

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE

in INGEGNERIA AEROSPAZIALE Classe LM-20

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In Strutture e Materiali Aerospaziali LM

Applicazione di reticoli di Bragg per il monitoraggio della deformazione di strutture in materiali compositi prodotti tramite la tecnologia in autoclave

CANDIDATO

Amina Frozzi

RELATORE

Prof. Enrico Troiani

CORRELATORI

Prof.ssa Raffaella Di Sante

Prof. Lorenzo Donati

Anno Accademico 2011/2012

Sessione III

*"Work smarter
not just harder"*

Indice

1	Introduzione	11
2	FBG e sistemi di monitoraggio tramite fibre ottiche	15
2.1	Le fibre ottiche	15
2.2	Reticoli di Bragg in fibra	16
2.3	Tipologie di coating	17
2.4	Principi base degli FBG	19
2.5	Sistemi di giuntura e di interrogazione OTDR	25
2.5.1	Giunzioni tra fibre	25
2.5.2	Sistema di interrogazione OTDR	26
2.6	Problematiche legate alle fibre ottiche	28
2.7	Alernative a sistemi di fibre ottiche	29
2.7.1	Gli estensimetri utilizzati	31
3	I materiali compositi e le tecnologie di produzione	35
3.1	Caratteristiche generali dei materiali compositi	36
3.2	Materiali compositi utilizzati in questa attività	36
3.2.1	Fibre di carbonio	37
3.2.2	Compositi a matrice polimerica	38
3.2.3	Resine Epossidiche	39
3.3	I materiali compositi utilizzati	40
3.4	Polimerizzazione dei compositi in autoclave	41
3.4.1	Materiali base	42
3.4.2	Autoclave	50
3.4.3	Stampi per autoclave	53
3.4.4	Ciclo di curing in autoclave	54
3.4.5	Caratteristiche delle tecnologie basate su autoclave	59
3.5	Curing in autoclave nei laboratori MasterLab	60
3.6	La collaborazione con Riba Composites, presentazione aziendale	61

3.6.1	Settore automobilistico e motociclistico da competizione	62
3.6.2	Settore navale	63
3.6.3	Settore aeronautico, militare e spazio	63
4	L'uso delle fibre ottiche nei componenti in materiale composito	65
4.1	FBG nei materiali compositi	66
4.1.1	Misure di deformazione con FBG integrati	66
4.1.2	Risposta del Sensore FBG	67
4.1.3	Trasferimento della deformazione tra il sensore a Fibra Ottica e il materiale ospitante	75
4.1.4	Applicazioni di sensing di deformazione uni-assiale	75
4.2	Riassunto dei precedenti studi eseguiti sul progetto	78
4.3	Applicazione di altre tipologie di fibre	82
4.3.1	Accorgimenti da considerare durante la laminazione	83
4.3.2	Laminazione dei provini	90
4.3.3	Considerazioni sulla laminazione e la lettura mediante OTDR	97
4.4	Prove sperimentali su provini unificati	99
4.4.1	Prove a trazione	100
4.4.2	Prove a flessione	116
4.5	Estensione a simulacri a livello industriale	123
4.5.1	Primo spezzone	123
4.5.2	Secondo spezzone	126
4.5.3	Provini per testare l'infiltrazione della resina	130
4.5.4	Realizzazione del simulacro	131
4.6	Prove sperimentali di flessione sul simulacro	139
4.6.1	Risultati delle prove di flessione	142
4.6.2	Considerazioni sulle prove di flessione	145
5	Conclusioni	149

Elenco delle figure

1	Generica fibra ottica per rete dati	15
2	Metodologie per ridurre la sensibilità alla flessione: riduzione del diametro del mode field diameter (MFD) (a), riduzione del rivestimento (b), aggiunta di un piccolo canale (c) e l'aggiunta di un anello di fori simmetrici (d)	19
3	Struttura di un FBG, con profilo di indice di rifrazione e risposta spettrale	20
4	Schema degli angoli di incidenza e riflessione	21
5	Angolo di accettazione e di incidenza	22
6	Sistema di coordinate usato per una fibra ottica	24
7	Calibrazione della temperatura (da -22°C a $+135^{\circ}\text{C}$) di un FBG inserito in una fibra ottica dopata al Germanio	25
8	Sesto Sensor	26
9	Datasheet degli estensimetri utilizzati	31
10	Applicazione di un estensimetro (a) e sistema di acquisizione (b)	34
11	Schema del tessuto intrecciato tipo twill	38
12	Curva di viscosità della resina MTM 57	40
13	Formatura di un pannello piano	48
14	Struttura a sandwich	48
15	Chiusura con guarnizione di gomma a sezione circolare	49
16	Chiusura con guarnizione di gomma a incastro	49
17	Schema della struttura base di un'autoclave	50
18	Diagramma sperimentale della viscosità in funzione del tempo e della temperatura (resina epossidica e fibre di carbonio)	55
19	Autoclave dei laboratori MasterLab	60
20	Logo dell'azienda Riba Composites	61
21	Esempi di bompreso	66

22	Diagramma di flusso dei diversi passi necessari per il monitoraggio dello stato strutturale impiegando un sensore a fibra ottica integrata	67
23	(a) Strumento di calibrazione che sfrutta un leveraggio per caricare un FBG e la fibra di supporto. (b) Strumento di calibrazione che sfrutta una pressa di carico per caricare simultaneamente due FBGs	69
24	Spettri di riflessione di un sensore FBG, che è stato inserito in un laminato , misurati durante il ciclo di curing. (a) Durante il processo di riscaldamento e (in basso) durante il processo di raffreddamento, (b) per un sensore non rivestito, (c) per un sensore rivestito.	71
25	Spettro di un FBG non rivestito inserito (a) in un laminato unidirezionale, (b) in un laminato cross-ply, (c) in un laminato cross-ply woven fabric.	72
26	Misure spettrali di un FBG integrato prima e dopo la cura, usando un laser regolabile con controllo della polarizzazione. I due picchi a destra rappresentano i due maggiori assi di polarizzazione	74
27	FBG inserito in un laminato unidirezionale (a), in un laminato cross-ply (b), in un laminato cross-ply woven fabric (c).	77
28	Provini con fibra ricoperta in acrilato	81
29	Risultati ottenuti per provini con fibra ricoperta in acrilato per il provino 1 (a) e il provino 2 (b)	82
30	Dimensioni dei provini secondo la Normativa ASTM 3039	84
31	Schema della disposizione delle fibre all'interno dei provini	86
32	Guaine protettive Sterling utilizzate all'interfaccia	88
33	Particolare dell'interfaccia di uscita della fibra dal provino: sterling (a) e distaccante (b)	89

34	Andamento di temperatura e pressione in un ciclo a 120° in autoclave	90
35	Provino “120”	91
36	Andamento di temperatura e pressione in un ciclo a 95° in autoclave	92
37	Provino “A” dopo il ciclo di cura in autoclave	93
38	Spettro di riflessione dell’ FBG nel provino A	94
39	Provino “B” dopo la cura in autoclave	95
40	Spettro di riflessione dell’ FBG nel provino C2	96
41	Particolare dell’effetto della resina in eccesso sulla fibra	98
42	Provini su cui sono stati installati gli estensimetri	101
43	Interrogatore Micron Optics	102
44	Valutazione del Gauge Factor - provini kapton	106
45	Valutazione del Gauge Factor - provini acrilato	107
46	Confronto delle letture tra FBG ed SG - provini kapton	108
47	Confronto delle letture tra FBG ed SG - provini acrilato	109
48	Valutazione del modulo di elasticità globale - provini kapton	111
49	Valutazione del modulo di elasticità globale - provini acrilato	112
50	Errore percentuale delle misure effettuate	113
51	Posizionamento di provino per la prova a flessione	116
52	Confronto delle letture tra FBG ed SG nel caso di provini con fibre in mezzeria (a) e fibre in superficie (b)	118
53	Confronto delle misure dei 5 provini	119
54	Schema della trave di De St Venant	120
55	Andamento del momento flettente a tre punti in una trave	122
56	Cicli di cura primo e secondo albero	124
57	Datasheet delle fibre utilizzate, bend insensitive (a) e Alcatel (b)	124
58	Fibre rinforzate con sterling e pvc (a) e sacchetti di distaccante per le fibre (b)	125

59	Primo spezzone di albero: Preparazione alla cura in autoclave (a) dopo la cura e risultati delle etturre delle fibre (a)	125
60	Guaina per la protezione delle fibre (a) e posa delle fibre (b) .	127
61	Disposizione delle fibre nella sezione (a) e spezzone dopo la cura (b)	128
62	Dispersione (sinistra) e riflettanza (destra) nella fibra SMF28 incorporato nella sezione dello spezzone.	129
63	Dispersione (sinistra) e riflettanza (destra) nella fibra bend insensitive incorporata nello spezzone.	129
64	Blocco dell'infiltrazione della resina guaina restringente (a), guaina e resina (b) e provino dopo il ciclo di cura(c)	131
65	Schema della sezione del bompreso	132
66	Le due metà dello stampo aperto e i sacchetti per il conteni- mento delle fibre	132
67	Datasheet delle fibre	133
68	Estremità interna del bompreso	134
69	Sacchetti di contenimento delle fibre	135
70	Schema della disposizione di FBG ed SG	135
71	Spettri di riflessione delle fibre utilizzate	136
72	Giunzioni tra le fibre C-D (a), D-A e C-B (b)	137
73	Macchina per le prove a flessione (a) e particolare (b)	138
74	Schermata del sistema di acquisizione contemporanea dei dati FBG ed SG durante prove a flessione	139
75	Lecture estensimetri e FBG delle prove di trazione: caso A (a) e caso C (b)	143
76	Lecture estensimetri e FBG delle prove di trazione e dati ana- litici: caso A (a) e caso C (b)	145

Elenco delle tabelle

1	Caratteristiche delle fibre utilizzate nei provini in acrilato	81
2	Caratteristiche principali delle fibre nei provini	85
3	Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino 120	91
4	Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino A	93
5	Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino C2	96
6	Lunghezza d'onda delle fibre	133
7	Dati relativi al bompresso	142
8	Principali risultati ottenuti analiticamente	144

1 Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni i materiali compositi hanno acquisito una rilevanza sempre maggiore in diversi settori industriali, come quelli aerospaziale e nautico; le caratteristiche che li contraddistinguono, come l'elevato rapporto tra resistenza e densità e la possibilità di produrre manufatti con proprietà meccaniche elevate limitatamente alle direzioni desiderate, offrono numerosi vantaggi, che ne hanno permesso un'ampia diffusione.

L'utilizzo di questo tipo di materiali sta diventando sempre più importante nel campo delle costruzioni di alto livello di prodotti che devono essere leggeri, ma allo stesso tempo robusti, per diverse applicazioni.

Nonostante la crescente diffusione dei materiali compositi strutturali, si deve considerare che il loro comportamento meccanico è decisamente diverso rispetto ai materiali isotropi convenzionali da costruzione. I feedback provenienti da carichi, deformazioni e temperature registrate di strutture esistenti in condizioni reali, possono portare informazioni di grande valore per i criteri di progettazione. In particolare, il monitoraggio della deformazione di una struttura in servizio può migliorare molto la conoscenza e l'affidabilità nel comportamento a lungo termine di strutture composite ad alte prestazioni, pertanto, queste tecniche hanno avuto particolare rilievo a livello mondiale.

Un importante campo di ricerca riguarda l'applicazione di sensori a fibra ottica, caratterizzati da una serie di vantaggi ben noti quali l'insensibilità alle interferenze elettromagnetiche, le piccole dimensioni, i pesi ridotti e resistenza alla corrosione. La compatibilità di questi sensori con il processo di produzione di materiali compositi a matrice polimerica e fibre continue, può essere vista come un ulteriore vantaggio. All'interno del gruppo dei sensori a fibra ottica integrata, i reticoli a fibra di Bragg (FBG) sono i più diffusi per la misurazione delle deformazioni interne di diversi tipi di strutture composite.

Nel corso dell'attività di ricerca qui presentata, svolta presso i locali hangar dell'Università di Bologna nella sede di Forlì, è stato possibile sperimentare e valutare analiticamente il comportamento di questa tecnologia.

Il lavoro è stato possibile grazie anche alla collaborazione con l'azienda Ribba Composites, marchio del Gruppo Bucci presente sui mercati mondiali e leader nella progettazione, prototipazione e produzione di parti strutturali e componentistica in materiali compositi avanzati ed in particolare delle fibre di carbonio. L'azienda si è mostrata interessata alle potenzialità di questa innovativa tecnologia per monitorare componenti della propria produzione.

Gli obiettivi della tesi sono quelli di studiare le problematiche di inclusione delle fibre ottiche nei materiali compositi e le loro prestazioni nei confronti delle misure di deformazione, a partire da provini semplici misurati in condizioni di riferimento. Il problema è stato affrontato in particolare nel caso di materiali compositi avanzati utilizzati in ambito nautico, ma molti risultati sono eventualmente estendibili ad altri campi di utilizzo dei materiali compositi. L'attività si è concentrata sui problemi relativi all'inserimento di questa fibra ottica all'interno del composito e alla relativa possibilità di ottenere una misura da test a trazione e flessione, tale da non venire inficiata durante il ciclo di polimerizzazione, sia per componenti contenenti fibre con coating in acrilato sia per quelli con fibre ricoperte di poliammide (kapton).

Successivamente si è voluto testare la capacità di un array di sensori in fibra ottica di misurare correttamente i valori di deformazione in un componente strutturale in composito utilizzato in ambito nautico, come il bompresso, in condizioni di riferimento e in particolare di studiarne le prestazioni nel caso di sollecitazioni di flessione, quali quelle attese in condizioni operative.

Nel linguaggio nautico il bompresso è un componente che si può trovare montato a prua e che nelle imbarcazioni di fattura più moderna, in particolare barche da regata, viene armato per le diverse andature, ovvero su di esso sono installate le diverse attrezzature necessarie alla navigazione. La possibilità di produrre questo componente in materiale composito assicura una diminuzione del peso e un aumento della resistenza del materiale nel tempo e nelle condizioni più varie.

Durante la trattazione di questo elaborato vengono inizialmente illustrati

i principi alla base della tecnologia FBG e i sistemi di integrazione e di lettura delle fibre di Bragg e in seguito, i materiali compositi e le tecniche di produzione che hanno interessato l'attività di ricerca.

Successivamente vengono descritte le attività di ricerca che sono state svolte, cioè prove sperimentali di laboratorio necessarie per la ricerca sviluppata mediante provini unificati e simulacri.

2 FBG e sistemi di monitoraggio tramite fibre ottiche

2.1 Le fibre ottiche

Una volta portato a dimensioni micrometriche il vetro perde la sua caratteristica di fragilità e diventa un filo flessibile e robusto. Una fibra ottica si presenta proprio come un sottilissimo filo di materiale trasparente. In genere è realizzata in vetro o silicio fuso, e purché il materiale sia un dielettrico trasparente alla luce, può essere realizzata anche in plastica. Il suo utilizzo è quello di trasportare energia luminosa in modo guidato. Le fibre ottiche vengono realizzate attraverso strutture cilindriche concentriche aventi indice di rifrazione differente, la parte centrale viene detta *core* e la parte che lo avvolge è il *cladding*. Le metodologie per produrre fibre ottiche sono la filatura diretta della fibra o da una preforma, che è quello maggiormente utilizzato.

In Figura 1 è rappresentata la struttura di una fibra ottica con doppio rivestimento. Questo doppio rivestimento (soffice quello più interno e duro quello più esterno) è necessario per evitare fenomeni di microflessione e proteggere la fibra contro l'urto sia durante il processo di fabbricazione che nell'installazione.

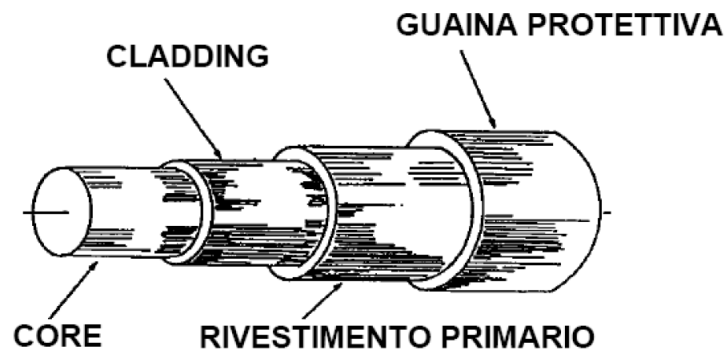


Figura 1: Generica fibra ottica per rete dati

2.2 Reticoli di Bragg in fibra

Un reticolo di Bragg in fibra (FBG) è un tipo di riflettore di Bragg distribuita costruito in un breve segmento di fibra ottica che riflette particolari lunghezze d'onda di luce e trasmette tutte le altre. Questo si ottiene creando una variazione periodica dell'indice di rifrazione del nucleo della fibra, che genera uno specchio d'onda dielettrica specifica. Un reticolo di Bragg in fibra può quindi essere utilizzato come un filtro in linea ottica per bloccare determinate lunghezze d'onda, o come una lunghezza d'onda specifica riflettore.

Il primo FBG è stato sviluppato da Ken Hill nel 1978. Inizialmente, le griglie sono state realizzate utilizzando un laser visibile che si propaga lungo il nucleo della fibra. Nel 1989, Gerald Meltz e colleghi hanno dimostrato il più flessibile tecnica trasversale iscrizione olografica dove l'illuminazione laser proveniva dal lato della fibra. Questa tecnica utilizza il modello di interferenza della luce laser ultravioletta per creare la struttura periodica del reticolo della fibra Bragg.

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

Vengono utilizzati principalmente questi processi:

- interferenze: è stato il primo metodo ampiamente utilizzato per la realizzazione di reticoli di Bragg in fibra e utilizza due fasci di interferenza. Qui il laser UV viene suddiviso in due fasci che interferiscono con l'altro creando una distribuzione periodica di intensità lungo il modello. L'indice di rifrazione della fibra fotosensibile varia secondo l'intensità della luce a cui è esposta. Questo metodo consente variazioni rapide e facili della lunghezza d'onda di Bragg, che è direttamente collegata al periodo di interferenza ed una funzione dell'angolo di incidenza della luce laser.
- mascheramento: una fotomaschera con le caratteristiche del reticolo

che si vuole ottenere viene posta tra la sorgente di luce UV e la fibra fotosensibile. L'ombra della fotomaschera determina quindi la struttura del reticolo sulla base dell'intensità della luce trasmessa che colpisce la fibra.

- point-by-point: il laser è un fascio uguale al periodo del reticolo. Questo metodo è specificamente applicabile alla fabbricazione di reticoli di fibre con lungo periodo. Questo metodo viene anche utilizzato nella fabbricazione di reticoli inclinati.

Il metodo da impiegare dipende dal tipo di reticolo da fabbricare. Normalmente nella fabbricazione di reticoli di Bragg in fibra viene usata una fibra in silice dopata con germanio, in modo che sia fotosensibile, il che significa che l'indice di rifrazione del nucleo cambia in base con l'esposizione alla luce UV. La variazione dipende dall'intensità e dalla durata dell'esposizione e dalla fotosensibilità della fibra. Per scrivere un reticolo di fibre di Bragg ad alta riflettività direttamente nella fibra il livello di drogaggio con germanio deve essere alto. Tuttavia, possono essere utilizzate fibre standard se la fotosensibilità è aumentata mediante il pre-ammollo della fibra in idrogeno. Più recentemente, reticoli di Bragg sono stati scritti in fibre polimeriche. [9]

2.3 Tipologie di coating

I rivestimenti sono applicati direttamente agli strati di protezione per la fibra di vetro durante il processo di estrazione. Tamponi e elementi di rinforzo di cablaggio sono aggiunti in seguito. Un materiale di ricoprimento particolare può essere utile adifferenti funzioni, a seconda delle sue proprietà meccaniche e a come viene applicato sulla fibra; ad esempio, un rivestimento può essere usato come strato separatore o come materiale di cablaggio. Le applicazioni per cui viene prodotto e le caratteristiche richieste del materiale determinano la funzione per cui esso può essere applicato.

Un rivestimento o una combinazione che funziona perfettamente per una applicazione non può essere appropriata per un altro ambiente. Certe applicazioni richiedono una accurata scelta dei materiali per offrire resistenza all'abrasione, prodotti chimici, vapore acqueo, ingresso di idrogeno e per garantire prestazioni ottiche della fibra per tutta la durata necessaria.

Durante lo svolgimento dell'attività di ricerca successivamente descritta, sono state utilizzate fibre con i seguenti tipi di coating:

- acrilato: le fibre di telecomunicazioni standard hanno generalmente un doppio rivestimento in uretano acrilato. Lo strato interno è morbido per ammortizzare gli effetti delle flessioni sulla fibra ed è di facile connettorizzare; esternamente lo strato ha modulo di elasticità maggiore per proteggere la fibra dalle abrasioni. Tuttavia per applicazioni a fattore di forma minori si utilizza un solo strato.
- poliammide (nello specifico, kapton): è resistente alle basse e alle alte temperature, all'abrasione e agli agenti chimici. Viene applicato alla fibra in uno strato compatto di circa $15 \mu m$; uno strato di dimensioni ridotte permette un funzionamento migliore in caso di piegatura. [33]

Una delle tipologie di fibre utilizzata è detta *bend insensitive*, per la caratteristica proprietà di resistere bene alle piegature.

Diversi approcci sono stati proposti per ridurre la perdita di curvatura di fibre monomodali. Molti di questi progressi si sono concentrati su alcune modifiche al rivestimento, mediante una guaina riflettente che aiuta a contenere le onde luminose all'interno del nucleo quando la fibra è piegata. Approcci recenti includono la riduzione del diametro del campo (MFD), riduzione del rivestimento, aggiunta di un piccolo canale e l'aggiunta di un anello di fori simmetrici (Figura 2)

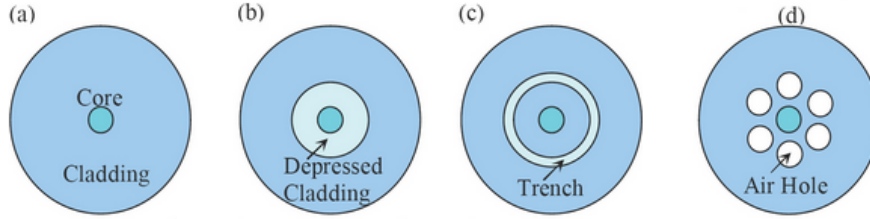


Figure 2: Metodologie per ridurre la sensibilità alla flessione: riduzione del diametro del mode field diameter (MFD) (a), riduzione del rivestimento (b), aggiunta di un piccolo canale (c) e l'aggiunta di un anello di fori simmetrici (d)

Il processo per la produzione di fibre con anello di fori è molto più complicato e costoso. [18]

2.4 Principi base degli FBG

Come è stato detto, un reticolo a fibra di Bragg è una modulazione locale dell'indice di rifrazione nella fibra ottica che può essere creata tramite un'appropriata illuminazione trasversale con luce UV di una fibra ottica foto-sensibile. Sebbene esistano diversi tipi di reticoli (uniforme, chirped, apodized, ecc), gli FBG uniformi saranno l'argomento principale di questo capitolo. Quando una luce con spettro a banda larga è accoppiata con una fibra ottica single mode (SM che trasmettono cioè un singolo raggio di luce per trasportare segnali modulati) e interagisce con i reticoli, solo una piccola parte dello spettro luminoso sarà riflesso all'indietro. Lo spettro riflesso è centrato nella lunghezza d'onda di Bragg (λ_B) e dipende dall'indice di rifrazione effettivo (n_{eff}) e dal periodo di Bragg (Λ) del reticolo secondo la ben nota equazione di Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Inscrivendo diversi FBG con differenti periodi di reticolo nella stessa fibra ottica, si può costruire un array di reticoli. Questo consente all'utilizzatore

di monitorare diversi punti della struttura solo con una linea di sensori. Sia l'indice di rifrazione effettivo sia il periodo di Bragg del reticolo saranno influenzati da ogni deformazione meccanica applicata e dalla temperatura.

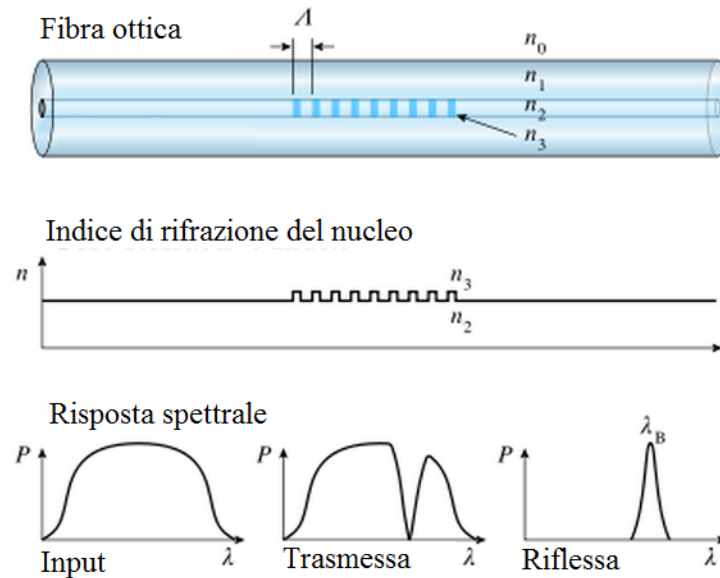


Figura 3: Struttura di un FBG, con profilo di indice di rifrazione e risposta spettrale

2.4.0.1 Meccanismo di propagazione del segnale luminoso La propagazione all'interno delle fibre ottiche avviene per riflessioni successive del segnale luminoso immesso. Un ruolo chiave è giocato dall'Indice di Rifrazione, in genere indicato con n . Il core e il cladding avendo indici di rifrazione diversi riflettono la luce secondo le leggi dell'ottica geometrica (legge di Snell). La velocità della luce varia sensibilmente a seconda del mezzo attraversato. Nel vuoto tale velocità si indica con c e vale $3 \cdot 10^8$ m/s. Nei materiali a maggior densità, la velocità della luce, indicata con v , è inferiore. Si definisce Indice di Rifrazione il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c rispetto a quella nel mezzo v e si indica con $n = c/v$. Nel Core la velocità di propagazione è inversamente proporzionale all'indice di rifrazione. Un raggio di luce

che viaggia in un mezzo 1 con indice di rifrazione n_1 e che entra in un mezzo 2 con indice di rifrazione n_2 diverso da n_1 , si divide in un raggio riflesso nel mezzo 1 e in un raggio rifratto che si propaga nel mezzo 2 secondo la Legge di Snell (o legge dei seni).

$$n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta) \quad (2)$$

Dove α è l'angolo di incidenza del raggio rispetto la normale alla superficie di incidenza e β è l'angolo che il raggio rifratto forma con la stessa normale nel secondo mezzo, come illustrato nella Figura 4.



Figura 4: Schema degli angoli di incidenza e riflessione

L'angolo di rifrazione dipende da quello di incidenza e dagli indici di rifrazione dei due mezzi. Se $n_1 > n_2$ si ha $\beta > \alpha$.

All'aumentare dell'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta. Per angolo limite si intende l'angolo α_c per cui $\beta = 90^\circ$, scompare la rifrazione e tutto il segnale viene riflesso:

$$\alpha_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (3)$$

Valori tipici per le fibre ottiche sono:

- $n_2 = 1.475$

- $n_1 = 1.5$
- $\alpha_c = 79.5^\circ$

Per un corretto funzionamento di deve ottenere un indice di rifrazione del core maggiore di quello del cladding e un angolo di incidenza maggiore di quello critico. n_1 viene scelto leggermente superiore a n_2 affinché la propagazione del segnale ottico avvenga nel nucleo per successive riflessioni sulla superficie di separazione tra nucleo e mantello.

Affinché il generico raggio incida sempre sulla discontinuità tra core e cladding con angolo superiore al valore critico, è necessario che esso venga introdotto ad una estremità ottica entro un certo angolo di accettazione γ_e della fibra (Figura 5) ricavabile utilizzando sempre la legge di Snell:

$$\gamma_e = \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_0^2}} \quad (4)$$

dove n_0 è l'indice di rifrazione del mezzo esterno. Un eventuale raggio iniettato nella fibra al di fuori del cono di accettazione, andrà poi ad incidere sulla separazione core-cladding con angolo inferiore al valor critico e quindi si perderà nel mantello a seguito della rifrazione.

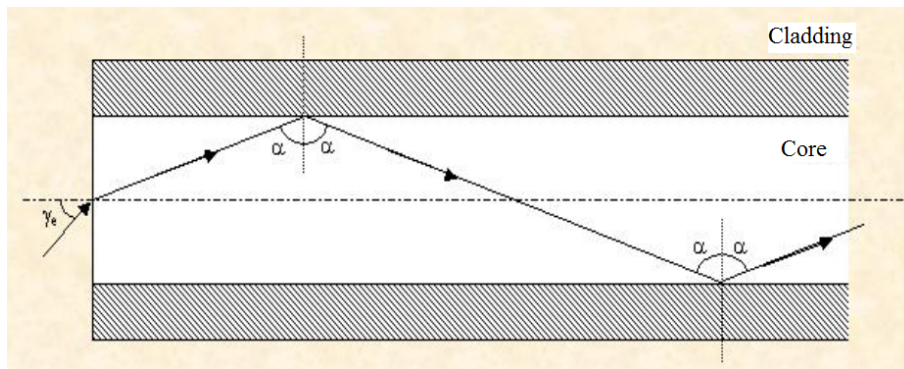


Figura 5: Angolo di accettazione e di incidenza

2.4.0.2 Sensibilità alla deformazione Nella maggior parte dei casi, per FBG inseriti in fibre ottiche single mode convenzionali, l'approssimazione della deformazione centrale può essere usata per determinare la risposta teorica alla deformazione e alla temperatura . In base a questa approssimazione, ogni picco della lunghezza d'onda di Bragg (corrispondente agli assi 1' e 2', Figura 6) dipende dal campo di deformazione totale presente al centro del sensore a fibra ottica. Sotto l'ipotesi di una condizione isoterma ($\Delta T = 0$) le variazioni di lunghezza d'onda per piccole perturbazioni della deformazione possono essere scritte come:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\lambda_{B,1'}}{\lambda_{B,1'}} &= \epsilon_{3'} - \frac{1}{2}n_{eff,1'}[p_{11}\epsilon_{1'} + p_{12}(\epsilon_{2'} + \epsilon_{3'})] \\ \frac{\Delta\lambda_{B,2'}}{\lambda_{B,2'}} &= \epsilon_{3'} - \frac{1}{2}n_{eff,2'}[p_{11}\epsilon_{2'} + p_{12}(\epsilon_{1'} + \epsilon_{3'})]\end{aligned}\quad (5)$$

dove $\epsilon'_1, \epsilon'_2, \epsilon'_3$ sono le componenti di deformazione principale lungo gli assi del sistema di coordinate della fibra (Figura 6).

Viene usato l'apostrofo per evitare confusione con i numeri usati per indicare i diversi reticoli in un array di sensori (es., per la compensazione della temperatura). Le componenti di deformazione ϵ'_4, ϵ'_5 e ϵ'_6 vengono solitamente trascurate per quanto riguarda la risposta del sensore. Inoltre nell'Equazione 5, $\Delta\lambda_B$ è la variazione del picco della lunghezza d'onda di Bragg, λ_B è il picco medio iniziale della lunghezza d'onda di Bragg, p_{11} e p_{12} sono coefficienti strain-optic. È chiaro dall'Equazione 5 che l'allungamento assiale ($\epsilon'_3 > 0, \epsilon'_1 = \epsilon'_2 = -\nu\epsilon'_3$) o la compressione uniforme ($\epsilon'_1 = \epsilon'_2 < 0$) causeranno lo spostamento del picco di riflessione di Bragg verso lunghezze d'onda maggiori o minori, rispettivamente.

2.4.0.3 Sensibilità alla temperatura Ipotizzando una condizione senza deformazione ($\epsilon_i = 0$) la variazione del picco di Bragg per carichi termici relativamente piccoli può essere scritta come:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (6)$$

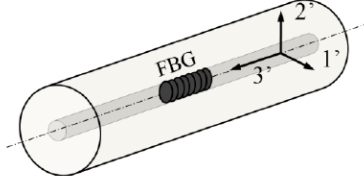


Figura 6: Sistema di coordinate usato per una fibra ottica

L'Equazione 6 rappresenta gli effetti della temperatura sulla lunghezza d'onda di Bragg. Un aumento di temperatura provoca un'espansione termica della fibra con reticolo di Bragg (e quindi un cambiamento del suo periodo di Bragg) e anche una variazione del suo indice di rifrazione. Questa piccola variazione della lunghezza d'onda dovuta ad un piccolo cambiamento di temperatura ΔT può essere scritto come:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_f + \alpha_n)\Delta T = \lambda_B\beta\Delta T \quad (7)$$

dove $\alpha_f = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial T}$ è il coefficiente di espansione termica della fibra ottica (approssimativamente 0.55×10^{-6} 1/K per la silice). La quantità $\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ rappresenta il cosiddetto coefficiente termo-ottico, che dipende dal tipo e dalla concentrazione di dopanti. Sono stati riportati valori compresi tra 3.0×10^{-6} 1/K e 8.6×10^{-6} 1/K per una fibra con nucleo di silice, dopata al germanio. I coefficienti α_f e α_n possono essere raggruppati nel cosiddetto coefficiente di temperatura β . Si noti che il coefficiente di espansione α_f è costante su un intervallo di alte temperature, tuttavia, il coefficiente termo-ottico α_n dipende dalla temperatura ($\alpha_n = \alpha T + b$). Quindi, quando si considerano intervalli di temperature elevate, è necessaria una equazione più accurata. Sostituendo questa dipendenza lineare nell'Equazione 7, questa può essere riscritta come:

$$d\lambda_B = \lambda_B(\alpha_f + (\alpha T + b))dT \quad (8)$$

Un esempio di tipici effetti non lineari nella curva di calibrazione della

temperatura di un FBG inserita in una fibra ottica dopata al Germanio è mostrato in Figura 7. Qui, la variazione di lunghezza d'onda normalizzata $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ è graficata rispetto alla variazione di temperatura ΔT , rispetto alla temperatura di riferimento (es., $T_{ref}=22.5^\circ\text{C}$). Se si usa una regressione lineare invece di una polinomiale (Figura 7), possono essere commessi grandi errori se utilizzata quando si compensano misure di deformazione per fluttuazioni di temperatura, ad esempio in applicazioni della vita reale. Per una variazione di temperatura di 120°C , si introduce un errore di variazione della lunghezza d'onda di circa 60 pm o un errore di deformazione longitudinale di circa $70 \mu\text{m}$.

