

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

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

**CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe: LM-33**

**TESI DI LAUREA
In Tecnologie Speciali Lm**

**Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati
CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica**

**CANDIDATO
Michael Argelli**

**RELATORE
Prof. Lorenzo Donati**

**CORRELATORI
Prof.ssa Raffaella Di Sante
Ing. Enrico Dolcini**

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III

Indice

1	Introduzione.....	15
2	Fibre ottiche.....	17
2.1	Generalità.....	17
2.2	Storia.....	18
2.3	Costituzione.....	19
2.3.1	Silice.....	20
2.3.2	Polimeri.....	21
2.4	Funzionamento.....	21
2.5	Attenuazione.....	24
2.5.1	Meccanismi di perdita in fibra ottica.....	24
2.5.2	Perdite per assorbimento.....	24
2.5.3	Perdite per diffusione (Rayleigh scattering).....	25
2.5.4	Perdite specifiche delle guide dielettriche.....	26
2.5.4.1	Curvatura della guida dielettrica.....	26
2.5.4.2	Corrugazioni della guida dielettrica.....	26
2.5.4.3	Imperfezioni nella fabbricazione.....	26
2.6	Dispersione.....	27
2.7	Sensori a fibra ottica.....	28
2.7.1	Sensori intrinseci.....	29
2.7.2	Sensori estrinseci.....	30
3	Reticoli di Bragg in fibra ottica.....	31
3.1	Storia.....	34
3.2	Fabbricazione.....	34
3.2.1	Interferenza.....	35
3.2.2	Scrittura sequenziale.....	36
3.2.3	Mascheratura fotografica.....	37
3.2.4	Point-by-point.....	38
3.2.5	Produzione.....	38
3.3	Teoria.....	38
3.3.1	Superfici multiple.....	40
3.4	Tipi di reticolo.....	42
3.5	Struttura del reticolo.....	42

3.5.1	Reticoli <i>Apodizzati</i>	43
3.5.2	Reticoli chirped.....	44
3.5.3	Reticoli inclinati (tilted).....	44
3.5.4	Reticoli a lungo periodo.....	44
3.6	Applicazioni.....	45
3.6.1	Comunicazioni.....	45
3.6.2	Sensori FBG.....	46
3.7	Misura e interrogazione FBG.....	47
3.7.1	Principi di misurazione.....	47
3.7.1.1	Deformazione.....	47
3.7.1.2	Temperatura.....	49
3.7.1.3	Pressione.....	49
3.7.1.4	Campo magnetico dinamico.....	50
3.7.2	Tecniche di interrogazione.....	51
3.7.3	Principi degli schemi di interrogazione.....	52
3.7.3.1	Filtro selettivo.....	52
3.7.3.2	Filtro accordabile.....	52
3.7.3.3	Scansione con interferometro.....	53
3.8	Applicazioni FBG.....	54
3.8.1	Applicazioni in grandi strutture in composito e cemento.....	55
3.8.1.1	Ponti.....	56
3.8.1.2	Miniere.....	56
3.8.1.3	Veicoli marini.....	57
3.8.1.4	Aerei.....	57
3.8.2	Applicazioni nell'industria dell'energia elettrica.....	59
3.8.2.1	Monitoraggio del carico di una linea di trasmissione di potenza.....	59
3.8.2.2	Misura della temperatura dell'avvolgimento.....	60
3.8.2.3	Misura della corrente elettrica.....	60
3.8.3	Applicazioni in medicina.....	61
3.8.3.1	Temperatura.....	61
3.8.3.2	Ultrasuoni.....	63
3.8.4	Applicazioni per il settore chimico.....	64

4	Structural Health Monitoring di componenti in materiale composito.....	65
4.1	Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors di S.Takeda, Y.Okabe, T.Yamamoto, N.Takeda.....	65
4.1.1	Abstract.....	65
4.1.2	Introduzione.....	66
4.1.3	Test di trazione statico.....	67
4.1.4	Individuazione di delaminazione di bordo sotto carico ciclico.....	68
4.1.5	Verifica dei risultati sperimentali.....	71
4.1.6	Conclusioni.....	73
4.2	Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors di S.Takeda, Y.Okabe, N.Takeda.....	74
4.2.1	Abstract.....	74
4.2.2	Introduzione.....	74
4.2.3	Esperimento.....	74
4.2.4	Calcolo teorico dello spettro di riflessione.....	77
4.2.5	Risultati e discussione.....	77
4.2.6	Conclusioni.....	85
4.3	Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors di S. Takeda, S. Minakuchi, Y. Okabe, N. Takeda.....	86
4.3.1	Abstract.....	86
4.3.2	Introduzione.....	86
4.3.3	Esperimento.....	86
4.3.4	Analisi.....	89
4.3.5	Conclusioni.....	92
4.4	Detection of transverse cracks in CFRP laminates using embedded fiber Bragg grating sensors di Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka e N. Takeda.....	93
4.4.1	Abstract.....	93
4.4.2	Introduzione.....	93

4.4.3	Procedura sperimentale.....	93
4.4.4	Risultati sperimentali.....	95
4.4.5	Analisi.....	97
4.4.6	Conclusioni.....	100
4.5	Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack location in composites di Y. Okabe, R. Tsuji, N- Takeda.....	101
4.5.1	Abstract.....	101
4.5.2	Introduzione.....	101
4.5.3	Procedura sperimentale.....	102
4.5.4	Conclusioni.....	111
5	Prove Sperimentali.....	113
5.1	Materiali.....	113
5.2	Macchinari e strumenti.....	118
5.3	Svolgimento prove.....	124
5.3.1	Laminazione provini ed embedding delle fibre.....	124
5.3.2	Cura in autoclave.....	128
5.3.3	Taglio dei provini.....	131
5.3.4	Applicazione dei tab.....	132
5.3.5	Lucidatura dei provini.....	133
5.3.6	Connettorizzazione delle fibre ottiche.....	136
5.3.7	Test preliminari sui provini non strumentati.....	138
5.3.8	Analisi al microscopio.....	139
5.3.9	Test di trazione sui provini strumentati.....	141
5.3.10	Registrazione degli spettri.....	143
5.3.11	Riepilogo delle fasi dei test di trazione su provini strumentati.....	145
6	Analisi dei risultati.....	147
6.1	Caratteristica meccanica dei provini in UD.....	147
6.2	Densità di fratture nei provini in UD.....	149
6.3	Analisi al microscopio dei provini in UD.....	151
6.4	Analisi degli spettri del provino in UD.....	156
6.4.1	Spettri a riposo.....	156
6.4.2	Spettri sotto carico.....	160

6.5	Caratteristica meccanica dei provini in PW.....	162
6.6	Analisi al microscopio dei provini in PW.....	163
6.7	Analisi degli spettri del provino in PW.....	168
6.7.1	Spettri a riposo.....	168
6.7.2	Spettri sotto carico.....	171
6.8	Risposte del sensore alla deformazione.....	174
6.9	Lunghezza d'onda di Bragg.....	176
6.10	Analisi della FWHM (Full Width at Half Maximum).....	178
6.10.1	FWHM degli spettri relativi al provino in UD.....	179
6.10.2	FWHM degli spettri relativi al provino in PW.....	181
7	Conclusioni e sviluppi futuri.....	185
8	Riferimenti.....	189
9	Ringraziamenti.....	193

