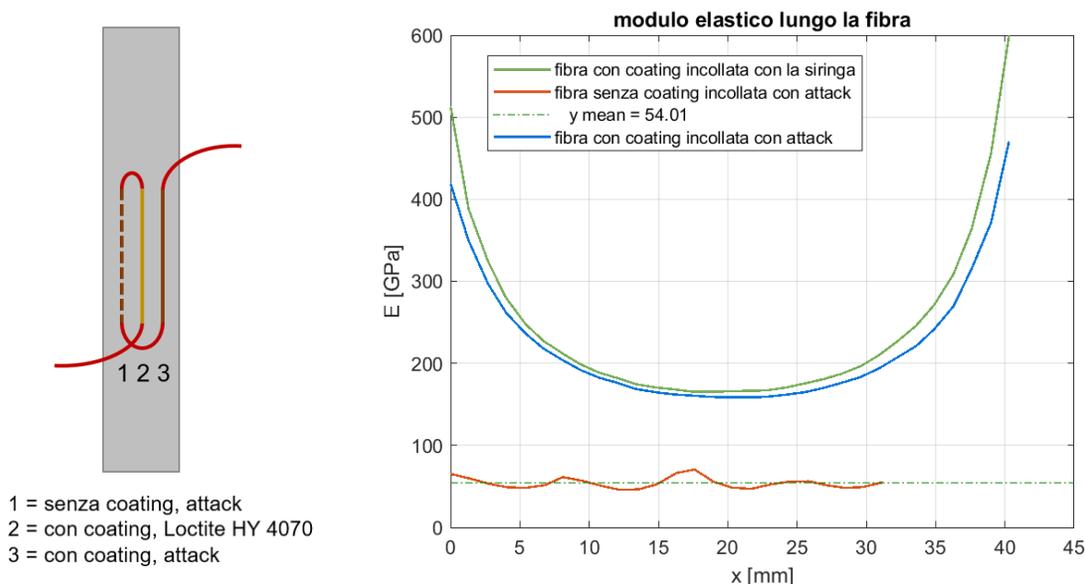


Figura 9.7. A sinistra, uno schema del provino sottoposto a trazione, con le specifiche di ciascun tratto di fibra incollato ad esso. A destra, l'andamento del modulo elastico rilevato da ciascun tratto di fibra ottica.

Lo stesso discorso sulla lunghezza della fibra si può fare anche per provini con fibre ottiche interne in acrilato: in questo caso, come emerge dalla tabella 9.3, la maggiore lunghezza della fibra ottica (superiore a 150 mm) permette di rilevare, indipendentemente dal terminale, valori di deformazione, e quindi di modulo, vicini a quelli corretti. In figura 9.8 sono state riportate le curve di modulo elastico ottenute da fibre con lunghezza diversa.

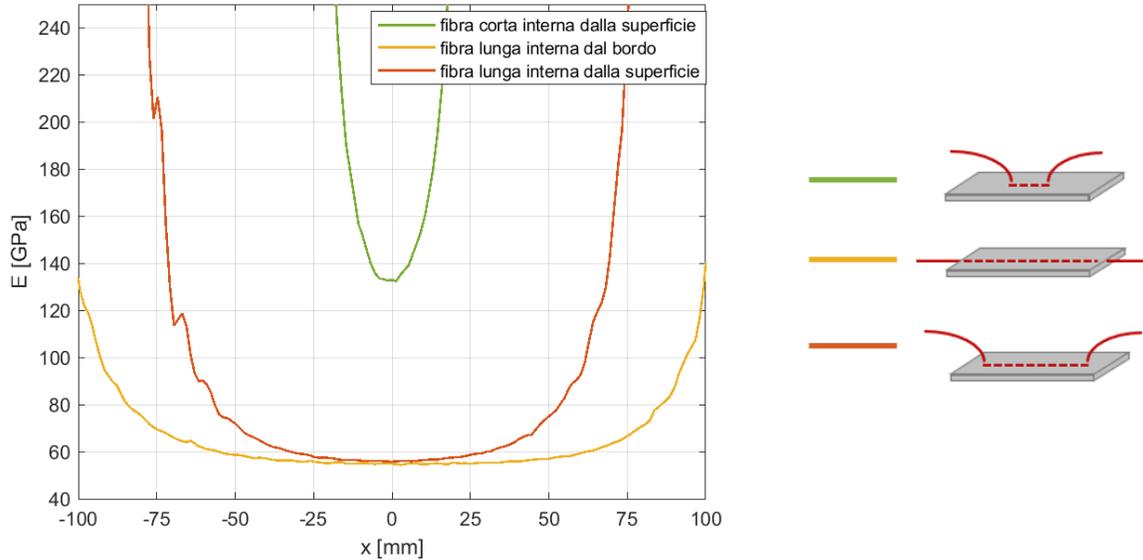


Figura 9.8. Effetto della lunghezza del tratto di fibra ottica interno al provino sul modulo elastico.

L'inserimento delle fibre ottiche all'interno dei provini porta con sé una criticità ulteriore: per poter tagliare i bordi del campione infatti è necessario che le fibre fuoriescano dalla superficie superiore, e non dal bordo del provino. Ciò implica che alle fibre venga imposto un certo raggio di curvatura che permetta loro di attraversare i layer superiori, ma se questa curvatura è troppo accentuata il fascio di luce che attraversa la fibra fatica a mantenersi all'interno del core, impedendo di ottenere un segnale di qualità. Dai vari tentativi effettuati è emerso che i risultati migliori si ottengono facendo passare la fibra in maniera quanto più possibile inclinata rispetto ai piani di prepreg. In figura 9.9 è stato schematizzato questo concetto, mentre lo spettro in figura 9.10 è relativo a un provino in cui la fibra è stata inserita tra i layer in posizione quasi verticale. Da esso è ben riconoscibile il punto di ingresso della fibra ottica nel provino, segnalato con una linea rossa, a partire dal quale il segnale perde di intensità. Inoltre è fondamentale mantenere le fibre in tensione durante la sovrapposizione degli strati in modo da impedire la formazione di onde e tratti curvi.

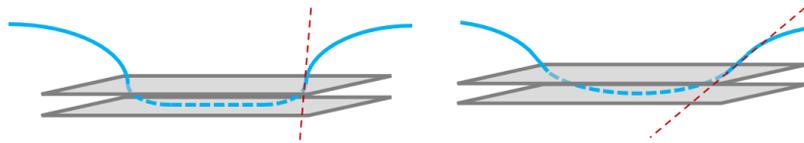


Figura 9.9. A sinistra, la fibra ottica attraversa i layer in maniera troppo verticale: la distorsione che ne deriva impedisce di avere un segnale di qualità. A destra invece la fibra è più inclinata, cosa che favorisce la sensibilità dello strumento.