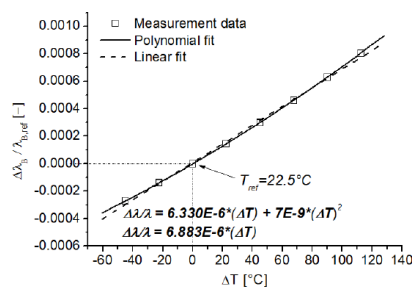


Figura 7: Calibrazione della temperatura (da -22°C a $+135^\circ\text{C}$) di un FBG inserito in una fibra ottica dopata al Germanio

Dovrebbe essere chiaro che ogni variazione della lunghezza d'onda, associata all'azione di un perturbazione esterna sul reticolo, è la somma di termini di deformazione meccanica e temperatura. Pertanto, in applicazioni di sensoristica in cui una sola perturbazione è di interesse, la separazione temperatura e deformazione diventa necessaria. [20]

2.5 Sistemi di giuntura e di interrogazione OTDR

2.5.1 Giunzioni tra fibre

Poiché le fibre ottiche non sono infinitamente lunghe, esse devono necessariamente essere unite. Inoltre nella pratica, risulta sempre più semplice lavorare

con cavi corti, anziché lunghi. I tipi di giunzioni sono:

- la giunzione permanente, splice
- la giunzione non permanente, connessione.

L'unione di due fibre ottiche è un'operazione alquanto delicata poiché nel punto di giunzione le perdite dovranno essere ridotte al minimo. In particolare è più difficile effettuare una connessione che non una splice; la difficoltà di effettuare giunzioni e connessioni implica costi rilevanti, che sono particolarmente alti per le fibre monomodali le quali richiedono precisioni estremamente elevate per via del loro ridotto diametro. Tuttavia, lo sviluppo recente di macchine automatiche ha praticamente risolto il problema. Sono attualmente realizzabili giunti e connettori che assicurano allineamenti con precisione inferiori al μm , soddisfacendo così le stringenti tolleranze per questo tipo di fibra.

2.5.2 Sistema di interrogazione OTDR

I campioni realizzati durante questa attività sono stati portati a Zola Predosa dove si trova la sede della Sesto Sensor (Figura 8) per analizzare mediante riflettometro l'attenuazione del segnale dovuta alla laminazione.

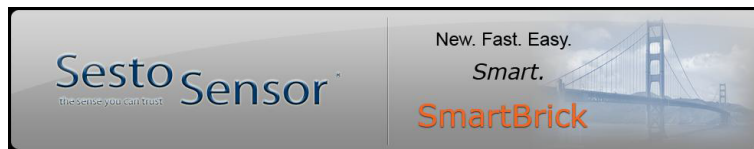


Figura 8: Sesto Sensor

La Sesto Sensor è una delle uniche aziende in Italia che produce e commercializza soluzioni di monitoraggio attraverso l'utilizzo di sensori FBG.

Questo lavoro si basa sull'utilizzo di un riflettometro ottico detto OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) che identifica uno strumento di misura

optoelettronico, usato principalmente nel campo delle telecomunicazioni per l'analisi e la diagnosi dei guasti nelle fibre ottiche.

Dato che l'utilizzo di un macchinario come questo richiede grande competenza, il contributo della Sesto Sensor è stato fondamentale.

Inoltre dotarsi di un OTDR e di tutta la strumentazione necessaria non è facile; per le misure sono infatti essenziali svariati strumenti che non è possibile avere se non si tratta quotidianamente la tecnologia, come dispositivi per creare le giunzioni, connettori di differenti tipi e misure e pinze adatte a svestire le fibre ottiche.

L'analisi mediante OTDR permette di determinare la lunghezza e l'attenuazione complessiva della fibra, valutando la presenza di giunzioni, connessioni e le attenuazioni che esse introducono. È possibile individuare anche interruzioni complete della linea di trasmissione ottica e stimarne la distanza dal punto di analisi.

Come già detto, il Reticolo di Bragg è costituito da una modulazione periodica dell'effettivo indice di rifrazione del nucleo della fibra ottica. La luce nell'intorno della lunghezza d'onda di Bragg λ (caratteristica del reticolo) viene riflessa indietro dal reticolo e pertanto risulta mancante dallo spettro di trasmissione. In assenza di deformazioni meccaniche o termiche, il reticolo fotoinciso riflette un segnale luminoso con lunghezza d'onda caratteristica del reticolo.

La lettura degli spettri è importante per capire se il processo di embedding ha introdotto delle distorsioni degli stessi, per effetto delle tensioni termomeccaniche presenti durante il processo di fabbricazione; nel caso, infatti, di distorsioni importanti, una lettura con un sistema di interrogazione classico come quello a nostra disposizione, basato su algoritmi di "peak picking", potrebbe dare risultati errati in quanto l'informazione proveniente dai reticoli non è mediata spazialmente come nel caso degli estensimetri.

2.6 Problematiche legate alle fibre ottiche

Uno dei problemi principali che riguardano le fibre ottiche è costituito dalle attenuazioni, definite dal rapporto tra la potenza ottica trasmessa e quella ricevuta. L'attenuazione è funzione della lunghezza d'onda, del tipo di fibra e delle eventuali sollecitazioni meccaniche che agiscono sulla fibra e possono essere raggruppate in perdite dovute alla realizzazione tecnologica o all'interconnessione tra fibre.

Le perdite dovute alla realizzazione tecnologica sono un fenomeno di propagazione casuale del raggio luminoso a causa della disomogeneità della struttura che costituisce la fibra, dovute alla presenza di particelle metalliche e di bolle d'aria. Poiché i raggi diffusi presentano angoli diversi da quelli che garantiscono la riflessione totale nella fibra, escono dal core e si disperdono nel cladding. In questo modo vengono causate perdite di energia sia verso il cladding sia verso la sorgente. Tali perdite non si possono eliminare, perché dipendono dal trattamento del materiale subito durante la fase di lavorazione.

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

Le fibre ottiche inoltre sono spesso sottoposte a sollecitazioni di tipo direzionale dovute alle curvature. Queste sollecitazioni però provocano una dispersione del raggio incidente in quanto il corrispondente angolo α supera l'angolo di accettazione e si disperde in parte nel cladding. Nel raggio di raccordo esterno della fibra i raggi di luce dovrebbero essere più veloci di quelli più vicini al centro di curvatura, dato che questo non è possibile, una parte di energia va dispersa nel cladding.

Un'ulteriore problematica è costituita dall'interconnessione tra fibre ottiche che è una fase molto importante e particolarmente delicata per la real-

izzazione di un collegamento. Le cause delle perdite sono dovute soprattutto alle diverse caratteristiche trasmissive delle due fibre ottiche nel punto di connessione.

Altri tipi di perdite si verificano a causa di:

- Dispersione modale: si presenta nelle fibre che trasmettono più modi poiché ogni modo ha una velocità caratteristica.
- Dispersione del materiale: consiste nella dipendenza della velocità di un raggio di lunghezza d'onda dalla composizione della fibra. Se si immette nella fibra un impulso di luce bianca, le componenti cromatiche costituenti, percorrendo la fibra con velocità differenti, arrivano al ricevitore in tempi differenti generando, così, un impulso di uscita allargato e più "basso" rispetto a quello di entrata.
- Dispersione di guida d'onda: è dovuta alle ridotte dimensioni del core che consente il trasporto di una parte della potenza ottica anche nel cladding.

2.7 Alternative a sistemi di fibre ottiche

Come confronto per le misurazioni dei sensori ottici sono stati installati sui componenti degli estensimetri.

L'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche come applicazione di carichi o variazioni di temperatura. Conoscendo a priori le caratteristiche meccanico/fisiche del materiale, misurando le deformazioni si possono facilmente ricavare i carichi a cui il materiale è sottoposto. Inoltre, utilizzando estensimetri di giusta tipologia e applicandoli in modo oculato, possono rilevare la direzione e il verso di queste deformazioni, e di conseguenza dei carichi presenti nel materiale sotto esame. I campi d'applicazione sono molteplici: testing in laboratorio su componenti meccanici o

materiali, analisi statiche e dinamiche di componenti o sistemi meccanici già montati in situ, monitoraggio di componenti o sistemi strutturali, elemento sensore per trasduttori di grandezze meccaniche. Sono stati sviluppati vari tipi di estensimetri, ognuno con caratteristiche peculiari che si adattavano a specifici campi d'applicazione.

L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico e viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni generalmente utilizzando collanti istantanei come il cianoacrilato. Il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa; queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un ponte di Wheatstone o altro sistema tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate. Le dimensioni di un estensimetro possono variare da pochi micron ad alcuni centimetri. Quelli di dimensioni minori sono utilizzati per misure puntuali, cioè per conoscere il valore delle deformazioni in un punto preciso, mentre quelli di maggior lunghezza sono utili per rilevare la deformazione media relativa ad un'area più estesa.

Un estensimetro elettrico è caratterizzato da due grandezze fondamentali: la resistenza del filo che costituisce la griglia sensibile (i valori più diffusi in commercio sono 120, 350 e 600 ohm) e il Gauge factor ovvero il fattore di trasduzione, che esprime la sensibilità dell'estensimetro. L'incremento di resistenza dell'estensimetro viene espressa come rapporto fra la variazione di resistenza e la resistenza totale del filo.

Se L è la lunghezza iniziale del corpo, ΔL la sua variazione, R è la resistenza iniziale del filo e ΔR la sua variazione, allora il gauge factor G_f è pari a:

$$G_f = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (9)$$

Negli estensimetri commerciali il valore del gauge factor si aggira intorno

a 2. [34]

2.7.1 Gli estensimetri utilizzati

Gli estensimetri utilizzati durante l'attività di ricerca forniscono la misurazione della deformazione locale del provino, prestandosi bene ad essere montati su superfici in materiale composito; sono caratterizzati da una resistenza di 350 ohm, sensibilità laterale di $(-0,3 \pm 0,2)\%$ e un Gauge Factor di 2.1, di dimensioni 10X5 mm, forniti dalla HBM.



Figura 9: Datasheet degli estensimetri utilizzati

Per Gauge Factor si intende il fattore di trasduzione, che esprime la sensibilità dell'estensimetro. L'incremento di resistenza dell'estensimetro viene espressa come rapporto fra la variazione di resistenza e la resistenza totale del filo e fornisce la misura della deformazione localmente prodotta nel provino

Gli estensimetri sono stati disposti su un'unica faccia e posizionati lungo l'asse del campione, cercando per quanto possibile di sovrapporli alla fibra.

La scelta delle dimensioni dell'estensimetro da utilizzare varia in base al tipo di materiale utilizzato: per quanto riguarda un materiale composito

unidirezionale come quello qui impiegato, quindi fortemente anisotropo, l'estensimetro misura la deformazione come media delle deformazioni nell'area di risoluzione spaziale nel senso della direzione delle fibre della superficie. Se l'estensimetro è troppo piccolo caratterizza eccessivamente il tessuto; bisogna però tener presente che all'aumentare delle dimensioni dell'estensimetro, aumentano i costi ad esso legato, quindi la necessità di non utilizzare estensimetri troppo grandi è economica.

I dati rilevati mediante l'utilizzo di estensimetri, sono influenzati da:

- Gauge Factor (K_{GF})
- sensibilità trasversale
- variazione della temperatura

La variazione della temperatura in cui l'estensimetro agisce, induce una variazione della deformazione apparente; tuttavia lavorando a una temperatura ambiente pressochè costante, questo fattore è trascurabile.

Anche l'effetto della sensibilità laterale è notevolmente bassa proprio perchè gli estensimetri sono stati installati su ply di materiale unidirezionale. Si deve tuttavia esser precisi nell'allineare l'estensimetro nel momento dell'incollaggio e aver cura di posizionarlo nel punto del provino in cui passa la fibra, in modo da avere misurazioni quanto più possibile attendibili.

Per l'installazione degli estensimetri è necessaria una procedura delicata e precisa. Infatti è fondamentale pulire bene la superficie su cui andrà incollato il sensore. Viene quindi applicato uno sgrassatore per una prima pulizia superficiale. Poi la parete viene levigata mediante un foglio di fine carta abrasiva; successivamente si applica una soluzione di acqua e acido fosforico che ha la funzione di rimuovere i residui e preparare meglio la superficie all'incollaggio.

Si esegue poi il posizionamento segnando delle tacche di centramento, che funzionano da riferimenti per gli estensimetri che sulla loro superficie esterna

presentano anch'essi delle piccole tacche che ne permettono una corretta disposizione. Per fare ciò si può utilizzare un pezzo di nastro adesivo che contribuirà a una buona distribuzione della colla.

Prima di applicare la colla però occorre neutralizzare la soluzione acida precedentemente applicata, mediante un'altra soluzione, questa volta basica per riequilibrare il PH superficiale. A questo punto una goccia di colla specifica è sufficiente per assicurare una buona adesione dell'estensimetro; applicato il gel adesivo è necessario applicare una piccola pressione per qualche secondo. Ultimato questo procedimento si saldano alle piastre i cavi di collegamento che servono per la misurazione. Infine si stende uno strato di poliuretano per la protezione dell'estensimetro e delle saldature; il poliuretano tuttavia non influisce sulla rigidità.

Per quanto riguarda l'installazione di estensimetri su materiali compositi bisogna tener conto dell'assenza di proprietà continue di omogeneità e isotropia che sono invece caratteristiche dei materiali metallici.

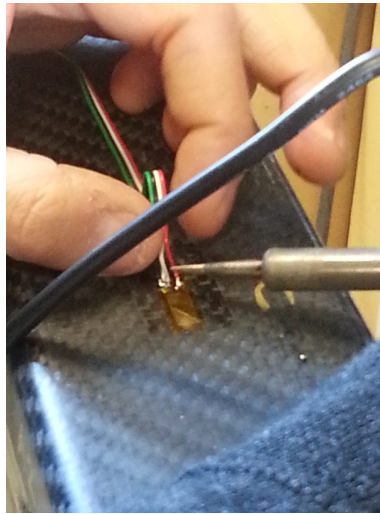
Vanno valutati sia il gradiente di tensione sia la direzione di trama e ordito tipica del materiale composito utilizzato per la misura. Il comportamento dell'estensimetro quindi è in parte condizionato dal tipo di materiale su cui è installato.

Nel caso dello spezzone di bompreso, la scelta delle dimensioni dell'estensimetro da utilizzare varia in base al tipo di materiale impiegato: per quanto riguarda i materiali compositi, le dimensioni del sensore devono essere preferibilmente maggiori del doppio delle dimensioni della trama-ordito. Bisogna però tener presente che all'aumentare delle dimensioni dell'estensimetro, aumentano i costi ad esso legato, quindi la scelta di non utilizzare estensimetri troppo grandi è di fatto più economica.

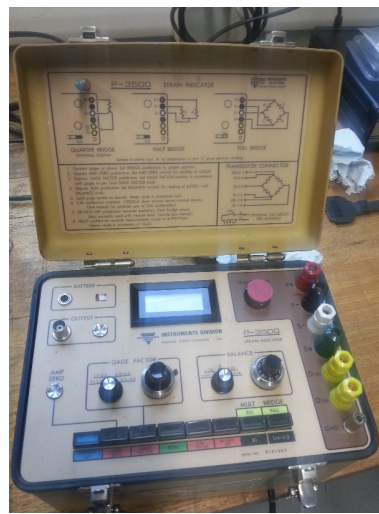
Se nel caso di fibra unidirezionale, c'è un comportamento prevalente in una direzione, in una trama-ordito c'è invece una componente laterale maggiore, legata all'anisotropia tipica dei materiali compositi.

Il collegamento con l'unità di controllo è stato con il tradizionale quar-

to di ponte (Figura 10 (b)) per analizzare la sola componente di trazione monoassiale.



(a)



(b)

Figura 10: Applicazione di un estensimetro (a) e sistema di acquisizione (b)

3 I materiali compositi e le tecnologie di produzione

Durante il secolo scorso, successivamente alla scoperta delle materie plastiche, si è rivelato sempre più importante lo sviluppo dei materiali compositi.

Uno degli ambiti in cui vengono prevalentemente utilizzati questi materiali, è quello aeronautico, che sfrutta maggiormente le prestazioni meccaniche al fine di ottenere ottime performance pur cercando di limitarne l'investimento economico.

L'utilizzo di materiali compositi avanzati rappresenta la soluzione ideale per la realizzazione di componenti in campo aerospaziale e nautico, per le elevatissime caratteristiche di resistenza e rigidità specifica che i compositi forniscono. Questa tipologia di materiale offre infatti alcuni vantaggi rispetto ai materiali convenzionali:

- guadagno di massa: porta risparmio di carburante o aumento del carico utile o in alternativa aumento del raggio d'azione: ciò comporta miglioramenti delle prestazioni;
- buona resistenza a fatica: la durata di vita del pezzo aumenta richiedendo minori interventi di manutenzione ordinaria e portando quindi a costi di esercizio minori; permette inoltre di guadagnare sull'ammortamento della parte;
- assenza di corrosione: riduce i costi di esercizio alleggerendo la richiesta di ispezioni durante la manutenzione ordinaria.

Lo studio dei materiali compositi è un campo in continuo sviluppo e la sua evoluzione ha reso possibili risultati che, in base alle caratteristiche proprie dei materiali utilizzati per la loro realizzazione, permettono di ottenere compositi con ben determinate proprietà meccaniche. È così possibile prevedere come la parte realizzata con tale materiale si comporterà sotto l'azione dei carichi ad essa applicati.

L'evoluzione delle tecnologie di produzione, inoltre, grazie ai loro progressi, permettono di realizzare parti in materiali compositi di qualsiasi forma e dimensione.

3.1 Caratteristiche generali dei materiali compositi

I materiali compositi, sono costituiti da più materiali differenti in forma solida che operano in comune adempiendo a diverse funzioni. ¹² Alla vista si presentano come eterogenei, in quanto sono bifasi, cioè formati da due fasi distinte tra loro:

- **FIBRA:** determina le caratteristiche meccaniche al composito; esse possono essere di diversa lunghezza e avere diverso orientamento. Le fibre hanno il compito di dare resistenza meccanica al materiale e costituiscono la parte che realmente partecipa al lavoro. Anche solo con una bassa percentuale di fibre si ha già un sostanziale aumento delle caratteristiche meccaniche
- **MATRICE:** funziona da sostegno per le fibre ed è di solito un materiale con caratteristiche meccaniche scarse rispetto alla fase fibra. La matrice, tenendo insieme le fibre, ha il compito di dare una forma al pezzo e trasmettere gli sforzi ricevuti alle fibre. In generale questi due elementi lavorano insieme per produrre proprietà nel materiale, che sono differenti dalle proprietà dei singoli elementi.

3.2 Materiali compositi utilizzati in questa attività

Ad oggi sono presenti tantissime tipologie differenti di fibre e matrici utilizzabili; di seguito vengono brevemente illustrate le caratteristiche e le proprietà dei componenti che hanno interessato questa attività di ricerca, ovvero materiali in fibre di carbonio e resina epossidica.

3.2.1 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio si trovano in commercio sia sotto forma di fibre lunghe che di fibre corte. Queste possono a loro volta essere considerate come un composito: solo una parte del carbonio è convertito in piccoli cristalli di grafite orientati secondo l'asse della fibra; ad un maggior contenuto di grafite corrisponde una maggiore rigidità, ma anche una minore resistenza; le fibre di carbonio hanno tipicamente un diametro di $8 \mu m$.

Il principale inconveniente delle fibre di carbonio è il costo; le fibre economiche e di bassa qualità sono molto più costose delle fibre di vetro. I materiali di base sono costosi e i processi di carbonizzazione e grafitizzazione richiedono un accurato controllo del processo, tempi lunghi, materiali ed energia. Un secondo inconveniente di queste fibre è la fragilità, che si accentua nei compositi poiché tipicamente anche le matrici sono fragili. La resistenza all'impatto di questi compositi è bassa e, poiché la fibra di carbonio è un conduttore elettrico, esiste la possibilità di corrosione galvanica nel contatto con metallo.

È da considerare il fatto che queste fibre hanno un valore negativo del coefficiente di dilatazione lineare, il che permette di produrre compositi con coefficiente di dilatazione nullo, orientando opportunamente le fibre.

Le proprietà meccaniche delle fibre di carbonio possono essere migliorate riducendo i microdifetti strutturali. Ciò è ottenuto con un forte riscaldamento del materiale di partenza a temperature intorno ai $2000^{\circ}C$, ottenendo una maggiore compattazione dei piani cristallini. I vari tipi di fibre di carbonio sono ottenuti mediante pirolisi in atmosfera inerte di fibre polimeriche, che rappresentano il materiale di partenza, detto precursore. I tipi di precursore sono: rayon, poliacrilonitrile (PAN), catrame e pece.

I tipi di tessuto sono classificati in funzione sia delle fibre usate, sia dei diversi metodi di costruzione e processo utilizzati per mantenere le fibre unite; in particolare le tipologie di fibre che interessano questo lavoro sono:

- Unidirezionali: le fibre sono disposte in una sola direzione

- Tessuto intrecciato di tipo twill: una o più fibre di ordito sono alternativamente passate sopra e sotto due o più fibre di trama in maniera regolare e ripetuta; ha buone proprietà meccaniche e buon drappeggio, resiste all'umidità e presenta una superficie levigata; è però caratterizzato da una stabilità piuttosto ridotta (Figura 11)

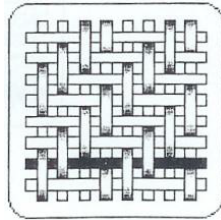


Figura 11: Schema del tessuto intrecciato tipo twill

3.2.2 Compositi a matrice polimerica

Consistono di fibre (di carbonio, aramidiche o vetro) incastonate in una matrice polimerica. Tali fibre possiedono modulo elastico (rigidità) o resistenza molto più elevati di quello delle matrici polimeriche che vanno a rinforzare. Queste resine, hanno buone proprietà, in particolare la capacità di formarsi facilmente all'interno di modelli complessi, utilizzati per la realizzazione di elementi in composito.

E' importante ricordare che le proprietà di un composito sono determinate dalle proprietà della resina, delle fibre, quantità di fibre nella resina, geometria e orientamento delle fibre.

Le proprietà principali delle resine sono:

- tenacità: capacità del materiale di resistere alla propagazione della frattura. Nonostante sia difficile valutare questo parametro per un materiale composito, ci si può riferire a una curva tensione/deformazione
- resistenza all'ambiente (all'acqua ed a sostanze aggressive)
- capacità di sopportare cicli di fatica costanti

3.2.3 Resine Epossidiche

Le resine epossidiche sono prepolimeri di basso peso molecolare capaci di essere utilizzati in molteplici condizioni. L'ampia famiglia delle resine epossidiche rappresenta l'insieme di resine con le più alte proprietà disponibili al giorno d'oggi; tra i vantaggi troviamo il fatto che le resine epossidiche possono essere lavorate chimicamente e immagazzinate in questo stato, inoltre mostrano un basso restringimento durante il processo chimico di curing. Tuttavia la viscosità delle più comuni resine epossidiche è più elevata di quella delle resine poliestere e sono anche più costose di queste ultime. Le resine, dopo il processo chimico, presentano elevata resistenza agli agenti chimici ed alla corrosione, buone proprietà meccaniche e termiche, capacità adesive con molteplici elementi e buone proprietà elettriche e presentano caratteristiche meccaniche e di resistenza agli agenti ambientali, che ne fanno una delle tipologie maggiormente usate per la produzione di parti aeronautiche. Come per le resine che subiscono laminazione, le loro incrementate proprietà adesive e la resistenza al degrado causato dall'ambiente, fanno di queste resine le ideali per l'uso in applicazioni come la costruzione di barche ed impieghi in campo marittimo. In questo settore, le resine epossidiche sono utilizzate largamente come primo materiale di costruzione per barche di alte prestazioni, oppure come materiale secondario per il rivestimento della carena di una barca, o per sostituire resine poliestere degradate dall'acqua. La loro più grande limitazione risiede negli alti tempi necessari per la reazione di curing e lo scarso rendimento in applicazioni con ambienti caldo-umidi. La facilità di processo, le buone caratteristiche di fusione, le eccellenti capacità adesive con vari elementi, il basso restringimento durante la reazione di curing, le proprietà meccaniche superiori, le buone caratteristiche di resistenza termica e chimica, hanno fatto della resina epossidica il materiale prescelto per compositi avanzati che presentano fibre di rinforzo. [12]

3.3 I materiali compositi utilizzati

Tutti i materiali utilizzati sono preimpregnati, hanno cioè già il contenuto di resina che garantisce una corretta reticolazione durante il ciclo di curing. Per evitare che rimangano zone con carenza di resina, i pre-preg sono prodotti con un eccesso di resina, che nel processo di curing verrà espulsa grazie a temperatura e pressione, quella in eccesso verrà assorbita dal materiale assorbente che avvolge il pezzo.

Per la produzione dei provini, la resina che impregna le fibre è la MTM 57 della Advanced Group, una resina con una viscosità e un tack (capacità di adesione) intermedio. È una matrice molto performante epossidica per cicli termici che possono variare fra gli 80 e i 120°C. In particolare il ciclo di curing necessario per la corretta reticolazione è 1 ora a 120°C salendo a 3°/min e poi raffreddamento sempre a 3°/min fino ad 80° mantenendo sempre la pressione che può essere anche di 6,2 bar. Possono essere fatte modifiche al ciclo termico e nel caso si rimanga a temperature più basse, il tempo necessario alla reticolazione si allunga. Le fibre sono in carbonio unidirezionali.

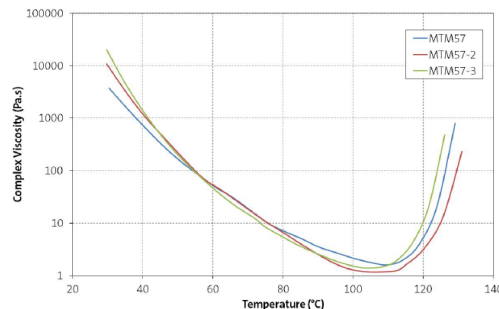


Figure 12: Curva di viscosità della resina MTM 57

Per la realizzazione del simulacro è stato impiegato un tessuto di carbonio impregnato GG630T-DT120-37, un epossidico termoindurente tenacizzato, caratterizzato da buona trasparenza, stabilità all'ingiallimento e autoadesività, adatto per zone che richiedono alta resistenza all'impatto e alto livello di finitura superficiale. Il tipo di filato è un carbonio ad alta resistenza Toray

T700, con tessitura in twill 2X2. Lo spessore nominale dello strato curato è pari a 0,652 mm.

3.4 Polimerizzazione dei compositi in autoclave

La tecnologia della formatura mediante sacco a vuoto in autoclave è sostanzialmente un'evoluzione della semplice formatura con sacco a vuoto in cui la pressione di compattazione del laminato è prodotta dalla sola pressione atmosferica, essendo nata dalla necessità di ottenere laminati con caratteristiche meccaniche migliori.

Nella vacuum bag, infatti, la pressione massima applicabile sulla superficie del laminato, quella atmosferica, comporta delle limitazioni per quanto riguarda l'azione di compattazione dei materiali; con l'impiego dell'autoclave, viceversa, è possibile intensificare tale azione di compattazione, portando la pressione a valori anche molto elevati all'interno dell'autoclave.

Una pressione maggiore garantisce una minima presenza di vuoti tra le lamine e un rapporto fibra/resina più elevato e, quindi, consente al laminato di raggiungere prestazioni più elevate.

Questo tipo di lavorazione viene privilegiato quando si deve realizzare un numero limitato di pezzi aventi caratteristiche meccaniche molto spinte e dimensioni non eccessive, o quando gli stampi prevedono dei contorni complessi. Non è, viceversa, indicata per produzioni di grande serie e per pezzi di notevoli dimensioni, soprattutto a causa della durata elevata del processo. Il processo in autoclave rappresenta, dunque, una delle tecnologie più avanzate nella fabbricazione di componenti complessi in composito in settori tecnologicamente avanzati come quello aerospaziale ed aeronautico. Tra i vantaggi conseguibili con questa tecnologia, si ricordano i seguenti:

- bassa porosità nel laminato, dovuta alla pressione applicata, che in genere arriva fino a 14 bar
- bassi livelli di scorrimento delle lamine le une sulle altre, dovuti alla

uniforme distribuzione della pressione sul laminato; ad alte temperature, infatti, prima della polimerizzazione, si ha una notevole diminuzione del valore della viscosità e una non uniforme distribuzione della pressione potrebbe provocare uno scorrimento delle lamine e quindi un difetto di compattazione

- ottima finitura superficiale sulla faccia rivolta verso lo stampo
- valore abbastanza costante dello spessore del laminato dovuto sempre alla distribuzione uniforme della pressione su di esso

3.4.1 Materiali base

Riportiamo semplici descrizioni dei componenti, materiali e accessori necessari per utilizzare la tecnologia della formatura in autoclave, per poi illustrare e descrivere criticamente il ciclo completo.

3.4.1.1 Rinforzi

I materiali di rinforzo vengono combinati con i sistemi di resina in una varietà di formati per creare laminati strutturali. I tipi più comuni di rinforzo usati per la lavorazione con sacco a vuoto, sono sostanzialmente tessuti di vario tipo. In commercio ne esistono tantissime varietà, ognuna caratterizzata da particolari valori dei parametri che la definiscono e tra questi si ricordano:

- lo spessore (da 0,02 mm fino a 1 mm e oltre)
- la grammatura (intesa come rapporto peso/superficie di tessuto, normalmente compresa tra gli 80 e 600 g/m^2)
- la composizione (numero di fili costituenti l'ordito e la trama)
- il titolo (peso per unità di lunghezza del filato, espresso in $Tex = g/10^3m$)

- l'armatura (tipo di intreccio esistente nel filato)
- il carico di rottura (espresso in kg/cm di larghezza)

I materiali utilizzati per le fibre sono molteplici, e vanno dai vari tipi di vetro, al carbonio, alle fibre aramidiche.

3.4.1.2 Resine

Le resine utilizzate nella tecnologia in autoclave, sono principalmente del tipo epossidico. Ciò è dovuto al fatto che questa tecnologia viene utilizzata per la produzione di laminati a elevate prestazioni, e si accettano quindi resine più costose come le epoxy, che esibiscono le migliori caratteristiche tra tutte le resine termoindurenti.

3.4.1.3 Prepreg

I preimpregnati sono materiali semi-lavorati, in cui cioè le fibre sono già impregnate dell'esatta quantità di resina (generalmente epossidica) voluta dal progettista e che pertanto garantiscono in partenza uno dei requisiti, indispensabili per garantire la ripetibilità del processo, cioè costanza del rapporto fibre-matrice. Naturalmente questo corrisponde a un maggior costo da sopportare per la fabbricazione del pezzo, ma il fattore costo viene ammortizzato in molti casi da altre valutazioni relative all'intera vita del pezzo: in altri termini una maggiore qualità iniziale comporta una diminuzione dei costi complessivi durante l'intero ciclo di vita del componente (life cycle cost). I preimpregnati sono disponibili con percentuali variabili di volume di resina, con fibre in formato sia unidirezionale sia di tessuto.

Il materiale viene fornito in rotoli di varia lunghezza, con un film distaccante di polietilene che riveste entrambi i lati delle lamine; vanno conservati nel loro imballo originale in celle frigorifere a una temperatura compresa tra i -15°C e i -20°C , e hanno, generalmente, una shelf life di alcuni mesi.

Per quanto, riguarda le modalità di utilizzo, una volta prelevati dalla cella, i preimpregnati devono raggiungere la temperatura ambiente prima di poter

essere estratti dal loro involucro; siccome a 20 °C il tempo di lavorabilità varia di solito da 16 a 72 ore, è fondamentale che la stratificazione sia completata entro questi tempi, prima che abbia inizio il processo di polimerizzazione.

Tutto il materiale che non viene utilizzato entro questo periodo può essere rimesso nella cella frigorifera, ma occorre tenere conto del tempo in cui è rimasto a temperatura ambiente. Il suo periodo di lavorabilità, infatti, dovrà essere ridotto proporzionalmente al tempo in cui il preimpregnato è rimasto fuori dalla cella.

Il materiale deve essere tagliato, nelle forma desiderata, con forbici, taglierine o macchine automatiche prima di rimuovere i film protettivi; una volta fatto ciò uno dei due film di polietilene dovrà essere tolto e il materiale potrà essere posto sul modello o sullo stampo. Con un rullo si elimineranno le bolle d'aria, poi, dopo aver tolto il secondo film protettivo, si rullerà nuovamente il laminato.

Successivi strati di materiali possono essere sovrapposti, seguendo questo metodo, fino a raggiungere lo spessore desiderato.

I vantaggi che l'uso di preimpregnati epossidici può offrire, sono principalmente:

- migliori caratteristiche meccaniche
- maggior controllo del peso finale
- assenza di zone di non uniforme impregnazione
- semplicità e rapidità di lavorazione
- pulizia della lavorazione (non dovendosi utilizzare nessuna resina liquida)
- notevole miglioramento delle condizioni di sicurezza del lavoro.