Elenco delle figure

1. Un braccio in composito realizzato da Riba Composites.....	16
2. Fibre ottiche.....	17
3. Diagramma di fibra ottica single-mode: (1) Core 10 μm (2) Cladding 125 μm (3) Buffer 250 μm (4) Jacket 400 μm	20
4. Funzionamento della fibra step-index.....	22
5. Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi in fibra ottica step-index.....	22
6. Confronto tra fibre ottiche.....	24
7. Curvatura della guida dielettrica.....	26
8. Distorsioni nella fibra ottica.....	28
9. Gli strati sottili con indice di rifrazione n_1 sono intervallati da strati spessi con indice n_2 . Le lunghezze di traiettoria l_A e l_B differiscono esattamente di una lunghezza d'onda, determinando un'interferenza costruttiva.....	33
10. Struttura dell'FBG, profilo dell'indice di rifrazione e risposta spettrale.....	34
11. Schema del metodo ad interferenza con due laser.....	36
12. Schema del metodo ad interferenza con lunghezza d'onda sintonizzabile.....	36
13. Schema del metodo con mascheratura con maschera di fase.....	37
14. Schema del metodo di mascheratura con maschera di fase modificato.....	38
15. Variabili utilizzate nelle equazioni di Fresnel.....	39
16. Potenza riflessa dall'FBG come funzione della lunghezza d'onda....	41
17. Profilo dell'indice di rifrazione nel core.....	43
18. Tipico diagramma di radiazione.....	44
19. Tipico diagramma di radiazione in coordinate cartesiane.....	44
20. Strutture dell'indice di rifrazione.....	45
21. Sensore FBG chirped.....	48
22. Divisione della risonanza di Bragg dovuta alla birifrangenza circolare indotta da un campo magnetico.....	51
23. (a) Principio del metodo con filtro selettivo; (b) Principio del metodo	

con filtro accordabile; (c) Principio del metodo con interferometro.....	53
24.Schema del sistema di FBG utilizzati per monitorare il ponte.....	56
25.Schema di un veicolo marino con sensori FBG.....	57
26.Diagramma schematico del sistema FBG di monitoraggio di una linea di trasmissione elettrica.....	60
27.Confronto tra sensori FBG e termocoppia.....	62
28.Risultati di misure di temperatura con sensori FBG.....	63
29.Dimensioni provino.....	67
30.Foto al microscopio del provino: parallela al carico (a) e perpendicolare (b).....	68
31.Sensore FBG inserito nel laminato.....	69
32.Spettri riflessi misurati.....	70
33.Foto al microscopio del provino dopo il ciclo di carico.....	71
34.Raffronto tra spettro misurato (a) e calcolato (b) a $L_{ed} = 9$ mm ad un carico di 220 Mpa.....	72
35.Rapporti di intensità dei picchi rispetto a L_{ed}	73
36.Laminato con delaminazione sotto flessione a 4 punti.....	75
37.Inserimento del sensore FBG in due posizioni: Tipo A (a) e Tipo B (b).....	76
38.Delaminazione osservata tramite fotografia a raggi-X fatta dalla superficie superiore del provino.....	78
39.Spettro di riflessione agli step 0-5 nel test di Tipo A (1).....	79
40.Spettro di riflessione agli step 0-5 nel test di Tipo A (2).....	80
41.Spettro di riflessione del Test B (1).....	81
42.Spettro di riflessione del Test B (2).....	82
43.Influenza della lunghezza di delaminazione sullo spettro.....	84
44.Rapporto di intensità dei due picchi rispetto alla lunghezza di delaminazione.....	85
45.Illustrazione e micrografie del laminato soggetto ad impatto a bassa velocità.....	87
46.Sensore FBG inserito nel provino.....	88
47.Spettri misurati e fotografie della delaminazione.....	89

48. Spettri di riflessione calcolati e distribuzione assiale di deformazione.....	90
49. Valutazione della dimensione della delaminazione. (a) Definizione delle intensità dei due picchi e (b) curve logaritmiche del rapporto di intensità rispetto alla lunghezza di delaminazione.....	92
50. Sensore inserito nel composito.....	94
51. Sezione del laminato: (a) perpendicolare alla direzione del carico e (b) parallela alla direzione del carico.....	94
52. Geometria e dimensioni del provino.....	95
53. Densità di fratture e tensione in funzione della deformazione.....	96
54. Spettri di riflessione misurati per varie deformazioni. Corrispondono ai dati (A)-(F) di Fig. 53.....	97
55. Relazione tra larghezza dello spettro e densità delle fratture.....	98
56. Densità media di fratture di 18 provini testati.....	99
57. Larghezza dello spettro calcolata per la densità media di fratture di Fig. 56.....	100
58. Profili di indice di rifrazione e spettro di riflessione di FBG: (a) uniforme e (b) chirped.....	102
59. Posizionamento del sensore nel laminato e configurazione del laminato.....	103
60. Geometria e dimensioni del provino.....	103
61. Tensione e densità di fratture in funzione della deformazione.....	104
62. Spettri di riflessione del sensore normale misurati dopo lo scaricamento a diversi valori di ϵ_{max} : (a) $\epsilon_{max} = 0,0 \%$, 0 fratture; (b) $\epsilon_{max} = 0,875 \%$, 1 frattura; (c) $\epsilon_{max} = 0,95 \%$, 5 fratture	105
63. Spettri di riflessione del sensore normale misurati dopo lo scaricamento a diversi valori di ϵ_{max} : (d) $\epsilon_{max} = 0,975 \%$, 10 fratture e (e) $\epsilon_{max} = 1,05 \%$, 21 fratture.....	106
64. Spettro calcolato.....	107
65. Tensione e densità di fratture in funzione della deformazione.....	108
66. Spettro di riflessione misurato dopo lo scaricamento da diversi valori di ϵ_{max} ad una deformazione dello 0,4 %: (a) $\epsilon_{max} = 0,0 \%$, nessuna frattura; (b) $\epsilon_{max} = 0,75 \%$, 1 frattura; (c) $\epsilon_{max} = 0,75 \%$, 4 fratture.....	109

67. Spettro di riflessione misurato dopo lo scaricamento da diversi valori di ε_{\max} ad una deformazione dello 0,4 %: (a) $\varepsilon_{\max} = 0,0$ %, nessuna frattura; (d) $\varepsilon_{\max} = 0,82$ %, 12 fratture; (e) $\varepsilon_{\max} = 0,92$ %, 22 fratture.....	110
68. Scheda tecnica pre-impregnato plain weave.....	114
69. Scheda tecnica sistema resinoso (1).....	115
70. Scheda tecnica sistema resinoso (2).....	116
71. Caratteristiche fibra impiegata nel pre-impregnato unidirezionale.....	117
72. Autoclave in dotazione al MasterLab.....	119
73. Interrogatore di sensori FBG.....	120
74. Schermata di controllo dell'interrogatore.....	120
75. Sistema per la regolazione dell'interrogatore.....	122
76. Dettaglio del sistema di regolazione dell'interrogatore.....	122
77. Giuntatrice.....	123
78. Strain Indicator.....	124
79. Geometria e dimensioni nominali dei provini.....	125
80. Fibra ottica con guaina in Teflon e Kapton rimosso nella zona del reticolo.....	127
81. Laminato con fibra ottica.....	127
82. Laminato pronto per il ciclo di cura.....	128
83. Dettaglio del sistema di protezione della fibra ottica.....	128
84. Sacco pronto per il ciclo di cura.....	129
85. Ciclo di cura.....	130
86. Laminato in UD dopo l'estrazione.....	130
87. Laminato in tessuto dopo l'estrazione.....	131
88. Sacchetti per proteggere la fibra ottica.....	132
89. Provini in UD dopo il taglio.....	132
90. Distaccante posto "a protezione" dei provini.....	133
91. Dischi abrasivi. Partendo dall'alto, sono ordinati per dimensione del grano minore.....	134
92. Macchina per la lucidatura con disco a grana più fine e diamante spray.....	134
93. Sistema per non danneggiare la fibra ottica durante la lucidatura del	

provino.....	135
94. Strumento per tranciare le fibre.....	136
95. Inserimento di una della fibre nella giuntatrice.....	137
96. Display che comunica l'avvenuto collegamento delle due fibre.....	137
97. Applicazione della guaina protettiva.....	138
98. "Sistema di trasporto" del provino connettorizzato.....	138
99. Provino montato sulla pressa.....	139
100. Provino strumentato sul microscopio.....	140
101. Provino strumentato sul microscopio (ingrandimento).....	141
102. Intero sistema di misura.....	142
103. Dettaglio collegamento provino - Strain Indicator.....	142
104. Dettaglio collegamento Interrogatore FBG – PC.....	143
105. Protezione del connettore aggiuntivo.....	143
106. Caratteristica meccanica provini UD.....	147
107. Lunghezza utile per il calcolo della densità di fratture.....	149
108. Densità di fratture.....	150
109. Provino in UD non danneggiato. Ingrandimento 10X.....	151
110. Interfaccia 0°/90°. Ingrandimento 50X.....	152
111. Frattura trasversale. Ingrandimento 5X.....	152
112. Frattura. Ingrandimento 50X.....	153
113. Delaminazioni all'interfaccia 0°/90° e cricche trasversali alla rottura del provino.....	154
114. Fibra ottica all'interno dell'UD (1) Ingrandimento 10X.....	154
115. Fibra ottica all'interno dell'UD (2) Dettaglio del core della fibra. Ingrandimento 10X.....	155
116. Fibra ottica all'interno dell'UD (3) Dettaglio del core della fibra. Ingrandimento 20X.....	155
117. Fibra ottica all'interno dell'UD (5) Vista frontale. Ingrandimento 20X.....	156
118. Spettri a riposo provino UD (1).....	157
119. Spettri a riposo provino UD (2).....	158
120. Spettri a riposo provino UD (2)_ingrandimento.....	159
121. Spettri sotto carico provino UD (1).....	160
122. Spettri sotto carico provino UD (2).....	161