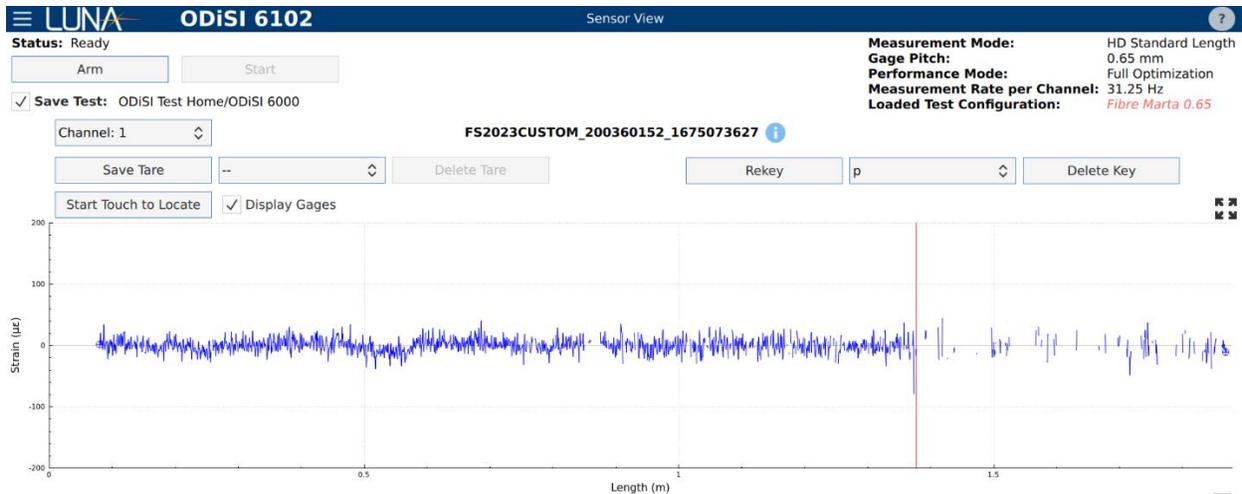


Figura 9.10. Segnale di una fibra ottica che presenta una discontinuità in corrispondenza del segmento rosso verticale.

Nonostante possa sembrare la soluzione migliore, incorporare fibre ottiche senza rivestimento all'interno dei provini è stato un tentativo fallimentare. Il problema principale risiede nella fragilità intrinseca delle fibre di vetro: le tensioni e gli assestamenti di un layer sull'altro durante la cura inducono delle microflessioni troppo accentuate per mantenere una buona qualità del segnale. Per incorporare fibre ottiche all'interno dei materiali dunque il rivestimento è essenziale.

Per mettere in luce anche altri effetti della disposizione della fibra ottica, i campioni con fibre interne lunghe sono stati realizzati secondo tre configurazioni diverse, schematizzate in figura 9.11.

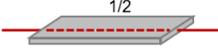
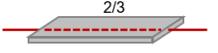
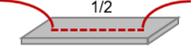
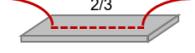
- Il primo presenta due fibre ottiche longitudinali uscenti dai bordi esterni, una posizionata tra primo e secondo layer e una tra secondo e terzo layer;
- Il secondo presenta una fibra ottica uscente dalla superficie posizionata tra primo e secondo layer;
- Il terzo presenta una fibra ottica uscente dalla superficie posizionata tra secondo e terzo layer.



Figura 9.11. Schema dei tre provini con fibre ottiche interne in acrilato.

Questi provini sono stati quelli scelti per effettuare le misurazioni di confronto con DIC e estensimetri: in particolare, la DIC è stata effettuata sui primi due provini; sul secondo sono stati posizionati anche due estensimetri (uno da 6 mm e uno da 3 mm) mentre sul terzo si è scelto di apporre un solo estensimetro da 6 mm. La tabella 9.4 mette a confronto i moduli elastici calcolati con Luna su questi tre provini con quelli ottenuti mediante le rispettive tecniche alternative. In essa si può vedere che i risultati di Luna nel tratto centrale della curva possono essere giudicati in buon accordo con quelli ricavati con le altre tecniche di confronto.

Tabella 9.4. Moduli elastici ottenuti dai provini con fibre ottiche interne lunghe in acrilato.

	Tipo di fibra	E LUNA medio (GPa)	E DIC (GPa)	E estensimetro 6 mm (GPa)	E estensimetro 3 mm (GPa)
	Dal bordo, tra 1° e 2° layer	57,99	58,3	-	-
	Dal bordo, tra 2° e 3° layer	55,04	58,3	-	-
	Dalla superficie, tra 1° e 2° layer	57,16	56,8	58,3	62,1
	Dalla superficie, tra 2° e 3° layer	57,15	-	57,2	-

La scelta di posizionare le fibre ottiche tra layer differenti deriva dalla volontà di comprendere se fibre ottiche più superficiali fossero influenzate diversamente in termini di qualità del segnale e/o dei valori di deformazione rilevati. A livello di fabbricazione, il passaggio della fibra ottica attraverso un solo layer è più semplice da realizzare, e inoltre tutte le fibre posizionate tra primo e secondo layer sono risultate funzionanti, mentre a causa della curvatura impressa alcuni tentativi di inserimento delle fibre ottiche al centro del provino sono risultati fallimentari. Il grafico in figura 9.12 riporta il modulo elastico ottenuto da fibre ottiche lunghe posizionate tra primo e secondo layer (in un caso uscenti dal bordo del provino e nell'altro dalla superficie) a confronto con il modulo ottenuto da fibre analoghe ma incorporate tra secondo e terzo layer. Si evidenzia che fibre ottiche più superficiali leggono deformazioni leggermente maggiori, e quindi permettono di calcolare moduli di Young leggermente inferiori rispetto alle fibre situate più in profondità. Le motivazioni di questo comportamento non sono state approfondite e si prestano ad analisi future.

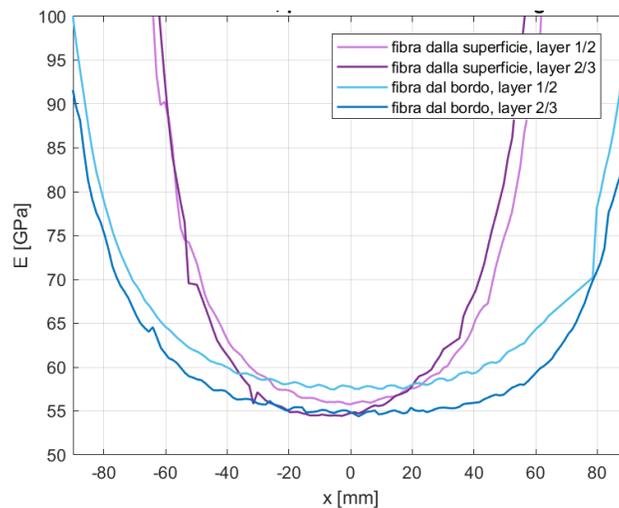


Figura 9.12. Effetto del posizionamento della fibra ottica (layer tra i quali si trova e punto di uscita dal provino).

9.1.2 Fibre ottiche con coating poliimmidico

A differenza delle fibre ottiche rivestite in acrilato, la maggior rigidità del coating poliimmidico permette alla fibra di leggere correttamente la deformazione del substrato, senza che intervengano effetti elastici di assorbimento. Il grafico in figura 9.13 riporta l'andamento della deformazione misurata lungo una fibra ottica poliimmidica interna a un provino al termine di un test di trazione. In questo caso, la separazione tra la porzione di fibra interna al provino e quella esterna non vincolata è molto netta.