Un ulteriore vantaggio dei preimpregnati è la possibilità di impiegarli per la costruzione di strutture a sandwich, date le eccellenti proprietà di adesione

della resina, e la sua bassa viscosità, che garantiscono incollaggi ottimali con anime a struttura alveolare (honeycornb) di alluminio o di Nomex.

A seconda degli scopi, i preimpregnati sono disponibili in fibra di vetro, carbonio, oppure in fibra aramidica; sono altresì reperibili in differenti grammature, con diversi tipi di resina e con temperature di polimerizzazione variabili.

3.4.1.4 Sacco

Il sacco è costituito da una membrana flessibile che ricopre interamente il laminato ed è fissato a tenuta, tramite un mastice sigillante, sullo stampo.

Uno dei materiali usati per la costruzione del sacco è il nylon, le cui caratteristiche principali devono essere un'elevata elongazione percentuale (oltre il 400%) ed elevata resistenza a trazione. La temperatura massima d'esercizio è di circa 210 °C.

3.4.1.5 Nastri sigillanti

Le moderne tecniche di fabbricazione di compositi utilizzano dei nastri appositamente messi a punto (generalmente in gomma sintetica estrusa) per effettuare una chiusura tra lo stampo e il film per il sacco a vuoto. È necessario che i nastri sigillanti aderiscano a tutti i più comuni sottostrati dello stampo e ai materiali per il sacco.

Devono sopportare la temperatura del ciclo di indurimento e quindi essere tolti senza sbavature.

Naturalmente, è necessario che abbiano una buona resistenza chimica e che forniscano le necessarie garanzie di sicurezza quando sono utilizzati in officina.

Si deve fare attenzione, infine, che gli agenti distaccanti siano tenuti lontano dall'area di accoppiamento sigillante/stampo, e che siano applicati su superfici pulite, asciutte, e senza contaminazione.

3.4.1.6 Materiali traspiranti

Questi materiali sono necessari per permettere all'aria, ai solventi o alle sostanze volatili imprigionate, di essere rimosse dalla preforma prima del ciclo di indurimento.

Lo strato traspirante, forma il collegamento essenziale tra lo stampo e il sistema a vuoto. Deve essere in grado di mantenere un passaggio di flusso tra i due, nelle condizioni di temperatura e di pressione alle quali viene effettuato l'indurimento. Materiali in tessuto feltrato costituiscono degli eccellenti traspiranti, e sono disponibili varianti adatte a essere drappeggiate sopra curve complesse e per operare efficientemente con una grande varietà di temperature e di pressioni.

3.4.1.7 Materiali assorbenti (bleeder)

La funzione di un materiale assorbente è quella di assorbire l'eccesso di resina dalle preforme preimpregnate, secondo necessità. Può essere costituito da una carta assorbente, o da un tessuto filtrante, o da uno dei tanti tessuti disponibili.

Il tessuto traspirante prescelto, o il pacco, viene generalmente messo sopra lo stampo, ed è da esso separato da uno strato poroso distaccante. La pressione applicata durante l'indurimento in autoclave, fa sì che la resina fluisca dal laminato nel pacco traspirante, secondo le capacità del materiale selezionato, producendo il contenuto in resina desiderato nel composito finale indurito. I fattori che determinano la scelta includono: la forma del componente, la pressione che si deve applicare, la temperatura massima di indurimento, lo spessore del laminato, la frazione di volume della fibra desiderata ecc.

I materiali assorbenti devono essere eliminati dopo l'utilizzo.

3.4.1.8 Distaccanti

I materiali di questo gruppo rientrano, nelle seguenti quattro categorie principali:

1. agenti distaccanti: del tipo PVA liquido, cosparsi sullo stampo a mano o a spruzzo
2. film distaccanti: destinati a fornire uno strato di materiale che si stacca facilmente dal componente indurito, lasciando una finitura liscia e brillante
3. tessuti distaccanti: si staccano dal componente indurito con diversi gradi di facilità, e lasciano una superficie rugosa, a seconda del tessuto scelto
4. sono dei tessuti leggeri destinati ad assorbire la resina e quindi aderire leggermente alla superficie del componente, cosicché, quando viene strappato, viene rimosso anche uno strato di resina, lasciando una superficie fresca, opaca e pulita. La ruvidità della superficie dipenderà dai peel ply scelto secondo le necessità dell'operazione secondaria che si dovrà eseguire, cioè la stuccatura; verniciatura, o altro.

Si dà ora una descrizione delle funzioni dei materiali ausiliari utilizzati nella formatura di un pannello piano e di una struttura sandwich mostrate rispettivamente nella Figura 13 e Figura 14. Il distaccante a film o a tessuto, è sistemato direttamente sul preimpregnato per permettere il distacco del pezzo dagli altri componenti del sacco. Il distaccante può essere poroso e non poroso; si utilizza un distaccante poroso quando si adoperano dei preimpregnati con perdita di peso.

Al di sopra del distaccante si pone uno strato di "bleeder", formato da un tessuto di vetro che assolve due funzioni:

- assorbire l'eccesso di resina;
- permettere l'allontanamento dell'aria

Per piastre piane, e per forme anche più complesse, si sovrappone una lastra rigida piana per rendere quanto più uniforme l'applicazione della pressione.

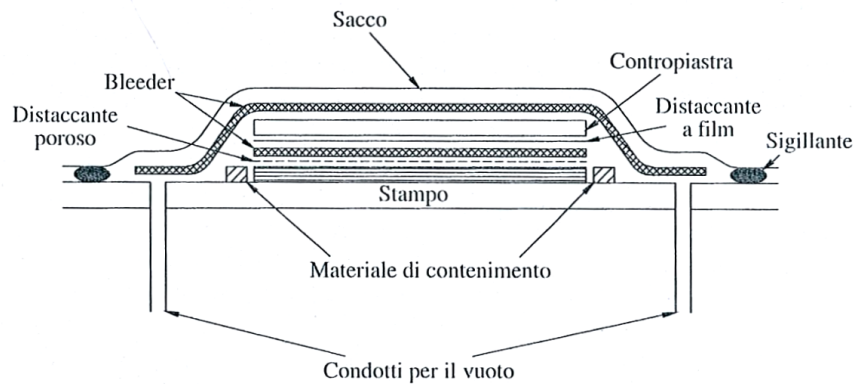


Figure 13: Formatura di un pannello piano

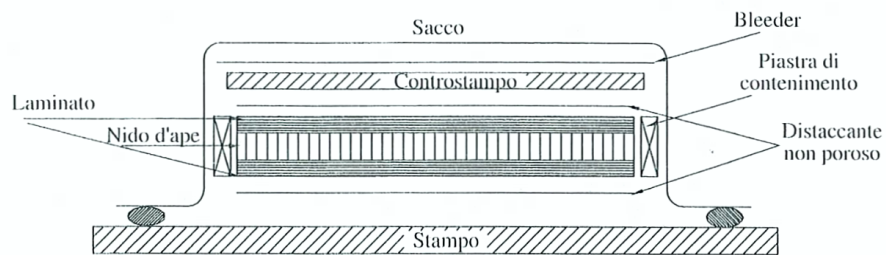


Figure 14: Struttura a sandwich

Un distaccante a film non poroso viene sistemato fra gli strati di bleeders e la piastra per permetterne il distacco, evitando l'incollaggio dovuto alla resina che, fuoriuscita dal preimpregnato, attraversa gli strati di bleeder. Un ulteriore strato di bleeder è raccomandato sopra la piastra per eliminare l'aria e i vuoti d'aria i quali possono dar luogo a una distribuzione di pressione non uniforme.

Un bordo comprimibile di neoprene (sigillante) può essere messo intorno al pezzo, fissato con nastro adesivo, per evitare fuori-uscite laterali di resina. A tal punto il sacco viene sistemato sul complessivo; le sue dimensioni devono essere tali che fuoriesca di circa $100 \div 200$ mm dal bordo del pezzo affinché si possa chiudere il tutto con un sigillante.

Il sacco è di materiale flessibile e può essere di: poliestere, cloruro di polivinile, silicone gomma, neoprene gomma, vetro ricoperto di neoprene e, più frequentemente, come già detto, di nylon con spessore di 0,03 mm; il sacco è adattabile a molte forme.

Per forme meno complicate si possono utilizzare per la chiusura delle guarnizioni di gomma (Figura 15 e Figura 16).

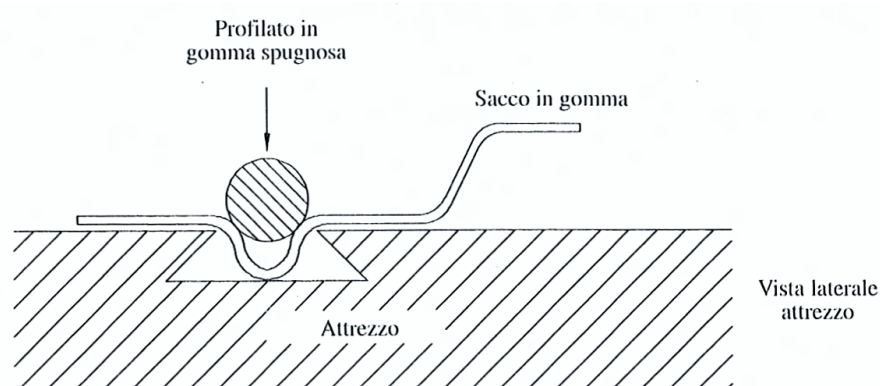


Figure 15: Chiusura con guarnizione di gomma a sezione circolare

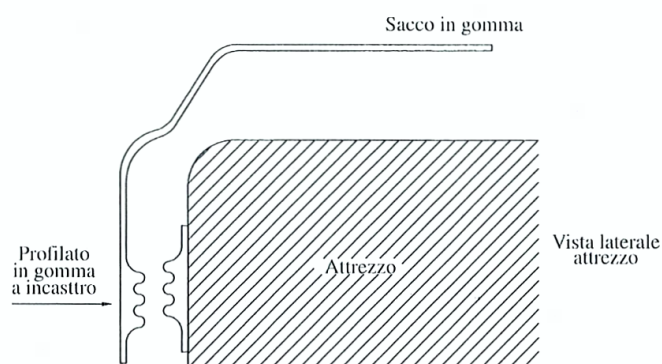


Figure 16: Chiusura con guarnizione di gomma a incastro

3.4.2 Autoclave

L'autoclave si presenta come un grande recipiente pressurizzato (Figura 17) le cui dimensioni massime sono di circa 5÷6 m di diametro e 18÷20 m di lunghezza; la pressurizzazione è ottenuta utilizzando un fluido di lavoro che è generalmente costituito da CO_2 riscaldato e messo in pressione come richiesto dal ciclo di lavorazione.

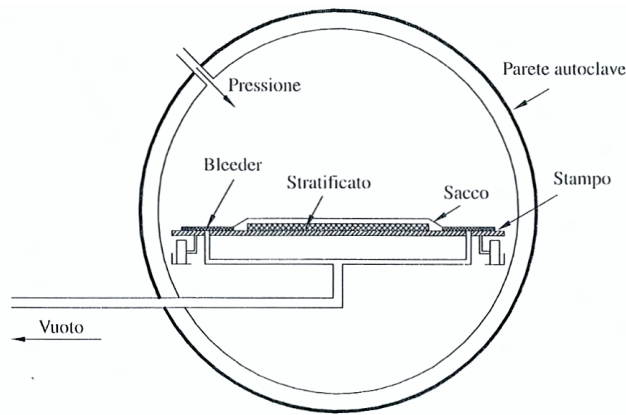


Figure 17: Schema della struttura base di un'autoclave

L'evoluzione dei materiali utilizzati per tale tecnologia ha portato il campo di utilizzo da 120 °C e 3 atm fino a molte centinaia di °C e decine di atm.

Sostanzialmente un'autoclave è un recipiente isolato termicamente, nel quale circola un fluido caldo in pressione. Le caratteristiche costruttive di un'autoclave, devono rispondere a determinate esigenze di processo, per cui è doveroso evidenziarne alcune tra le principali:

- è necessaria una sufficiente fonte termica per fornire una rapida variazione della temperatura durante il ciclo di curing
- è indispensabile un opportuno sistema per la circolazione del fluido all'interno dell'autoclave che garantisca il più possibile l'assenza di gradienti termici tra zone diverse della stessa

- è richiesta un'elevata capacità di pressurizzazione per portare velocemente il grande volume dell'autoclave alla pressione voluta
- si richiede la presenza di un sistema adeguato che consenta di mantenere il vuoto all'interno del sacco delle varie parti sottoposte al ciclo di curing;
- è necessario, infine, un sistema automatico di registrazione e variazione continua dei valori di temperatura e pressione all'interno dell'autoclave, durante tutto il ciclo.

I recenti sviluppi della tecnologia informatica hanno enormemente migliorato la capacità di monitorare e controllare i cicli di curing. Gli obiettivi principali sono tesi a incrementare la riproducibilità dei cicli, ottimizzando attraverso scelte opportune i parametri di processo e riducendo il costo del lavoro associato ai controlli manuali.

I cicli di curing possono essere controllati in feedback da termocoppie, trasduttori e sensori dielettrici e ultrasonici. Ogni sistema di controllo deve essere opportunamente tarato per l'applicazione corrente.

L'autoclave è composta da un corpo a pressione di forma cilindrica, disposto orizzontalmente, e terminante da un lato o entrambi con una porta, per reintroduzione e l'estrazione del prodotto. Esistono modelli con porta orizzontale e verticale, e il movimento di apertura e chiusura è servoassistito da una centralina oleodinamica comandato manualmente. Sono disponibili diversi sistemi per il riscaldamento dell'autoclave. I più comuni usati per autoclavi di grandi dimensioni, adoperano olio diatermico che, riscaldato da una caldaia a gasolio, viene fatto circolare nell'apposito circuito di scambio. Le autoclavi di dimensioni minori sono invece riscaldate elettricamente.

Alcune autoclavi sono provviste anche di circuito di raffreddamento con acqua a circolazione forzata.

Particolare rilevanza, nello studio dei cicli di curing, risultano avere le velocità di riscaldamento e di raffreddamento che, sebbene siano imposte dalla

scelta del materiale, sono in ogni caso caratteristiche di selezione dell'autoclave. Infatti, all'interno dell'autoclave è presente un circuito idraulico attraverso il quale l'acqua fredda deve circolare al termine del ciclo di polimerizzazione al fine di accelerare il raffreddamento e quindi ridurre il tempo del ciclo che è inizialmente lungo.

La circolazione del flusso all'interno dell'autoclave deve permettere uniformità termica e un ottimale flusso di calore sul materiale. Valori tipici vanno da 1 a 3 m/s, mentre valori maggiori possono causare problemi alle attrezzature adibite alla creazione del vuoto (sacco in pressione).

Nel circuito di riscaldamento, come già detto, circola olio diatermico riscaldato da una caldaia a gasolio mentre in quello di raffreddamento acqua a circolazione forzata. Nella parte posteriore dell'autoclave sono disposti due scambiatori in uno dei quali circola l'olio diatermico e nell'altro l'acqua per il raffreddamento. Dietro gli scambiatori è posizionata una ventola in aspirazione per la circolazione forzata, del fluido che viene inviata nella zona anteriore della camera tramite un'intercapedine esistente fra questa e l'involucro esterno.

Un adeguato valore di pressione è necessario, nella fabbricazione dei composti, per asportare la resina in eccesso ed evitare la formazione di vuoti o inclusioni gassose.

Particolare attenzione va posta nella progettazione del portellone di accesso all'autoclave, per il quale vengono utilizzate guarnizioni a base di gomma siliconica che ne garantiscono una perfetta tenuta. I valori di pressione raggiunti nei cicli di cura sono di circa 10 bar e in generale si fa in modo che il massimo coincida con la fase di minore viscosità della resina per permetterne la fuoriuscita.

Gli organi adibiti al controllo della pressione in autoclave devono essere sottoposti a revisione e certificazione annualmente, onde evitare l'insorgenza di condizioni pericolose durante l'utilizzo.

La pressione nell'ambiente viene fornita, in genere, da compressori stazionari

a vite, monostadio, azionati da motori elettrici. Una serie di valvole pneumatiche a membrana provvede alla regolazione di temperatura e pressione all'interno della camera.

Il sistema di comando e controllo dei cicli di polimerizzazione è gestito generalmente da un quadro elettrico, tramite un programmatore elettronico PLC e un pannello operatore di interfaccia. Il sistema è in grado di supportare cicli differenziati in relazione alle tipologie delle resine utilizzate e alle caratteristiche meccaniche che devono essere conferite al pezzo o particolare in formazione. Tali cicli potranno essere naturalmente ripetitivi e i vari parametri e ricette mantenute nel tempo.

Durante il processo devono venire continuamente prese in esame la temperatura dell'ambiente, la pressione e la temperatura in particolari punti all'interno del sacco.

Sono previsti allarmi e blocchi per la mancanza di una qualunque fonte di alimentazione o energia.

3.4.3 Stampi per autoclave

Per gli stampi da autoclave, esiste una varietà di materiali utilizzabili. Una decisione a tal fine dipende dal numero di pezzi da fabbricare: se questo è maggiore di cento allora è essenziale usare acciaio o alluminio che alza il numero dei processi e contemporaneamente si ottengono dei contorni accurati; in particolare, stampi ottenuti per elettrodeposizione di nichel permettono di ottenere un numero elevato di stampati con ottime finiture ma con costi elevati.

Per poche unità possono essere adoperati stampi in gesso o in legno; per un numero di pezzi comunque inferiore a cento si possono adoperare stampi di resina epossidica caricata con alluminio. Per stampi di gesso o di legno la pressione non deve superare il valore di 1,5 atm. Essendo poroso, questo tipo di stampo deve essere sigillato prima dell'uso.

Gli stampi metallici di notevole massa non permettono elevate velocità

di riscaldamento e agiscono come volani termici non permettendo rapidi incrementi di temperatura.

In alcuni casi molto estremi è necessario contenere al massimo o eliminare le deformazioni dello stampo durante le escursioni termiche dovute al ciclo di polimerizzazione, per preservare al meglio le tolleranze dimensionali previste in fase di progettazione del pezzo; in questi casi è indispensabile adoperare stampi in carboresina (resina epossidica con fibre di carbonio/grafite) poiché a questo materiale composito, se progettato e costruito con fibre orientate opportunamente, può corrispondere un coefficiente di dilatazione termica pari a zero.

3.4.4 Ciclo di curing in autoclave

Lo stampo viene messo all'interno dell'autoclave riscaldata, dove, collegato a una pompa del vuoto, seguirà il ciclo di curing previsto; in tale fase avviene la polimerizzazione del materiale, il cui buon esito dipende in larga misura dal controllo della temperatura e della pressione durante tutto il ciclo.

La selezione dei cicli di indurimento dipenderà dal tipo di resina utilizzato, e da altri parametri relativi allo spessore del laminato, alla complessità e alla natura delle reazioni chimiche durante l'indurimento, considerando la necessità che il processo tecnologico avvenga uniformemente anche in zone a spessori diversi.

Durante il processo di polimerizzazione è particolarmente importante il controllo della viscosità, dovendo essere possibile l'allontanamento delle bollicine di gas, prodotte dalla reazione e intrappolate nella resina.

È inoltre necessaria la corretta compattazione delle fibre e l'eliminazione dell'eventuale eccesso di resina e di aria. Nella Figura 18 è riportato un esempio di diagramma sperimentale della viscosità in funzione del tempo e della temperatura per una resina epossidica.

Si nota l'iniziale decremento della viscosità all'aumentare della temperatura fino al raggiungimento di un valore minimo. A partire da tale punto la

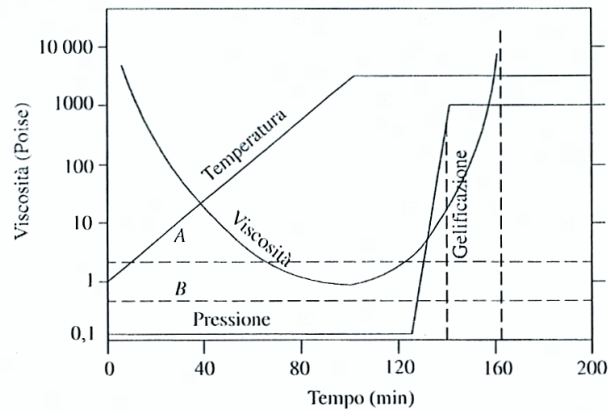


Figure 18: Diagramma sperimentale della viscosità in funzione del tempo e della temperatura (resina epossidica e fibre di carbonio)

temperatura è mantenuta costante, e inizia la reazione chimica di polimerizzazione tra i componenti della resina, con formazione di macromolecole, che comporta un incremento della viscosità.

Il rapido aumento di viscosità, che si osserva nel secondo tratto della curva, corrisponde alla fase di gelificazione della resina. Il fenomeno è dovuto alla formazione di numerosi legami incrociati tra le macromolecole.

Per l'applicazione della pressione bisogna distinguere due casi.

- Preimpregnato con perdita di resina; in questo caso si devono definire, per la resina in esame, due limiti A e B, che definiscono il campo in cui deve essere applicata la pressione. Il limite A definisce il valore massimo della viscosità, al di sopra del quale le bollicine di gas non lascerebbero il preimpregnato. Il limite inferiore B definisce il valore minimo al di sotto del quale si avrebbe un flusso eccessivo di resina.
- Preimpregnato senza perdita di resina; la pressione va applicata nell'intervallo di gelificazione, in quanto essa non deve creare un flusso di resina ma deve solo compattare il preimpregnato.

Un ciclo in autoclave contiene le seguenti fasi:

1. applicare il vuoto e mettere il pezzo sulla piattaforma mobile per introdurlo nell'autoclave;
2. sigillare l'autoclave e inserire il ventilatore per la circolazione del fluido pressurizzante;
3. inserire il riscaldamento e controllare la temperatura;
4. pressurizzare l'autoclave come dettato dal ciclo di polimerizzazione;
5. eliminare il vuoto e controllare se c'è una perdita di pressione interna;
6. completata la polimerizzazione, eliminare la pressione e aprire le valvole di scarico lentamente;
7. eliminare il vuoto;
8. lasciare il pezzo raffreddare fino a temperatura ambiente o al di sotto di 100 °C e rimuovere il sacco.

Normalmente, per applicazioni strutturali o comunque in settori ad avanzata tecnologia, i produttori di materiali forniscono il ciclo di curing più adatto a ottenere le migliori prestazioni della resina e quindi anche del composito.

Si sottolinea che le condizioni di cura hanno una notevole importanza sulle prestazioni a fatica dei compositi. Come si può osservare per ottenere le migliori prestazioni del composito, bisogna adottare tecnologie, come appunto quella dell'autoclave, che consentono di controllare i parametri di temperatura, pressione e vuoto, non solo come valori assoluti, ma anche seguendo le velocità di variazione.

I cicli di curing sono normalmente determinati empiricamente. Durante un normale ciclo l'andamento crescente della temperatura subisce diverse fermate a temperature prestabilite, per facilitare il flusso di resina verso l'esterno ed evitare formazione di vuoti.

Le fermate inoltre permettono di ottenere una distribuzione di temperatura uniforme all'interno del laminato in modo da far raggiungere la temperatura d'innescò della reazione (esotermica) di polimerizzazione quasi simultaneamente in tutti i punti. Tale fenomeno risulta ancora più necessario per quei materiali compositi la cui bassa conducibilità rallenta la trasmissione del calore all'interno del laminato.

Contemporaneamente al raggiungimento di bassi valori di viscosità si incrementa il valore della pressione nell'autoclave per facilitare il flusso di resina verso l'esterno.

Qui di seguito riportiamo un esempio di un caratteristico ciclo di polimerizzazione per compositi a base di resina epossidica:

- temperatura ambiente, pressione vuoto 17 kPa;
- riscaldamento fino a 250°C con velocità 15.°C/min;
- mantenimento a 250°C per 30 minuti;
- pressione vuoto 81 kPa, pressione autoclave 1400 kPa;
- riscaldamento fino a 325°C con velocità di 20°C/min;
- mantenimento a 325°C per 3 ore;
- raffreddamento a 3°C/min fino a 65 °C con valori di vuoto e pressione massimi;
- trattamento di postcura per 6 ore a 330 °C in un forno a circolazione d'aria.

Come si nota dal ciclo di cura, è necessario un periodo superiore alle 6 ore sotto vuoto e ad alte temperature per far reagire completamente le molecole e ottenere il completo stato di polimerizzazione. I cicli di cura sono normalmente prescritti dai produttori di preimpregnati in funzione sia del tipo di resina sia della fibra.

Per l'ottenimento di un composito con caratteristiche ottimali è necessario che vengano soddisfatti durante il ciclo di cura anche altri requisiti trattati di seguito.

- **Eliminazione dei vuoti:** molti preimpregnati contengono una considerevole quantità di aria dovuta al processo di realizzazione stesso. Il processo di stratificazione aggiunge aria supplementare tra i componenti (fino al 12% in volume per preimpregnati realizzati meccanicamente). Inoltre i preimpregnati a base di fibre grafite e resine epossidiche contengono più dello 0,5% del peso di acqua che può arrivare a ebollizione durante il processo di cura. Il processo di cura deve quindi prevenire un valore della porosità troppo elevato comprimendo l'aria intrappolata ed evitando l'ebollizione dell'acqua.
- **Rimozione dei solventi:** alcune resine sono disciolte con solventi prima di essere applicate alla fibra. Se gli stessi non fossero eliminati prima dell'ultima fase del processo di cura potrebbero creare delle bolle all'interno del composito e peggiorarne le caratteristiche. Fortunatamente i solventi usati per le resine epossidiche hanno un basso punto di ebollizione ed evaporano durante la stratificazione.
- **Impregnazione delle fibre:** per ottenere le migliori caratteristiche dal composito è necessario che la resina ricopra perfettamente ogni fibra. Una bassa viscosità durante la cura permette l'impregnazione delle fibre e riduce la porosità all'interno del componente.
- **Consolidamento:** nel caso di materiali preimpregnati lo spessore iniziale del singolo strato di materiale è normalmente maggiore del 20% dello spessore finale desiderato. Un'opportuna combinazione di basso valore di viscosità della resina e di pressione ne diminuiscono lo spessore finale.
- **Rimozione della resina in eccesso:** normalmente all'interno del materiale, prima del ciclo di cura, vi è un eccesso di resina anche superiore al

10%. È possibile rimuoverlo sfruttando il cambiamento della viscosità durante il ciclo di cura.

3.4.5 Caratteristiche delle tecnologie basate su autoclave

Con riferimento ai due parametri distintivi qualitativamente della tipologia delle caratteristiche delle diverse tecnologie, cioè gli aspetti relativi alle proprietà del materiale ottenibile e gli aspetti relativi alla ripetibilità del processo di produzione, è facile fare le seguenti considerazioni nel caso di uso di autoclave.

Le caratteristiche meccaniche del materiale composito ottenibile mediante tecnologie basate sull'uso di autoclave sono conseguenti alle necessità di adoperare un sistema produttivo con bassi ritmi di produzione, ma da cui si pretende l'ottenimento di materiali dalle grandi prestazioni, molto vicine o pari a quelle prevedibili dalla teoria dei compositi. Ciò viene in pratica confermato dall'uso di formati di fibre di grammatura bassa, generalmente di tipo preimpregnato. In altri termini, si preferisce proiettarsi verso materiali anche più costosi, avendo affidato ad altri in precedenza il compito di assicurare la qualità del semilavorato preimpregnato e a cui però corrispondono elevate caratteristiche di sfruttamento delle potenzialità delle fibre.

Naturalmente tutto questo deve essere dettato dal progettista che in questi casi ha necessariamente bisogno, per motivi di sicurezza e di ammissibili di progetto, delle elevate proprietà offerte da questa tipologia di produzione, di materiali compositi.

La caratteristica di automazione decisa della tecnologia con uso di autoclave implica necessariamente la totale o quasi assenza di attività dell'operatore durante le diverse fasi del processo. Unendo a ciò la citata ripetibilità e affidabilità del materiale relativamente alle sue proprietà iniziali (uso di preimpregnati), consegue che la produzione di pezzi in tempi successivi, o da parte di operatori diversi come succede normalmente nei reparti industriali di produzione, sarà in tutti i casi ripetitiva e pertanto la affidabilità del processo

nel suo insieme non potrà che essere totalmente assicurata. [10]

3.5 Curing in autoclave nei laboratori MasterLab

Il lavoro successivamente presentato in questo elaborato, viene svolto all'interno dei laboratori MasterLab, dell'Università di Forlì. L'autoclave di cui la facoltà è dotata (Figura 19) dispone di 4 linee del vuoto a cui poter collegare due sacchi contemporaneamente o due valvole montate nello stesso pezzo.



Figura 19: Autoclave dei laboratori MasterLab

I procedimenti di cura in autoclave svolti nei laboratori MasterLab hanno seguito le procedure e le caratteristiche illustrate in questo capitolo, per quanto riguarda gli stampi, i cicli e le caratteristiche qui descritte.

Bisogna tuttavia tenere in considerazione che i diagrammi dei cicli di polimerizzazione riportati, sono in realtà diagrammi ideali: la resina vicina allo stampo, infatti, subisce la temperatura dello stesso che, essendo in alluminio, è caratterizzato da una ben specifica inerzia termica. Nella fase ascendente la temperatura si rivela essere leggermente più bassa di quella indicata, viceversa, nella zona discendente, la temperatura è maggiore. Una buona soluzione per ovviare almeno in parte questo problema, consiste nel pre-riscaldare lo stampo in modo da diminuire, o addirittura eliminare la differenza di temperatura tra il caso ideale e quello reale. Un metodo per

monitorare la temperatura del provino consiste nell'inserire all'interno dell'autoclave che effettua il ciclo di cura, un secondo provino al cui interno è posizionata una termocoppia. Il provino si può realizzare con le lamine di composito di scarto non impiegate per la creazione dei campioni da studiare e una volta terminato il processo, non è riutilizzabile e viene scartato.

3.6 La collaborazione con Riba Composites, presentazione aziendale

Per lo sviluppo di questa sperimentazione è stata fondamentale la cooperazione con Riba Composites, azienda leader nella progettazione, prototipazione e produzione di parti strutturali e componentistica in materiali compositi avanzati ed in particolare delle fibre di carbonio.



Figura 20: Logo dell'azienda Riba Composites

Riba è un marchio del Gruppo Bucci presente sui mercati mondiali con cinque marchi principali: Iemca, Giuliani, Sinteco, Riba Composites e Vire Automation. La struttura ospita tutte le attività di progettazione e di processo, tra quali accettazione, taglio, laminazione, lavorazione, finitura, incollaggio, verniciatura, assemblaggio, ispezione e consegna del prodotto. Scopo di questa azienda è garantire per ogni prodotto alte prestazioni meccaniche, rigidità e leggerezza dei componenti, riduzione della quantità di parti e delle lavorazioni, semplificazione di progettazione e flessibilità nelle forme e infine resistenza e stabilità dei materiali. L'azienda è composta da quattro divisioni produttive che sono: settore Marine, Aerospace, Automotive, Design&Automation. Dai particolari strutturali per veicoli ad elevate per-

formance, ai componenti per la nautica, al settore avio, l'estrema flessibilità e l'altissima capacità nella risoluzione di problematiche produttive complesse rendono Riba il partner ideale nelle più svariate aree applicative. RiBa ha a disposizione un valido impianto composto da numerose attrezzature:

- 5 autoclavi di diverse dimensioni, 3 forni
- Macchina a controllo numerico a 5 assi Belotti Clean
- Diverse clean-room climatizzate e celle frigorifere per lo stoccaggio delle materie prime
- Sala metrologica
- Proiettori Laser Virtek per il controllo del posizionamento delle pelli sugli stampi

Riba nasce alla fine del 1988 iniziando ad utilizzare la tecnologia dei materiali compositi avanzati presa dal mondo delle competizioni automobilistiche di altissimo livello. Questa azienda ha saputo svilupparsi con estrema rapidità in tutti i settori che richiedono al prodotto alte prestazioni tecniche, di peso e di qualità, tanto da guadagnarsi nel tempo la fiducia di clienti prestigiosi.

3.6.1 Settore automobilistico e motociclistico da competizione

Nel 1989 viene avviata la collaborazione con Ferrari per il progetto F40 diventando successivamente fornitore ufficiale dei team Ferrari F1 e Minardi (oggi Toro Rosso) e consolidando la partnership con Ferrari per il progetto F50. Nel 2003 inizia una importante collaborazione con Ferrari sul programma 360 Challenge e nel 2008 Riba produce gli interni per il programma Ferrari 430. Nell'anno 2009 si conferma partner preferenziale di Ferrari GT con la produzione di parti per le vetture F430, F149 e 599.

Viene avviata la collaborazione con Ducati Corse (Moto GP, 999) nel 2002 e 5 anni dopo diventa fornitore del programma Ducati Desmo16 RR (replica moto GP)

3.6.2 Settore navale

Riba Composites avvia la produzione dei primi alberi in fibra di carbonio per catamarani classe A nel 1992. Nel 2004 inizia la produzione di alberi in fibra di carbonio da 36 a 52 piedi fino ad acquisire una importante commessa per la produzione di 20 alberi del RC44 (imbarcazione da 44 piedi). Nel 2005 RiBa acquisisce una importante commessa nel settore della Nautica per la produzione di 20 alberi ed altri importanti componenti del progetto RC44 (imbarcazione monotipo da 44 piedi x competizioni sportive) gestito direttamente dallo skipper Russell Coutts. Nel 2006 diventa fornitore dei team di Coppa America +39 e Mascalzone Latino realizzando il famoso boma reticolare

3.6.3 Settore aeronautico, militare e spazio

Riba Composites diviene fornitore qualificato AVIO Group per la produzione dei scroll case, condotti filtranti per motori elicotteri nel 2004 e in un anno la produzione dei Scroll case assembly raggiunge i 150 kits anno. In quell'anno inizia la collaborazione con Aerosekur per la produzione delle parti strutturali dell'elicottero Agusta AW139. Nel 2006 viene scelta da uno dei maggiori fornitori italiani di interni per aeronautica e Boeing per un programma di "refurbish" degli interni degli aerei di linea delle compagnie aeree "Air India" e "Shenzen". Diviene poi partner con Selex Galileo per la produzione della struttura dell'UAV Falco e con Aerosekur per lo sviluppo e la produzione dei contenitori Eurocopter EC175. Nel 2011 Riba produce strutture spazio per Thales Alenia Space (satellite)

Al termine di un processo di rinnovamento raggiunge l'obiettivo della Certificazione di Qualità ISO 9002:1994. Successivamente completa il processo di riqualifica del proprio sistema di qualità secondo le norme ISO9001:2000.