123.	Spettri sotto carico provino UD (2)_ingrandimento.....	161
124.	Caratteristica meccanica provini PW.....	162
125.	Micrografia di un provino in PW (1) Ingrandimento 10X...	163
126.	Micrografia di un provino in PW (2) Ingrandimento 10X....	164
127.	Micrografia di un provino in PW (3) Ingrandimento 10X...	164
128.	Fibra ottica all'interno del PW (1) Ingrandimento 10X.....	165
129.	Fibra ottica all'interno del PW (2) Ingrandimento 10X.....	166
130.	Fibra ottica all'interno del PW (3) Cladding sezionato dal piano di taglio del provino. Ingrandimento 10X.....	166
131.	Fibra ottica all'interno del PW (4) Vista frontale. Ingrandimento 10X.....	167
132.	Fibra ottica all'interno del PW (5) Vista frontale. Ingrandimento 20X.....	168
133.	Spettri a riposo del provino in PW (1).....	169
134.	Spettri a riposo del provino in PW (2).....	170
135.	Spettri sotto carico del provino in PW (1).....	171
136.	Spettri sotto carico del provino in PW (2).....	172
137.	Spettri sotto carico del provino in PW (3).....	173
138.	Lunghezza d'onda di Bragg del provino in UD.....	177
139.	Lunghezza d'onda di Bragg del provino in PW.....	177
140.	Confronto tra le lunghezze d'onda di Bragg sotto carico.....	178
141.	FWHM dello spettro relativo al provino in UD.....	179
142.	FWHM dello spettro relativo al provino in UD. Grafico modificato.....	180
143.	FWHM degli spettri relativi al provino in PW.....	182
144.	FWHM degli spettri relativi al provino in PW. Grafico modificato.....	183

Elenco delle tabelle

1. Sensibilità a deformazione e temperatura di sensori FBG a differenti lunghezze d'onda.....	49
2. Lunghezza di delaminazione all'aumentare dei cicli.....	70
3. Lunghezza di delaminazione nel test di Tipo A.....	78
4. Lunghezza di delaminazione nel test di Tipo B.....	79
5. Proprietà delle fibre ottiche utilizzate.....	118
6. Proprietà degli estensimetri utilizzati.....	118
7. Calcolo del Gage Factor (Strain Coefficient) delle fibre ottiche....	175
8. Calcolo dell'allungamento percentuale misurato dall'FBG.....	175
9. Tensioni residue del ciclo di cura.....	176

1 **Introduzione**

Questa tesi si colloca nell'ambito dello Structural Health Monitoring, un campo di recente sviluppo concentrato, in particolare, sui materiali compositi. Lo studio, non è altro che il proseguimento di altre due tesi, portate avanti dalla Seconda Facoltà di Ingegneria, nelle quali, il filo conduttore, è la tecnologia dei Reticoli di Bragg. Se nella prima tesi, quella dell'Ing. Chiozzini, ci si è concentrati, principalmente, sulla corretta tecnologia da applicare per inserire le fibre ottiche in un composito, con la seconda tesi, dell'Ing. Amina Frozzi, si è giunti ad uno step ulteriore; si è, infatti, utilizzata la sensoristica FBG, per realizzare misurazioni di deformazione di un manufatto in composito. Con lo studio attuale, si vuole raggiungere uno step ulteriore: in questo caso, data per assodata la tecnica di inglobamento della fibra, si vogliono sfruttare le proprietà degli FBG per individuare e valutare un eventuale danneggiamento all'interno di un componente; si vuole, quindi, riuscire a monitorare lo stato di un componente, per prevenirne la rottura.

L'input per questo studio, viene dall'azienda Riba Composites. Essa, infatti, produce (tra gli innumerevoli prodotti) bracci per gru e bracci per autopompe di calcestruzzo, in materiale composito (Fig.1); si tratta di applicazioni altamente innovative, che garantiscono numerosi vantaggi. L'esigenza di Riba Composites è quella di poter fornire, al cliente finale, un sistema di monitoraggio delle strutture sopra citate. Riuscendo, quindi, a valutare lo stato di un componente, ci si potrebbe accorgere di difetti strutturali non visibili ad occhio nudo. In tal modo, si riuscirebbe a prevenire e scongiurare rotture di schianto, che avrebbero effetti catastrofici e, potenzialmente, mortali. Consapevoli delle potenzialità dei sensori FBG, ci si è quindi chiesti, se fosse possibile sfruttarli per risolvere tale problematica. La ricerca bibliografica svolta, è servita a confermare tale ipotesi. L'idea di fondo, infatti, è quella di caricare un componente, fino a indurre la nascita e sviluppo di difetti interni, registrare la risposta del sensore inserito al suo interno e riuscire a valutare se, il sensore, è in grado di percepire il danno, qualitativamente e/o quantitativamente.



Figura 1: Un braccio in composito realizzato da Riba Composites

2 **Fibre ottiche**

Le fibre ottiche sono filamenti di materiali vetrosi o polimerici (Fig.2), realizzati in modo da poter condurre al loro interno la luce (propagazione guidata), e che trovano applicazione, generalmente, in telecomunicazioni, diagnostica medica e illuminotecnica.

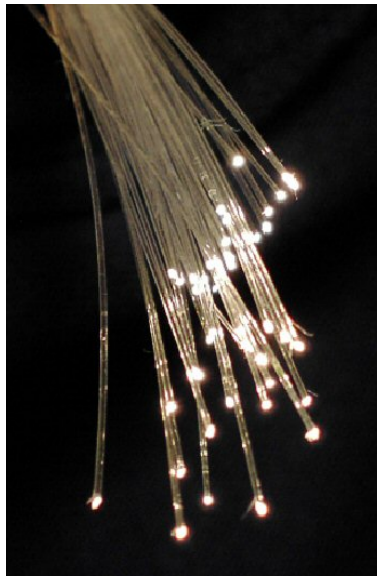


Figura 2: Fibre ottiche

2.1 **Generalità**

Disponibili sotto forma di cavi, sono flessibili, immuni ai disturbi elettrici ed alle condizioni atmosferiche più estreme, e poco sensibili a variazioni di temperatura. Hanno un diametro del cladding solitamente di 125 micrometri (circa le dimensioni di un capello) e pesano molto poco: un chilometro di fibra ottica pesa meno di 2 kg, esclusa la guaina che la ricopre.

Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche. Esse, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno un campo elettromagnetico di frequenza sufficientemente alta (in genere in prossimità dell'infrarosso) con perdite estremamente limitate. Vengono comunemente impiegate nelle telecomunicazioni come mezzo trasmissivo di segnali ottici

anche su grandi distanze ovvero su rete di trasporto e nella fornitura di accessi di rete a larga banda cablata (dai 100 Mbit/s al Tbit/s).

2.2 **Storia**

La storia dell'ottica risale ai tempi di Archimede e del trattato *Catottrica*. In epoca vittoriana il principio della riflessione totale interna venne utilizzato per illuminare le fonti delle fontane pubbliche. Il successivo sviluppo, nella metà del XX secolo, si concentrò sullo sviluppo di un fascio di fibre volto alla trasmissione di immagini, il cui primo impiego fu il gastroscopio medico. Il primo gastroscopio a fibra ottica semi-flessibile fu brevettato da Basil Hirschowitz, C. Wilbur Peters e Lawrence E. Curtiss nel 1956. Nel processo di sviluppo del gastroscopio, Curtiss produsse fisicamente la prima fibra ottica. Presto si susseguirono una varietà di altre applicazioni per la trasmissione di immagini.

Nel 1965 Charles K. Kao della STC, e George A. Hockham del British Post Office, furono i primi a riconoscere che l'attenuazione delle fibre contemporanee era causata dalle impurità, che potevano essere rimosse, piuttosto che dallo scattering (processo fisico in cui, una radiazione, è costretta a deviare traiettoria a causa di una locale non uniformità del mezzo in cui si muove – in particolare, si parla di scattering, nel caso di riflessione diffusa).

Kao e Hockham dimostrarono che le fibre ottiche possono essere un mezzo pratico per la comunicazione, nel caso l'attenuazione sia ridotta al di sotto dei 20 dB per chilometro. In questa misura, la prima fibra ottica per le comunicazioni, fu inventata nel 1970 dai ricercatori Robert D. Maurer, Donald Keck, Peter Schultz e Frank Zimar, impiegati presso la Corning, azienda statunitense produttrice di vetro. Costruirono una fibra con 17 dB di attenuazione ottica per chilometro, drogando il silicio del vetro con il titanio.