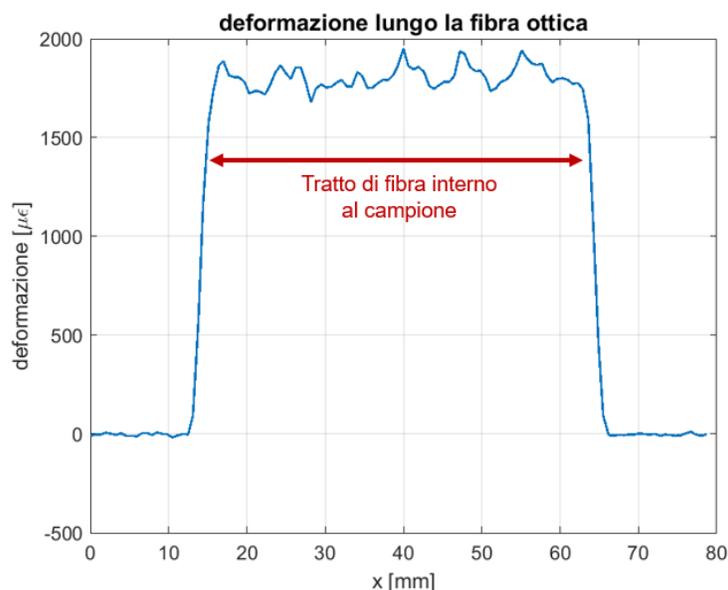


Figura 9.13. Andamento della deformazione rilevata da una fibra ottica con rivestimento in poliimmide interna al provino al termine di una prova di trazione.

Nel grafico inoltre si nota un andamento oscillatorio delle deformazioni intorno a un valor medio. Tali oscillazioni potrebbero essere dovute all'alternanza delle maglie longitudinali - trasversali del tessuto; inoltre il fatto che tra il primo e il secondo tratto (a circa 35 mm) il valor medio salga leggermente può essere sintomo di un allineamento non corretto della fibra all'interno del provino. Questa differenza non è presente nel caso in cui la fibra è stata incollata esternamente al provino (figura 9.14). In questo caso però le oscillazioni sono più accentuate (tra il massimo e il minimo intercorrono 660 $\mu\epsilon$ contro i 272 $\mu\epsilon$ del caso precedente).

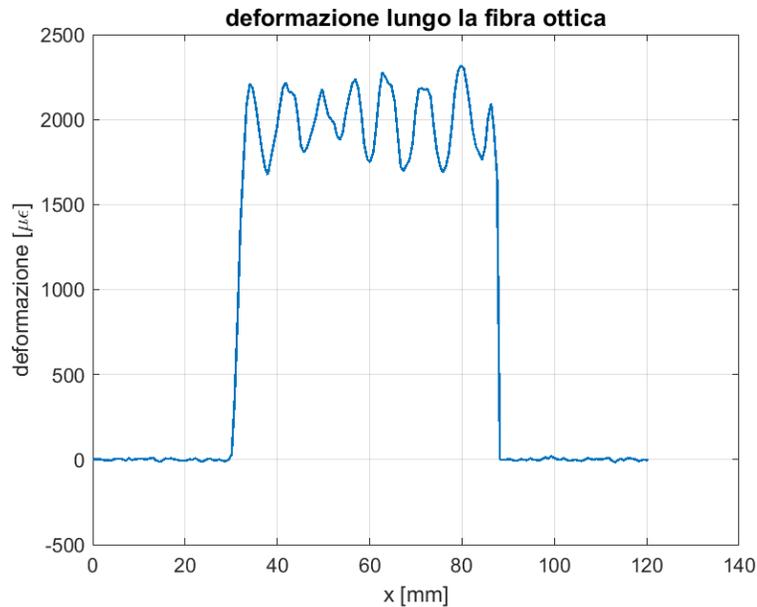


Figura 9.14. Andamento della deformazione rilevata da una fibra ottica con rivestimento in poliimmide esterna al provino al termine di una prova di trazione.

Per le due fibre poliimmidiche, interna e esterna, di cui sono state analizzate le deformazioni, viene riportato in figura 9.15 l'andamento del modulo elastico.

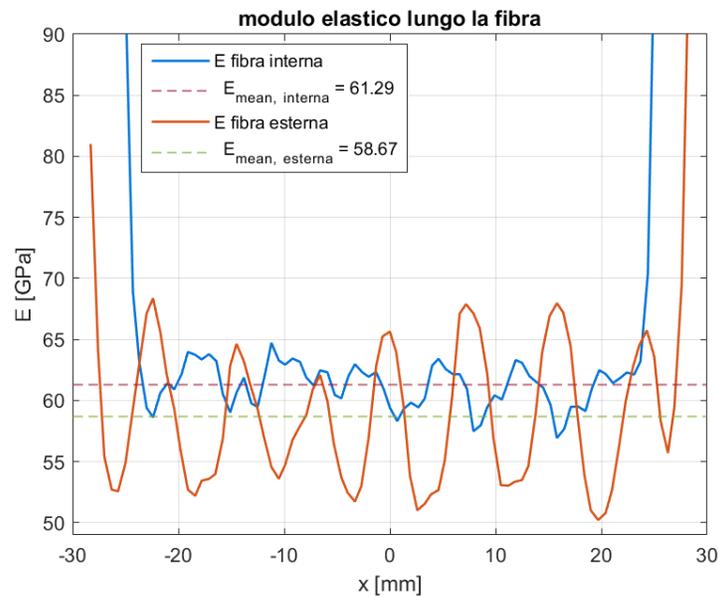


Figura 9.15. Andamento del modulo elastico calcolato mediante fibre ottiche poliimmidiche.

Anche dall'analisi del modulo è evidente la totale assenza dell'andamento a U che caratterizza l'acrilato, segno che tutti i punti della fibra leggono la stessa deformazione. Le oscillazioni della misura sono presumibilmente dovute all'alternanza delle maglie longitudinali-trasversali su cui la fibra ottica è posizionata. A conferma di ciò, è possibile notare come in superficie queste oscillazioni siano molto

regolari, con ampiezza simile e periodo costante, suggerendo per l'appunto una correlazione con il tessuto. All'interno invece la misura risente dei layer superiore e inferiore e dello sfasamento tra di essi, il che determina oscillazioni meno regolari e con ampiezze considerevolmente inferiori.

Le fibre ottiche poliimmidiche dunque possiedono il grande vantaggio di rilevare con precisione la deformazione corretta, anche se adese al substrato per piccole lunghezze. L'unico fattore che rende l'acrilato conveniente rispetto alla poliimmide è il fatto che risulta molto più maneggevole e decisamente meno fragile, pertanto nel caso in cui l'area da monitorare sia molto estesa, esso rappresenta una valida alternativa.

9.2 Prove in temperatura

9.2.1 Prove in forno a temperatura controllata

Per verificare l'efficacia dei sensori alla rilevazione della temperatura, inizialmente tre provini con fibre ottiche interne tra quelli già testati a trazione sono stati sottoposti a prove termiche statiche in forno. Di questi tre provini, due presentano una fibra ottica in acrilato tra secondo e terzo layer (lunga nel primo e corta nel secondo) mentre il terzo presenta una fibra ottica corta rivestita in poliimmide. Nello specifico, è stata misurata mediante le fibre ottiche la variazione di temperatura percepita dal campione a 40, 50 e 60°C rispetto a una temperatura ambiente di 20°C. Le misurazioni sono state eseguite nelle due modalità permesse dal sistema ODiSi: *strain* e *temperature*. I campioni sono stati mantenuti in forno 3 minuti prima di effettuare il rilevamento, della durata di qualche secondo.