La Ricerca di RiBa in collaborazione con i più rinomati istituti di ricerca italiani (ad es. ISTEC-CNR, Università di Bologna, Università di Genova) è

orientata allo sviluppo di nuove tecnologie e nuovi prodotti articolandosi su due livelli:

1. sviluppo processo (nuove tecnologie produttive)
2. sviluppo prodotto (nuovi materiali).

4 L'uso delle fibre ottiche nei componenti in materiale composito

In questo capitolo, fulcro dell'elaborato, successivamente alla trattazione del comportamento degli FBG per quanto riguarda i materiali compositi, verranno descritte le prove sperimentali che sono state effettuate in parte nei laboratori MasterLab nell'hangar dell'Università di Forlì e in parte nella sede principale della Riba Composites, a Faenza.

Le prove si propongono di studiare le problematiche di inclusione delle fibre nei materiali compositi e le loro prestazioni nei confronti delle misure di deformazione, a partire da provini semplici misurati in condizioni di riferimento. Il problema è affrontato, in particolare, nel caso di materiali compositi avanzati utilizzati in ambito nautico, ma molti risultati sono eventualmente estendibili ad altri campi di utilizzo dei materiali compositi. Il beneficio che se trae è un monitoraggio in tempo reale di materiali che sono difficili da studiare e modellare analiticamente a causa della anisotropia e disomogeneità che li caratterizzano. Nel linguaggio nautico, il bompresso è un componente che si può trovare montato a prua e che nelle imbarcazioni di fattura più moderna, in particolare barche da regata, viene armato per le diverse andature, ovvero su di esso sono installate le diverse attrezzature necessarie alla navigazione. Sul bompresso, che viene installato in posizione leggermente inclinata, sono fissate le vele chiamate focchi, ed è generalmente di materiale metallico o, negli ultimi anni, di materiale composito. La possibilità di produrre quest'albero in materiale composito infatti, assicura un aumento delle prestazioni e di resistenza del materiale nel tempo e nelle condizioni più varie.



Figura 21: Esempi di bompreso

L'utilizzo di questi materiali innovativi infatti garantisce, in quest'ambito navale e molti altri, alte prestazioni meccaniche, componenti leggeri e resistenti, riduzione del numero di parti e di lavorazione del pezzo, e semplificazione di progettazione, ma soprattutto una buona resistenza a temperatura, carichi, corrosione e fatica. Come già è stato detto, i materiali compositi si prestano bene al tipo di monitoraggio mediante FBG che si è voluto studiare e applicare nel corso di questa sperimentazione.

4.1 FBG nei materiali compositi

4.1.1 Misure di deformazione con FBG integrati

Lo schema di monitoraggio di Figura 22 fornisce una panoramica dei diversi passi necessari a collegare l'output di un FBG integrato con la deformazione della struttura in cui questo è inserito. Procedendo da destra a sinistra in questo schema di monitoraggio, la risposta del sensore (variazioni della lunghezza d'onda di Bragg) dovrebbe essere collegata alla deformazione del sensore (longitudinale e/o trasversale). Questo richiede un know-how di base (teorico e sperimentale) per quanto riguarda la dipendenza della deformazione degli FBG inseriti nelle fibre ottiche (passo 1, calibrazione). La forma dello spettro cured può giocare un ruolo significativo in questo. In secondo luogo, dato che il sensore (fibra ottica in vetro di silice) e il materiale ospitante (plastico rinforzato in fibra) sono caratterizzate da proprietà, dovrebbe essere

valutata l'interazione meccanica tra il sensore inserito e il materiale ospitante per determinare il campo di deformazione nella struttura in prossimità della fibra ottica (questo è il passo 2, relazione di trasferimento della deformazione). Nel terzo e ultimo passo, la deformazione in alcuni punti distinti della struttura può essere usata come misura per la sua condizione globale (passo 3, sensori multipli), ad esempio, il campo di deformazione nella struttura lontano dalla fibra ottica. Di seguito ci si concentra sui primi due passi dello schema.

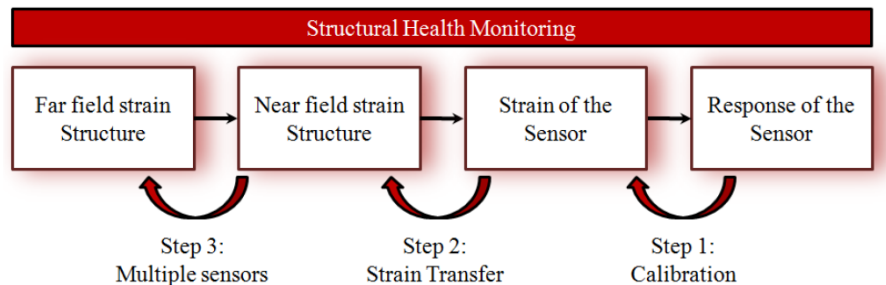


Figura 22: Diagramma di flusso dei diversi passi necessari per il monitoraggio dello stato strutturale impiegando un sensore a fibra ottica integrata

4.1.2 Risposta del Sensore FBG

4.1.2.1 Calibrazione di un FBG non integrato

La calibrazione di un FBG non integrato, o passo 1 (Figura 22), è già stata ampiamente affrontata in letteratura senza considerare il caso integrato. Questa dovrebbe essere suddivisa in calibrazioni di deformazione longitudinale e deformazione trasversale. Le calibrazioni di deformazione longitudinale degli FBG sono più o meno semplici e quindi, sono riportati solo pochi risultati di ricerca. Per esempio è stata fissata la fibra in mezzo a due displacement stages, in cui può essere applicata una deformazione nota tramite un micrometro calibrato. È stata determinata la sensibilità alla deformazione longitudinale di un internal elliptical cladding fibre. Si dovrebbe, tuttavia,

ricordare che questo metodo non è adatto per fibre localmente non rivestite. La deformazione varierà significativamente se si confronta una sezione rivestita della fibra con la sezione di una fibra localmente non rivestita. Quindi, si introducono grandi errori quando si determina la sensibilità alla deformazione. Per determinare la sensibilità alla deformazione degli FBG non rivestiti, è necessario misurare il carico applicato durante la calibrazione e metterlo in relazione con lo sforzo/deformazione nella fibra.

Quando si prevedono deformazioni trasversali è necessario un approccio differente. Generalmente, si usa un set-up per un test di compressione diametrale per le calibrazioni di deformazione trasversale (Figura 23). Applicando un carico diametrale su una fibra ottica assial-simmetrica nella quale è inscritto un FBG, si genera un ben noto stato di deformazione piana ($\epsilon'_3=0$). Successivamente, sostituendo questo stato di deformazione dell'Equazione 5 possono essere determinati sperimentalmente i coefficienti strain-optic. In letteratura vengono proposti diversi design per le calibrazioni di deformazione trasversale, che possono essere suddivisi in due gruppi principali. Il primo gruppo impiega un braccio dotato di leveraggi e dei pesi calibrati per caricare le fibre, l'altro gruppo comprime direttamente le fibre con pesi calibrati o con una prova al banco (Figura 23). Nel primo gruppo, sono state usate due fibre di supporto e una fibra di prova per quantificare l'effetto dei carichi trasversali sullo spettro di Bragg. Le due fibre di supporto possono, tuttavia, compromettere la misurazione, dal momento che il carico dovrebbe essere esattamente sulla cima della fibra di prova e tutte le fibre dovrebbero avere esattamente lo stesso diametro. Pertanto, è stata poi usata solo una fibra di supporto. Successivamente, è stato migliorato il set-up della prova riducendo il numero di puntine in acciaio. Il set-up della prova risultante è mostrato in Figura 23(a). Nel secondo gruppo, le differenze tra i diversi set-up delle prove sono soprattutto dovuti all'uso o meno di perni per la guida dello stampo di carico. Rimuovendo i perni guida, tutto l'attrito viene rimosso dal sistema, tuttavia, quando lo stampo di carico si sposta durante

la calibrazione, l'orientazione delle fibre ottiche (certamente per le fibre di mantenimento della polarizzazione, o fibre PM) diventa incerto.

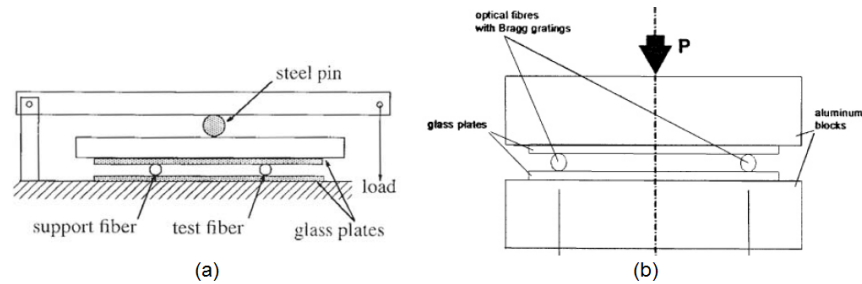


Figura 23: (a) Strumento di calibrazione che sfrutta un leveraggio per caricare un FBG e la fibra di supporto. (b) Strumento di calibrazione che sfrutta una pressa di carico per caricare simultaneamente due FBGs

Entrambi i metodi sono per lo più impiegati per la calibrazione di FBG inseriti in fibre ad alta bi-rifrangenza (fibre HiBi). Spesso le variazioni di Bragg ottenute sono solo collegate con la forza diametrale applicata (in N/mm) e non con il campo di deformazione necessariamente indotto al centro della fibra. Le parti che applicano uno sforzo in queste fibre HiBi rendono difficile la previsione di tali campi di deformazione. Quindi, non è affatto semplice definire gli esatti coefficienti strain-optic di fibre di questo tipo. Inoltre, in gran parte di questi set-up i ricercatori impiegano un singolo FBG e una fibra fittizia (*dummy*) di supporto per distribuire il carico applicato. In questo modo, può essere fatta la media delle possibili asimmetrie dovute al mal allineamento dei carichi applicati.

4.1.2.2 Risposta spettrale di un FBG dopo l'inserimento

A seconda della morfologia del composito, nel quale lo FBG è inserito e al rivestimento del FBG, lo spettro riflesso del reticolo di Bragg (dopo la cura) può restare uniforme, distorta in zone specifiche (specifically distorted) o in zone randomiche (highly randomly distorted). La distorsione dello spettro del FBG è principalmente causata dall'esistenza di deformazioni resi-

due, che si creano durante il processo di fabbricazione del composito. Queste deformazioni esistono in assenza di ogni carico esterno (meccanico e termico). A livello microscopico queste derivano dallo sfasamento delle proprietà dei materiali fra le fibre di rinforzo (rigide) e la resina (cedevole). A livello macroscopico, possono derivare dall'anisotropia degli strati (es., laminati non bilanciati, non simmetrici). Per strutture composite in generale, queste deformazioni giocano un ruolo importante nelle prestazioni meccaniche future. In letteratura, è stato affrontato l'inizio e la crescita della distorsione spaziale e ne vengono dati alcuni esempi. Inserendo le fibre in mezzo a due strati intermedi parallelamente alle fibre di rinforzo, la forma dello spettro rimane inalterata durante il processo di riscaldamento. Tuttavia, all'inizio del processo di raffreddamento, compaiono deformazioni residue favorite dalla contrazione termica, che influenzano lo spettro e portano anche ad una divisione del picco di Bragg. Questa divisione indica che si è sviluppata una certa componente di deformazione trasversale ($\Delta\epsilon'_1 - \Delta\epsilon'_2$) durante il processo di vulcanizzazione. Di seguito sono mostrati in Figura 24 gli spettri di riflessione di un sensore FBG, che è stato inserito in un laminato, misurati durante il ciclo di cura durante il processo di riscaldamento e durante il processo di raffreddamento, per un sensore non rivestito e per un sensore rivestito

Confrontando l'influenza della deformazione residua di vulcanizzazione che si trova in sensori FBG non rivestiti, rivestiti di poliammide normali e rivestiti di poliammide di piccolo diametro (inserite in un laminato cross-ply $[0_2, 90_4, 0_2]$ nello strato a 0 gradi, a contatto con lo strato a 90 gradi.), si è visto che durante il processo di riscaldamento, la forma dello spettro di tutti i sensori è rimasta inalterata (Figura 24 (a)). Durante il processo di raffreddamento, nei sensori FBG non rivestiti, si producono effetti di birifrangenza nella fibra ottica, che portano ad uno spettro con due diversi picchi (Figura 24 (b)). Questa divisione dello spettro non è stata osservata per le FBG integrate e rivestite di poliammide (Figura 24(c)), questo indica che

una fibra rivestita mostra una specie di effetto “buffering” per le deformazioni trasversali.

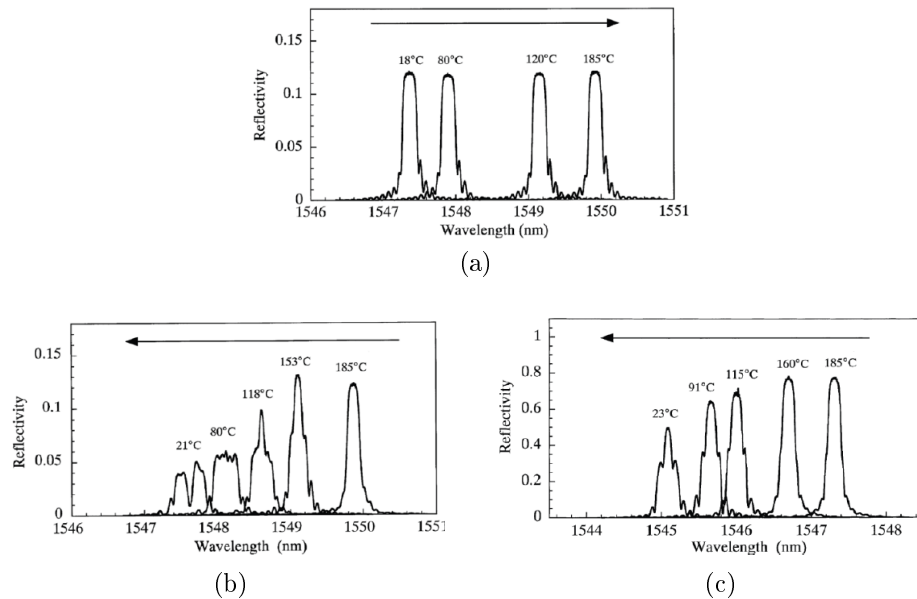


Figura 24: Spettri di riflessione di un sensore FBG, che è stato inserito in un laminato, misurati durante il ciclo di curing. (a) Durante il processo di riscaldamento e (in basso) durante il processo di raffreddamento, (b) per un sensore non rivestito, (c) per un sensore rivestito.

Dovrebbe essere chiaro che ogni tipo di distorsione necessita un diverso approccio per determinare le componenti di deformazione della struttura in cui è inserito il sensore. Esempi di risposte spettrali di FBGs inseriti in diversi laminati FRP, sono mostrati in Figura 25. Una panoramica dei possibili metodi per interpretare questi spettri è fornita nella prossima sezione.

4.1.2.3 Determinazione della Lunghezza d'Onda di Bragg

L'interpretazione dello spettro di Figura 25(a) è semplice. Durante una calibrazione longitudinale, lo spostamento dello spettro può essere direttamente collegata con il fattore di misura del FBG. Sono stati riportati diversi metodi per analizzare lo spostamento di tale spettro fra i quali l'algoritmo

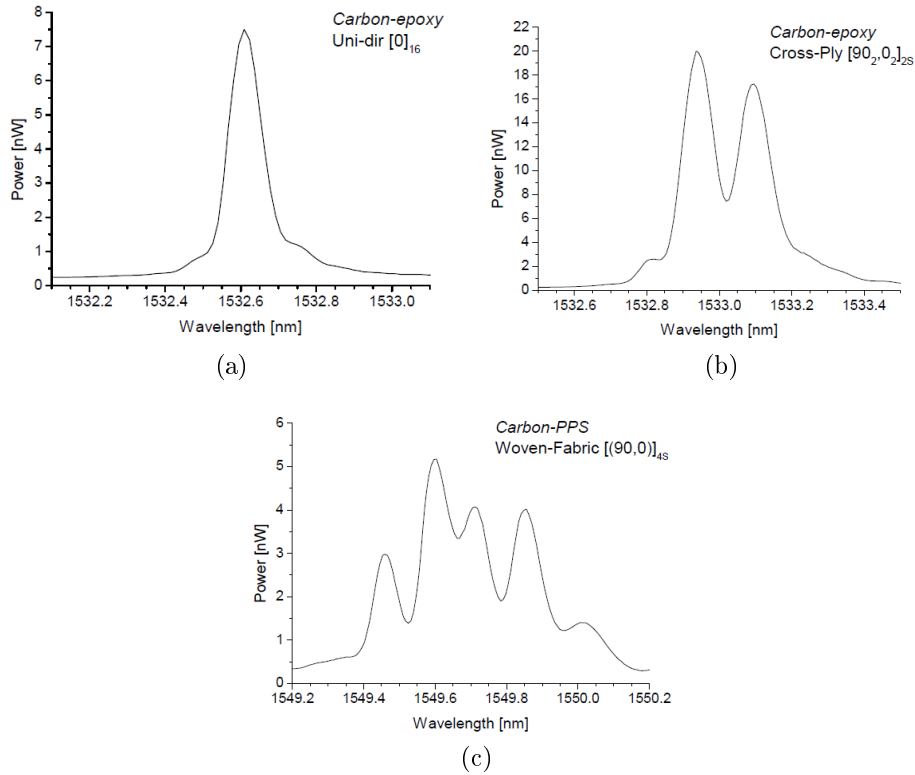


Figura 25: Spettro di un FBG non rivestito inserito (a) in un laminato unidirezionale, (b) in un laminato cross-ply, (c) in un laminato cross-ply woven fabric.

“Full Width at Half Maximum” (FWHM) e l’algoritmo “centro di gravità” (COG) o “centroide” sono quelli più diffusi. Notiamo che la misura della lunghezza d’onda di Bragg dipende prima di tutto dalla stabilità e dalla riproducibilità degli interrogatori adottati. L’algoritmo di misura dell’interrogatore, tuttavia, è importante. La determinazione della lunghezza d’onda di Bragg usando un algoritmo FWHM può essere diversa da una lunghezza d’onda di Bragg determinata usando un algoritmo di calcolo centroide. Questo è dovuto all’influenza delle caratteristiche del reticolo (principalmente l’uniformità della forma spettrale, l’ampiezza) e dalla densità di campionamento dello spettro del FBG, così come all’incertezza dell’algoritmo di fit

della curva per la determinazione della lunghezza d'onda di Bragg. Per il secondo spettro (Figura 25(b)), le deformazioni residue presenti durante il processo di produzione di un laminato di carbonio e resina epossidica cross-ply causano la divisione dello spettro in due picchi di Bragg ben separati uno per ogni modo di propagazione. Bisognerebbe dire che lo FBG usato in questo esempio è non rivestito e quindi non distanziato dalle deformazioni trasversali presenti nel materiale. Di conseguenza, nella maggior parte dei tipi di carico, la variazione della lunghezza d'onda della luce che viaggia in accordo ad entrambi gli autovettori (1' e 2') sarà diversa a causa di un diverso cambiamento dell'indice di rifrazione provocato dal campo di deformazione presente al centro della fibra ottica (Equazione 5). Entrambi i picchi di Bragg possono quindi essere monitorati separatamente (algoritmo FWHM o COG). Aggiungendo uno o diversi altri FBG, si può pensare di creare un sensore di deformazione multi-assiale.

Gli FBG possono essere considerati sensori puntuali. Tuttavia, i gradienti di deformazione locale (assiale così come la deformazione trasversale) possono seriamente distorcere lo spettro di Bragg. La differenza fra entrambi è spesso difficile da fare. Un metodo per fare la differenza fra entrambi i tipi di può essere trovato nel controllo della polarizzazione della luce di input inviata nella fibra ottica (Figura 26).

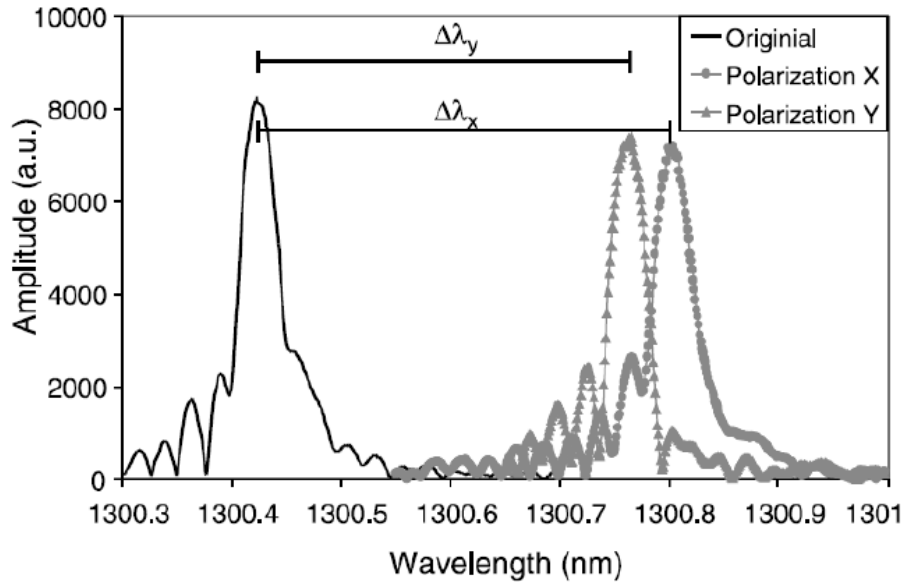


Figura 26: Misure spettrali di un FBG integrato prima e dopo la cura, usando un laser regolabile con controllo della polarizzazione. I due picchi a destra rappresentano i due maggiori assi di polarizzazione

A parte questo, i gradienti possono essere collegati con il processo di inserimento del FBG nel materiale composito o possono originarsi da una specifica condizione di carico (es, flessione). Per esempio la Figura 25(c) mostra lo spettro di un FBG inserito in un composito termoplastico tessuto satin a 5 filamenti.

È chiaro che, per spettri di FBG fortemente distorti, una semplice tecnica di demodulazione come l'algoritmo FWHM non soddisferà la necessità di quantificare la deformazione globale di una struttura sottoposta a carico. Pertanto, sono necessarie alcune nuove tecniche per prevedere la deformazione in una struttura, e forse altri parametri del reticolo potrebbero essere misurati contemporaneamente. Uno spettro di un FBG inserito in una fibra ottica multimode tipicamente è composto da più di un picco (che dipende dai modi riflessi).

4.1.3 Trasferimento della deformazione tra il sensore a Fibra Ottica e il materiale ospitante

Nel passo di trasferimento della deformazione (passo 2, Figura 22), bisogna trovare una relazione tra la deformazione misurata nella fibra ottica e quella nel materiale composito. Preventivamente, dovrebbe essere fatta una chiara distinzione fra il sensing uni-assiale e quello multi-assiale.

4.1.4 Applicazioni di sensing di deformazione uni-assiale

Per applicazioni di sensing di deformazione uni-assiale, la fibra ottica è solitamente dotata di uno strato polimerico di protezione, cioè, un rivestimento della fibra. Se si considera una fibra ottica integrata, il rivestimento si comporterà come interfaccia tra la fibra e il materiale ospitante. È chiaro che questo può avere un certo impatto sul trasferimento delle deformazioni dalla matrice alla fibra e scegliendo il giusto rivestimento, il trasferimento della deformazione può essere migliorato secondo certe direzioni principali. Per esempio, è possibile scegliere un rivestimento per il quale possono essere evitate le concentrazioni di sforzo attorno alla fibra e minimizzate le distorsioni del composito. Gran parte della ricerca sui meccanismi di trasferimento della deformazione si riferisce a FBG montati sulla superficie. Si dovrebbe, tuttavia, evidenziare che la relazione tra la deformazione del sensore rispetto a quella del substrato per sensori di deformazione FBG montati superficialmente, inseriti in un sottile strato adesivo, e vincolati alla superficie di una struttura è sostanzialmente diversa da quella di sensori di deformazione integrati. Nel primo caso, lo spessore dello strato adesivo e le proprietà meccaniche di questo strato hanno una certa influenza sulla deformazione trasferita dalla struttura al FBG attaccato. Inoltre, quando viene attaccato ad un substrato sottile e a basso modulo di elasticità, il FBG potrebbe cambiare la deformazione originale del substrato. Il trasferimento della deformazione è comandato da:

- spessore adesivo tra la parte bassa della fibra e il substrato
- lunghezza del vincolo della fibra

Dato che le fibre inserite sono completamente circondate da materiale ospitante, non si può parlare di spessore del vincolo e di lunghezza del vincolo nel secondo caso. Quanto a questo, evidenti gradienti di deformazione esistono solo oltre ~ 2 mm (in base alle proprietà del materiale) a partire dal punto di ingresso della fibra inserita.

In alcuni casi, nelle applicazioni di sensing di deformazione assiale si sceglie di non rivestire la fibra (recoating) all'altezza del FBG. In questo modo, la deformazione agisce direttamente sulla superficie del rivestimento del sensore a fibra ottica.

4.1.4.1 Problemi tecnici riguardanti l'inserimento di FBG nei materiali compositi Nonostante i molti vantaggi dei sensori a fibra ottica integrati, inserirli nelle strutture porta ad una serie di problemi specifici che devono essere affrontati. Un importante problema è il punto di accesso della fibra ottica introdotta nel materiale composito, che è soggetto a rottura. Esistono due principali opzioni per proteggere il punto di uscita della fibra nei laminati compositi: o inserendo un connettore della fibra nel bordo o sulla superficie del laminato o l'inserimento di un meccanismo di fibre feed-through cioè passante. Entrambi i metodi permettono far uscire agevolmente la fibra ottica dal laminato rigido (bordo o superficie) senza una flessione e una curvatura eccessive. Tuttavia, decenni di studi hanno permesso ai ricercatori di trovare il punto d'ingresso ideale in un materiale che è insensibile alla delaminazione. Forse ci si dovrebbe concentrare sull'eliminazione del punto di ingresso completamente tramite la trasmissione wireless dei dati dal sensore integrato all'unità di visualizzazione. Un altro problema è la distorsione della struttura in composito nelle vicinanze della fibra ottica. Le dimensioni del sensore FBG variano da $125 \mu m$ (che è una classica fibra per telecomunicazioni) fino a $52 \mu m$. Queste sono ancora di un ordine di grandezza più

grande delle fibre di rinforzo usate più comunemente (vetro: 5-20 μm , carbonio: 5-10 μm). Perciò, le fibre ottiche inserite causeranno inevitabilmente una distorsione locale nel materiale ospitante (Figura 27).

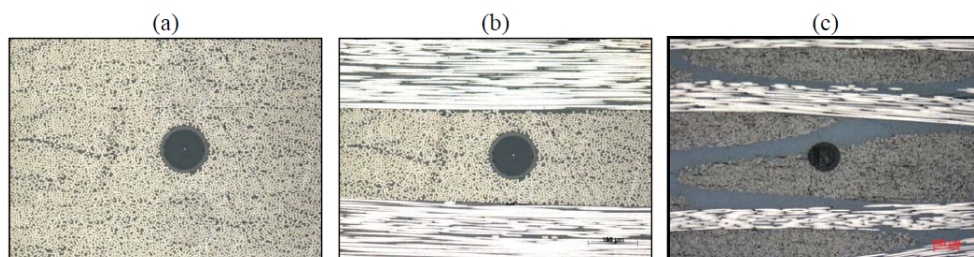


Figura 27: FBG inserito in un laminato unidirezionale (a), in un laminato cross-ply (b), in un laminato cross-ply woven fabric (c).

Il rimpicciolimento delle fibre ottiche ridurrà la distorsione del composito. Tuttavia, non solo l'accoppiamento sbagliato nelle dimensioni tra le fibre ottiche e le fibre di rinforzo, ma anche il tipo di materiale composito che viene usato (unidirezionale, woven fabric, stitched, intrecciato, ecc), e l'allineamento relativo delle fibre ottiche rispetto alle fibre di rinforzo influenza la distorsione. La ricerca ha dimostrato che fibre ottiche di piccolo diametro non provocano una riduzione significativa nella resistenza dei compositi e fibre ottiche standard di 125 μm producono un perturbazione minima del materiale ospitante quando vengono inserite parallelamente alle fibre di rinforzo nei laminati. Inoltre, per fibre ottiche di piccolo diametro, non vengono individuate regioni ricche di resina (anche dette tasche di resina) attorno alla fibra, come al contrario in alcuni casi, possono essere trovate per fibre ottiche standard per telecomunicazioni. Shivakumar ed Emmanwori hanno inserito fibre ottiche con un orientamento relativo rispetto alle fibre di rinforzo e hanno scoperto che le proprietà strutturali non erano influenzate quando le fibre venivano inserite parallele alle fibre di rinforzo.

4.1.4.2 Tecniche di misura della deformazione con FBG integrato

L'analisi di resistenza strutturale non considera il disturbo del campo di

deformazione nel materiale composito. Il campo di deformazione attorno ad una fibra ottica inserita è notevolmente modificato e gli sforzi interfacciali aumentati. Inoltre, il campo di sforzo/deformazione presente nel materiale composito ospitante sarà significativamente diverso da quello presente nel centro della fibra ottica, a causa delle differenti proprietà meccaniche di entrambi i materiali.

4.2 Riassunto dei precedenti studi eseguiti sul progetto

Per avviare questo studio si è partiti da un lavoro già precedentemente sviluppato nei laboratori MasterLab dall'Ingegnere Stefano Chiozzini. Egli ha effettuato prove sperimentali di laboratorio su campioni per prove unificate necessarie per la ricerca sviluppata e modellazione FEM per la simulazione di un prototipo di componente da testare in laboratorio. In particolare la modellazione è risultata utile per capire dove installare i sensori all'interno del laminato, e che livelli di deformazioni attendersi in funzione dei carichi applicati, al fine di analizzare tutte le sollecitazioni ed avere stime delle configurazioni possibili.

L'attività ha messo in luce una moltitudine di informazioni che non era possibile rilevare con la sola lettura della bibliografia sull'argomento, fornendo le basi per gli sviluppi qui presentati. Dalla sperimentazione svolta, si è potuto evincere che per quanto riguarda l'aspetto tecnico, l'inglobamento delle fibre nel materiale composito è adatto a questo scopo preposto e la laminazione RiBa per quanto riguarda il componente non inficia le possibilità di misura della deformazione.

Viene specificato inoltre che il ciclo termico a 95°C per 8 ore e la pressione a 3 bar, sono compatibili sia con le fibre rivestite in acrilato che con quelle rivestite in poliammide, mentre cicli a pressioni e temperature maggiori non hanno mostrato buoni risultati per quanto riguarda le fibre ricoperte in acrilato. Sono state riportate numerose difficoltà tecniche per quanto riguarda

la maneggiabilità delle fibre e la loro resistenza ai cicli di polimerizzazione dovute alla fragilità delle stesse per le quali è necessaria notevole attenzione.

Oltre ai problemi legati alla stesura si trovano complicazioni nel percorso da imporre alle fibre, in quanto la sezione dell'albero di una barca a vela in materiale composito attuale, ha tutti i sistemi di movimentazione delle vele e il passaggio di cavi elettrici interno della sezione stessa che obbliga a produrre nel profilo dell'albero svariati fori, asole, scassi, aperture di diversa forma, che in larga parte sono fatte con operazioni di taglio successive alla produzione del componente in autoclave. I sensori FBG per contro avrebbero bisogno di essere disposti nel modo più lineare e ordinato possibile. L'albero in questione viene prodotto tutto d'un pezzo e quindi è possibile stendere una fibra ottica unica lungo tutto il profilo, ma si deve fare forte attenzione alle estremità.

Ulteriori difficoltà si sono riscontrate per quanto riguarda l'estremità della fibra uscente dal componente che provoca diverse problematiche di natura tecnica, perché è molto difficile far uscire la fibra in modo perpendicolare dal laminato; inoltre l'uscita normale dalla superficie dello stampo o del sacco produce un forte schiacciamento della fibra ottica e potrebbe provocarne la rottura se non protetta adeguatamente. Essendo tuttavia integre alcune delle fibre inserite nei provini, è stato possibile ottenere la misurazione della deformazione a seguito della produzione del pezzo. In questa fase precedente, sono state riscontrate buone ripetibilità e dinamica di misura paragonabili ai comuni estensimetri tradizionali; buoni risultati si sono infatti ottenuti dal confronto delle misure effettuate con estensimetri.

Si è constatato inoltre che l'utilizzo di fibre già connettorizzate da inserire nei laminati è sconsigliabile, poiché esse hanno mostrato una scarsa propensione a subire sia cicli termici che di pressione, in quanto, nei casi in cui è stata montata questo tipo di fibra, essa si è sempre spezzata.

Ciò comporta l'eventualità di creare provini con FBG non connettorizzati, ed effettuare la connettrizzazione in un momento successivo.

Non era poi stato possibile effettuare delle misurazioni attendibili utilizzando fibre depositate alla mezzeria del provino, quindi internamente allo strato, e le misurazioni dell'entità di attenuazioni era risultata accettabile unicamente per fibre depositate superficialmente.