L'amplificatore ottico drogato con erbio, che ridusse il costo per i sistemi a fibra ottica per le lunghe distanze eliminando il bisogno dei ripetitori ottico-elettronico-ottico, fu inventato da David Payne dell'Università di Southampton, nel 1987.

Il primo cavo telefonico transatlantico ad usare la fibra ottica fu il TAT-8, che iniziò ad operare nel 1988.

Nel 1991, il campo emergente dei led a cristalli fotonici condusse allo sviluppo delle fibre a cristalli fotonici.

La prima fibra a cristalli fotonici venne venduta a partire dal 1996. Esse possono essere progettate per trasportare un maggiore quantitativo di energia rispetto alle fibre convenzionali e, le loro proprietà, variabili a seconda della lunghezza d'onda, possono essere manipolate per migliorare le loro prestazioni in certe applicazioni.

Negli ultimi vent'anni, i progressi relativi allo sviluppo della fibra ottica sono stati enormi. Al momento, ciò che non sfrutta appieno la larghezza di banda che permette la fibra ottica, rimane la traduzione dal segnale elettrico al segnale luminoso, ed è proprio questo il punto chiave sul quale si sta cercando di lavorare nell'industria della fibra ottica.

2.3 Costituzione

Ogni singola fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o core, ed un mantello o cladding attorno ad esso. Il core presenta un diametro molto piccolo, di circa 10 μm per le monomodali e 50 μm per le multimodali, mentre il cladding ha un diametro di circa 125 μm . I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso; il cladding deve avere un indice di rifrazione minore (tipicamente 1,475) rispetto al core (circa 1,5). Come ulteriore caratteristica, il mantello (cladding) deve avere uno spessore maggiore della lunghezza di smorzamento dell'onda evanescente (onda elettromagnetica piana non uniforme) caratteristica della luce trasmessa, in modo da catturare la luce che non viene riflessa nel core.

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

All'esterno della fibra vi è una guaina protettiva polimerica detta jacket che

serve a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione ed evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno. In Fig.3 è presentato lo schema di una tipica fibra ottica.

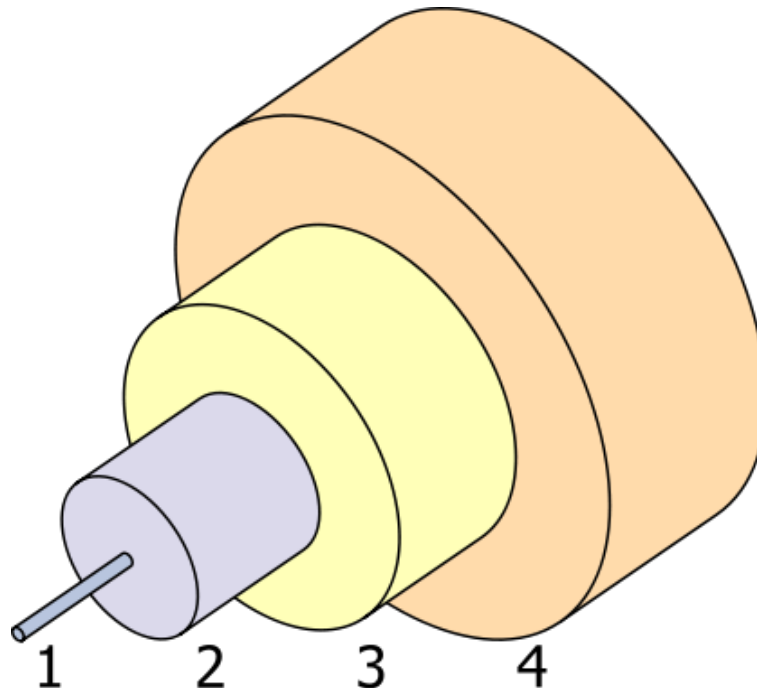


Figura 3: Diagramma di fibra ottica single-mode: (1) Core $10\ \mu\text{m}$ (2) Cladding $125\ \mu\text{m}$ (3) Buffer $250\ \mu\text{m}$ (4) Jacket $400\ \mu\text{m}$

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

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

2.3.1 Silice

La fibra ottica è una singola fibra di vetro. Le fibre vengono realizzate a partire da silice ultrapura, la quale viene ottenuta dalla reazione fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Nel silicio destinato alla produzione del core viene aggiunto del germanio (sotto forma di tetracloruro di germanio)

in modo da aumentarne l'indice di rifrazione senza variarne l'attenuazione. Nella silice destinata al cladding, invece, viene aggiunto del boro, allo scopo di ridurne l'indice di rifrazione.

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

2.3.2 Polimeri

La fibra è costituita da una materia plastica. Queste fibre ottiche polimeriche sono molto più facili da maneggiare rispetto alle fragili fibre realizzate in vetro. La dimensione del core è molto più grande (1 mm) rispetto alle fibre in silice, quindi si ha un'apertura numerica più elevata e la possibilità di realizzare fibre multimodali. Tuttavia questo tipo di fibre ottiche ha un'attenuazione abbastanza elevata e una scarsa resistenza termica. Le fibre ottiche plastiche hanno un costo al metro lineare simile a quello delle fibre in vetro, ma garantiscono un'ampia capacità di trasmissione dei dati.

2.4 Funzionamento

Uno studio rigoroso della fisica delle fibre ottiche richiede concetti di ottica quantistica.

Usando un paragone di ottica classica, nelle fibre ottiche avviene un fenomeno di riflessione totale interna, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente, in pratica finché la fibra non compie curve troppo brusche.

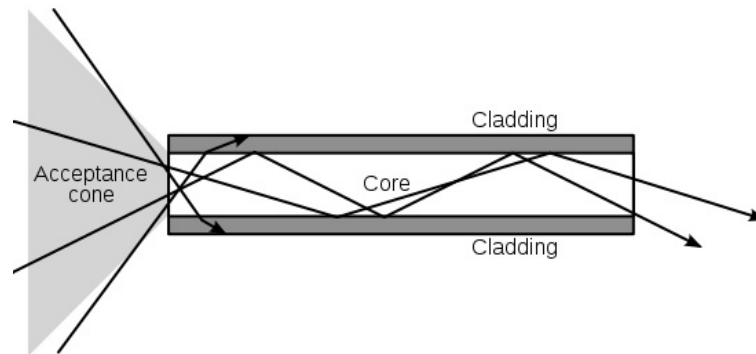


Figura 4: Funzionamento della fibra step-index

In figura è rappresentato come due raggi luminosi, cioè due treni di radiazione elettromagnetica, incidono sull'interfaccia tra nucleo e mantello all'interno della fibra ottica.

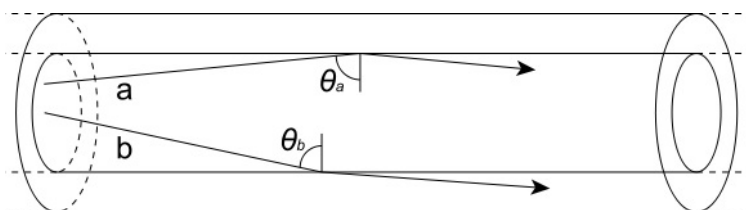


Figura 5: Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi in fibra ottica step-index

Il fascio a incide con un angolo θ_a superiore all'angolo critico di riflessione totale e rimane intrappolato nel nucleo; il fascio b incide con un angolo θ_b inferiore all'angolo critico e viene rifratto nel mantello e quindi perso. È importante ricordare che in ottica si indica l'angolo tra la radiazione e la normale alla superficie, cioè $90^\circ - \alpha$ dove α è l'angolo, più intuitivo ma più scomodo da utilizzare, tra la radiazione e la superficie.

All'interno di una fibra ottica il segnale può propagarsi in modo rettilineo oppure essere riflesso un numero molto elevato di volte. Il modo di propagazione rettilineo si dice di ordine zero. Le fibre monomodali consentono la propagazione di luce secondo un solo modo hanno un diametro del core compreso tra 8 μm e 10 μm , quelle multimodali consentono la propagazione di più modi, e hanno un diametro del core di 50 μm o 62.5 μm . Il cladding ha tipicamente un diametro di 125 μm .