Il grafico in figura 9.16 riporta l'andamento del ΔT registrato da una fibra interna lunga in acrilato. Come si può vedere, la precisione di misura con questa modalità è molto bassa, infatti il segnale oscilla molto, e questo complica in parte l'analisi dei risultati. Questo effetto potrebbe essere anche dovuto al fatto che le temperature cui sono stati esposti i provini sono comunque relativamente basse per garantire una precisione di misura apprezzabile. Ad ogni modo, con l'acrilato l'andamento della curva di deformazione o ΔT rispecchia quello ottenuto mediante le prove meccaniche, ovvero leggermente incurvato agli estremi. Vanno quindi presi in considerazione solo i risultati rilevati dal tratto centrale della fibra (che alle T più alte tende ad appiattirsi).

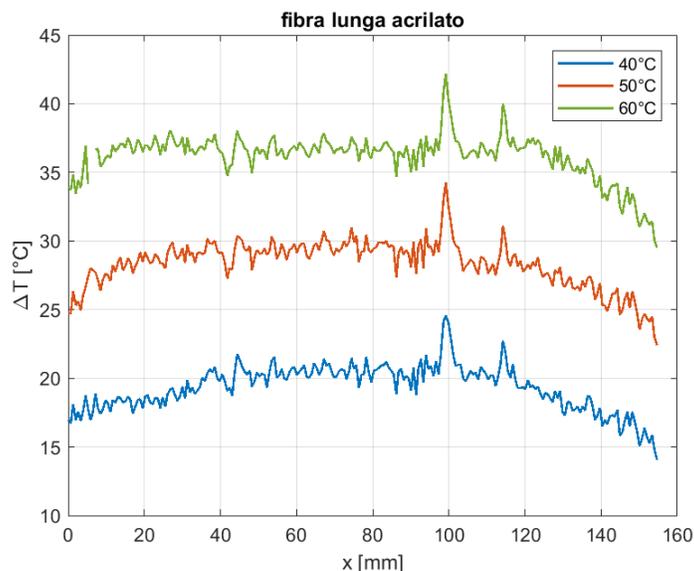


Figura 9.16. Variazione di temperatura registrata lungo la fibra ottica interna in acrilato alle tre temperature di riferimento.

Al contrario, fibre ottiche poliimmidiche permettono di leggere la stessa deformazione termica per tutta la lunghezza di contatto, salvo, anche in questo caso, oscillazioni della misura. Come per le prove meccaniche, le oscillazioni della fibra poliimmidica sono più accentuate per la maggior sensibilità all'alternanza delle maglie di tessuto. In figura 9.17 è riportata la curva registrata da una fibra poliimmidica a confronto con una fibra lunga in acrilato, alla stessa temperatura di 60°C.

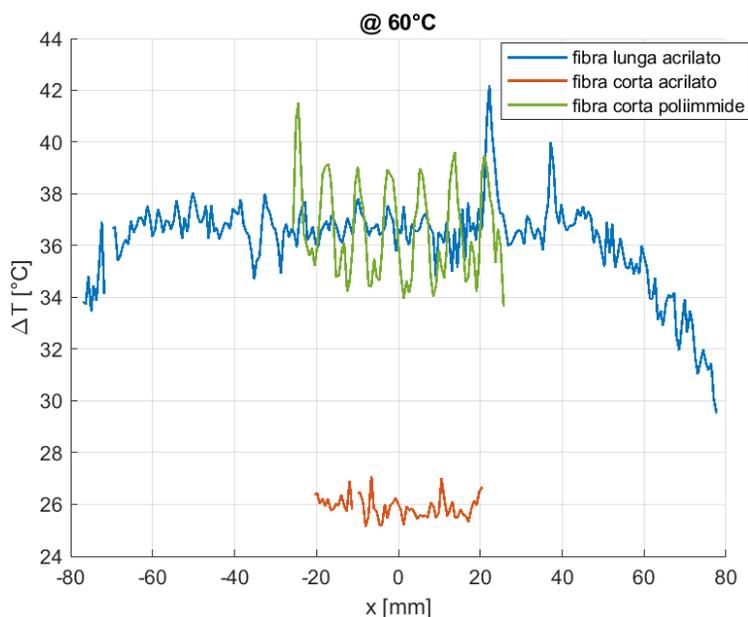


Figura 9.17. Confronto tra le tre fibre ottiche esaminate relativo alla variazione di temperatura rilevata a 60°C.

Al di là del valore assoluto di temperatura registrato durante le prove, che potrebbe non essere corretto a causa del poco tempo di mantenimento in forno, il dato importante che emerge da questi grafici è il fatto che il tratto centrale della fibra lunga in acrilato raggiunge la deformazione rilevata dalla poliimmide. Fibre corte in acrilato invece, come per le prove meccaniche, non permettono di avvicinarsi al valore corretto. Nella tabella 9.5 sono raccolti i ΔT calcolati durante queste prove per la fibra poliimmidica e quella lunga in acrilato.

Tabella 9.5. Risultati delle prove termiche per campione con fibra interna lunga in acrilato (N.B. i valori si riferiscono al tratto centrale della fibra) e con fibra corta in poliimmide.

T forno (°C)	ΔT acrilato (°C)	ΔT poliimmide (°C)	Deformazione acrilato ($\mu\epsilon$)	Deformazione poliimmide ($\mu\epsilon$)
40	19,25	10,81	222,2	78,23
50	28,26	24,5	280,1	276,17
60	36,08	36,62	368,5	394,07

L'andamento delle curve di deformazione termica coincide con quelle di ΔT , segno che entrambe le soluzioni sono adatte al rilevamento di deformazioni termiche.

9.2.2 Prove VHCF

Una volta verificata l'affidabilità delle fibre ottiche come strumento di misura della temperatura, questi sensori sono stati impiegati per valutare il riscaldamento interno al materiale nei test VHCF. Le prove VHCF sono state eseguite, come le altre, imponendo un valore di gage pitch pari a 0,65 mm e una frequenza di acquisizione di 31,25 Hz. Per testare l'efficacia della fibra ottica al rilevamento della temperatura in questa configurazione, inizialmente è stato imposto un voltaggio molto basso (1 V) per una durata di pochi secondi. Durante la fase di vibrazione del provino, anche a basse tensioni, la fibra ottica non riesce a registrare alcun dato, presumibilmente in quanto gli spostamenti della barra sono così veloci da disperdere il segnale ottico all'esterno della fibra. Tale segnale tuttavia viene recuperato integralmente non appena la vibrazione cessa, permettendo di ricavare l'informazione relativa all'innalzamento termico interno al provino provocato dagli ultrasuoni. Per tensioni molto basse in realtà l'aumento di temperatura è minimo ($< 1^\circ\text{C}$ secondo i laser), e tale incremento con la fibra ottica è difficile da distinguere in quanto si confonde con l'imprecisione di misura dovuta all'oscillazione del segnale. A partire da una tensione di 1,3 V tuttavia si inizia a distinguere la differenza di temperatura del provino dopo la vibrazione anche con la fibra ottica. In figura 9.18 è riportato il ΔT registrato da ogni punto della fibra, rappresentato dalle linee colorate, mentre in nero e in grigio sono riportate le variazioni di temperatura superficiali misurate contestualmente dai laser.