Considerando le problematiche tecniche e l'elevatissima difficoltà di ottenere una posa superficiale in un eventuale ambito di produzione aziendale, risultava quindi necessario verificare se utilizzando fibre ricoperte in poliammide è possibile ottenere un buon risultato se depositate in mezzeria, o comunque tra gli strati del laminato.

Ai risultati ottenuti in questa sessione di prove si affiancano quelli precedentemente rilevati durante il lavoro precedente per quanto riguarda i provini al cui interno erano stati installati fibre ricoperte in acrilato. Il confronto delle letture estensimetriche fra sensori convenzionali e sensori FBG, ha permesso una prima verifica dell'affidabilità dei sensori ottici.

I campioni che sono stati prodotti sono due, e seguono i principi e le caratteristiche di quelli laminati in questa sessione. Essi sono caratterizzati da:

- 20 ply di unidirezionale
- Materiale: MTM 57 T700S, spessore 0,12 mm e grammatura 150 g/mm²
- Sequenza di laminazione creata: [0,90,90,0,90,90,0,90,90,0]s
- Ciclo di cura di 95°C con tempo di permanenza pari a 8 ore, pressione mantenuta a 3 bar
- Dimensioni:
 - Lunghezza: 250 mm
 - Larghezza: 50 mm
 - Spessore: circa 2,4 mm

- Lunghezza d'onda nominale dei sensori FBG installati: 1551,306 nm e 1551,093 nm rivestimento della fibra in acrilato
- Estensimetri con resistenza caratteristica pari a 350 ohm e gauge factor K_{SG} di 2,1

Nei due campioni prodotti (Figura 28) in un caso la fibra ottica è stata disposta in superficie fra stampo e lamine di preimpregnato (provino “Acrilato-1”), mentre nel secondo caso la fibra è stata posata in mezzeria (provino “Acrilato-2”) (Tabella 1)

	Provino Acrilato 1	Provino Acrilato 2
$\lambda(\text{nm})$	1551,306	1551,093
Recoating	Acrylate	Acrylate
Posizione	Superficiale	Intermedia

Tabella 1: Caratteristiche delle fibre utilizzate nei provini in acrilato

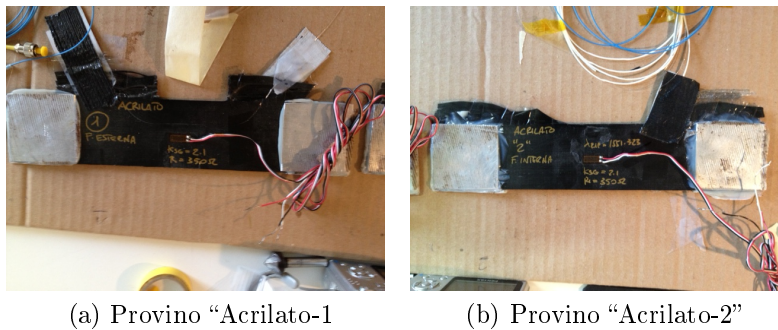


Figura 28: Provini con fibra ricoperta in acrilato

Da queste prove risultava che il sensore in superficie sembrava essere meno preciso del caso con sensore inglobato. In più anche il rivestimento in acrilato di cui sono ricoperti entrambi i campioni non risulta molto idoneo a questo tipo di misure, perché risulta poco adatto all'uso rispetto a uno in poliammide e ciò può aver contribuito a rilevare una deformazione inferiore.

Ad ogni modo, in entrambi i casi al di sotto dei $1000 \mu\epsilon$ la differenza fra le due letture dei sensori collegati ad entrambi i casi in prova è inferiore al 4-5% (Figura 29)

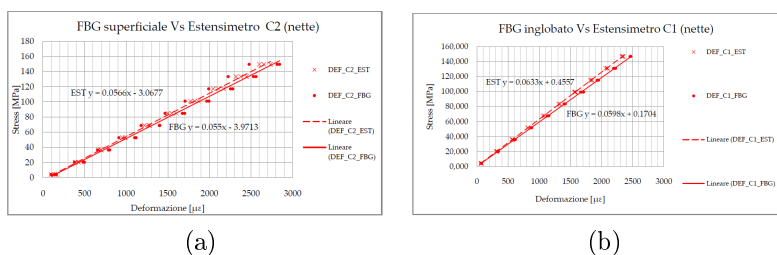


Figura 29: Risultati ottenuti per provini con fibra ricoperta in acrilato per il provino 1 (a) e il provino 2 (b)

In base a queste informazioni e a questi dati, è stato possibile proseguire la sperimentazione proponendoci inizialmente di produrre campioni mediante FBG in fibre ricoperte in kapton, effettuare test a trazione e flessione insieme ai due provini già precedentemente laminati al cui interno è stata inserita una fibra rivestita in acrilato. Successivamente, grazie alla collaborazione con RiBa, lo scopo è stato quello di testare questa tecnologia nella produzione del bompreso.

4.3 Applicazione di altre tipologie di fibre

Come prima fase del lavoro, non avendo rilevanti riferimenti su cui basarsi, è stato fondamentale verificare quali fossero le problematiche riguardanti l'aspetto tecnologico. Per questo sono stati creati, e successivamente testati dei provini di piccole dimensioni che permettessero una prima valutazione del comportamento delle fibre rivestite in kaptonal loro interno.

In particolare, l'attività si è concentrata sui problemi relativi all'inserimento di questa fibra all'interno del composito e alla relativa possibilità di ottenere una misura che non venisse inficiata durante il ciclo di polimerizzazione. Oltre agli aspetti tecnologico-pratici che riguardano l'ingloba-

mento delle fibre, infatti, si possono verificare alterazioni dell'attenuazione caratteristica della fibra e rotture premature delle fibre.

Questa prima fase di prove è stata dovuta alla necessità di riuscire a valutare alcuni aspetti fondamentali per quanto riguarda l'inserimento delle fibre, quali:

- tipologia e disposizione delle fibre
- ciclo di polimerizzazione
- interfaccia di ingresso e uscita dal laminato

Si è proceduto quindi con la laminazione di provini piani con lo scopo di verificare la migliore soluzione per quanto riguarda i punti sopra elencati. Questa fase è molto importante poichè i risultati determineranno la soluzione che verrà scelta per le successive sessioni di prove, in quanto bisogna garantire alle fibre la possibilità di trasportare il segnale a lunga distanza, e ciò può avvenire in maniera corretta solo se le fibre non vengono alterate o deteriorate durante la polimerizzazione e la posa. Una eccessiva attenuazione infatti non permette una buona misurazione poichè il segnale luminoso inserito nella fibra non è in grado di leggere tutte le informazioni dai sensori.

4.3.1 Accorgimenti da considerare durante la laminazione

4.3.1.1 Normativa ASTM 3039

Per regolare le metodologie di caratterizzazione dei materiali compositi si fa riferimento alla Normativa ASTM 3039 che definisce le tecniche, le pratiche e le dimensioni dei campioni e dei metodi utilizzati per riportare i risultati.

Visto che il materiale risente grandemente della tecnica di produzione e delle metodologie di prova, è fondamentale la sua caratterizzazione; per questo motivo ci si deve attenere alle normative che uniformano le tecniche e garantiscono livelli qualitativi particolarmente elevati.

Le regole fondamentali per il dimensionamento dei provini sono le seguenti:

- forma rettangolare,
- sezione costante
- spessore del campione: secondo necessità.
- larghezza minima: lunghezza tab + 2 volte la larghezza + lunghezza degli eventuali estensimetri
- larghezza del provino come da tabella seguente (Figura 30)


 D 3039/D 3039M – 08

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations^a

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Figura 30: Dimensioni dei provini secondo la Normativa ASTM 3039

Data la scelta effettuata per quanto riguarda il tipo di materiale utilizzato e la sequenza di laminazione, dalla tabella in Figura 30 vediamo che il nostro caso fa riferimento a quello bilanciato e simmetrico, alla terza riga.

La prova da noi impostata si è quindi basata su provini rettangolari di sezione costante con le seguenti caratteristiche:

- lunghezza: circa 250 mm
- larghezza: circa 50 mm
- spessore: 3.1 mm
- sequenza di laminazione creata: [0,90,90,0,0,90,90,0,0,90,90,0]s
- 24 ply di unidirezionale
- materiale: MTM 57 T700S, spessore 0,12 mm e grammatura 200 g/mm²

4.3.1.2 Tipologia di fibre

Per quanto riguarda la tipologia delle fibre, è stato possibile effettuare prove di carico su provini con fibre rivestite in acrilato ed altri con fibre rivestite in kapton. Questi ultimi sono stati laminati durante questa sessione di prove nei laboratori MasterLab dell'università di Forlì, mentre i primi erano già stati prodotti durante il precedente lavoro descritto in 4.2.

In entrambi i casi, le fibre sono dotate di sensori FBG fotoincisi caratterizzati da una lunghezza attiva di circa 10 mm. Per quanto riguarda i provini realizzati in questa sessione di prove, vengono riportati successivamente i dati caratteristici per ognuno di essi.

Nella tabella seguente (tab.2) sono riportate le caratteristiche principali delle fibre utilizzate per ognuno dei tre provini

	Provino 120	Provino A	Provino C2
Product Name	FBG	FBG	FBG
Model number	FBG-SM-1541	FBG-SM-1536	FBG-SM-1532
λ (nm)	1540,98	1536,47	1531,91
Riflettività (dB)	>90%	>90%	>90%
Fiber Type	SM Polyimide coating	SM Polyimide coating	SM Polyimide coating
Recoating	Polyimide	Polyimide	Polyimide
Serial Number	20120112154100/01	20120112153605/01	20120112153200/01

Tabella 2: Caratteristiche principali delle fibre nei provini

4.3.1.3 Disposizione delle fibre

Il secondo fattore che differenzia i provini consiste nel posizionamento: si è voluta verificare la differenza tra la condizione di fibre inserite a metà dello spessore e quelle inserite invece in superficie, ovvero all'ultimo strato di composito depositato. La disposizione scelta per le fibre è invece comune a tutti i campioni: esse vengono disposte a "U" come mostrato in Figura 31.

La soluzione adottata è un compromesso tra la necessità di mantenere la direzione dell'FBG parallela all'asse principale del campione e l'esigenza di far uscire le estremità delle fibre dai provini per poterle connettere

ed effettuare le misurazioni durante le prove di carico. Risulta fondamentale imporre raggi di curvatura non eccessivamente bruschi per evitare che la fibra si danneggi sia durante la posa sia successivamente in autoclave.

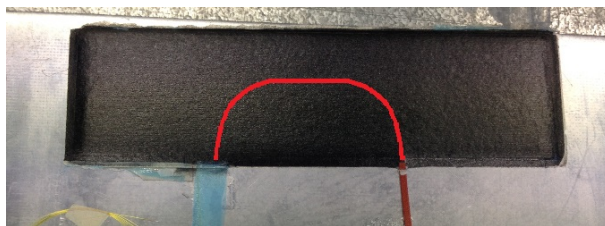


Figura 31: Schema della disposizione delle fibre all'interno dei provini

Dalla bibliografia risulta che la disposizione migliore delle fibre ottiche rispetto alle fibre di carbonio sarebbe quella in cui queste sono tra loro parallele; ciò migliorerebbe la qualità della misura minimizzando gli effetti meccanici come gli scorrimenti indotti dalle variazioni locali della struttura. Rimane tuttavia da verificare il comportamento dell'inserimento di fibre in materiali compositi prodotti con ply in tessuto.

4.3.1.4 Cicli di polimerizzazione e procedimento in autoclave

Un fattore di differenziazione nei provini è stato il ciclo di cura: la prima soluzione consiste in un ciclo di 8 ore alla temperatura di 95°C, in alternativa il ciclo ha la durata di 1 ora a 120°C.

La scelta della prima metodologia si basa essenzialmente sul tipo di cura in autoclave che viene effettuata in RiBa, a cui ci si è voluti attenere il più possibile. Si è voluto tuttavia verificare che i provini fossero in grado di resistere anche a situazioni maggiormente difficoltose per quanto riguarda la resistenza della fibra alle condizioni a cui viene sottoposta in un ciclo a temperature maggiori, ma con tempistiche più brevi, soluzione che può ritenersi interessante per RiBa, per eventuali sviluppi futuri.

Per quanto riguarda la preparazione alla cura in autoclave, è fondamentale prendere alcuni accorgimenti che sono già stati trattati nel capitolo 3.4.

I metri di fibra ottica lasciati liberi dopo le estremità, devono essere protetti con dei sacchetti appositamente preparati con della pellicola distaccante per contenere il rotolo di fibre in eccesso, in modo da garantire, a processo ultimato, la pulizia delle fibre ottiche e una più facile protezione delle stesse (Figura 33)

È necessario inoltre disporre di distaccante liquido per tutte le superfici più esposte al flusso di resina in eccesso, anche questo per prevenire l'incollaggio di parti. Il campione è stato creato facendo uso di stampo e controstampo, e il processo di insaccamento e di cura sono stati quelli caratteristici della tecnologia in autoclave e descritti nel capitolo 3.4. Tutti i campioni sono quindi stati insaccati nel modo tradizionale.

Tutte le fasi di laminazione sono sempre state svolte nell'hangar della facoltà, dove è presente tutto il materiale e la strumentazione necessari per la laminazione, la cura, l'ispezione dei pezzi prodotti.

4.3.1.5 Interfaccia al bordo del provino

All'interfaccia di uscita delle fibre dal composito sono stati presi alcuni accorgimenti: nonostante esse siano state depositate direttamente sulle lamine, nel punto di uscita dal provino, che è la regione più critica, alcune delle fibre sono state ricoperte da una guaina protettiva resistente alla temperatura per valutare se un rinforzo aggiuntivo permette di evitare la rottura della fibra.

Si è pensato di fare uso di una particolare guaina in materiale resistente alla temperatura in modo da proteggere la fibra proprio in quei circa 10 cm critici prima delle due uscite dal pezzo.

Il materiale usato è il cosiddetto *sterling*, tessuto intrecciato in poliammide rivestito a sua volta da un materiale gommoso di protezione, in questo caso in neoprene.

Essendo questo materiale in grado di resistere a temperature fino a circa 400°C, è adatto alle applicazioni su cui dovrà essere montato, anche in previsione di inserimento delle fibre ottiche in pezzi RiBa. Sono stati utilizzati

due tipologie di guaine differenti (Figura 32) di cui si elencano le principali caratteristiche di seguito:

- guaina rossa: diametro manicotto 2.5mm; diametro massimo cavo 4.5mm; diametro minimo cavo 2.5mm; espandibile; materiale neoprene; spessore parete 0.6mm
- guaina gialla: diametro manicotto 1.8mm; diametro massimo cavo 3.5mm; diametro minimo cavo 1.75mm; espandibile; materiale neoprene; spessore parete 0.5mm



Figura 32: Guaine protettive Sterling utilizzate all'interfaccia

Particolare attenzione inoltre è stata posta sulla disposizione del distaccante; bisogna infatti tenere in considerazione il deflusso della resina durante la cura che, ultimato il processo, crea uno strato sottile ma estremamente rigido sui bordi del provino. Se questo strato coinvolge la fibra la rende estremamente fragile e incline alla rottura.

Il distaccante quindi è stato usato all'interfaccia nel caso delle fibre che non sono state ricoperte con guaine all'uscita del provino, per evitare appunto che la resina le rendesse fragili, aumentandone la probabilità di rottura.



Figura 33: Particolare dell'interfaccia di uscita della fibra dal provino: sterling (a) e distaccante (b)

Il principio alla base della misurazione della deformazione, si basa sul segnale riflesso all'interno della fibra, per cui per effettuare le prove è sufficiente ottenere uno dei due capi integri, e non necessariamente entrambi.

4.3.1.6 Tabs

Sul provino vengono poi vincolati 4 tab per ogni campione, ognuno delle dimensioni di 50x50x0.6 mm in lamiera di alluminio precedentemente puliti e preparati, utilizzando colle bi-componenti adatte, in modo da assicurare una buona resistenza per gli afferraggi delle macchine con cui si sono successivamente svolti i test a trazione e compressione, poichè un campione senza tab ha una elevatissima probabilità di rompersi prematuramente o di scivolare fra le ganasce della macchina di trazione invalidando così la prova.

Per poter garantire un'ottima adesione, i tab le superfici su cui essi vi aderiscono devono essere precedentemente preparate prima dell'incollaggio mediante levigatura con carta vetrata fine e pulizia con alcool. L'assemblaggio viene ultimato mediante l'utilizzo di morsetti in grado di comprimere le zone incollate al fine di ottenere una perfetta reticolazione della resina con assenza di bolle d'aria o zone poco adese.

Successivamente all'applicazione dei tabs, i campioni vengono rifilati per eliminare le parti in eccesso dal lato del provino che non interessa l'ingresso della fibra, in modo da ottenere le dimensioni volute.

Le caratteristiche tecniche del collante sono:

- tempo di lavoro: 30 - 60 min
- tempo di fissaggio: 180 min
- temperatura di esercizio: -50°C - $+120^{\circ}\text{C}$

4.3.2 Laminazione dei provini

Di seguito, per ogni provino vengono riportati le sue caratteristiche principali, i dati ottenuti durante la laminazione e i risultati delle prove effettuate a trazione e a flessione.

4.3.2.1 I provino (“120”)

Il primo provino ha subito un ciclo di cura in autoclave che prevedeva il mantenimento per un'ora a 120°C con aumento di temperatura a $3^{\circ}/\text{min}$, e pressione a 3 bar (fig 34) raggiunta con un incremento di $0,2 \text{ bar}/\text{min}$ e successivo decremento a $1 \text{ bar}/\text{min}$

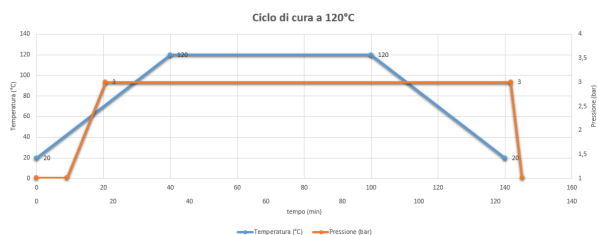


Figura 34: Andamento di temperatura e pressione in un ciclo a 120° in autoclave

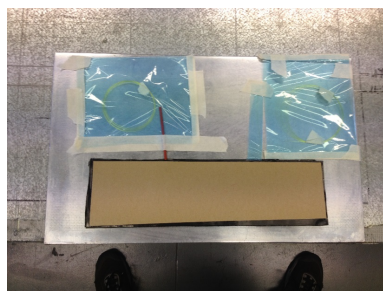
La fibra è stata posizionata nel piano di mezzeria dello spessore, ciò significa tra il dodicesimo e il tredicesimo ply.

In maniera riassuntiva (Tabella 3):

MATERIALE		
Sequenza di laminazione	[0,90,90,0,0,90,90,0,0,90,90,0]s	
Tipo di materiale	MTM 57 T700S 200 g/mm ²	
Ply	24, unidirezionale	
Dimensioni	Lunghezza	250 mm
	Larghezza	66 mm
	Spessore	3.1 mm
FIBRA		
Coating	Polymide	
Lunghezza d'onda nominale λ_0	1540,98	
Lunghezza d'onda a riposo λ_R	1540,808	
Posizione	Intermedia	
CICLO DI POLIMERIZZAZIONE		
Temperatura	120°C	
Pressione	3 bar	
Tempo	60 min	

Tabella 3: Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino 120

Per quanto riguarda l'interfaccia ai bordi del provino, come si può vedere in Figura 35 un'estremità è stata rinforzata mediante la guaina sterling (rossa, diametro 2.5mm), mentre l'altra è stata semplicemente ricoperta col distaccante.



(a) Preparazione del provino "120" per la cura in autoclave



(b) Provino "120" dopo il ciclo di cura in autoclave

Figura 35: Provino "120"

4.3.2.2 II provino (“A”)

Il secondo provino ha subito un ciclo di cura in autoclave con aumento di temperatura a $3^{\circ}/\text{min}$, permanenza a 95°C per di 8 ore, a pressione di 3 bar raggiunta anche in questo caso con una incremento di $0,2 \text{ bar}/\text{min}$ e successivo decremento a $1 \text{ bar}/\text{min}$ (Figura 36)

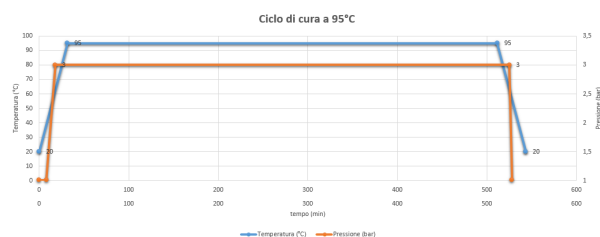


Figura 36: Andamento di temperatura e pressione in un ciclo a 95° in autoclave

La fibra è stata depositata superficialmente, ovvero disposta tra stampo e lamine di preimpregnato. In questo caso la fibra non è stata rinforzata in nessuna delle due estremità al bordo del provino; ciò non avrebbe infatti avuto senso dato che, come si può notare dalla Figura 37, la fibra viene completamente inglobata dalla resina del composito, e la presenza di una guaina avrebbe creato una notevole discontinuità, non potendo essere incorporata alla stessa maniera.

La presenza di una protezione aggiuntiva è possibile quindi se la fibra viene depositata tra gli strati. Le caratteristiche principali del provino A sono riassunte in Tabella 3

MATERIALE		
Sequenza di laminazione	[0,90,90,0,0,90,90,0,0,90,90,0]s	
Tipo di materiale	MTM 57 T700S 200 g/mm ²	
Ply	24, unidirezionale	
Dimensioni	Lunghezza	250 mm
	Larghezza	73 mm
	Spessore	3.1 mm
FIBRA		
Coating	Polymide	
Lunghezza d'onda nominale λ_0	1536,46	
Lunghezza d'onda a riposo λ_R	1536,47	
Posizione	Superficiale	
CICLO DI POLIMERIZZAZIONE		
Temperatura	95°C	
Pressione	3 bar	
Tempo	480 min	

Tabella 4: Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino A

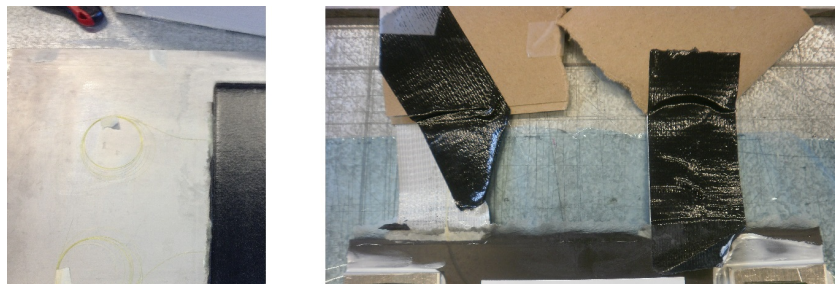


Figura 37: Provino "A" dopo il ciclo di cura in autoclave

Di seguito si riporta lo spettro di riflessione ottenuto mediante l'OTDR (Figura 38)

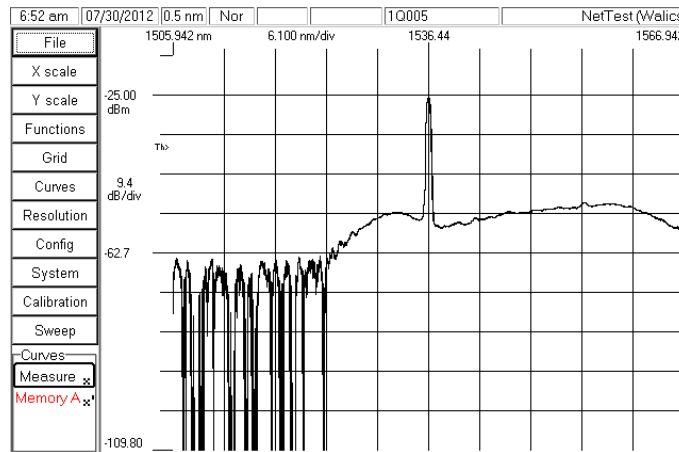


Figura 38: Spettro di riflessione dell' FBG nel provino A

4.3.2.3 III provino (“B”)

Per il terzo provino si è scelto un ciclo di polimerizzazione pari al provino A, ovvero 95°C per 8 ore alla pressione di 3 bar. Il grafico dell'andamento di temperatura e pressione in autoclave quindi è lo stesso che è stato illustrato nel caso precedente.

Tuttavia in questo campione la fibra è stata depositata in mezzeria, come nel primo provino.

Una delle due estremità all'interfaccia è stata rinforzata con una guaina sterling (gialla, diametro manicotto 1.8mm), mentre l'altra è stata semplicemente avvolta dal materiale distaccante (Figura 39)

Purtroppo successivamente alla connettorizzazione la fibra è risultata notevolmente danneggiata, quindi inutilizzabile per le misure che si intendevano effettuare. Di conseguenza è stato laminato un quarto provino denominato “C”.



Figura 39: Provino “B” dopo la cura in autoclave

4.3.2.4 IV provino (“C”)

Il quarto campione è stato prodotto seguendo le stesse specifiche del provino B, quindi cura a 95°C per 8 ore a 3 bar di pressione e con fibra intermedia.

Allo stesso modo sono state anche trattate le estremità della fibra, ovvero guaina nella prima e distaccante nella seconda; purtroppo la fibra è stata tranciata nel punto di uscita dalla guaina, tuttavia la lettura è possibile all'altra estremità (estremità 2). Per questo motivo, di seguito il provino sarà denominato “C2”.

In maniera riassuntiva (Tabella 5)

MATERIALE		
Sequenza di laminazione	[0,90,90,0,0,90,90,0,0,90,90,0]s	
Tipo di materiale	MTM 57 T700S 200 g/mm ²	
Ply	24, unidirezionale	
Dimensioni	Lunghezza	250 mm
	Larghezza	86 mm
	Spessore	3.1 mm
FIBRA		
Coating	Polymide	
Lunghezza d'onda nominale λ_0	1545,39	
Lunghezza d'onda a riposo λ_R	1545,12	
Posizione	Intermedia	
CICLO DI POLIMERIZZAZIONE		
Temperatura	95°C	
Pressione	3 bar	
Tempo	480 min	

Tabella 5: Tabella riassuntiva delle caratteristiche del provino C2

Di seguito si riporta lo spettro di riflessione ottenuto mediante l'OTDR (Figura 40)

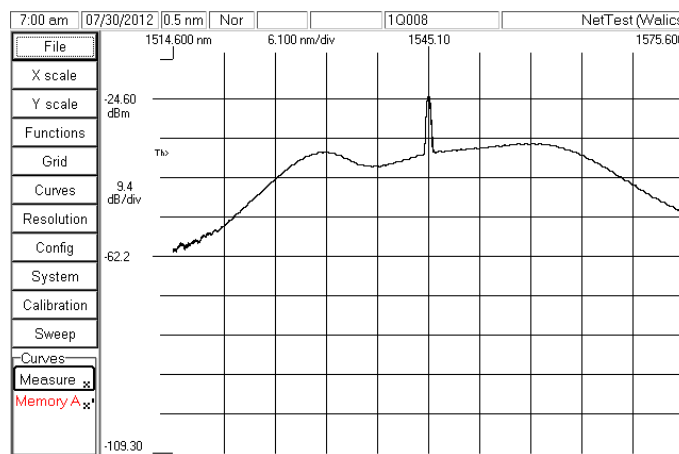


Figura 40: Spettro di riflessione dell' FBG nel provino C2

4.3.3 Considerazioni sulla laminazione e la lettura mediante OT-DR

4.3.3.1 La laminazione I campioni prodotti in questa fase di lavoro hanno evidenziato alcune problematiche che si possono presentare durante la laminazione di un materiale in composito al cui interno viene inserita una fibra ottica.

Nonostante ciò è stato possibile rilevare alcuni aspetti positivi di questa metodologia.

- Innanzitutto, l'impossibilità di riuscire ad utilizzare il provino B evidenzia quanto sia delicata la fibra ottica da maneggiare ed utilizzare; ciò implica che per questo tipo di lavoro è necessario prestare la dovuta attenzione agli accorgimenti necessari durante la posa della stessa e durante la cura.
- La fibra del provino A depositata superficialmente è stata perfettamente inglobata nel materiale composito, risultando completamente vincolata al laminato e protetta da un buono strato di resina che la avvolge. Le fibre depositate in mezzeria hanno reagito bene ai cicli di polimerizzazione dimostrando che è possibile ottenere ottimi risultati con fibre posate tra gli strati del laminato.
- La resina in eccesso presente in tutti i campioni crea problemi in particolare alle fibre uscenti dai bordi dei provini, che ne vengono ricoperte, aumentando la probabilità di rottura delle stesse (Figura 41). La resina in eccesso, inoltre, rende difficoltoso il distacco dei campioni dalle lastre dello stampo. Risulta quindi necessario proteggere con cura le fibre ottiche dalla fuoriuscita della resina in eccesso, provvedendo a ricoprirle con adeguata pellicola distaccante.

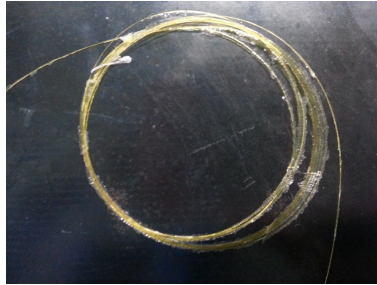


Figura 41: Particolare dell'effetto della resina in eccesso sulla fibra

- L'utilizzo delle guaine di tipo sterling, al contrario del previsto, si è rivelato sconveniente: essendo compressa durante il ciclo di cura, e ricoperta di resina che la rende estremamente rigida, la guaina ha tranciato le estremità delle fibre da essa uscenti. Ciò nonostante si nota che sebbene i rinforzi fossero di diametro ben più grande delle fibre, si sono integrati bene con il laminato. Inoltre rimane improponibile l'idea di lasciare le fibre senza una dovuta protezione che le renda resistenti e facilmente maneggiabili, soprattutto considerando sviluppi di questa tecnologia all'interno di un'eventuale produttività aziendale. Risultano quindi necessarie ulteriori prove e verifiche per quanto riguarda i rinforzi all'interfaccia, che verranno effettuate nelle sessioni successive, variando il materiale e valutando quale può essere quello più idoneo per evitare che le fibre vengano tranciate all'estremità del campione.
- Per praticità è risultato conveniente lasciare diversi cm di fibra libera all'uscita dai provini (circa 100 cm), in modo da assicurare una buona maneggiabilità e possibilità di giunzione per il collegamento con i vari strumenti di misura mediante quelli che sono detti pig-tail, ovvero cavi in fibra già connettorizzati. La lunghezza della fibra inglobata (circa 15 cm) è stata sufficiente a garantire una buona lettura della stessa, che viene ben riconosciuta dagli strumenti.
- La differenza principale fra i due cicli di cura imposti è la parte termica.

In quanto, come si era accennato sebbene la resina sia la stessa, per una buona reticolazione accetta sia alte temperature (120°C) per poche ore, ma anche temperature minori (95°C) per molto tempo. Proprio in questo caso anche se il primo tipo di cura prevedeva 1 ora a 120°C, il secondo invece impone 95°C per 8 ore. Il primo provino è stato sottoposto a un ciclo di cura più severo e difficoltoso dal punto di vista della sopportazione della fibra a temperature e pressioni elevate. Questa scelta è stata fatta per appurare che la fibra sia in grado di resistere a condizioni simili in termini di temperatura a quelle generalmente utilizzate per le produzioni in Riba. L'azienda infatti ha la possibilità di effettuare una notevole quantità di cicli termici differenti in funzione dell'articolo da produrre e non è da escludere l'eventualità da parte della ditta di voler impiegare tempistiche differenti per quanto riguarda i cicli di cura in autoclave, a temperature più elevate.

4.3.3.2 Lettura OTDR

- Lo scopo di un'analisi mediante OTDR è quello di verificare l'attenuazione indotta dall'inglobamento della fibra e del reticolo nel materiale. In condizioni di base cioè, in assenza di deformazioni o variazioni di temperatura, ci si aspetta di rilevare un picco alla lunghezza d'onda riflessa, pari a quella nominale del sensore. Dal confronto con la tab. 2, si può notare che la lunghezza d'onda qui rilevata coincide con quella nominale indicata dai datasheet dell'FBG. Inoltre non si verificano notevoli distorsioni, che possono essere causate dalla presenza di alti gradienti di tensioni longitudinali o trasversali.

4.4 Prove sperimentali su provini unificati

In questa sezione vengono illustrate le metodologie delle prove effettuate sui provini, ovvero quelle di trazione e flessione. Per ognuna, vengono riportati i

risultati ottenuti e successivamente commentati.

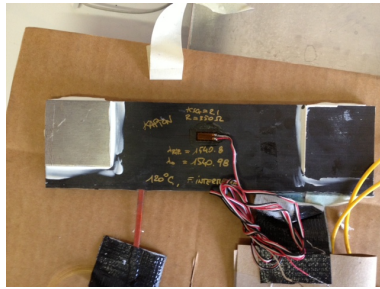
4.4.1 Prove a trazione

I fattori che influenzano la risposta alla trazione sono i seguenti:

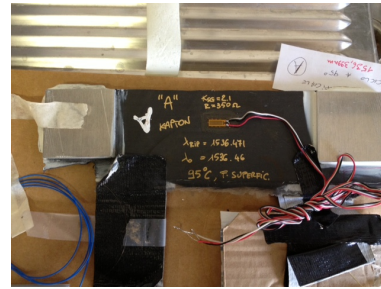
- materiali
- metodi di preparazione e lay-up
- sequenza di impilamento del campione
- preparazione del campione
- l'ambiente di test
- l'allineamento
- la velocità di test
- il tempo e la temperatura
- presenze di difetti
- percentuale di rinforzo nel volume, etc

Per effettuare le prove vengono innanzitutto installati degli estensimetri sui provini, in modo da avere un termine di confronto con la lettura del sensore FBG.