È possibile conoscere a priori il numero di modi possibili N_m per una radiazione di lunghezza d'onda λ che attraversa una fibra step-index di diametro d con apertura numerica NA :

$$N_m = 0,5 * \left(\frac{\pi * d * NA}{\lambda} \right)^2$$

Le fibre multimodali permettono l'uso di dispositivi più economici, ma subiscono il fenomeno della dispersione intermodale, per cui, i diversi modi si propagano a velocità leggermente diverse, e questo limita la distanza massima a cui il segnale può essere ricevuto correttamente.

Le fibre monomodali, di contro, hanno un prezzo molto più elevato rispetto alle multimodali, ma riescono a coprire distanze e a raggiungere velocità nettamente superiori.

Le fibre multimodali possono essere divise ulteriormente in fibre *step index* e *graded index*:

- Nelle fibre step index l'indice di rifrazione è costante lungo tutta la sezione del core e cambia improvvisamente allorquando si incontra il cladding
- Nelle fibre graded index l'indice di rifrazione cambia gradualmente dal core al cladding, permettendo l'uso di luce multicromatica.

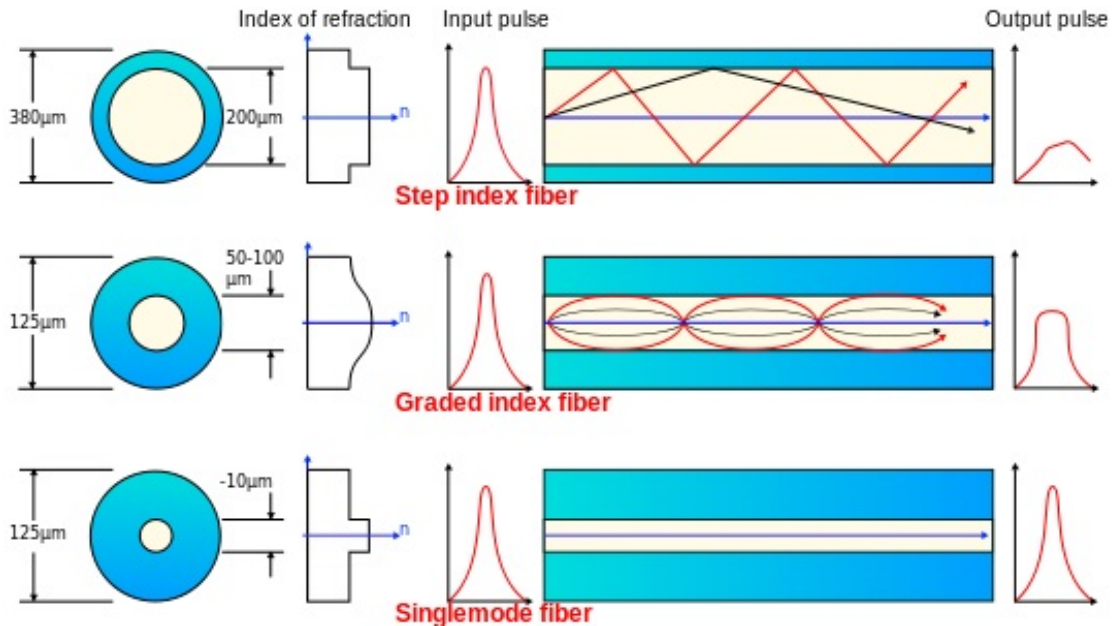


Figura 6: Confronto tra fibre ottiche

2.5 Attenuazione

2.5.1 Meccanismi di perdita in fibra ottica

Idealmente, le fibre ottiche sono un mezzo di trasmissione perfetto. Infatti, oltre a non risentire in nessun modo di disturbi elettromagnetici o di diafonia, se strutturate adeguatamente per garantire la riflessione totale del segnale d'ingresso, teoricamente, permettono di trasferire completamente la potenza in ingresso nell'uscita.

In pratica, però, intervengono dei fenomeni fisici che causano comunque delle perdite di attenuazione della potenza lungo la fibra; tali perdite, solitamente valutate statisticamente in termini di attenuazione specifica, ovvero in db/km, sono dovute a:

- proprietà intrinseche del mezzo;
- presenza di impurità all'interno del materiale;
- specifiche delle guide dielettriche aperte.

2.5.2 Perdite per assorbimento

Il materiale di cui sono realizzate le fibre ottiche è costituito da

macromolecole, che interagiscono fra di loro tramite forze dette di *Van der Waals*. Normalmente, queste macromolecole possono ruotare intorno ad un asse o possono vibrare. Durante questi movimenti, tali molecole assorbono la radiazione, vibrano, e possono emettere altra radiazione. La loro condizione di risonanza si innesca per alcune particolari lunghezze d'onda. Qualunque materiale che è trasparente ad una radiazione, risulta inevitabilmente opaco ad un'altra lunghezza d'onda. Ad esempio, il vetro è trasparente nel campo del visibile ($\approx 400\text{nm} \div 750\text{ nm}$), mentre risulta opaco nel campo dell'infrarosso ($\approx 750\text{ nm} \div 1000\text{ nm}$). Quindi le fibre realizzate in vetro sono utilizzabili solo con sorgenti di luce visibile.

Durante il processo di fabbricazione, la fibra tende inevitabilmente ad assorbire il vapore acqueo. Nel vapore, così come nel vetro, sono presenti dei gruppi OH; ad alcune particolari frequenze, le molecole OH vengono eccitate e assorbono energia elettromagnetica (lunghezze d'onda di 1,24 e 1,38 μm), causando perdite.

2.5.3 Perdite per diffusione (Rayleigh scattering)

Le perdite di segnale per diffusione sono causate da:

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

Queste imperfezioni causano una lieve diffusione (ossia deviazione a vari angoli) del segnale. Ciò non è legato ad una perdita di energia, ma ad una perdita di potenza. Nel vetro, questa perdita è pari a: $\alpha \approx 0,7*\lambda^{-4}$ [dB/km].

Un basso indice di rifrazione e una bassa compressibilità riducono la possibilità che il raggio venga diffratto a causa di variazioni nella densità del mezzo. Tuttavia nel caso di fibre ottiche polimeriche, la compressibilità del materiale è direttamente legata al volume molecolare. I polimeri densamente cross-linked hanno bassa comprimibilità ma hanno un alto indice di rifrazione. Polimeri costituiti da molecole con un grande volume molecolare possiedono un'elevata compressibilità ma un indice di rifrazione basso.

2.5.4 Perdite specifiche delle guide dielettriche

Oltre alle perdite dovute al mezzo, esistono altre tipologie di perdita in una guida dielettrica. Queste non sono dovute al tipo di luce utilizzata, ma sono legate alle deformazioni e alle discontinuità presenti nella guida.

2.5.4.1 Curvatura della guida dielettrica

Ha un duplice effetto sul segnale ottico:

- deformazione della distribuzione di campo elettromagnetico;
- eccitazione di componenti dello spettro indesiderati.

La perdita è legata all'angolo di curvatura della guida.

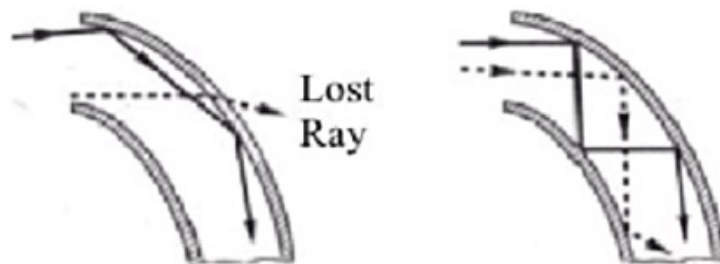


Figura 7: Curvatura della guida dielettrica

2.5.4.2 Corrugazioni della guida dielettrica

Durante la lavorazione della guida si possono creare delle corrugazioni lungo le pareti esterne. Esse possono essere periodiche e quindi danno luogo ad una perdita di potenza che viene irradiata esternamente.

2.5.4.3 Imperfezioni nella fabbricazione

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

2.6 **Dispersione**

Lavorando con fenomeni fisici ad elevatissima frequenza (le onde luminose), con le fibre ottiche sarebbero idealmente possibili velocità di trasmissione molto elevate. In pratica, però, intervengono dei fattori fisici che causano distorsione e quindi interferenza, limitando la velocità di trasmissione possibile in una fibra ottica.