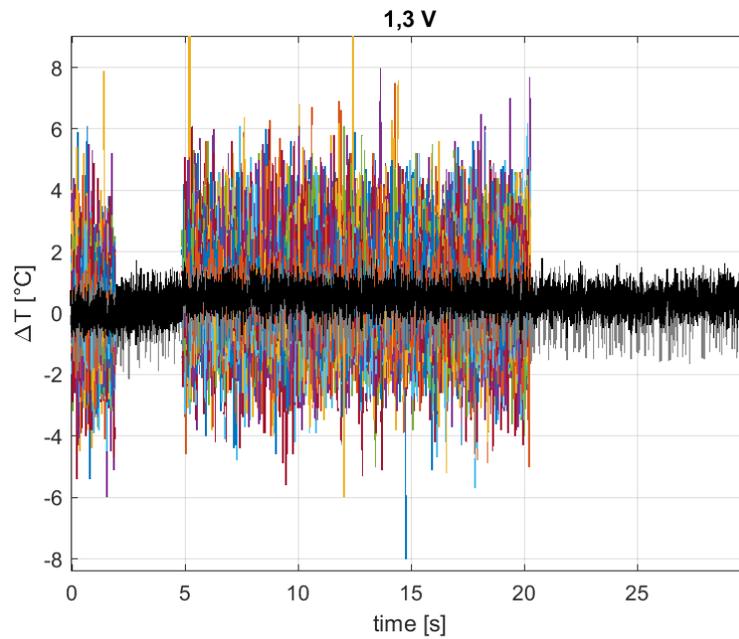


Figura 9.18. Variazione di temperatura registrata da ogni punto della fibra ottica e dai due laser durante test VHCF a 1,3 V. I tratti nero e grigio sono quelli relativi ai due laser, mentre ciascuno dei tratti colorati corrisponde a un punto della fibra ottica.

Come si può vedere, la temperatura misurata dai laser presenta una precisione maggiore rispetto alle fibre ottiche. Inoltre, non tutti i punti della fibra rilevano la stessa temperatura, ma le curve dei laser si sovrappongono in ogni istante ad almeno uno di questi punti, indicando che entrambi questi sistemi sono adatti per la misura. Questo discorso è valido anche per tensioni applicate maggiori, come si può vedere nei grafici di figura 9.19, ottenuti rispettivamente a 3 e 6 V.

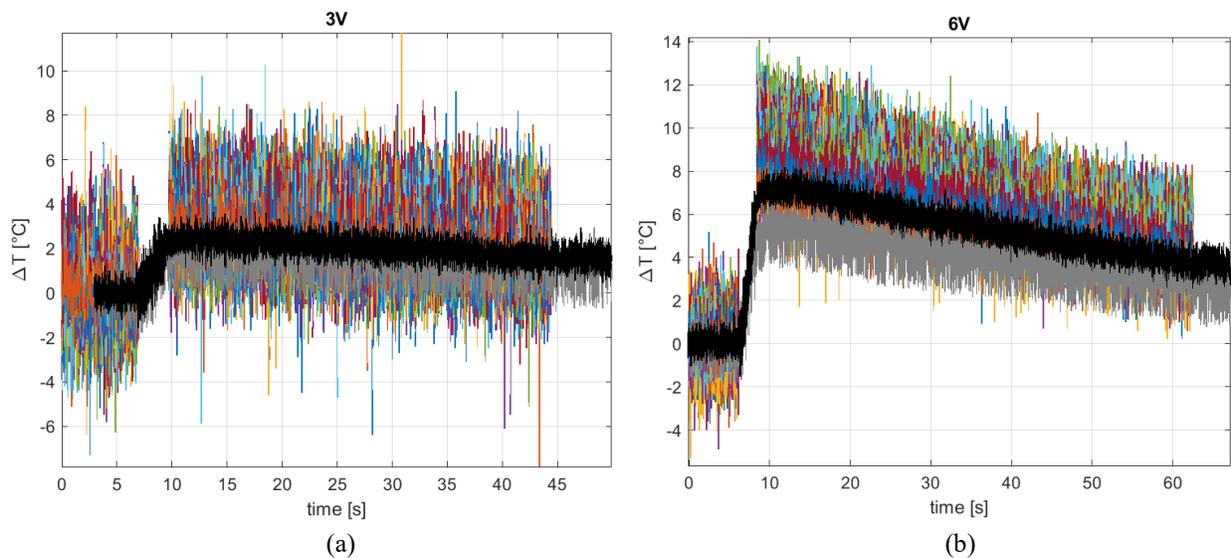


Figura 9.19. Variazione di temperatura registrata da ogni punto della fibra ottica e dai due laser durante test VHCF a 3 V (a) e 6 V (b). I tratti nero e grigio sono quelli relativi ai due laser, mentre ciascuno dei tratti colorati corrisponde a un punto della fibra ottica.

Durante la prova, la deformazione letta dalla fibra ottica all'interno del campione ha l'andamento riportato in figura 9.20.