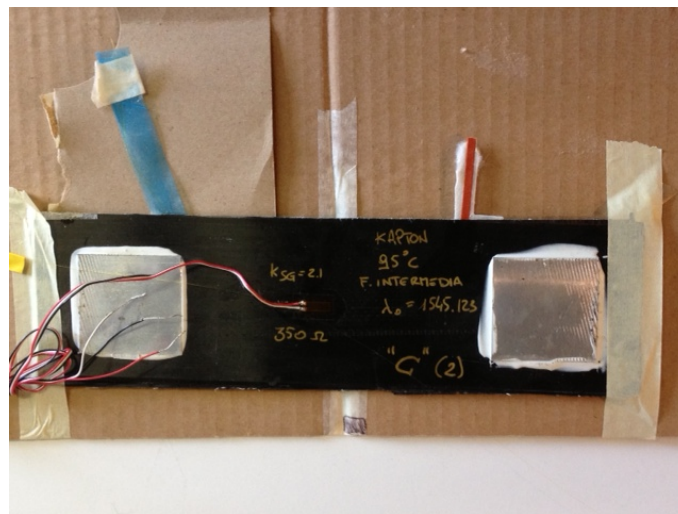
In Figura 42 si possono notare i campioni sulla cui superficie sono stati montati gli estensimetri



(a) Provino 120



(b) Provino A



(c) Provino C2

Figura 42: Provini su cui sono stati installati gli estensimetri

I campioni sono stati montati in macchina uno alla volta e bloccati alle estremità attraverso gli afferraggi della macchina di trazione a disposizione in hangar. La macchina è una Italsigma da 100 kN di massimo carico nominale. Il collegamento con l'unità di lettura è stato con il tradizionale quarto di ponte per analizzare la sola componente di trazione monoassiale. Oltre al collegamento con l'unità di lettura dell'estensimetro (Strain Indicator), il campione è stato chiaramente collegato con un interrogatore per l'analisi delle riflessioni generate dal sensore FBG. Per le misurazioni è stato utilizzato un interrogatore della Micron Optics ad un canale di acquisizione (Figura 43).

Questo acquisisce dati fino ad 1Hz tramite un software installato su PC e denominato Pico Wave.



Figura 43: Interrogatore Micron Optics

Per le prove di trazione si è scelto di agire sul campione con un aumento graduale del carico. Dopo un lieve precarico imposto per il corretto ancoraggio del campione alle morse, si prosegue con aumenti da 2 kN alla volta.

Tutte le prove sono state eseguite applicando un carico a 0,2 kN/sec fino ad arrivare a un massimo di 18 kN, rilevando sia le deformazioni relative agli FBG sia quelle degli estensimetri, in modo da ottenere un buon confronto degli output. Giunti al carico massimo, si è effettuato il procedimento inverso, sottoponendo i provini a compressione partendo da 18 kN fino ad arrivare a carico nullo sempre mantenendo un avanzamento di 0,2 kN/sec.

I dati ottenuti dalla lettura degli FBG però sono relativi alle lunghezze d'onda rilevate dal sensore; per ottenere un valido confronto con le misure degli estensimetri è necessario esprimere questi valori come deformazioni. Per fare ciò è necessario ricavare il Gauge Factor K_{GF} caratteristico della fibra.

La differenza relativa nella lunghezza d'onda di Bragg $\Delta\lambda/\lambda_R$ dovuta a una deformazione applicata ϵ e una variazione della temperatura ΔT è approssimativamente dato da:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_R} = K_{GF}\epsilon + K_T\Delta T \quad (10)$$

dove per λ_R si intende il valore di lunghezza d'onda rilevato in condizione di riposo, senza quindi carichi applicati, e per ϵ le deformazioni ottenute mediante gli estensimetri. Considerando trascurabili le variazioni di temperatura si ottiene:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_R} = K_{GF}\epsilon \quad (11)$$

Per questo poter calcolare il Gauge Factor quindi occorre invertire la relazione

$$K_{GF} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_R}\epsilon^{-1} \quad (12)$$

Un altro metodo per ottenere K_{GF} è quello di inserire nei grafici la linea ottenuta mediante regressione lineare dei dati; la pendenza della retta così ottenuta (in grassetto) corrisponde al valore di K_{GF}

Valutato K_{GF} è possibile calcolare i valori di deformazione relativi agli FBG per ogni misurazione i -esima effettuata:

$$\epsilon_i = \lambda_{O_i} K_{GF} \quad (13)$$

dove per λ_{O_i} si intende il valore i -esimo di deformazione misurata a cui viene sottratto il valore FBG iniziale, quello cioè valutato a carico nullo.

È possibile calcolare il modulo di elasticità E relativo ad ogni misura i -esima effettuata mediante la seguente equazione:

$$E_i = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\epsilon_i} \quad (14)$$

dove σ_i rappresenta la tensione nominale data dal rapporto tra la forza applicata misurata alla cella di carico e l'area del campione. In altro modo, si può scrivere, definendo j e k due punti differenti sul piano Stress/Deformazioni:

$$E_i = \frac{\sigma_j - \sigma_k}{\epsilon_j - \epsilon_k} \quad (15)$$

Inoltre è possibile valutare e plottare (Figura 50) l'errore percentuale tra le misure rilevate mediante gli estensimetri ϵ_{SG} e quelle mediante fibre di Bragg λ_{O_i}

$$Err\% = \frac{100 * |\epsilon_{SG} - \lambda_{O_i}|}{\epsilon_{SG}} \quad (16)$$

Consideriamo infine che essendo ogni FBG caratterizzato da una lunghezza d'onda caratteristica, ci si aspetta quindi che la prima rilevazione, quella a carico nullo, corrisponda a quella nominale. Definite λ_0 come differenza tra lunghezza d'onda nominale e λ_R quella di riferimento misurata a carico nullo, esse possono essere utilizzate per la valutazione delle deformazioni residue del materiale dovute al trattamento da loro subito. Queste si ricavano dalla:

$$\epsilon_{res} = \frac{\lambda_0 - \lambda_R}{\lambda_0} K_{GF}^{-1} \quad (17)$$

4.4.1.1 Risultati delle prove a trazione

4.4.1.1.1 Valutazione del Gauge Factor

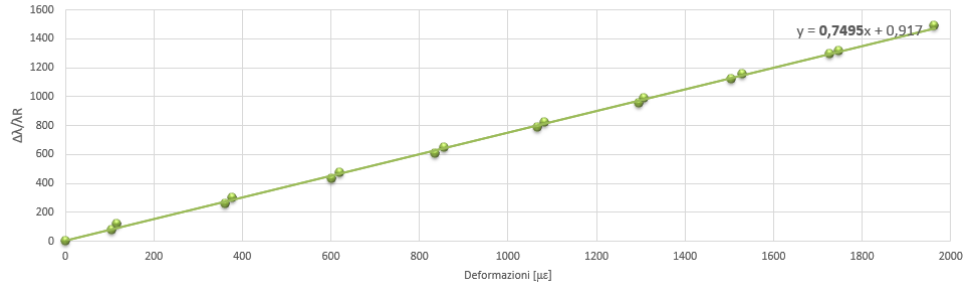
Applicando l'Equazione 12 utilizzando i valori medi dei $\Delta\lambda$ e degli ϵ rilevati, si ottengono i seguenti valori di K_{GF} :

- provino 120: $K_{GF} = 0,7499$
- provino A: $K_{GF} = 0,7823$
- provino C2: $K_{GF} = 0,6586$
- provino Acrilato 1: $K_{GF} = 0,6806$
- provino Acrilato 2: $K_{GF} = 0,7903$

Di seguito in Figura 44 (kapton) e 45 (acrilato), vengono plottati i valori di $\Delta\lambda/\lambda_R$ in funzione delle deformazioni. Si nota immediatamente che i valori ottenuti mediante i calcoli effettuati e quelli mediante regressione dei dati sono praticamente coincidenti.

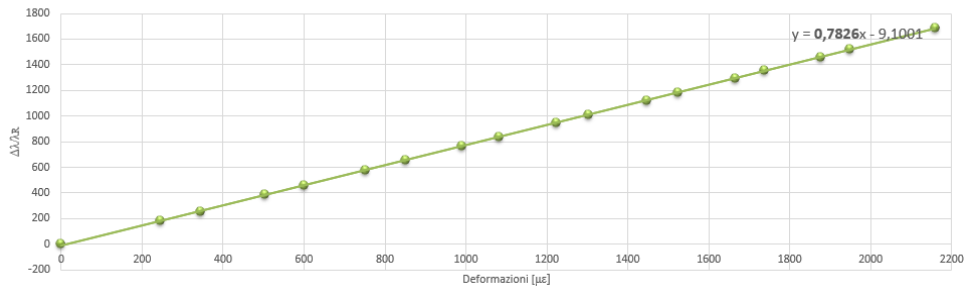
Le deformazioni sono espresse in $\mu\epsilon$ equivalente a μ^m/m quindi comunque adimensionali.

Valutazione del Gauge Factor - Provino 120



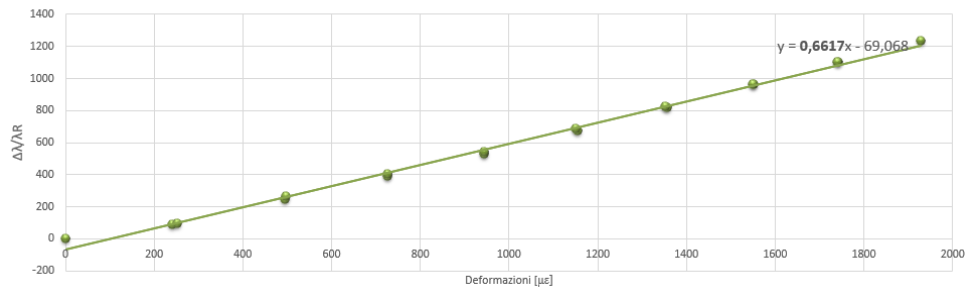
(a)

Valutazione del Gauge Factor - Provino A



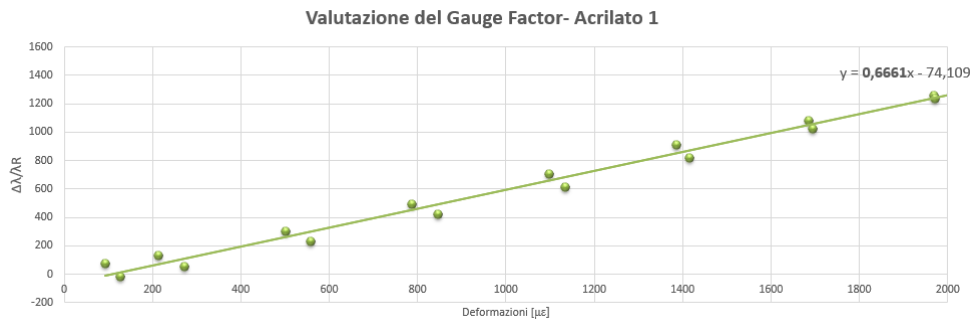
(b)

Valutazione del Gauge Factor - Provino C2

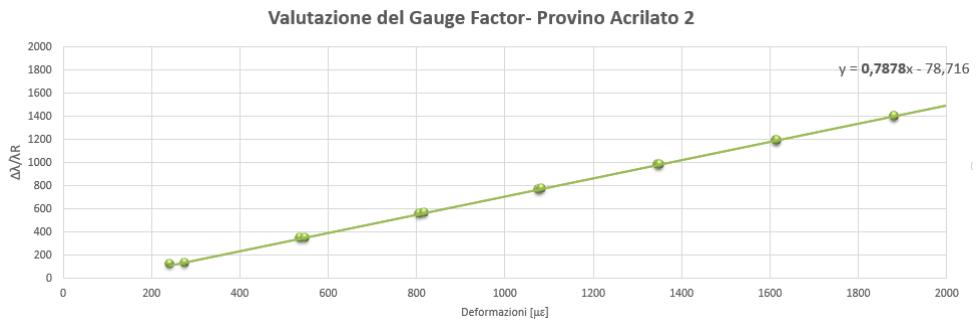


(c)

Figura 44: Valutazione del Gauge Factor - provini kapton



(a)



(b)

Figura 45: Valutazione del Gauge Factor - provini acrilato

4.4.1.1.2 Confronto tra le letture FBG e quelle estensimetriche

Di seguito si riporta il grafico ottenuto interpolando i valori calcolati mediante l'Equazione 13 per ogni provino.

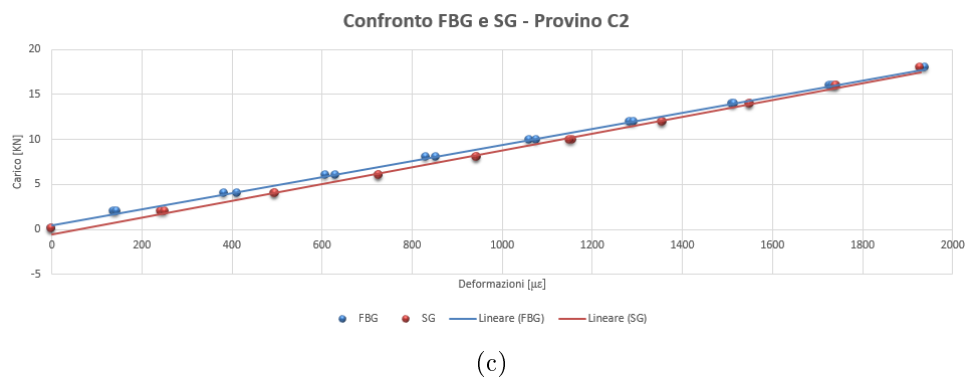
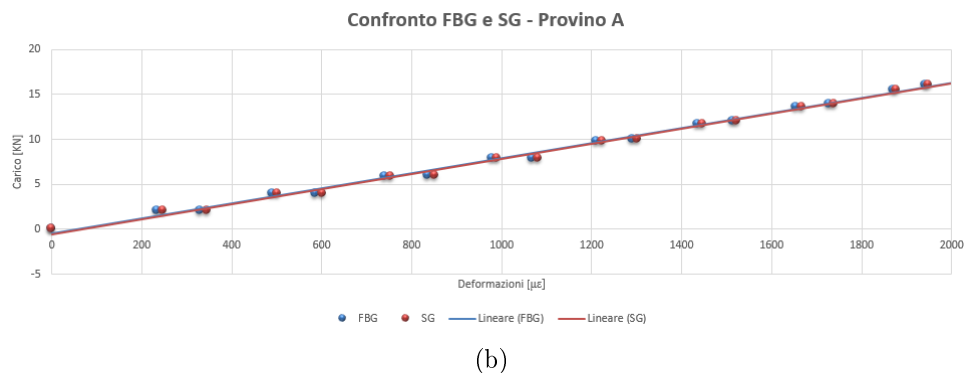
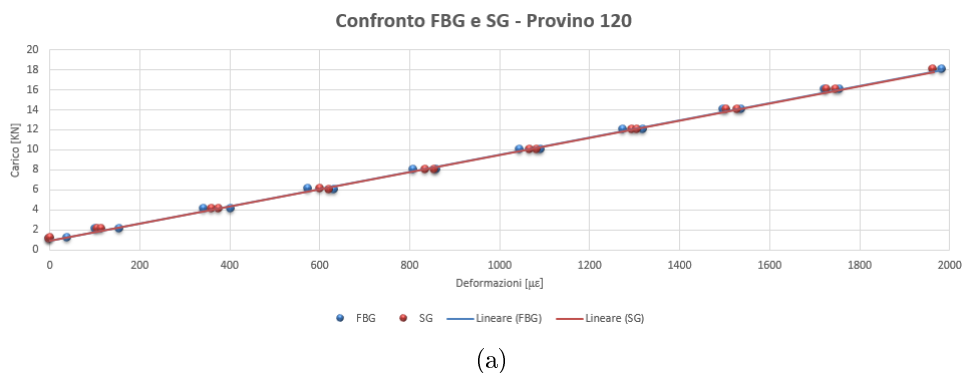
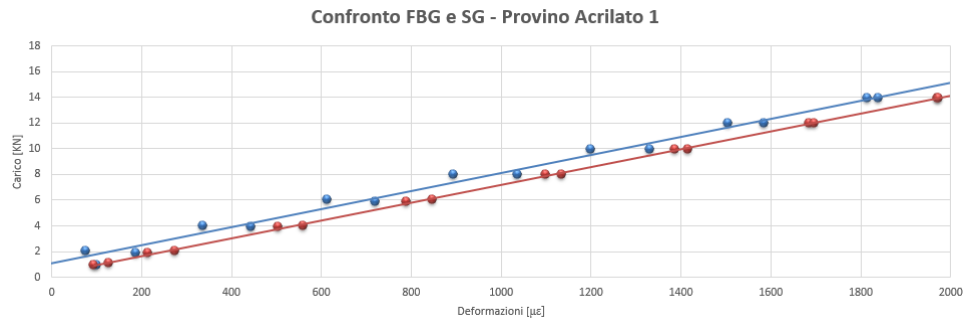
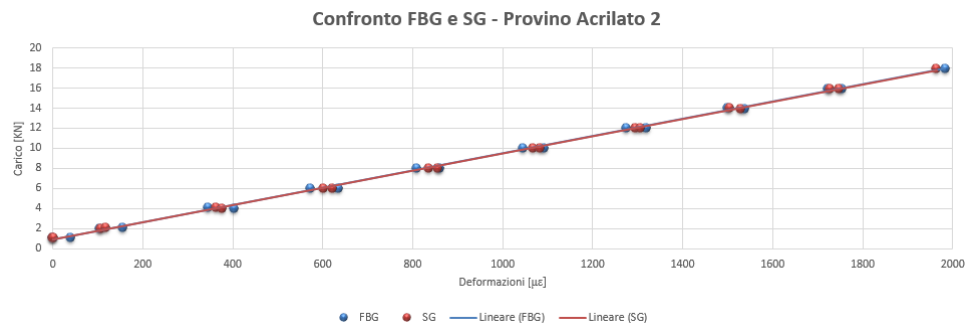


Figura 46: Confronto delle letture tra FBG ed SG - provini kapton



(a)



(b)

Figura 47: Confronto delle letture tra FBG ed SG - provini acrilato

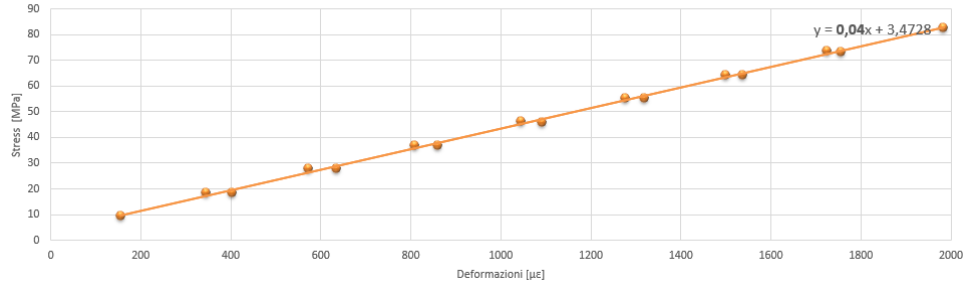
4.4.1.1.3 Valutazione del modulo di Young

Se si volesse utilizzare l'Equazione 14, non sarebbe possibile calcolare il modulo di elasticità globale, che si ricava dalla linea di regressione dei dati ottenuta plottando le tensioni nominali in funzione delle deformazioni registrate. Vengono riportati di seguito i dati relativi alle aree interessate al calcolo delle tensioni, relative ad ogni provino, considerando lo spessore di 3,1 mm:

- Area provino 120: 205 mm^2
- Area provino A: $226,3 \text{ mm}^2$
- Area provino C2: $266,6 \text{ mm}^2$
- Area provino Acrilato 1: 120 mm^2
- Area provino Acrilao 2: 120 mm^2

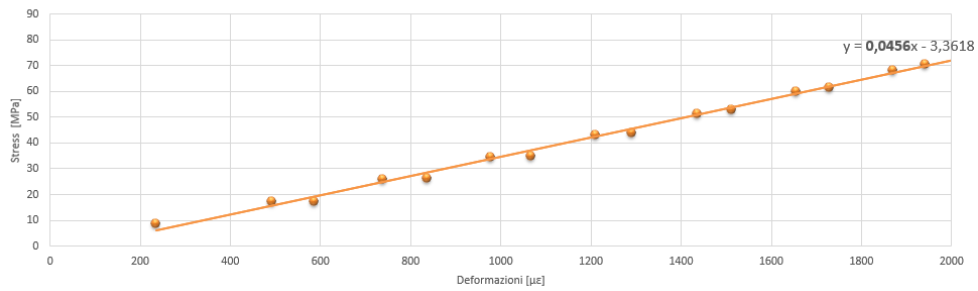
Ne consegue che la pendenza della curva rappresenta il modulo di elasticità globale E del laminato testato (Figura 48)

Valutazione del modulo elastico globale - Provino 120



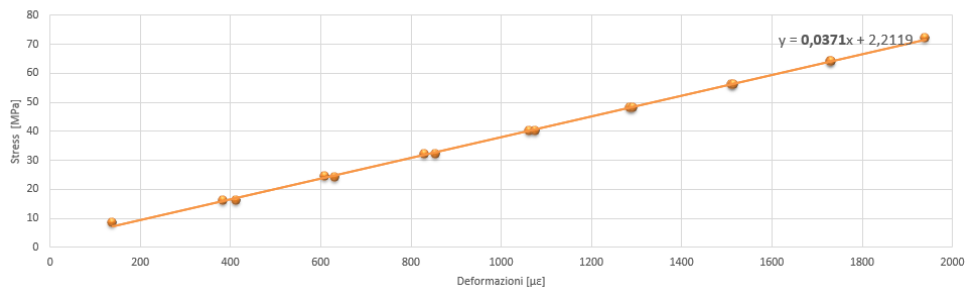
(a)

Valutazione del modulo elastico globale - Provino A



(b)

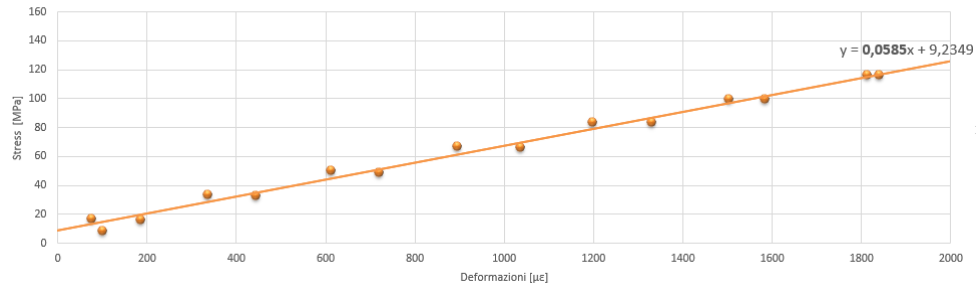
Valutazione del modulo elastico globale - Provino C2



(c)

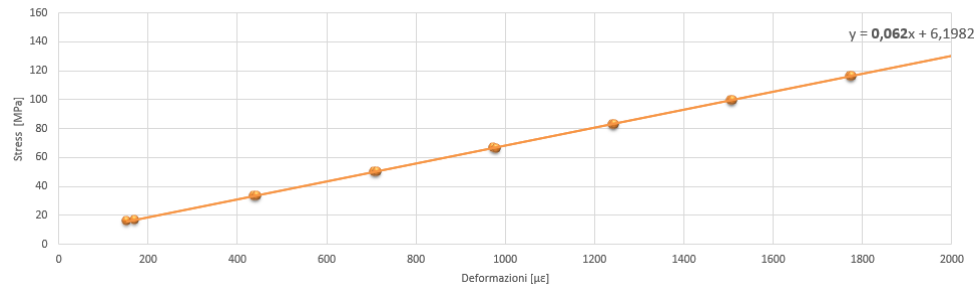
Figura 48: Valutazione del modulo di elasticità globale - provini kapton

Valutazione del modulo elastico globale - Provino Acrilato 1



(a)

Valutazione del modulo elastico globale - Provino Acrilato 1



(b)

Figura 49: Valutazione del modulo di elasticità globale - provini acrilato

4.4.1.1.4 Valutazione dell'errore percentuale tra le misure FBG-SG

Facendo riferimento all'Equazione 16, è possibile calcolare la differenza percentuale tra le misure rilevate mediante il sensore ottico e quelle rilevate mediante estensimetro. In Figura 50 sono plottati i risultati ottenuti dai calcoli effettuati

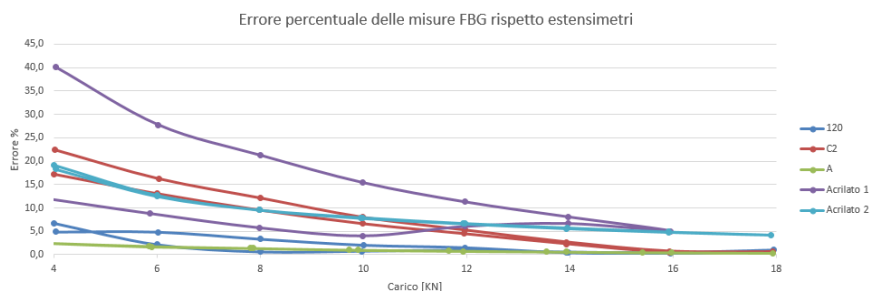


Figura 50: Errore percentuale delle misure effettuate

4.4.1.1.5 Valutazione delle tensioni residue

Applicando l'Equazione 17 è possibile ottenere la quantificazione delle tensioni residue successive alla polimerizzazione in autoclave. Si ottiene infatti:

- provino 120: $\epsilon_{res} = 148,82$
- provino A: $\epsilon_{res} = 9,15$
- provino C2: $\epsilon_{res} = 261,31$
- provino Acrilato 1: $\epsilon_{res} = 100,39$
- provino Acrilato 2: $\epsilon_{res} = 173,75$

4.4.1.2 Considerazioni delle prove a trazione

Per quanto riguarda i provini con fibra ricoperta in kapton si possono fare le seguenti considerazioni:

- Si è visto che la lunghezza d'onda di ogni FBG misurata a carico nullo non coincide con quella nominale. Il valore numerico non è esattamente identico poichè nel ciclo di cura la fibra è stata sottoposta ad elevate temperature e pressioni che ne hanno leggermente variato la caratteristica. È infatti fondamentale considerare che successivamente alla cura la resina si ritira leggermente e le fibre non avranno più il valore di lunghezza d'onda di riferimento. Tuttavia, la differenza tra lunghezza d'onda nominale, λ_0 , e quella di riferimento misurata a carico nullo, λ_R rimane abbastanza contenuta, il che dimostra che la fibra sopporta bene i cicli in autoclave e resta perfettamente funzionante. Inoltre, ciò ci porta a considerare la fibra ottica come possibile strumento per valutare le tensioni residue all'interno di un materiale composito sottoposto a cura, poichè a questo punto esse sono quantificabili.
- Confrontando i dati ottenuti dalla lettura dei sensori FBG e quelli ottenuti mediante gli estensimetri, che fungono da riferimento, (Figure 46 e 47) si evince immediatamente che i sensori ottici risultano pienamente in grado di misurare correttamente le deformazioni che il materiale subisce. In particolare per i primi due provini, 120 e A, i punti plottati nei grafici sono quasi sovrapposti. Ciò indica un'ottima adattabilità del sensore ottico in questo ambito di utilizzo.
- Eseguire queste prove mediante una trazione e successivamente un rilascio della forza, ha mostrato che la fibra ottica è in grado di sopportare bene le deformazioni; infatti, durante la fase di ricomprensione, i punti plottati quasi si sovrappongono ai punti relativi ai dati rilevati durante la prima fase di trazione. Inoltre i valori rilevati dagli FBG una volta che il provino torna in condizione di riposo sono quasi identici alle lunghezze d'onda misurate a carico iniziale nullo. La fibra dimostra quindi d'essere in grado di non degradarsi durante le deformazioni dovute ai carichi subiti.

- Dalla valutazione dell'equazione delle rette ottenute plottando $\Delta\lambda/\lambda_R$ in funzione delle deformazioni registrate (Figure 44 e 45), si ricava il valore di K_{GF} per ogni provino. Confrontando questi dati con quelli calcolati si nota che questi ultimi differiscono di poco; ciò è dovuto al fatto che i calcoli sono stati effettuati basandosi sulle medie dei valori ottenuti, mentre i dati ricavati da regressione lineare possono dirsi più precisi.
- Dal confronto coi risultati ottenuti sui provini con fibre ricoperte in acrilato, si nota per i provini in kapton un comportamento più simile a quello rilevato con gli estensimetri. Ad ogni modo, la somiglianza dei dati ottenuti mediante FBG e quelli mediante SG anche ad alti livelli di carico mostra una buona applicabilità dei sensori ottici.
- Per quanto riguarda i provini con fibra in acrilato, l'errore percentuale calcolato per la differenza dei dati rilevati con FBG ed SG rimane sempre molto limitato, sotto al 5%. Ciò non vale per quanto riguarda il provino C2, i cui valori a carichi a bassi KN presentano errori percentuali maggiori. Si nota infatti dalla Figura 46, che i dati di FBG che più differiscono dai rispettivi valori estensimetrici sono appunto quelli del provino C2. La motivazione di questo comportamento può essere ritrovata osservando gli spettri di riflessione ottenuti mediante l' OTDR in Figura 40: il caso del provino C2, mostra un picco di riflessione minore se confrontato con quello del provino A. Ciò significa che nel caso del provino C2 l'attenuazione del segnale è maggiore rispetto al caso A e questo è probabilmente il motivo della maggior distanza dei dati da quelli di riferimento estensimetrici. Bisogna inoltre considerare che per quanto si possa allineare l'estensimetro rispetto alla posizione del sensore ottico, una minima differenza di allineamento è possibile che si presenti, oltre al fatto che in due casi (provini C2 e 120) mentre l'estensimetro è fissato alla superficie, la fibra si trova alla mezzeria

dello spessore del campione; intercorre quindi una distanza tra i due sensori di più di 1.5 mm. Considerando ciò, le misure ottenute, per quanto non esattamente identiche, possono ritenersi attendibili.

- Confrontando tra loro i valori delle deformazioni residue calcolate si evince immediatamente che per quanto riguarda il provino A, queste sono così basse da considerarsi trascurabili. Ciò significa che la fibra non ha subito forti variazioni per quanto riguarda le sue caratteristiche principali durante il ciclo di cura.

4.4.2 Prove a flessione

Per le prove sperimentali di flessione, la macchina che effettua il test (Figura 51) è stata predisposta in modo che il provino si possa adagiare alle sue estremità su due rulli d'appoggio distanti tra loro 100 mm e fissati alla macchina mediante natri elastici agganciati ai loro ai bordi, riproducendo la condizione di flessione semplice a tra punti. Al centro un altro rullo all'estremità di un braccio meccanico, trasmette il carico verticale verso il basso.

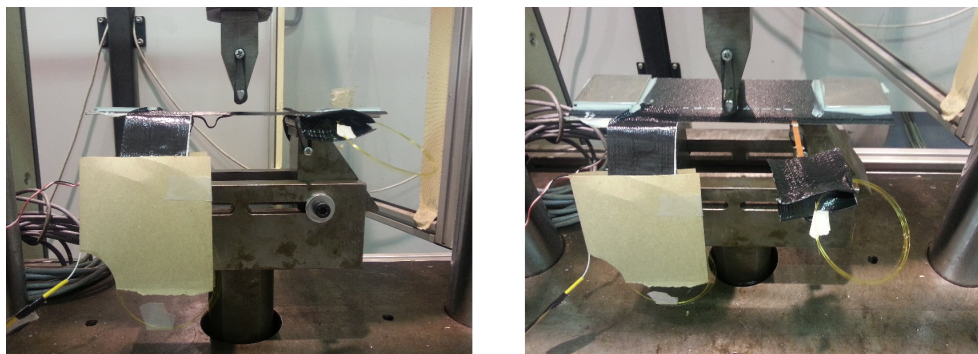


Figura 51: Posizionamento di provino per la prova a flessione

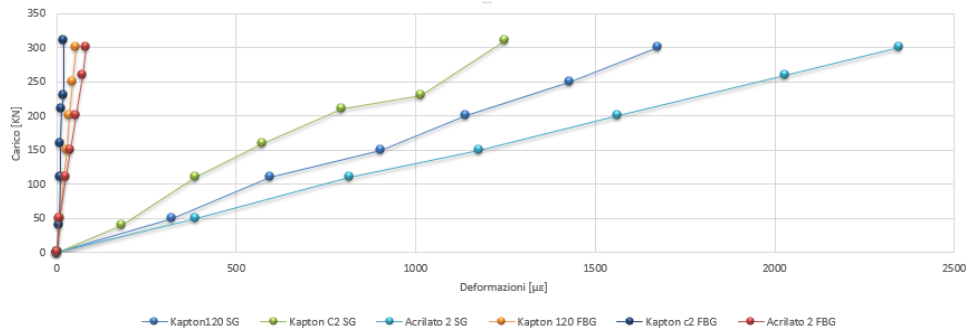
Come si può intuire, il punto d'azione del carico corrisponde alla posizione dell'estensimetro, che se fosse direttamente a contatto col rullo centrale subirebbe gravi danni fino ad arrivare a una condizione di rottura per cui non

sarebbe più possibile rilevare mediante il sensore le deformazioni agenti; per evitare ciò si posiziona il provino in maniera che la superficie su cui si trova l'estensimetro si trovi girata verso il basso.