- **Dispersione modale:** fenomeno dovuto al fatto che il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato, ma secondo un numero finito di modi (derivanti dalla legge di Snell). Vi saranno modi attraverso i quali il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi (il primo caso limite è il modo che percorre la fibra ottica completamente dritto; il secondo caso limite è il raggio che entra nella fibra con angolo uguale all'angolo limite di accettazione, e deve quindi eseguire un numero molto alto di riflessioni). A causa di questo, la forma del segnale originario viene dilatata nel tempo, e se la frequenza è troppo alta può arrivare a confondersi con l'impulso seguente (interferenza intersimbolica), impedendo dunque di leggere il segnale originario. Per ovviare a questo inconveniente, si possono utilizzare fibre multimodali graded index (nelle quali l'indice di rifrazione varia con continuità del centro del core fino al cladding) oppure fibre monomodali.
- **Dispersione cromatica:** fenomeno dovuto al fatto che la luce pura trasmessa in fibra dal trasmettitore non è perfettamente monocromatica, ma si compone in realtà di fasci di luce di colore diverso cioè con frequenze o lunghezza d'onda e quindi velocità di attraversamento diverse. Si ha lo stesso problema visto sopra: può capitare che il fascio luminoso di colore rosso (il più veloce) si confonda con il fascio luminoso di colore violetto (il più lento) dell'impulso inviato precedentemente, rendendo impossibile la decodifica del segnale originario. Per risolvere questo problema si

utilizzano led monocromatici per trasmettere la luce.

- Dispersione di polarizzazione: fenomeno dovuto ad asimmetrie del core cilindrico della fibra dovute, a loro volta, a stress meccanici o imperfezioni della fibra stessa durante il processo di produzione e che causano fenomeni di birifrangenza dell'onda elettromagnetica guidata. Ha caratteristiche tipiche di aleatorietà.

In generale la dispersione aumenta con la distanza dal trasmettitore.

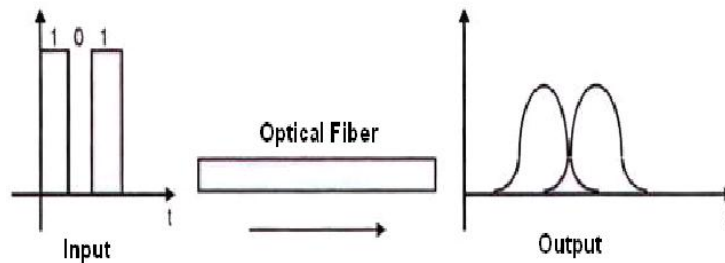


Figura 8: Distorsioni nella fibra ottica

2.7 Sensori a fibra ottica

Un sensore a fibra ottica è un sensore che sfrutta fibre ottiche sia come elemento sensibile (sensore *intrinseco*) o come mezzo di trasmissione del segnale da un sensore remoto all'elettronica che processa il segnale (sensore *estrinseco*). Le fibre presentano molti usi nella sensoristica a distanza. In base all'applicazione, le fibre possono essere usate grazie alle loro piccole dimensioni o perchè non necessitano di potenza elettrica nel luogo di rilevamento, o ancora perchè molti sensori possono essere multiplexati in una singola fibra utilizzando lo spostamento della lunghezza d'onda della luce per ogni sensore o misurando il tempo di ritardo del passaggio della luce attraverso ogni sensore lungo la fibra. Il tempo di ritardo può essere determinato utilizzando uno strumento come un riflettometro ottico nel dominio del tempo (optical time-domain reflectometer) e lo spostamento della lunghezza d'onda può essere calcolata utilizzando uno strumento che attua la riflettometria ottica nel dominio

della frequenza.

I sensori a fibra ottica, inoltre, sono immuni alle interferenze elettromagnetiche e non conducono elettricità; possono, perciò, essere usati in luoghi dove è presente alta tensione o materiali infiammabili, come il carburante dei jet. Tali sensori, possono essere progettati anche per resistere alle alte temperature.

2.7.1 Sensori intrinseci

Le fibre ottiche possono essere usate come sensori per misurare deformazione, temperature, pressione e altre quantità, modificando la fibra in modo che, la quantità da misurare, modifichi l'intensità, la fase, la polarizzazione, la lunghezza d'onda o il tempo di transito della luce nella fibra. I sensori che variano l'intensità della luce sono i più semplici, dato che sono richiesti solo una sorgente e un rivelatore. Una caratteristica particolare dei sensori a fibra ottica intrinseci è che possono, se richiesto, fornire una misurazione distribuita lungo distanze elevate.

La temperatura può essere misurata con una fibra che ha una perdita *evanescente* (un'onda evanescente è un'onda che esibisce un calo esponenziale in funzione della distanza da cui si è formata) che varia con la temperatura. La tensione elettrica può essere misurata tramite effetti ottici non lineari in fibre dopate opportunamente, in modo da alterare la polarizzazione della luce in funzione della tensione o del campo elettrico. Sensori che misurano gli angoli possono essere basati sull'*effetto Sagnac*.

Fibre particolari, come quelle con reticolo a lungo periodo, possono essere usate per riconoscere le direzioni.

Sono state utilizzate fibre ottiche anche per *idrofon*i (microfoni progettati per registrare o ascoltare suoni sott'acqua) per sonar o applicazioni sismiche. Sono stati sviluppati idrofoni con più di cento sensori per fibra. I sensori negli idrofoni sono usati dalle industrie petrolifere e dalle navi di alcuni paesi. Microfoni in fibra ottica e cuffie che sfruttano le fibre ottiche, sono utili in zone dove sono presenti forti campi elettrici o magnetici come, ad esempio, gli ambulatori o le sale chirurgiche dove vengono effettuate risonanze magnetiche.

Sensori a fibre ottiche per temperatura e pressione sono stati sviluppati per

misurazioni di profondità in pozzi petroliferi. I sensori a fibra ottica sono ben adatti a tali ambienti, perché funzionano a temperature troppo elevati per i sensori basati sui semiconduttori.

Le fibre ottiche possono essere trasformate in *sensori interferometrici* (l'interferometria è una famiglia di tecniche in cui le onde vengono sovrapposte per estrarne informazioni) come giroscopi a fibra ottica utilizzati nel Boeing 767 e in alcuni modelli di auto. Possono essere usate anche per realizzare sensori di idrogeno.

Sono stati sviluppati sensori a fibra ottica per misurare, in modo localizzato, temperatura e deformazione simultaneamente, con grande precisione, utilizzando i reticoli di Bragg. Ciò risulta particolarmente utile quando occorre acquisire informazioni da complesse strutture di piccola dimensione. Effetti di *scattering di Brillouin* (avviene quando la luce, all'interno di un mezzo, interagisce con variazioni di densità ottica e cambia la sua energia e traiettoria) possono essere usati per rilevare deformazioni e temperatura su lunghe distanze (20-30 km).

2.7.2 **Sensori estrinseci**

I sensori a fibra ottica estrinseci utilizzano un cavo a fibra ottica, normalmente una multimodo, per trasmettere luce modulata da un sensore, il quale, può essere sia non a fibra ottica, sia un sensore elettronico connesso a un trasmettitore ottico. Un vantaggio dei sensori estrinseci è la possibilità di raggiungere zone altrimenti inaccessibili. Un esempio, è la misura della temperatura all'interno dei motori di jet, fatta utilizzando una fibra che trasmette la radiazione ad un pirometro posizionato all'esterno del motore. I sensori estrinseci possono essere usati allo stesso modo per misurare la temperatura interna dei trasformatori elettrici nei quali, i forti campi elettromagnetici presenti, rendono le altre tecniche di misura impossibili da utilizzare. Questi sensori forniscono un'eccellente protezione del segnale misurato dal rumore di disturbo. Sfortunatamente, molti sensori convenzionali, producono un output elettrico che dev'essere convertito in un segnale ottico per essere utilizzato con le fibre. I sensori estrinseci sono usati per misurare vibrazioni, rotazioni, deformazioni, velocità, accelerazione, coppia e torsione.

3 **Reticoli di Bragg in fibra ottica**

In questo capitolo, verrà discussa la tecnologia sfruttata in questo studio, ovvero quella dei Reticoli di Bragg; si chiarirà innanzitutto cosa sono i Reticoli di Bragg e si vedranno, poi, le tecniche di misurazione e le applicazioni di questi sensori.