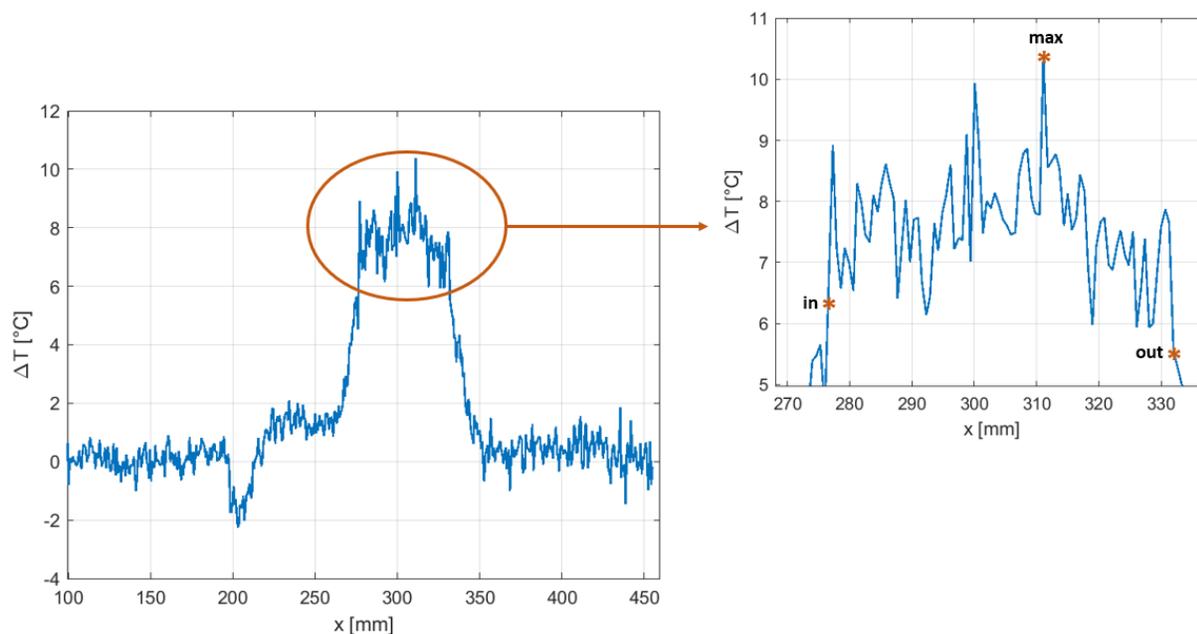
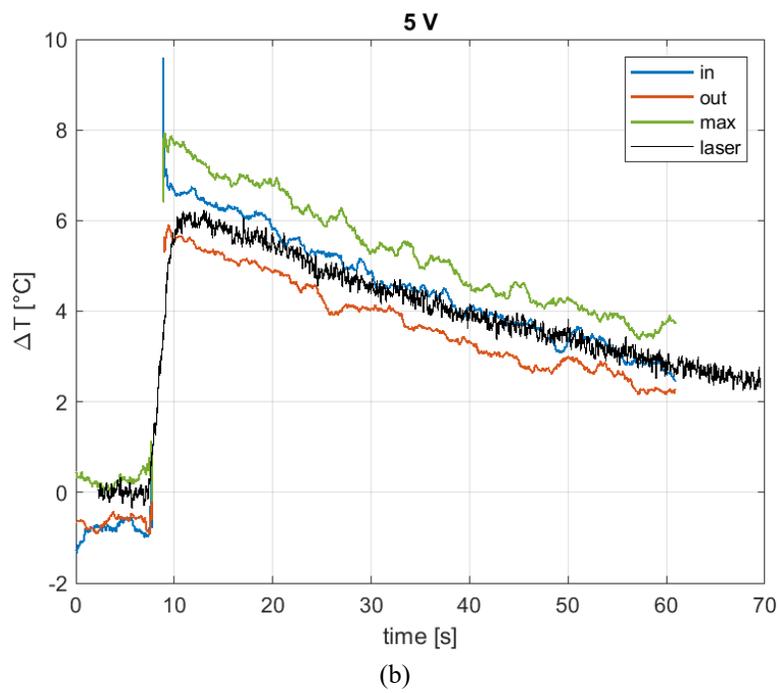
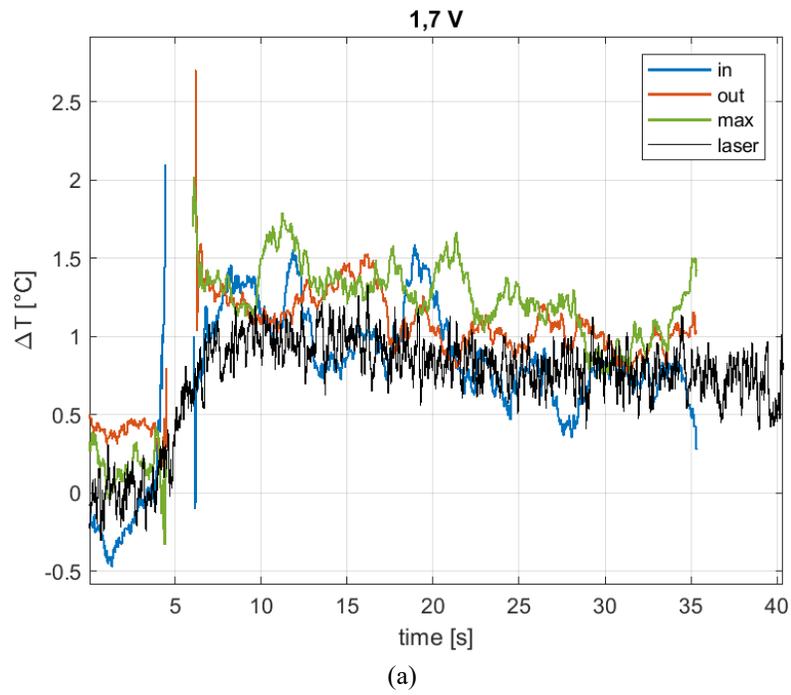


Figura 9.20. Fotografia del ΔT rilevato dalla fibra in un istante della prova VHCF a 5 V, per mettere in evidenza come varia tale parametro lungo la fibra. Il tratto di fibra ottica interno al campione è riportato nell'ingrandimento a destra.

Sebbene la fibra presenti un rivestimento poliimmidico, l'andamento della deformazione termica non è perfettamente rettilineo: al di là di alcune discontinuità, che possono essere dovute all'allineamento non perfetto della fibra tra i layer, si distingue un andamento curvilineo, maggiore nella zona centrale e decrescente verso le estremità. Ciò è dovuto al fatto che le onde ultrasoniche non provocano una distribuzione uniforme della tensione all'interno di un materiale composito come in una prova di trazione, ma essa è massima al centro e decresce procedendo man mano verso i lati. Da questo punto di vista, la fibra ottica legge un andamento corretto della deformazione termica interna.

Dal confronto tra i due grafici di figura 9.19, sembrerebbe che per tensioni maggiori la temperatura letta dalla fibra ottica tenda ad aumentare rispetto a quella dei laser. In figura 9.21 si riportano, per diversi valori di tensione, i ΔT rilevati da uno dei laser e da tre punti chiave della fibra ottica: i punti di ingresso e uscita e il massimo (indicati nella parte di destra della figura 9.20). In questo caso, per maggiore chiarezza, è riportata la media mobile dei dati.



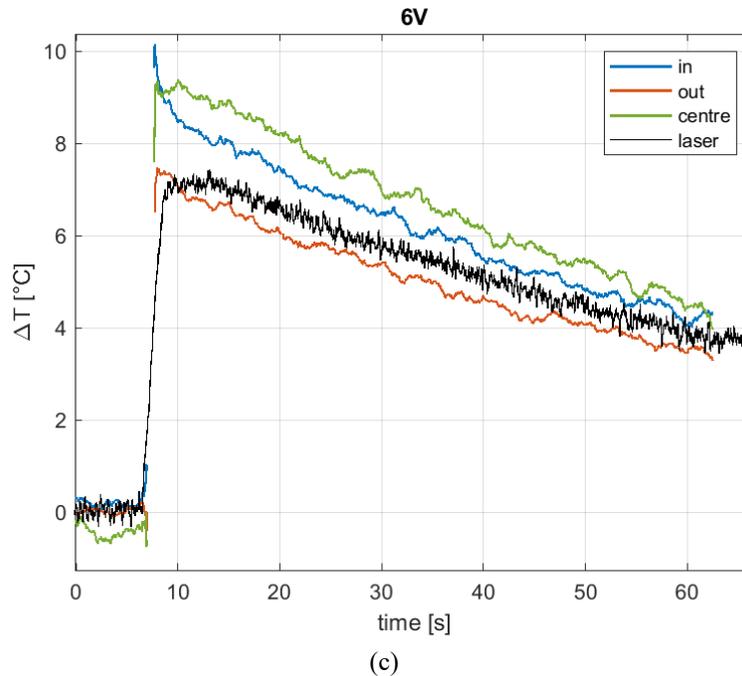


Figura 9.21. ΔT rilevato dal laser (in nero) e da tre punti principali della fibra ottica durante test VHCF a (a) 1,7 V, (b) 5 V, (c) 6 V.

La prima considerazione da fare è che ai voltaggi più bassi la precisione della fibra ottica è piuttosto scarsa, mentre migliora man mano che cresce il ΔT del campione. Inoltre, per basse tensioni la curva del laser e quelle della fibra ottica sono tutte molto vicine tra loro. Incrementando tale parametro invece la curva relativa al punto centrale della fibra si discosta sempre di più da quelle degli estremi, che invece rimangono più in accordo con la misura del laser. Questo effetto indica che è presente una piccola differenza tra la temperatura che si sviluppa all'interno del provino e quella superficiale, letta dai laser. Tale differenza è tanto più marcata quanto più aumenta l'entità dello spostamento indotto dalle onde ultrasoniche. A 6 V ad esempio, tra l'esterno e l'interno del provino è presente una differenza di temperatura di circa 2°C . Questo valore è comunque piuttosto basso, segno che quando si esegue questo tipo di prove su materiali compositi è sufficiente affidarsi alla lettura dei laser esterni, in quanto la differenza di temperatura rispetto all'interno del materiale è contenuta. Controllando la temperatura si può escludere un deterioramento della matrice per via del riscaldamento interno.