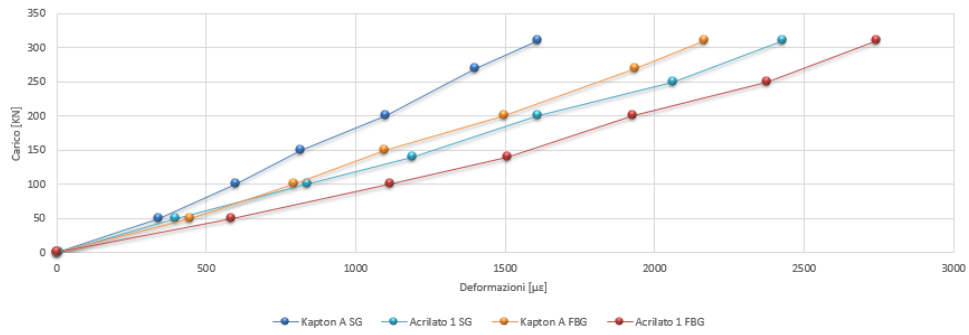
La velocità di deformazione utilizzata è pari a 0,01mm/sec

Una volta raccolti i dati delle varie prove è stato possibile calcolare i valori di deformazioni derivanti dalle misure dei sensori ottici, utilizzando il Gauge Factor stimato durante le prove a trazione.

Sono stati plottati (Figura 52) i valori delle deformazioni ottenute mediante FBG e quelle mediante estensimetri. Per motivi di chiarezza, essendo in totale dieci le curve ottenute, due per ogni provino, queste sono state suddivise in due casi: il grafico (a) mostra il caso dei provini con fibra intermedi, mentre il grafico (b) mostra il caso dei campioni con fibra superficiale.



(a)



(b)

Figura 52: Confronto delle letture tra FBG ed SG nel caso di provini con fibre in mezzeria (a) e fibre in superficie (b)

Calcolati i valori di $\Delta\lambda/\lambda_R$ relativi ovviamente ai sensori ottici, questi vengono rappresentati in Figura in funzione delle deformazioni per ognuno dei provini testati.

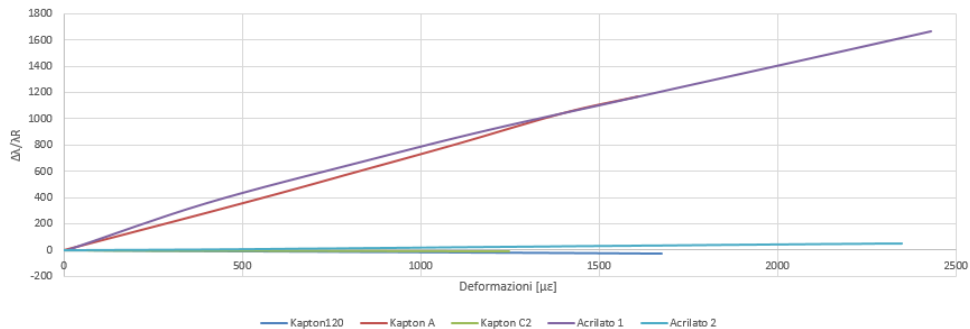


Figura 53: Confronto delle misure dei 5 provini

4.4.2.1 Considerazioni sulle prove a flessione

Per poter commentare i risultati ottenuti, sono necessari alcuni richiami alla teoria elementare delle travi.

Le strutture possono essere analizzate, per quanto concerne lo stato di tensione e di deformazione, con metodi di diversa complessità; un primo strumento di ricerca è la teoria elementare delle travi a guscio elaborata sulla base della teoria classica delle travi da cui deriva i risultati fondamentali ed evidentemente anche i limiti di validità che possono essere stabiliti in base alle ipotesi fondamentali di tale teoria.

I sistemi di tensioni e di deformazioni indicati dalla teoria di St. Venant, sono validi a rigore per un solido che soddisfa alle particolari ipotesi sulla cui base è sviluppata tale teoria ovvero:

- solido omogeneo e isotropo
- forze di volume e reazioni vincolari nulle
- solido prismatico
- solido caricato solamente sulle basi

Tuttavia anche nelle condizioni effettive spesso lontane dalle ipotesi base, le tensioni e le deformazioni che si verificano nelle travi, si avvicinano talmente

ai valori dati da questa teoria, che questa costituisce il più utile fondamento per il calcolo, almeno in prima approssimazione delle strutture.

Esaminando i casi fondamentali di flessione pura, si fa presente che questi sono caratterizzati dall'assenza di azioni esterne tangenziali sulle basi del solido. In tal caso, l'unica tensione non nulla è σ_x , ovvero lo sforzo normale in direzione parallela all'asse della trave (Figura 54).

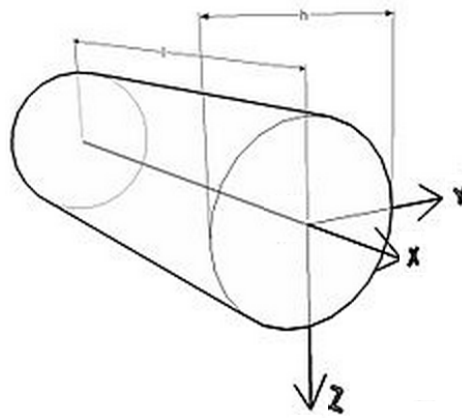


Figura 54: Schema della trave di De St Venant

Ipotizzando di analizzare lo stato tensionale di una sezione che anche dopo l'applicazione dei carichi resta piana e parallela all'asse della trave, σ_x è esprimibile come:

$$\sigma_x = \frac{P}{A} - \frac{M_z I_{yy} - M_y I_{yz}}{I_{yy} I_{zz} - (I_{yz})^2} y - \frac{M_y I_{zz} - M_z I_{yz}}{I_{yy} I_{zz} - (I_{yz})^2} z \quad (18)$$

dove P è lo sforzo normale semplice, A è l'area della sezione del provino, y e z sono le distanze della sezione dall'asse neutro, M_z e M_y sono i momenti flettenti intorno all'asse, rispettivamente z e y, e I_{yz} , I_{yy} , I_{zz} sono i momenti principali di inerzia che misurano la resistenza del corpo a mutare la sua velocità rotazionale attorno agli assi.

Supponendo di avere un solo momento flettente M_y , sforzo normale semplice nullo e un sistema di riferimento con assi principali di inerzia, l'equazione si semplifica in (Flessione semplice, Navier):

$$\sigma_x = -\frac{M_y}{I_{yy}}z \quad (19)$$

Le tensioni sono nulle sull'asse di mezzeria e massime all'estremità. Per l'equazione costitutiva in funzione del modulo di young E [MPa]:

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (20)$$

4.4.2.2 Risultati delle prove a flessione

- Osservando il grafico in Figura 52 si evince immediatamente che i provini con fibra superficiale presentano similarità tra le letture fornite dal sensore ottico e quelle fornite dagli estensimetri. Al contrario i valori dati dagli FBG posti in mezzeria sono notevolmente distanti da quelli estensimetrici. In quest ultimo caso infatti l'errore percentuale delle misure è superiore all'80%, mentre nel caso dei provini con fibra superficiale questo si aggira tra il 10% e il 20%. Ciò è dovuto, come è stato precedentemente illustrato , al fatto che i provini interni, trovandosi sulla mezzeria, giacciono sul piano neutro, in cui le tensioni, e quindi le deformazioni sono praticamente nulle. Tuttavia ci si poteva aspettare che le misure rilevate dalle fibre superficiali fossero più vicine a quelle estensimetriche, ma se nel caso precedente della trazione, i due sensori subiscono il carico allo stesso modo, in questo caso sono comunque separati da uno strato di materiale, per quanto sottile, che ne diversifica il comportamento
- Osservando la Figura 52 (b) si nota che a parità di carico imposto, i valori rilevati dal provino con fibra ricoperta in kapton sono minori di

quelli del provino con fibra ricoperta in acrilato. Ciò può essere dato dal fatto che i sensori del primo campione non si trovassero esattamente a metà tra i due rulli d'appoggio, ovvero che non fossero centrate precisamente con il punto di applicazione del carico. Facendo riferimento alla Figura 55, infatti, il punto A giacente sul punto di applicazione del carico, subisce momento flettente massimo, mentre qualsiasi altro punto, come ad esempio il B, registrerà un momento minore rispetto al primo punto, da cui risulta una minore deformazione. Va considerato inoltre che lo spessore del provino in acrilato è minore di quello in kapton; il primo quindi subirà deformazioni maggiori, poichè la differenza di spessore si traduce in una rigidità di stratificazione differente.

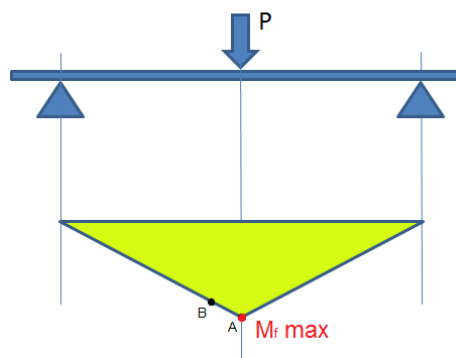


Figura 55: Andamento del momento flettente a tre punti in una trave

- In Figura 53, si può notare che due rette, quelle relative ai provini C2 e 120, hanno pendenza negativa e presentano valori minori di zero. Ciò dipende dalla posizione della fibra all'interno del laminato, considerando che per quanto si possa esser precisi nel laminare i campioni, il sensore FBG non può trovarsi esattamente sulla linea di mezzeria. Se questo quindi è collocato sotto ad essa registrerà una trazione (valori positivi); al contrario se si trova sopra alla linea di mezzeria esso

sarà soggetto a compressione, e ciò comporterà la rilevazione di valori negativi.

4.5 Estensione a simulacri a livello industriale

Lo scopo di questa sessione di prove è stato quello di verificare la capacità di un array di sensori in fibra ottica di misurare correttamente i valori di deformazione in un componente strutturale in composito utilizzato in ambito nautico, come il bompresso, in condizioni di riferimento; in particolare, di studiarne le prestazioni nel caso di sollecitazioni di flessione, quali quelle attese in condizioni operative.

Per poter valutare eventuali problematiche che potevano insorgere durante il processo di laminazione effettuato in azienda, in Riba sono stati prodotti due spezzoni di alberi di prova al cui interno sono state inglobate fibre nude, ovvero senza sensori FBG fotoincisi. Si è effettuata questa scelta non essendo quindi questi i pezzi definitivi che verranno utilizzati per le prove, si è scelto di utilizzare fibre non fotoincise perchè queste sono più economiche.

4.5.1 Primo spezzone

In questo caso si è scelto un ciclo di cura con mantenimento per 10 ore a 85°C e pressione a 6 bar (Figura 56-Primo spezzone).

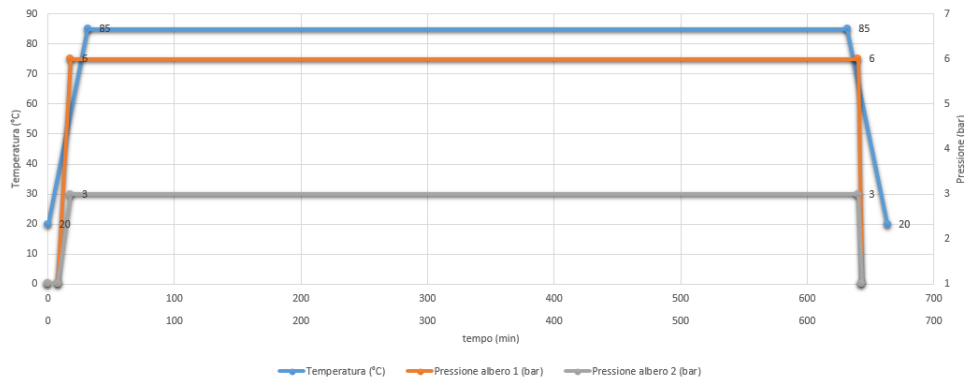


Figura 56: Cicli di cura primo e secondo albero

Sono state utilizzate fibre ottiche per telecomunicazioni della Alcatel ricoperte da un coating in acrilato e fibre band insensitive (Figura 57)



(a)

(b)

Figura 57: Datasheet delle fibre utilizzate, bend insensitive (a) e Alcatel (b)

Le fibre sono state rinforzate all'interfaccia di uscita dal laminato mediante guaine protettive sterling (Figura 58 (a) gialle) o pvc (Figura 58 (a) bianche) per evitarne la rottura; la guaina protettiva è stata utilizzata unicamente all'interfaccia di uscita dal laminato, lasciando la fibra scoperta nella parte centrale, per poter assicurare l'inglobamento della stessa con il composito. Le fibre uscenti dall'albero sono state posizionate all'interno di sacchetti creati appositamente con materiale distaccante (Figura 58).

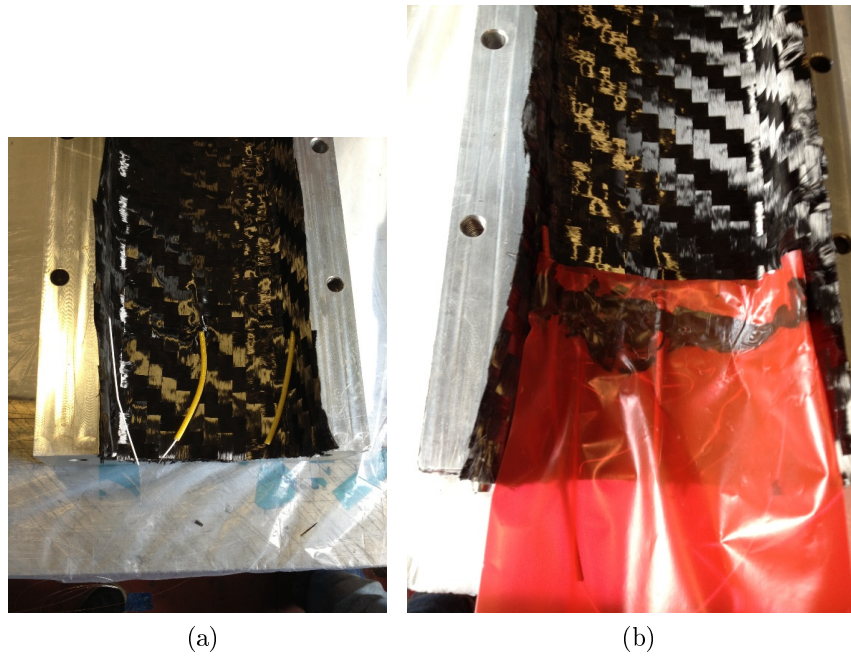


Figura 58: Fibre rinforzate con sterling e pvc (a) e sacchetti di distaccante per le fibre (b)

Il principale problema riscontrato in questo caso è stata la rottura di metà delle fibre utilizzate.

Nelle restanti è stato possibile leggere un'attenuazione che andava da 11,47 dB a 12,01 dB (Figura 59).

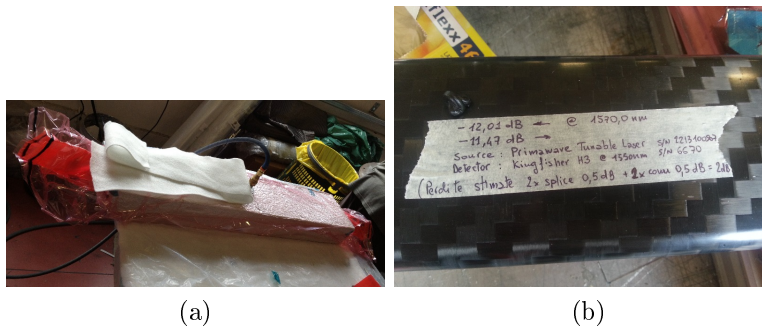


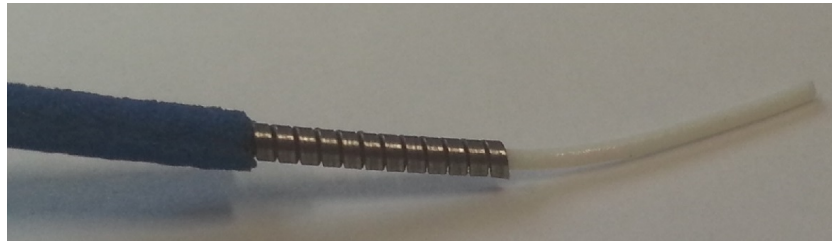
Figura 59: Primo spezzone di albero: Preparazione alla cura in autoclave (a) dopo la cura e risultati delle etture delle fibre (a)

Inoltre l'inclusione della resina all'interno dei sacchetti creati per il contenimento delle fibre, le ha rese inutilizzabili; da ciò che si è potuto evincere, la resina si è infiltrata passando tra la fibra e la guaina protettiva all'interfaccia di uscita dello spezzone.

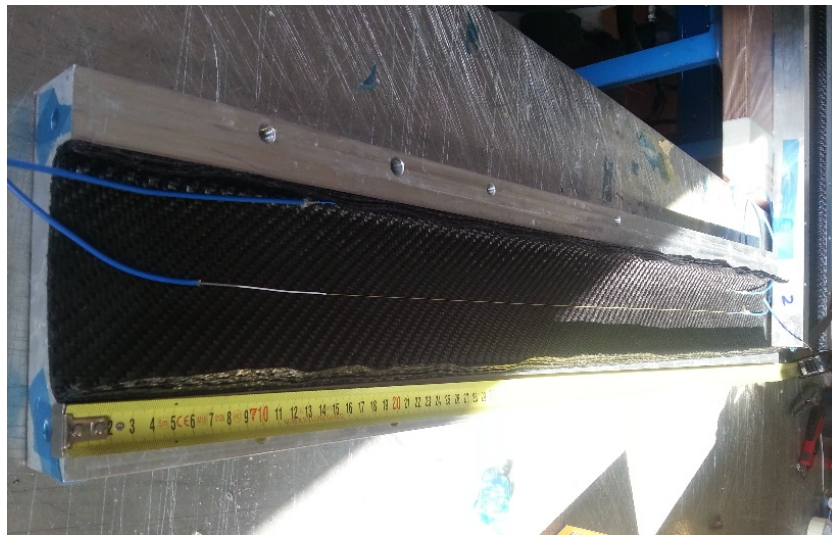
4.5.2 Secondo spezzone

Avendo a disposizione un numero limitato di fibre con FBG da utilizzare, si è scelto di effettuare un'ulteriore prova per verificare la resistenza delle fibre al ciclo di cura in Riba e per trovare una soluzione al problema precedentemente riscontrato dell'inclusione della resina.

In questa seconda realizzazione, è stato attuato un ciclo a pari temperatura e durata ma a 3 bar (Figura 56-Secondo spezzone); in questo caso è stata usata una guaina corazzata mediante una spirale metallica posta tra la fibra e lo strato protettivo esterno (guaina-spirale-guaina Figura 60). Anche in questo caso, la guaina protettiva è stata utilizzata unicamente all'interfaccia di uscita dal laminato, lasciando la fibra scoperta nella parte centrale.



(a)



(b)

Figura 60: Guaina per la protezione delle fibre (a) e posa delle fibre (b)

In questo caso, come nel precedente le fibre sono state disposte come in Figura 61(a), ovvero due lateralmente (una per lato), una nella parte superiore e una in quella inferiore

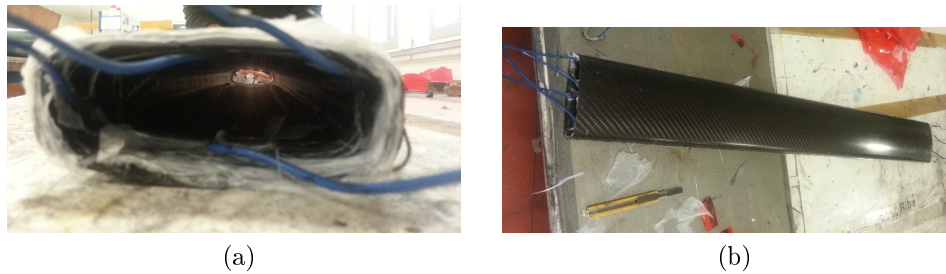


Figura 61: Disposizione delle fibre nella sezione (a) e spezzone dopo la cura (b)

Le letture delle fibre ha rilevato le seguenti attenuazioni:

- Fibra bend insensitive IUT G.657.A: attenuazione 0.20 dB
- Fibra standard SMF-28: attenuazione 0.80dB

Sebbene le fibre non si siano rotte e i punti di interfaccia con il cavo armato siano migliorati rispetto al primo spezzone, si sono comunque riscontrate delle difficoltà per quanto riguardava l'inclusione della resina tra la fibra e la guaina di protezione: i primi centimetri di fibra uscente dal laminato risultavano estremamente rigidi, segno che la resina si era infiltrata tra gli strati, inficiando il comportamento della fibra.

L'attenuazione registrata, tuttavia, è risultata decisamente minore rispetto al primo spezzone (meno del 10%).

I risultati sono mostrati in Figura 62 per quanto riguarda una delle due fibre SMF28e standard e nella Figura 63, relativa a una delle due G.652.A1 bend-insensitive fibre.

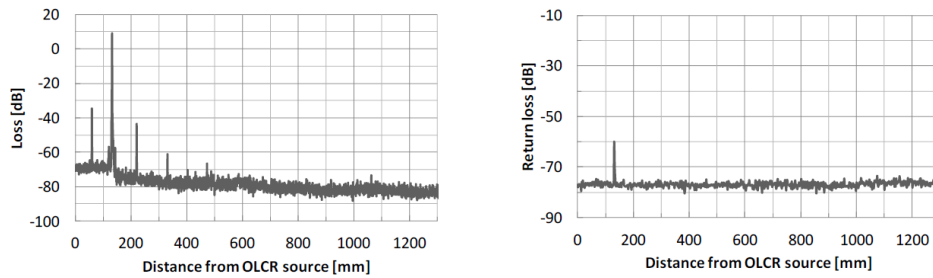


Figura 62: Dispersione (sinistra) e riflettanza (destra) nella fibra SMF28 incorporato nella sezione dello spezzone.

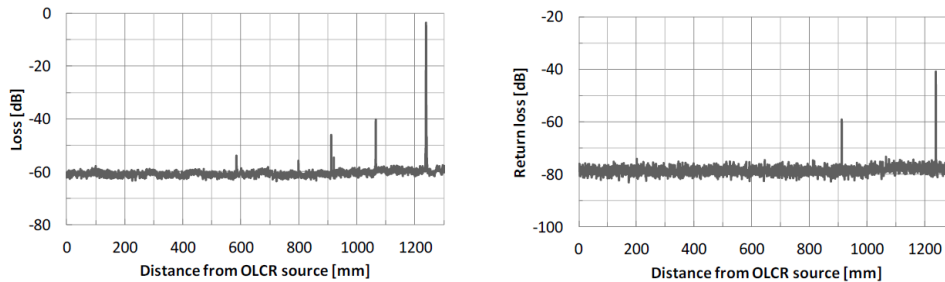


Figura 63: Dispersione (sinistra) e riflettanza (destra) nella fibra bend insensitive incorporata nello spezzone.

È evidente che la fibra SMF28e soffre di pesanti perdite distribuite e danni da microcurvature all'entrata fibra nel materiale, mentre la bend insensitive G.652.A1 no. In caso di campioni più lunghi rispetto ai provini visti nel capitolo precedente, la perdita distribuita è maggiore ed è rappresentata in Figura 62 dal decadimento della traccia di perdita di base dopo il picco elevato sul plot a sinistra. In Figura 63, dove viene mostrata la distribuzione delle perdite nel bend-insensitive fibra, è invece visibile una diminuzione della traccia poco sensibile. Inoltre, il picco relativo alla posizione in cui la fibra SMF28e entra nel materiale, che è il più alto picco a circa 120 mm in Figura 62, non è più evidente quando la fibra bend insensitive viene utilizzata. La perdita di trasmissione delle due fibre che, tuttavia, comprende le ulteriori

perdite introdotte dai connettori ottici e le giunzioni, è risultata essere 8,4 dB per la fibra SMF28e e solo 0,25 dB per il bend-insensitive G.652.A1 fibra.

I risultati ottenuti evidenziano come le fibre bend insensitive possono ridurre notevolmente sia le perdite microbending nei punti di transizione alle interfacce sia le perdite distribuite all'interno della lunghezza della fibra incorporata.

4.5.3 Provini per testare l'infiltrazione della resina

Dato che uno dei principali problemi riscontrati fino a questo punto, è stato l'infiltrazione della resina nelle guaine sterling e pvc usate a rinforzo delle fibre, sono state effettuate delle prove su campioni laminati appositamente per trovare la miglior soluzione in modo da ovviare questo problema, formati da 20 ply di circa 10X8 cm. Le fibre rinforzate con la guaina sono state inserite tra l'ultimo e il penultimo strato dei provini e sono state testate tre configurazioni differenti alle estremità finali delle guaine:

1. blocco con resina: viene applicata una resina epossidica (Loctite® 9492 Hysol)
2. blocco con guaina termorestringente: (VG/B116E) 1.6 mm di diametro, restringibile a 2:1
3. blocco con combinazione di entrambe, resina e guaina termorestringente

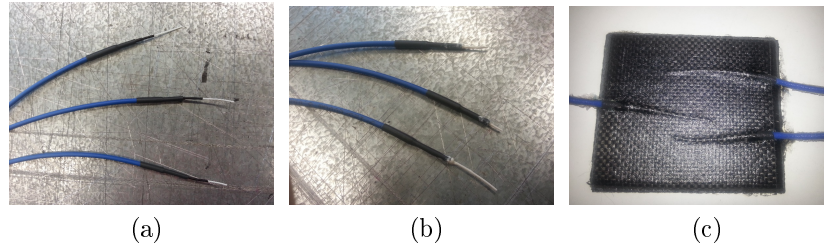


Figura 64: Blocco dell'infiltrazione della resina guaina restringente (a), guaina e resina (b) e provino dopo il ciclo di cura(c)

In ognuno dei tre provini sono stati installate tre guaine con le stesse caratteristiche. Delle tre configurazioni illustrate, solo l'ultima si è dimostrata efficiente allo scopo preposto, evitando efficacemente l'inclusione di resina. Infatti, nel primo caso si è riscontrata una notevole rigidità in un cavo su 3, nella seconda configurazione 2 su 3 mentre nel terzo caso nessun cavo si era indurito.

Con questo risultato sono state preparate nei laboratori MasterLab le fibre preposte alla posa dello spezzone del bompreso.

4.5.4 Realizzazione del simulacro

Successivamente, in Riba è stato laminato lo spezzone di bompreso. Il composito è composto da 7 ply di tessuto di carbonio impregnato GG630T-DT120-37 di 600 g/mm^2 . Il tipo di filato è un carbonio (Toray T700) con stile di tessitura a twill 2x2.

La sezione del bompreso è rettangolare e di dimensioni 100x80 mm, lunghezza di 2300 mm circa e spessore del laminato di 4,6 mm (Figura 65).

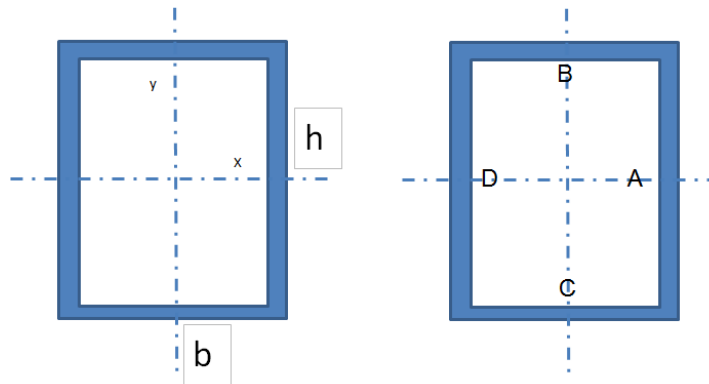


Figura 65: Schema della sezione del bompreso

Il pezzo è stato realizzato mediante stampo simmetrico, formato da due parti che prima della cura in autoclave vengono morsate insieme (Figura 66). Prima di chiudere lo stampo vengono depositate le fibre tra l'ultimo e il penultimo ply interno, posizionandole lungo gli assi di simmetria.



Figura 66: Le due metà dello stampo aperto e i sacchetti per il contenimento delle fibre

Sui lati denominati C e D sono state inserite fibre con fotoinciso un FBG, mentre ai lati A e B si trovano fibre con array di 3 reticoli per ognuno, distanti tra loro 500 mm. In Figura 67 vengono mostrate le confezioni delle fibre che ne riportano i datasheet.

Di seguito (Tabella 6) vengono riportate le caratteristiche nominali delle fibre utilizzate

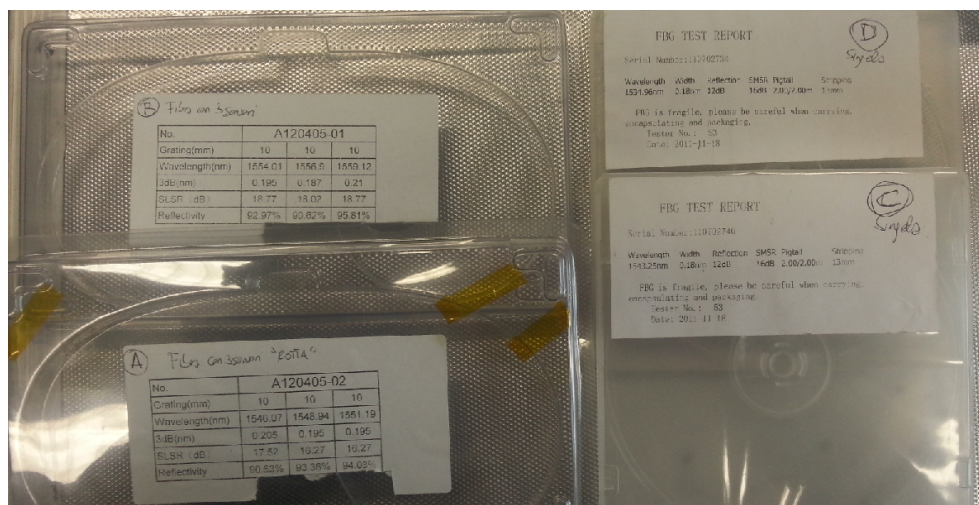


Figura 67: Datasheet delle fibre

Wavelength [nm]	A			B			C	D
Nominale	1546,07	1548,94	1551,19	1554,01	1556,9	1559,12	1543,25	1534,96
Riposo	1545,9	1549,3	1551,39	1554,2	1557,387	1559,2	1544,07	1535,428

Tabella 6: Lunghezza d'onda delle fibre

Durante la posa delle fibre è importante prestare attenzione ad alcuni fattori:

- Le fibre vengono depositate prima dell'ultimo strato interno allo stampo perchè questo procedimento, soprattutto relativamente alla produzione industriale, è più attuabile e semplice da realizzare rispetto alla posa su superficie esterna
- L'ultimo ply del composito viene tagliato all'estremità del bompreso in modo da farne uscire le fibre a circa 10 cm dal bordo (Figura 68); questa scelta è stata fatta considerando che alle estremità il pezzo può

eventualmente essere tagliato, rifinito e lavorato; se le fibre uscissero dal composito in prossimità dell'estremità del bordo non potrebbero venire effettuate queste operazioni

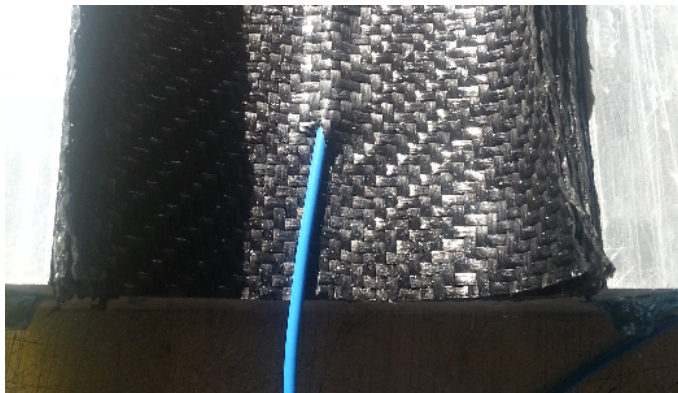


Figura 68: Estremità interna del bompresso

- Per evitare che l'effetto di inclusione della resina rovini le fibre, queste vengono sistemate all'interno di sacchetti creati ad hoc per contenerle; all'interfaccia col composito si è avuto cura di posizionare uno strato di materiale distaccante, in modo da evitare l'adesione delle fibre al materiale (Figura 69)



Figura 69: Sacchetti di contenimento delle fibre

- Successivamente al processo di cura, è necessario rifinire i lati del bompreso nella zona in cui le due metà dello stampo si uniscono; in questi punti infatti la resina può creare delle discontinuità fluendo nella zona di giuntura degli stampi.

Come è stato fatto con i provini, per la connettorizzazione è occorsa la collaborazione della Sesto Sensor. Questa ci ha potuto fornire gli spettri di riflessione relativi alle fibre embedded. Si riporta in Figura ,uno schema della disposizione delle fibre e dei relativi estensimetri, nello spezzone di bompreso.

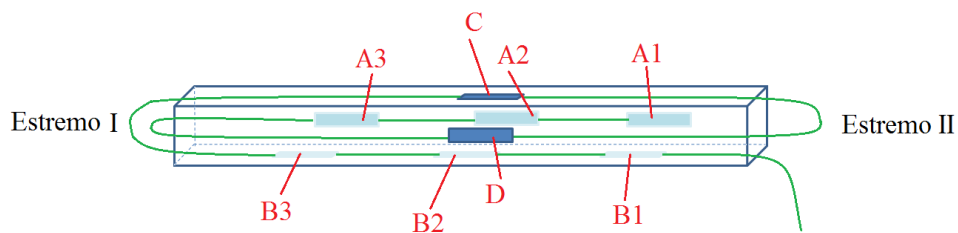


Figura 70: Schema della disposizione di FBG ed SG

Nella Figura 71 è possibile osservare i risultati delle letture dei sensori, relativamente ai loro spettri di carico. Le lettere a fianco indicano il lato di giacitura della fibra sul bompreso e i numeri indicano da quale estremità i dati sono state rilevati.

Si è poi scelto di collegare tra loro tutte le fibre alle due estremità in modo da ottenere una sorta di array unico composto da 8 reticoli in serie. A un estremo, le fibre C e D sono state saldate insieme, mentre nell'altro sono state unite, mediante connettori, D con A e C con B (Figura 72).