Un reticolo di Bragg in fibra (Fiber Bragg Grating – FBG) è un tipo di *riflettore distribuito di Bragg* (Distributed Bragg Reflector – DBR). Un DBR è un riflettore utilizzato in guide d'onda, come le fibre ottiche. Presenta una struttura formata da diversi strati di materiali alternati, costituiti da differenti indici di rifrazione, oppure da variazioni periodiche di altre caratteristiche (ad esempio, l'altezza) della guida d'onda dielettrica, che causano una variazione periodica dell'indice di rifrazione nella guida. Ogni strato limite causa una riflessione parziale di un'onda ottica. Per le onde con lunghezza d'onda prossima alle quattro volte lo *spessore ottico* degli strati (Optical Path Length – OPL, prodotto della lunghezza geometrica della traiettoria percorsa dall'onda e dell'indice di rifrazione del mezzo), la maggior parte delle riflessioni si combinano in *interferenze costruttive* (si verificano quando la differenza di fase tra le onde è un multiplo di 2π) e gli strati fungono da riflettori di alta qualità. Il range di lunghezze d'onda riflesse è detta *stopband* fotonica. All'interno di questo range di lunghezze d'onda, è “impedita” la propagazione della luce nel mezzo; nella stopband, in generale, il segnale può non passare oppure l'attenuazione può essere maggiore del livello di attenuazione richiesto dalla stopband.

La riflettività R (o riflettanza) dei DBR è, approssimativamente, data da:

$$R = \left(\frac{n_0(n_2)^{2N} - n_s(n_1)^{2N}}{n_0(n_2)^{2N} + n_s(n_1)^{2N}} \right)^2$$

dove n_0 , n_1 , n_2 e n_s sono, rispettivamente, gli indici di rifrazione del mezzo di origine, dei due materiali alternati e del mezzo terminale e N è il numero

di coppie ripetute di materiali a basso\alto indice di rifrazione.

La larghezza di banda $\Delta\lambda_0$ della stopband fotonica può essere calcolata tramite:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{4\lambda_0}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda centrale della banda.

Aumentando il numero di coppie in un DBR, aumenta la riflettività; aumentando la differenza tra gli indici di rifrazione tra i materiali nelle coppie di Bragg, si ottiene un incremento della riflettività e della larghezza di banda. Una scelta comune di materiali è diossido di titanio (TiO_2 , $n = 2,5$) e silice (SiO_2 , $n = 1,5$).

Tornando, nello specifico, ai reticoli di Bragg, come già detto, questi sono DBR costruiti in un piccolo segmento in una fibra ottica; riflettono una particolare lunghezza d'onda di luce e trasmettono tutte le altre. Ciò, è ottenuto creando una variazione periodica dell'indice di rifrazione del core della fibra, che genera uno *specchio dielettrico*. Uno specchio dielettrico è un tipo di specchio composto da sottili strati di materiale dielettrico, tipicamente depositati su un substrato di vetro o altro materiale ottico. Tramite una scelta accurata del tipo e dello spessore degli strati dielettrici, è possibile progettare un *rivestimento ottico* avente specifiche riflettività per diverse lunghezze d'onda della luce. Alternativamente, possono riflettere uno spettro diffuso come, ad esempio, l'intero range del visibile.

Il funzionamento degli specchi dielettrici è basato sull'interferenza della luce riflessa dai differenti strati dielettrici. Gli specchi più semplici, consistono di una pila di strati ad alto indice di rifrazione, intervallati da strati a basso indice di rifrazione (vedi Fig.9).

Gli FBG, pertanto, possono essere usati come filtri ottici che bloccano certe lunghezze d'onda o come riflettori di specifiche lunghezze d'onda.

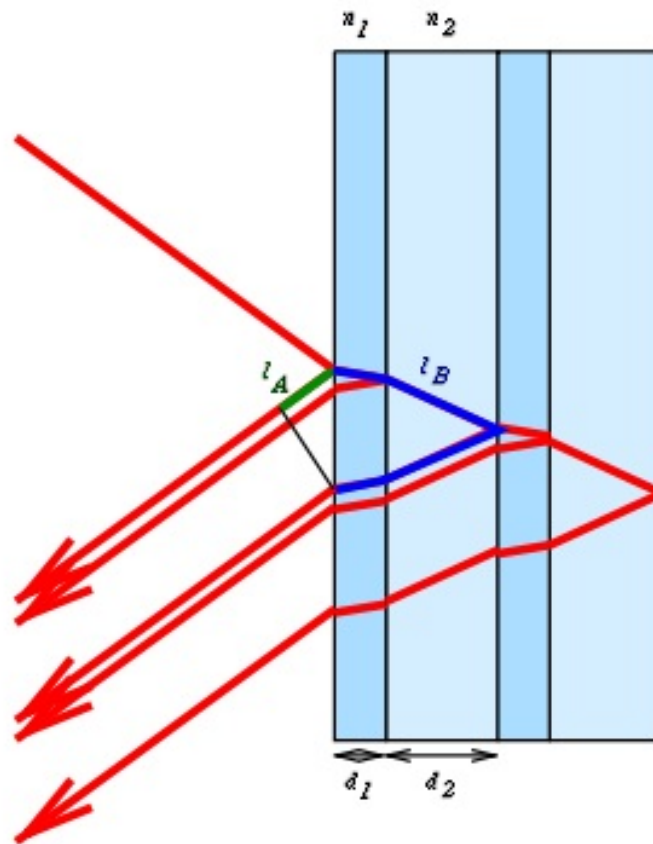


Figura 9: Gli strati sottili con indice di rifrazione n_1 sono intervallati da strati spessi con indice n_2 . Le lunghezze di traiettoria l_A e l_B differiscono esattamente di una lunghezza d'onda, determinando un'interferenza costruttiva

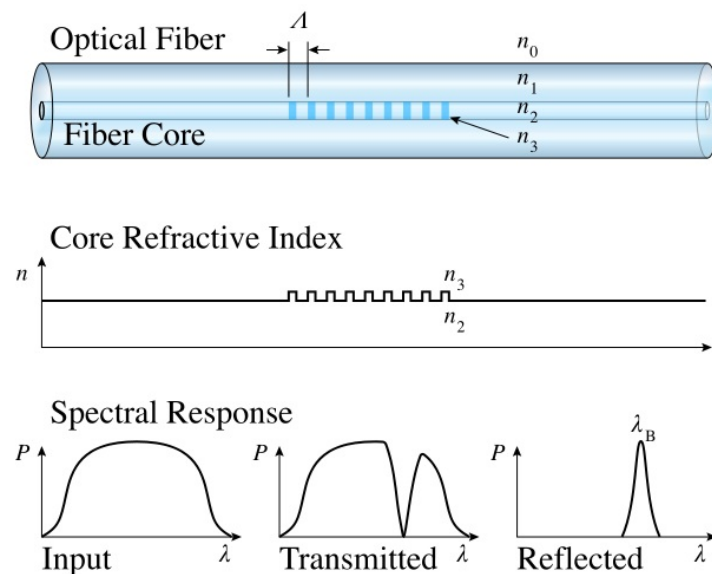


Figura 10: Struttura dell'FBG, profilo dell'indice di rifrazione e risposta spettrale

3.1 Storia

Il primo reticolo di Bragg in fibra, fu dimostrato da Ken Hill nel 1978. Inizialmente, i reticoli venivano fabbricati utilizzando un laser visibile propagato all'interno del core della fibra. Nel 1989, Gerald Meltz e colleghi, dimostrarono la più flessibile tecnica di iscrizione olografica trasversale, dove il fascio laser proveniva da un lato della fibra. Questa tecnica utilizza il modello di interferenza di luce laser ultravioletta per creare la struttura periodica del reticolo di Bragg.

3.2 Fabbricazione

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

- Flessibilità: riflettività e lunghezze d'onda centrali dovrebbero essere selezionabili per misure quasi-distribuite
- Capacità di produzione di massa economica: se gli FBG potessero

- essere prodotti ad alte velocità, sarebbero disponibili a basso costo
- Buone qualità fisiche ed ottiche: la resistenza meccanica di un FBG non dovrebbe diminuire dopo la fabbricazione, in relazione alla resistenza di una fibra di buona qualità. Una larghezza di banda ristretta e una piccola perdita di segnale, sono normalmente richieste per ottenere misure ad alta risoluzione.
 - Buona ripetibilità: la ripetibilità di lunghezza d'onda centrale e riflettività dell'FBG dovrebbe essere sufficientemente buona, in modo da rendere gli FBG degli strumenti standard, sotto la condizione di produzione di massa, senza necessità di calibrazione.

Gli FBG sono creati “inscrivendo” o “scrivendo” variazioni dell'indice di rifrazione sistematiche (periodiche o aperiodiche) all'interno del core di un tipo speciale di fibra ottica, sfruttando una sorgente ultravioletta, come un laser UV. Vengono seguiti due principali processi: *interferenza* e *masking*. Il metodo preferibile dipende dal tipo di reticolo da creare. Normalmente, per i reticoli di Bragg, viene usata una fibra di silice dopata al Germanio. Tale fibra, è fotosensibile, il che vuol dire, l'indice di rifrazione del core varia in base all'esposizione alla luce UV; l'entità della variazione dipende dall'intensità e dalla durata dell'esposizione, e dalla fotosensibilità della fibra. Per scrivere un reticolo di Bragg ad alta riflettività direttamente nella fibra, il livello di doping al germanio dev'essere elevato. Ad ogni modo, anche delle fibre standard possono essere utilizzate, se la fotosensibilità viene intensificata tramite una pre-impregnazione della fibra con idrogeno. Più recentemente, dei reticoli di Bragg sono stati scritti in fibre polimeriche.