Al di sopra della tensione di 6 V non si è potuto lavorare a causa del fatto che la vibrazione indotta nella porzione di fibra ottica uscente dal provino ne ha provocato più volte la rottura, fino a rendere impraticabile una riparazione.

10. Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono stati presi in considerazione e analizzati nel dettaglio diversi aspetti della tecnologia di rilevamento distribuito della deformazione mediante fibre ottiche. In particolare, si è riusciti a venire a capo di tutte le criticità insorte nelle fasi di fabbricazione dei provini, produzione dei sensori e applicazione della tecnologia di misura, determinandone le cause e ricercando possibili soluzioni.

In primo luogo, si può affermare di aver messo a punto una tecnica valida per la realizzazione di provini con fibre ottiche interne, dalla fase di produzione vera e propria alle lavorazioni di taglio post-cura, che permette di salvaguardare le fibre ottiche senza influire sulle proprietà meccaniche del materiale. La fabbricazione di sensori autoprodotti in fibra ottica è risultata nel complesso efficace, con i giusti accorgimenti infatti essi possono sostituire agevolmente i sensori ufficiali Luna, decisamente più costosi.

Molto importanti nella scelta dei materiali sono la terminazione, per la quale in termini di costi e qualità conviene utilizzare uno spezzone di fibra coreless, e la fibra ottica vera e propria, da scegliere tra quelle standard per telecomunicazioni per contenere i costi. Si è osservato che l'elasticità del rivestimento gioca un ruolo fondamentale nella fase di trasferimento del carico dal substrato al core della fibra: se esso presenta un modulo di Young molto basso, come nel caso dell'acrilato, tende ad assorbire parte della deformazione, falsando la misura ottenuta. Queste fibre tuttavia sono anche quelle più flessibili e che quindi presentano un minor rischio di frattura. Le fibre più rigide invece (come quelle rivestite in poliimmide) garantiscono una precisione di lettura delle deformazioni maggiore, ma allo stesso tempo la loro fragilità richiede molti più accorgimenti in fase di manipolazione e inglobamento nelle strutture. Un altro fattore da tenere in considerazione nella scelta delle fibre ottiche è il diametro esterno, che dev'essere quanto più piccolo possibile per non creare discontinuità rilevanti all'interno dei materiali. Anche in questo caso, dimensioni più piccole comportano una maggior fragilità della fibra.

Le considerazioni effettuate sono valide sia per rilevamenti di tipo meccanico che di tipo termico. A livello meccanico, questi accorgimenti hanno permesso di ottenere una buona precisione di misura. Ciò è stato verificato grazie al confronto con misure estensimetriche e DIC. A livello termico, è stato dimostrato grazie ai test in forno a temperatura controllata che le fibre ottiche rappresentano un mezzo adatto al rilevamento della dilatazione termica (o della variazione di temperatura) interna al campione, specialmente in presenza di gradienti termici significativi. Ciò ha permesso di sfruttarle con successo per monitorare la temperatura interna di un composito durante prove VHCF. Molto interessante sarà riuscire in futuro a identificare e distinguere questi due contributi, meccanico e termico, in uno stato di sollecitazione in cui sono entrambi presenti, come potrebbero essere test VHCF con tensione media non nulla.

La disposizione delle fibre adottata, in direzione longitudinale rispetto alla direzione di carico, sicuramente minimizza la possibilità di generare zone ad alta concentrazione di tensione o delaminazioni, ma per completare lo studio uno dei prossimi passi riguarderà l'effetto che possono avere fibre con diverse orientazioni sulla resistenza del composito. Un altro studio che si può collegare a questo lavoro riguarda l'analisi del sistema fibra-provino in presenza di sollecitazioni diverse dalla trazione pura. Inoltre, va approfondito il comportamento della fibra ottica anche in condizioni di stress maggiori, che provocano

plasticizzazione nel materiale. Tutte queste considerazioni inoltre dovrebbero essere confermate utilizzando materiali o architetture diverse da quella presentata.

In conclusione, le fibre ottiche rappresentano uno strumento potenzialmente molto efficace in ottica di SHM, grazie al fatto che non presentano alcune limitazioni dei sensori convenzionali ad oggi più diffusi. La possibilità di effettuare rilevamenti distribuiti, di essere inglobate all'interno delle strutture o l'inerzia ad attacchi chimici e interferenze elettromagnetiche sono senza dubbio vantaggi notevoli, e combinati al costo relativamente limitato dei materiali sono estremamente attraenti. Al momento, un aspetto su cui c'è ancora da lavorare è la durabilità di questi sensori, in quanto trattandosi comunque di una tecnologia "nuova" gli effetti di degrado a lungo termine non sono ancora pienamente noti.

11. Bibliografia

- [1] D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, *Structural health monitoring*. London (UK), Newport Beach (USA): ISTE Ltd., 2006.
- [2] O. Rufai, N. Chandarana, M. Gautam, P. Potluri, and M. Gresil, “Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre,” *Compos Struct*, vol. 254, Dec. 2020.
- [3] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova, and G. Farrell, “Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 1. MDPI AG, Jan. 15, 2016.
- [4] P. J. Schubel, R. J. Crossley, E. K. G. Boateng, and J. R. Hutchinson, “Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades,” *Renewable Energy*, vol. 51. pp. 113–123, Mar. 2013.
- [5] W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong, and Y. Huang, “Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review,” *Composite Structures*, vol. 256. Elsevier Ltd, Jan. 15, 2021.
- [6] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*. ASM International, 2010.
- [7] C. Badini, *Materiali compositi per l'ingegneria*. Torino, 2013.
- [8] R. P. L. Nijssen, *Composite Materials an introduction*. Inholland University of Applied Sciences, 2015.
- [9] I. Crivelli Visconti, *Materiali compositi. Tecnologie, progettazione, applicazioni*. 2009.
- [10] “CompositesWorld.” <https://www.compositesworld.com/articles/woven-fabrics-the-basics> (accessed Jan. 03, 2023).
- [11] P. Duchene, S. Chaki, A. Ayadi, and P. Krawczak, “A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites,” *Journal of Materials Science*, vol. 53, no. 11. Springer New York LLC, pp. 7915–7938, Jun. 01, 2018.
- [12] C. Barile, C. Casavola, and G. Pappaletta, “Digital image correlation comparison of damaged and undamaged aeronautical CFRPs during compression tests,” *Materials*, vol. 12, no. 2, Jan. 2019.