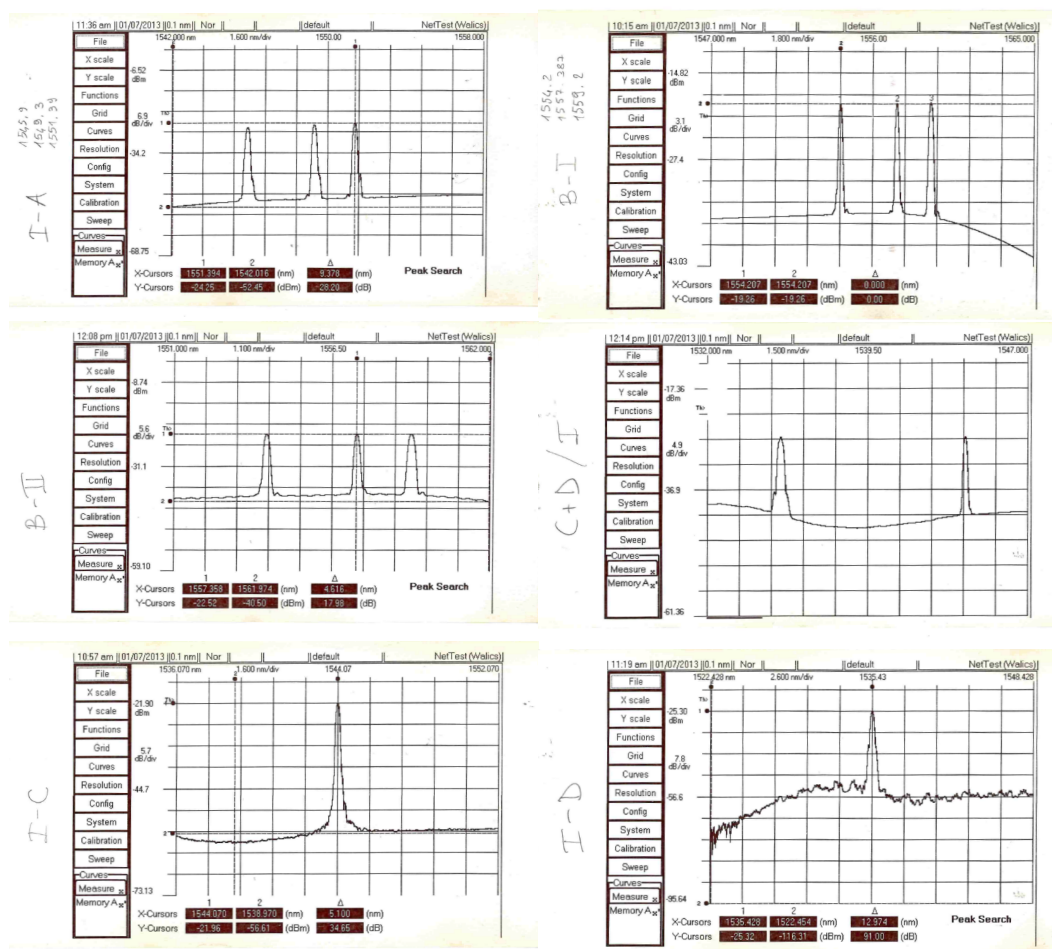


Figura 71: Spettri di riflessione delle fibre utilizzate

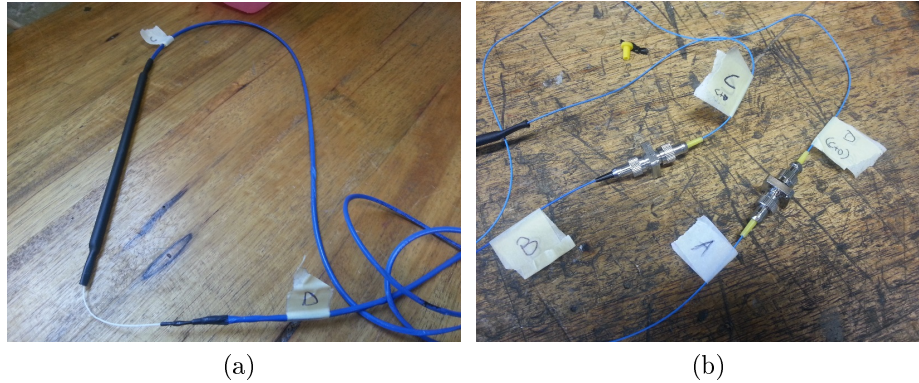


Figura 72: Giunzioni tra le fibre C-D (a), D-A e C-B (b)

Va considerato che il problema degli array è quello di riuscire a stabilire con che ordine il sistema di misura rileva le lunghezze d'onda delle fibre.

Per capire quindi come nominare le fibre, è stato sufficiente applicare un peso (circa 70 Kg) a tre quarti della lunghezza della trave e verificare quale tra le fibre laterali subiva la deformazione maggiore; in base a queste prove sono state nominate le estremità del bompreso come I e II.

Il passo successivo è stato quello di installare gli estensimetri sulle superfici esterne del bompreso, in modo da avere una misurazione di confronto per i sensori ottici. Come per i primi provini, si è cercato di fissare gli estensimetri in corrispondenza della posizione del sensore.

Per le prove a flessione che sono state eseguite, è stata predisposta anche in questo caso, come per i provini, la macchina Italsigma da 100 KN di massimo carico nominale. La macchina è stata adattata alle dimensioni del pezzo da testare installando gli appoggi per le estremità del bompreso e la struttura interna che trasferisce il carico alla trave, avendo cura che essa non tocchi gli estensimetri (Figura 73(b)) , per evitare che li danneggi. Si vede dalla Figura 73(a) che agli appoggi sono stati fissati dei piccoli bracci verticali per mantenere la trave in posizione.

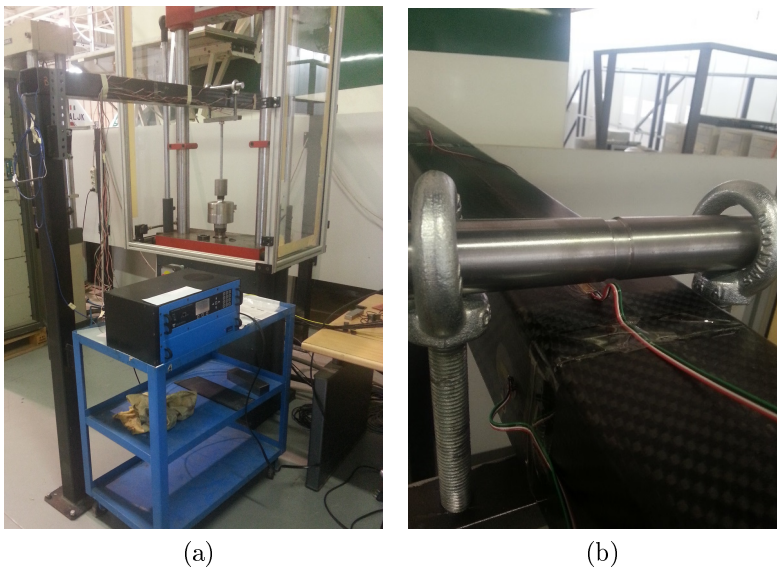


Figura 73: Macchina per le prove a flessione (a) e particolare (b)

Il campione è stato collegato con l'interrogatore Micron Optics per l'analisi delle riflessioni generate dal sensore FBG, in grado di leggere contemporaneamente gli 8 sensori ottici. Le letture dal sistema MO e dalla centralina estensimetrica sono rese simultanee grazie ad un programma di acquisizione dedicato, creato in ambiente Labview (Figura 74). Il sistema consente la sincronizzazione delle acquisizioni su tutti i canali di misura ed il salvataggio dei risultati delle letture, campionate con frequenza scelta.

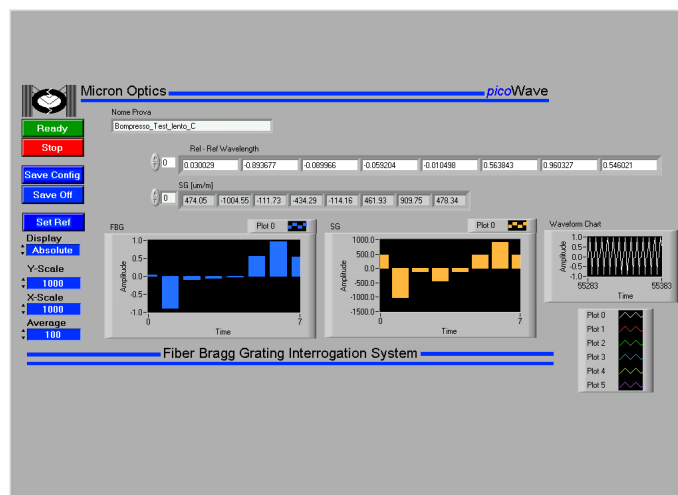


Figura 74: Schermata del sistema di acquisizione contemporanea dei dati FBG ed SG durante prove a flessione

Per quanto riguarda il collegamento con l'unità di controllo degli estensimetri, questi sono stati collegati al condizionatore di segnale Vishay la cui funzione è assimilabile a quella di un amplificatore. Una sub-routine, trasforma il segnale acquisito dagli estensimetri in deformazione, mediante il Gauge Factor caratteristico del sensore.

Con questa procedura, è possibile ottenere così nello stesso momento i dati rilevati dagli 8 sensori ottici e contemporaneamente dagli 8 estensimetri.

4.6 Prove sperimentali di flessione sul simulacro

Le prove sperimentali di flessione si sono svolte applicando un carico statico alla mezzeria del bompreso, in due condizioni differenti: per la prima si è previsto l'appoggio del bompreso sul lato lungo (x) di modo che il lato A si trovasse rivolto verso l'alto ("caso A"), secondariamente si è posto sul lato corto (y) con il lato C rivolto verso l'alto ("caso C"). Come è stato detto, sono stati acquisiti contemporaneamente i dati degli estensimetri e degli FBG, per poterli confrontare tra loro.

I dati sono stati poi confrontati con i valori di SG ed FBG previsti in maniera analitica che sono stati calcolati separatamente per il caso A e per il caso C.

Considerando “b” il lato minore della sezione, “h” quello maggiore (Figura 65), “s” lo spessore ed “L” la lunghezza della trave tra gli appoggi, per quanto riguarda il caso C, si è valutato:

- Modulo di resistenza a flessione (strato interno) :

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{h}{2} - s} \quad (21)$$

dove I_x è il momento di inerzia massimo rispetto all'asse x. Per il calcolo di I_x :

$$I_x = \frac{1}{12}(bh^3 - (b - 2s)(h - 2s)^3) \quad (22)$$

- Momento flettente massimo:

$$M_{fMAX} = \frac{P L}{2} \quad (23)$$

dove P è il carico applicato.

A questo punto è stato possibile calcolare la tensione massima

$$\sigma_{yMAX} = \frac{M_{fMAX}}{W_x} \quad (24)$$

Inoltre, per la deformazione prevista per i sensori ottici:

$$\epsilon_{yMAX-FBG} = \frac{\sigma_{yMAX}}{E} \quad (25)$$

Infine per la deformazione prevista per gli estensimetri:

$$\epsilon_{yMAX-SG} = \frac{M_{fMAX}}{W_{xEXT}E} \quad (26)$$

in cui (per lo strato esterno)

$$W_{xEXT} = \frac{I_x}{h} \quad (27)$$

Similmente, per il caso A valgono:

- Modulo di resistenza a flessione:

$$W_y = \frac{I_y}{\frac{b}{2} - s} \quad (28)$$

dove I_y è il momento di inerzia minimo rispetto all'asse y, calcolato come

$$I_y = \frac{1}{12}(hb^3 - (h - 2s)(b - 2s)^3) \quad (29)$$

- Momento flettente massimo:

$$M_{fMAX} = \frac{P L}{2} \quad (30)$$

$$\sigma_{xMAX} = \frac{M_{fMAX}}{W_y} \quad (31)$$

infine

$$\epsilon_{xMAX} = \frac{\sigma_{xMAX}}{E} \quad (32)$$

Infine per la deformazione prevista per gli estensimetri:

$$\epsilon_{xMAX-SG} = \frac{M_{fMAX}}{W_{yEXT}E} \quad (33)$$

in cui

$$W_{yEXT} = \frac{I_y}{b} \quad (34)$$

4.6.1 Risultati delle prove di flessione

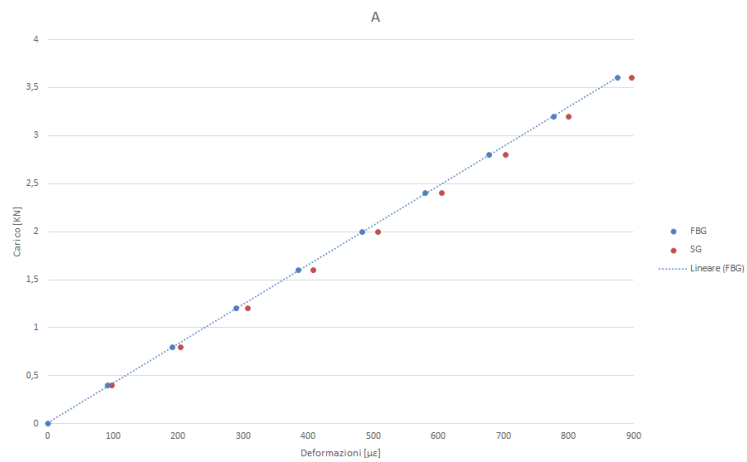
Si riportano in Tabella 7 le misure caratteristiche del bompreso:

Lato minore	b	82 mm
Lato maggiore	h	100 mm
Spessore	s	3.6 mm
Lunghezza della trave tra gli appoggi	L	2000 mm

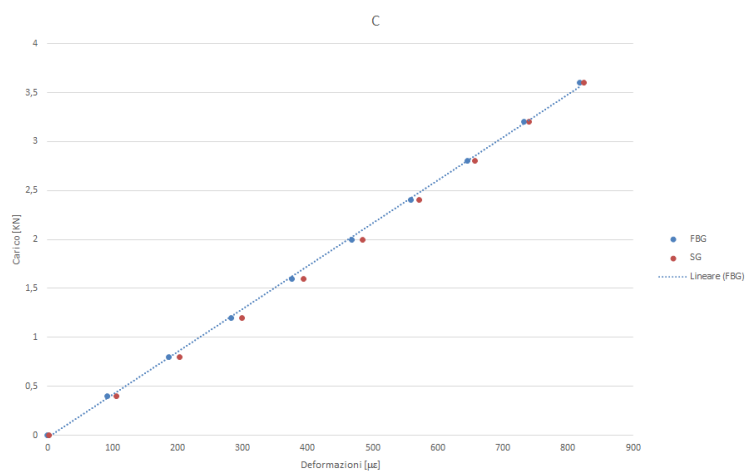
Tabella 7: Dati relativi al bompreso

è da specificare che lo spessore qui visualizzato non corrisponde a quello totale dello spezzone, bensì a quello in cui sono posizionate le fibre, che è il valore che interessa le successive valutazioni. A questo punto è possibile associare alle lunghezze d'onda dagli FBG, le deformazioni da essi rilevati; per far ciò è stato utilizzato il Gauge Factor calcolato precedentemente nel caso dei provini (4.4.1.1.1).

In Figura 75 si riportano i grafici relativi ai dati rilevati per quanto riguarda gli fbg centrali (rispettivamente A2 e C):



(a)



(b)

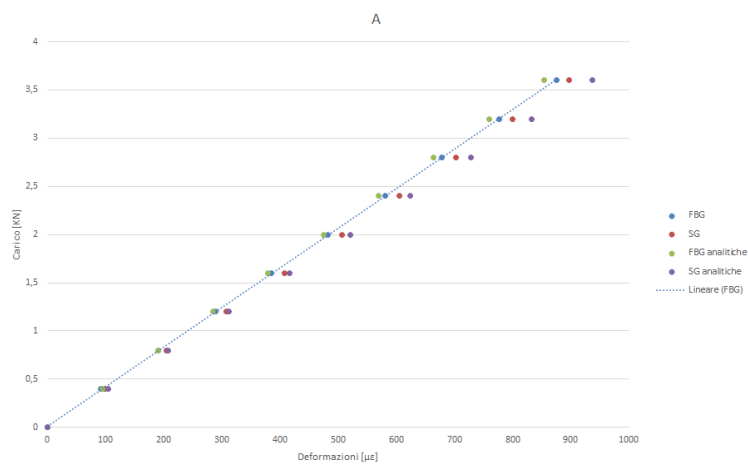
Figura 75: Letture estensimetri e FBG delle prove di trazione: caso A (a) e caso C (b)

Nella seguente Tabella 8, vengono riportati i principali valori ottenuti mediante le equazioni prima illustrate (Equazioni 21,22,27,28,29,34)

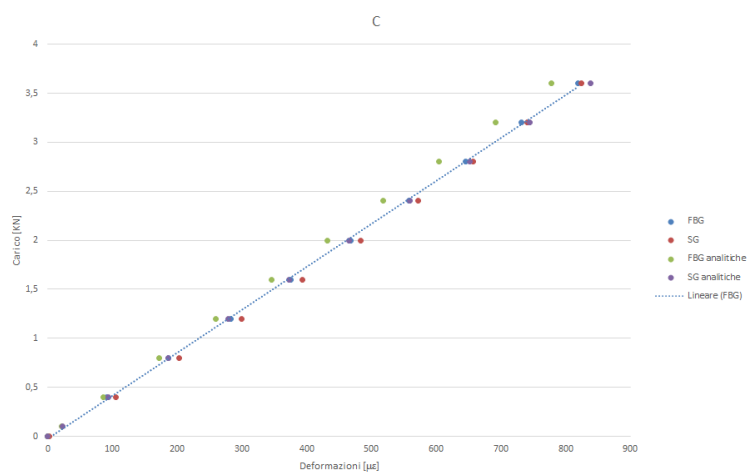
Momento inerzia massimo	I_x	$1851785,779 \text{ mm}^4$
Momento inerzia minimo	I_y	$1358263,795 \text{ mm}^4$
Modulo resistenza flessione (Strato interno)	W_x	$39909,17628 \text{ mm}^3$
	W_y	$36317,21378 \text{ mm}^3$
Modulo resistenza flessione (Strato esterno)	W_{xEXT}	$37035,71558 \text{ mm}^3$
	W_{yEXT}	$33128,38525 \text{ mm}^3$

Tabella 8: Principali risultati ottenuti analiticamente

Plottando i dati rilevati durante la sessione di prove a flessione insieme a quelli calcolati analiticamente si ottengono i grafici seguenti (Figura 76):



(a)



(b)

Figura 76: Letture estensimetri e FBG delle prove di trazione e dati analitici: caso A (a) e caso C (b)

4.6.2 Considerazioni sulle prove di flessione

- Osservando le forme degli spettri misurati tramite sistema OTDR, non si verificano distorsioni importanti, come allargamento dello spettro o “peak splitting” (separazione dello spettro in più picchi), dovute alla

presenza di importanti gradienti di stress longitudinali o trasversali; questo, d'altra parte, suggerirebbe che lo spostamento puramente traslatorio della lunghezza d'onda degli spettri, che si verifica in alcuni casi, sia dovuto ad una tensione residua prevalentemente longitudinale ed uniforme.

- Le fibre ottiche installate all'interno del bompreso sembrano seguire abbastanza bene il comportamento degli estensimetri; inoltre, risulta esserci una somiglianza notevole tra i dati calcolati analiticamente e quelli rilevati durante le prove di flessione. Questo dimostra che gli FBG sono pienamente in grado di rilevare le deformazioni di una trave in composito, dimostrando una buona adesione col materiale e un buon comportamento in conseguenza alle tensioni subite.
- In Figura 76, osservando la differenza tra le misure rilevate sperimentalmente e quelle calcolate analiticamente, si vede che c'è una buona corrispondenza tra i due casi. Nel caso C, infatti, l'errore percentuale tra i dati analitici e i dati rilevati varia dal 9,4% al 13,1% per quanto riguarda gli FBG e dal 0,9% all'11,8% per quanto concerne gli SG. Nel caso A l'errore percentuale per gli FBG varia da 0,1% a 2,7% mentre gli SG da 1% a 5%. In questo secondo caso, in particolare, i dati ottenuti dal sensore ottico rispecchiano molto bene il comportamento che si era analizzato analiticamente.
- In Figura 75 si nota che le letture fornite dagli FBG sono lievemente inferiori a quelle degli SG: ciò è dovuto alla posizione delle fibre, che sono collocate sullo strato interno dello spessore, mentre gli estensimetri si trovano sulla superficie esterna, argomento precedentemente affrontato in 4.4.2.1. Ad ogni modo, la differenza percentuale tra i dati analitici di FBG ed SG è all'incirca pari ad 8,7%; calcolando lo stesso errore percentuale per i dati del sensore ottico e degli estensimetri rilevati sperimentalmente si ottiene per il caso A un errore del $2.5 \div 6.5$ % e per

il caso C $0,7 \div 8,6\%$, valori che rimangono comunque minori di quello di riferimento analitico, quindi si possono considerare attendibili.

- Il Gauge Factor K_{GF} utilizzato per il calcolo delle deformazioni, è quello che è stato precedentemente calcolato per i provini della prima sessione di prove ed il modulo di Young E stimato per le considerazioni analitiche è pari a 58000 MPa. In realtà va considerato che questo tipo di analisi può essere ripercorsa in maniera inversa: visto che i dati sperimentali degli FBG e soprattutto degli SG si sono dimostrati attendibili, e trascurando gli effetti di sensibilità trasversale, è possibile modificare il valore di E e successivamente K_{GF} , in modo da far coincidere i dati analitici con quelli sperimentali. Procedendo con questo metodo iterativo è stato stimato che il valore più attendibile per K_{GF} è 0,8 e per E è 53000, comunque abbastanza simili ai dati che sono stati utilizzati.

5 Conclusioni

Lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi di monitoraggio strutturale offrono l'opportunità di valutare con continuità ed in tempo reale le caratteristiche strutturali e la loro degradazione durante il tempo di vita della struttura stessa. I sensori con fibra ottica integrata vengono presi in considerazione in un gran numero di applicazioni per il monitoraggio dello stato strutturale. Nei materiali compositi, i reticoli di Bragg sono risultati essere una delle più comuni ed affidabili soluzioni per il monitoraggio delle deformazioni. Nonostante la loro crescente popolarità bisogna tuttavia ricordare che sono ad oggi presenti delle limitazioni, molte delle quali sono relative al processo di integrazione.

L'attività svolta ha messo in luce numerosi aspetti difficilmente rilevabili dalla sola lettura della bibliografia riguardante l'argomento, risultando un fondamentale punto di partenza per lo studio e lo sviluppo di futuri componenti nautici e aerospaziali.

In particolare, le difficoltà maggiori che sono insorte durante il lavoro svolto hanno riguardato principalmente il processo di embedding (cioè di inglobamento) delle fibre nei componenti prodotti in composito, anche se l'utilizzo di opportune guaine rinforzanti e resine ha permesso di ottenere buoni risultati nei test di laboratorio.

Innanzitutto le fibre ottiche hanno dimostrato di sopportare bene i cicli di polimerizzazione in autoclave a cui sono state sottoposte durante il processo di inglobamento all'interno dei componenti in materiale composito; tali cicli variano a seconda del componente, dai 95°C ai 120°C con pressione a 3 bar. Infatti, osservando le forme degli spettri misurati tramite sistema OTDR, non si verificano distorsioni importanti, come allargamento dello spettro o separazione dello stesso in più picchi, dovute alla presenza di importanti gradienti di stress longitudinali o trasversali. Questo, d'altra parte, suggerirebbe che lo spostamento puramente traslatorio della lunghezza d'onda degli spettri, che si verifica in alcuni casi, sia dovuto ad una tensione residua prevalentemente longitudinale ed uniforme.

La possibilità tuttavia di poter ottenere, mediante i dati rilevati, l'intensità delle deformazioni residue, ci porta a considerare la fibra ottica come possibile strumento per valutare le tensioni residue all'interno di un materiale composito sottoposto a curing, poichè a questo punto esse sono quantificabili.

L'utilizzo di sensori estensimetrici (SG) che fungono da riferimento per le misurazioni, applicati sui componenti, ha permesso una verifica delle proprietà degli FBG. Dalle prove sperimentali effettuate è emerso che, confrontando i dati ottenuti dalla lettura dei sensori FBG e quelli ottenuti mediante gli estensimetri, i sensori ottici risultano pienamente in grado di misurare correttamente le deformazioni che il materiale subisce. Nonostante le letture fornite dagli FBG siano lievemente inferiori a quelle degli SG, la differenza tra le rilevazioni rimane inferiore al 9%. Dalle prove di trazione e flessione effettuate sui componenti si evince che le fibre ottiche sono pienamente in grado di sopportare le deformazioni imposte.

Nei casi di fibre embedded, come quelle valutate in questo lavoro, il coating della fibra ha rivestito un ruolo molto importante. Per quanto sia stato dimostrato che il tipo di rivestimento della fibra incida sulle proprietà del laminato, non sono stati riscontrati problemi con rivestimenti in poliammide e in acrilato. Ciononostante, dal confronto coi risultati ottenuti sui provini con fibre ricoperte in acrilato, si nota per i provini in kapton un comportamento più simile a quello rilevato mediante gli estensimetri. Infatti, per misurare le deformazioni, il rivestimento di poliammide si è rivelata la scelta più adatta, perché l'acrilato, essendo più morbido, trasmette con meno precisione la deformazione del pezzo alla fibra, soprattutto ad alte temperature. Dalla bibliografia, il kapton risulta essere più adatto all'applicazione in quanto molto rigido e resistente alle alte temperature. I risultati ottenuti con fibre bend insensitive inoltre, evidenziano come queste possono ridurre notevolmente sia le perdite nei punti di transizione alle interfacce sia le perdite distribuite all'interno della lunghezza della fibra incorporata.

Un'ulteriore differenza è stata riscontrata nel comportamento dei sensori

a seconda del loro posizionamento, in quanto quelli posti in superficie si sono rivelati più precisi rispetto a quelli depositati in mezzera. La differenza dei valori ottenuti è comunque quantificabile e calcolabile a priori.

Allo stesso modo è stato possibile valutare analiticamente i valori di deformazione che ci si può attendere in funzione di un carico applicato; i dati calcolati analiticamente e quelli rilevati durante le prove di flessione presentano una somiglianza notevole, la cui differenza varia da un minimo dello 0,1% a un massimo del 13%. Questo dimostra che gli FBG sono pienamente in grado di rilevare le deformazioni di una trave in composito, mostrando una buona adesione col materiale e un buon comportamento in conseguenza ai carichi applicati.

L'obiettivo ultimo dell'intera sperimentazione si prospetta quello di ottenere un dispositivo completo e ottimizzato per l'utilizzo industriale, il quale possa essere venduto e montato come optional per svariati prodotti della gamma in produzione, sia per quanto riguarda il settore nautico sia per quelli automobilistico o aerospaziale.

Riferimenti bibliografici

- [1] *Cataloghi Huihong Technologies Limited.*
- [2] *Cataloghi RS Components.*
- [3] *Micron Optics INC. Fiber Bragg Gratings Interrogation System Instruction Manual.*
- [4] *Norma ASTM 3039.*
- [5] Dinesh Arora, Dr.Jai Prakash, Hardeep Singh, and Dr. Amit Wason. Reflectivity and bragg wavelength in fbg. *International Journal of Engineering (IJE)*, 5, 2011.
- [6] H. K. Bal, F. Sidirolou, Z. Brodzeli, S. A. Wade, G. W. Baxter, and S. F. Collins. Fibre bragg grating transverse strain sensing using reflections at twice the bragg wavelength. *Measurement Science and Technology*, 2010.
- [7] Y. Bing, K. Ohsono, Y. Kurosawa, T. Kumagai, and M. Tachikura. Low-loss holey fiber. *Hitachi Cable Review*, 24, 2005.
- [8] Gianni Caligiana and Francesco Cesari. *I materiali compositi*. 2002.
- [9] Stefano Chiozzini. *Elaborato finale di laurea. Sviluppo di un sistema di monitoraggio dello stato di deformazione di un albero da imbarcazione in materiale composito tramite Reticoli di Bragg in fibra ottica*. 2010/2011.
- [10] Ignazio Crivelli-Visconti, Giancarlo Caprino, and Antonio Longella. *Materiali compositi, tecnologia progettazione applicazioni*. 01/2009.
- [11] M. S. Ferreira, J. Vieira, C. Frias, and O. Frazao. Simultaneous measurement of strain and temperature using fiber bragg grating sensors embedded in hybrid composite laminates. *Measurement Science and Technology*, 2005.

- [12] Amina Frozzi. *Elaborato finale di laurea. Studio del processo produttivo tramite infusione di resina per materiali compositi*. 2008/2009.
- [13] Daniel Gay, Suong V. Hoa, and Stephen W. Tsai. *Composite materials, design and applications*. CRC Press.
- [14] P.I. Gnusin, S.A. Vasil'ev, O.I. Medvedkov, and E.M. Dianov. Reversible changes in the reëctivity of different types of ébre bragg gratings. *Quantum Electron*, 40, 2010.
- [15] Kenneth O. Hill and Gerald Meltz. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of lightwave technologies*, 15, 1997.
- [16] Raman Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*. 2010.
- [17] S. Lebid, W. Habel, and W. Daum. How to reliably measure composite-embedded fibre bragg grating sensors influenced by transverse and point-wise deformations. *Measurement Science and Technology*, 2004.
- [18] Ming-Jun Li. Bend-insensitive optical fibers simplify fiber-to-the-home installations. *Optoelectronics & Communications*.
- [19] Ningliang Liu, Yuhua Li, Ying Wang, Haiyan Wang, Wenbin Liang, and Peixiang Lu. Bending insensitive sensors for strain and temperature measurements with bragg gratings in bragg fibers. *OPTICS EXPRESS*, 19, 2011.
- [20] Geert Luyckx, Eli Voet, Nicolas Lammens, and Joris Degrieck. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre bragg gratings: Criticism and opportunities for research. *Sensors*, 11, 2011.
- [21] P. K. Mallick. *Fiber reinforced composites, materials, manufacturing, and design*. CRC Press.
- [22] S. Matsuo, M. Ikeda, and K. Himeno. Bend-insensitive and low-splice-loss optical fiber for indoor wiring in ftth. 2004.

- [23] S. Matsuo, T. Nunome, T. Yoshita, T. Hamada, and Design optimization of trench index profile for the same dispersion characteristics with SMF K. Himeno. Design optimization of trench index profile for the same dispersion characteristics with smf. In *Opt. Fiber Comm. Conf. and The Expo. and Natl Fiber Optic Engineers Conf*, 2007.
- [24] Michael C. Y. Niu. *Composite airframe strucures, pratical design information and data*.
- [25] Peter L. Reece. *Smart materials and structures: new Research*. 2006.
- [26] E. Rivera and D. J. Thomson. Accurate strain measurements with fiber bragg sensors and wavelength references. *Smart materials and structures*, 2006.
- [27] Vivien G Schukar, Daniel Kadoke, Nadine Kusche, Sven Mšunzenberger, Klaus-Peter Grunder, and Wolfgang R Habel. Validation and qualification of surface-applied fibre optic strain sensors using application-independent optical techniques. *Measurement Science and Technology*, 2012.
- [28] S. Schultz, W. Kunzler, Z. Zhu, M. Wirthlin, R. Selfridge, A. Propst, M. Zikry, and K. Peters. Full-spectrum interrogation of fiber bragg grating sensors for dynamic measurements in composite laminates. *Smart materials and structures*, 2009.
- [29] P. W. Shumate and R. K. Snelling. Evolution of fiber in the residential loop plant. *IEEE Commun.*, 1991.
- [30] Sito. *Azienda HBM www.hbm.com*.
- [31] Sito. *Azienda Micron Optics www.micronoptics.com*.
- [32] Sito. *Azienda Riba Composite www.ribacomposites.it*.

- [33] Sito. *www.specialtyphotonics.com*.
- [34] Sito. *www.wikipedia.org*.
- [35] W.J. Staszewski, C. Boller, and G.R. Tomlinson. *Health Monitoring of Aerospace Structures Smart Sensor Technologies and Signal Processing*.
- [36] Prof. Enrico Troiani. Strutture e materiali aerospaziali LM. Appunti del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale Università degli Studi di Bologna.
- [37] Eric Udd, Whitten Schulz, John Seim, Eric Haugse, Angela Trego, Patrick Johnson, Thomas E. Bennettec, Drew Nelsond, and Alberto Makinod. Multidimensional strain field measurements using fiber optic grating sensors.
- [38] Francis T. S. Yu and Shitzhuo Yin. *Fiber Optic Sensors*. 2002.

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, il Professor Troiani, e i correlatori, il Professor Lorenzo Donati e la Professoressa Raffaella Di Sante, che mi hanno seguito durante lo sviluppo di questa attività di ricerca.

Special thanks vanno all'Ing. Paolo Proli il cui aiuto è stato fondamentale per la riuscita del mio lavoro.

Naturalmente ringrazio l'Ing. Filippo Bastianini della Sesto Sensor, l'Ing. Enrico Dolcini e "Zago" della Riba Composites per la disponibilità e la competenza tecnica.

Ringrazio Cocco e Toppi, che si laureano nel mio stesso giorno, come fu per la triennale, per essere stati coinquilini e compagni di studio eccezionali in questi quattro anni. Grazie a Francesco e Viola, ai ventidue coinquilini che ho avuto il piacere di avere, quelli stabili e quelli che sono passati di qua solo di sfuggita, e a tutte le persone che in un modo o nell'altro hanno contribuito a rendere belli gli anni che ho vissuto in questa città.

Un grazie ai miei genitori e ai miei parenti, ai miei amici di Ferrara, alle mie amiche di sempre, supporti fondamentali nella mia vita.

E un ulteriore grazie a Tommaso, per così tante cose da non poterle riassumere.