- [13] J. H. L. Grave, M. L. Håheim, and A. T. Echtermeyer, “Measuring changing strain fields in composites with Distributed Fiber-Optic Sensing using the optical backscatter reflectometer,” *Compos B Eng*, vol. 74, pp. 138–146, Jun. 2015.
- [14] F. E. Oz, M. Mehdikhani, N. Ersoy, and S. v. Lomov, “In-situ imaging of inter- and intralaminar damage in open-hole tension tests of carbon fibre-reinforced composites,” *Compos Struct*, vol. 244, Jul. 2020.
- [15] “dewesoft.” <https://dewesoft.com/daq/measure-strain-and-pressure> (accessed Nov. 30, 2022).
- [16] K. Flanagan, V. Kochergin, D. M. Peairs, and L. Sterner, “Fiber Optic Monitoring of Structural Composites using Optical Backscatter Reflectometry,” 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266456069>
- [17] M. D. Todd, J. M. Nichols, S. T. Trickey, M. Seaver, C. J. Nichols, and L. N. Virgin, “Bragg grating-based fibre optic sensors in structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851. Royal Society, pp. 317–343, Feb. 15, 2007.
- [18] D. Janner, “dispense del corso Ceramici Avanzati.” Politecnico di Torino, 2020.
- [19] W. D. Callister and C. Caneva, *Scienza e ingegneria dei materiali. Una introduzione*. 1999.
- [20] D. Manfredi, “dispense del corso Scienza e tecnologia dei materiali ceramici.” Politecnico di Torino, 2021.
- [21] M. Salvo, “dispense del corso Ceramici Avanzati.” Politecnico di Torino, 2020.
- [22] G. F. Fernando, “Fibre optic sensor systems for monitoring composite structures,” *REINFORCED plastics*, 2005.
- [23] K. Fidanboyly and H. S. Efendioğlu, “Fiber optic sensors and their applications,” Karabuk, Turkey, May 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267419252>
- [24] J. T. Tsai, J. S. Dustin, and J. A. Mansson, “Cure strain monitoring in composite laminates with distributed optical sensor,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 125, Oct. 2019.
- [25] “BlackBox.” <https://www.blackbox.it/it-it/page/28537/Informazioni/Risorse-Tecnologiche/Spiegazioni-BlackBox/fibre-optic-cable/Confronto-tra-cavo-in-fibra-ottica-multimodale-e-monomodale> (accessed Jan. 06, 2023).
- [26] D. Pugliese, “dispense del corso Scienza e tecnologia dei materiali funzionali.” Politecnico di Torino, 2021.

- [27] B. Gholamzadeh, "Fiber Optic Sensors," *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:2, No:6*, 2008.
- [28] G. Luyckx, E. Voet, N. Lammens, and J. Degrieck, "Strain measurements of composite laminates with embedded fibre bragg gratings: Criticism and opportunities for research," *Sensors*, vol. 11, no. 1. pp. 384–408, Jan. 2011.
- [29] "hbm." <https://www.hbm.com/it/4596/cose-la-fibra-a-griglia-di-bragg/> (accessed Jan. 06, 2023).
- [30] A. Barrias, J. R. Casas, and S. Villalba, "Embedded distributed optical fiber sensors in reinforced concrete structures - A case study," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 4, Apr. 2018.
- [31] D. M. Sánchez, M. Gresil, and C. Soutis, "Distributed internal strain measurement during composite manufacturing using optical fibre sensors," *Compos Sci Technol*, vol. 120, pp. 49–57, Dec. 2015.
- [32] E. Li, "Rayleigh scattering based distributed optical fiber sensing," Oct. 2017, p. 97.
- [33] G. F. Fernando and B. Degamber, "Process monitoring of fibre reinforced composites using optical fibre sensors," *International Materials Reviews*, vol. 51, no. 2. pp. 65–106, Apr. 2006.
- [34] T. Seong Jang, J. J. Lee, D. Chun Lee, and J. Huh, "The mechanical behavior of optical fiber sensor embedded within the composite laminate."
- [35] G. Souza and J. R. Tarpani, "Distributed Fiber Optics Sensing Applied to Laminated Composites: Embedding Process, Strain Field Monitoring with OBR and Fracture Mechanisms," *J Nondestr Eval*, vol. 39, no. 4, Dec. 2020.
- [36] Y. P. Michel, M. Lucci, M. Casalboni, P. Steglich, and S. Schrader, "Mechanical characterisation of the four most used coating materials for optical fibres," in *PHOTOPTICS 2015 - 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, Proceedings*, 2015, vol. 1, pp. 96–102.
- [37] Y. Padilla Michel, M. Zoheidi, M. M. Roth, R. Haynes, and J.-C. Olaya, "Applied stress on coated multimode optical fibres: a different point of view to bending losses," in *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II*, Sep. 2012, vol. 8450, p. 84503F.
- [38] M. Weisbrich, K. Holschemacher, and T. Bier, "Comparison of different fiber coatings for distributed strain measurement in cementitious matrices," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 189–197, Jul. 2020.

- [39] M. Weisbrich and K. Holschemacher, “Comparison between Different Fiber Coatings and Adhesives on Steel Surfaces for Distributed Optical Strain Measurements based on 2 Rayleigh Backscattering in Concrete Structures,” 2018.
- [40] “fbgs.” <https://fbgs.com/technology/ormocer-coating/> (accessed Jan. 06, 2023).
- [41] “ISC Fraunhofer.” <https://www.isc.fraunhofer.de/en.html> (accessed Jan. 06, 2023).
- [42] H. Wang, L. Jiang, and P. Xiang, “Improving the durability of the optical fiber sensor based on strain transfer analysis,” *Optical Fiber Technology*, vol. 42, pp. 97–104, May 2018.
- [43] J. Yang, P. Hou, C. Yang, and N. Yang, “Study of a long-gauge fbg strain sensor with enhanced sensitivity and its application in structural monitoring,” *Sensors*, vol. 21, no. 10, May 2021.
- [44] D. Kinet, P. Mégret, K. W. Goossen, L. Qiu, D. Heider, and C. Caucheteur, “Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 4. MDPI AG, pp. 7394–7419, Apr. 23, 2014.
- [45] L. Qiu, “Free-space input and output coupling to an embedded fiber optic strain sensor: dual-ended interrogation via transmission,” *Optical Engineering*, vol. 50, no. 9, p. 094403, Sep. 2011.
- [46] P. Zhu, X. Xie, X. Sun, and M. A. Soto, “Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites,” *Compos B Eng*, vol. 168, pp. 267–273, Jul. 2019.
- [47] B. G. Gorshkov and M. A. Taranov, “Simultaneous optical fibre strain and temperature measurements in a hybrid distributed sensor based on Rayleigh and Raman scattering,” *Quantum Elec (Woodbury)*, vol. 48, no. 2, pp. 184–187, Feb. 2018.
- [48] “Luna Innovations.” <https://lunainc.com/> (accessed Jan. 06, 2023).
- [49] “Easy Composites.” <https://www.easycomposites.eu/> (accessed Mar. 03, 2023).
- [50] “Wazer Products.” <https://wazer.com/product/> (accessed Jan. 05, 2023).
- [51] Luna INC, “ODiSI 6000 Series Optical Distributed Sensor Interrogators DataSheet.” Accessed: Jan. 10, 2023. [Online]. Available: <https://lunainc.com/>
- [52] “Thorlabs Coreless Termination Fiber.” https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7948 (accessed Feb. 06, 2023).

- [53] Luna INC, “ODiSi 6 User’s Guide.” Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://lunainc.com/>

- [54] “Zwick Roell.” <https://www.zwickroell.com/> (accessed Dec. 11, 2022).

- [55] “Data sheet Instron 8801.” <https://www.instron.cn/-/media/literature-library/products/2013/10/8801-fatigue-testing-system.pdf> (accessed Dec. 11, 2022).