3.2.1 **Interferenza**

Questo fu il primo metodo largamente usato per la fabbricazione di FBG; utilizza l'interferenza di due fasci. Il laser UV viene diviso in due fasci che interferiscono tra di loro, creando una distribuzione periodica di intensità lungo la zona di interferenza. L'indice di rifrazione della fibra cambia in relazione all'intensità della luce alla quale la fibra è esposta. Questo metodo è consigliato per semplici e veloci variazioni della lunghezza d'onda di

Bragg, che è collegata direttamente al periodo di interferenza ed è funzione dell'angolo di incidenza della luce laser.

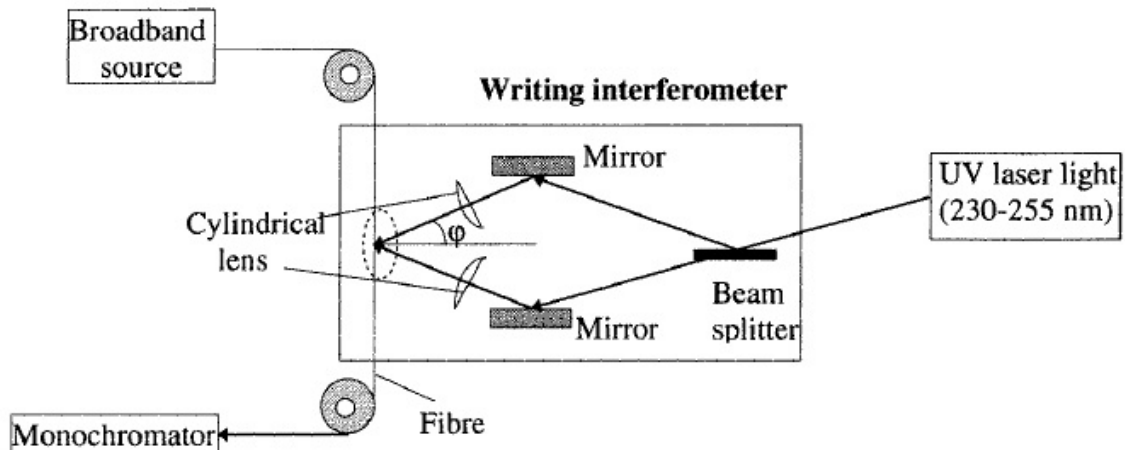


Figura 11: Schema del metodo ad interferenza con due laser

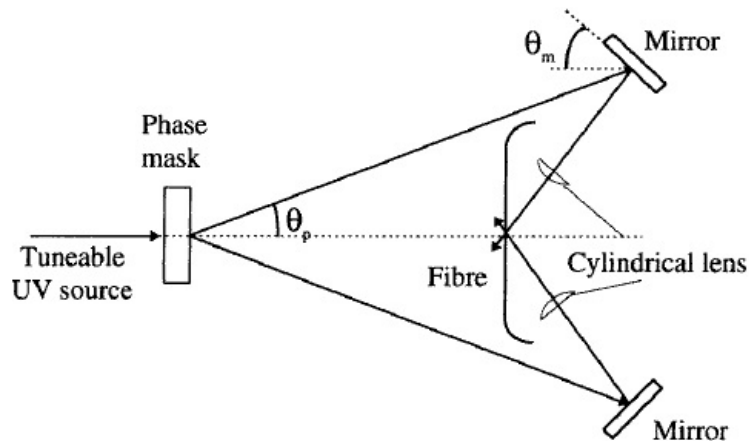


Figura 12: Schema del metodo ad interferenza con lunghezza d'onda sintonizzabile

3.2.2 Scrittura sequenziale

Reticoli dal profilo complesso, possono essere fabbricati con l'esposizione di un grande numero di reticoli piccoli e parzialmente sovrapposti, in sequenza. Possono essere introdotte proprietà avanzate, come spostamenti di fase e variazioni della profondità di modulazione, regolando le corrispondenti proprietà dei sub-reticoli. Un nuovo metodo di scrittura sequenziale, sfrutta una radiazione UV continua. La fibra fotosensibile è

spostata da un trasporto con cuscinetti ad aria come supporto, controllato da un interferometro. I raggi UV che interferiscono sono concentrati sulla fibra e, col movimento della fibra, le frange si muovono lungo la fibra, attraverso degli specchi in un interferometro. Tutti i parametri del reticolo sono accessibili da un software di controllo, ed è perciò possibile realizzare strutture del reticolo arbitrarie senza modifiche all'hardware.

3.2.3 Mascheratura fotografica

Tramite una mascheratura fotografica, si possono ottenere le caratteristiche del reticolo desiderate. La maschera viene posta tra la sorgente UV e la fibra fotosensibile. L'ombra della maschera fotografica determina così la struttura del reticolo, basata sull'intensità trasmessa dalla luce che raggiunge la fibra. Le maschere fotografiche sono utilizzate, in modo specifico, per la realizzazione di reticoli di Bragg *chirped*, che non possono essere fabbricati con il metodo dell'interferenza.

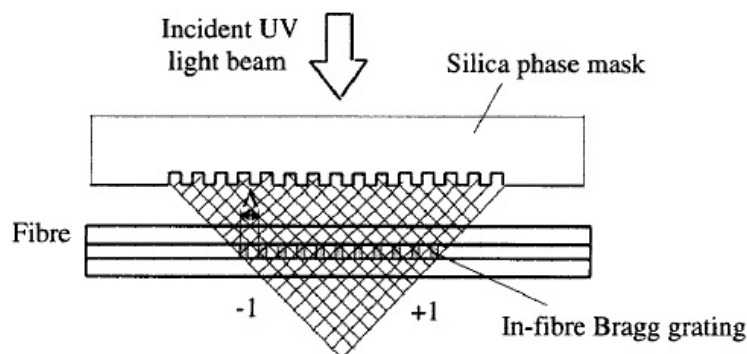


Figura 13: Schema del metodo con mascheratura con maschera di fase

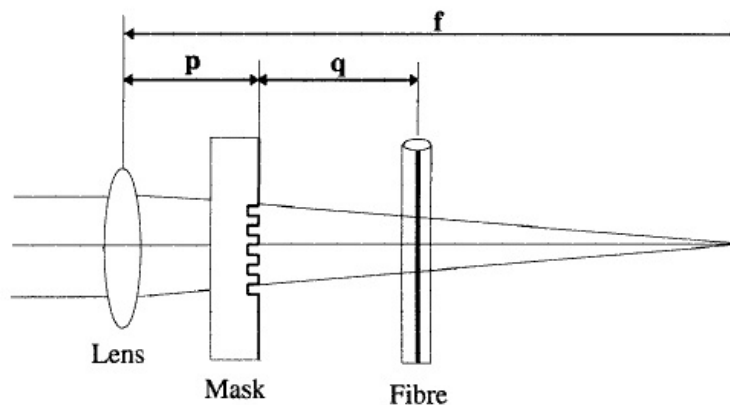


Figura 14: Schema del metodo di mascheratura con maschera di fase modificato

3.2.4 Point-by-point

Un singolo raggio UV può essere usato per “scrivere” un reticolo in una fibra, punto per punto. In questo caso, il laser, ha un fascio ristretto, uguale al periodo del reticolo. Questo metodo è applicabile alla fabbricazione di reticoli *a lungo periodo*. Il metodo point-by-point è utilizzato anche per i reticoli *tilted*.

3.2.5 Produzione

Originariamente, la realizzazione di fibre ottiche fotosensibili e la “scrittura” dei reticoli di Bragg in fibra, venivano svolte separatamente. Attualmente, le linee produttive, creano le fibre a partire dalla *preforma* (vetro di forma opportuna, che costituisce la “base” della fibra) e “scrivono” il reticolo in una singola fase. Riducendo, in tal modo, tempi e costi necessari, risulta possibile la produzione di massa di reticoli di Bragg. La produzione di massa, facilita, in particolar modo, le applicazioni in *smart structures*, che utilizzano un grande numero di reticoli di Bragg in fibra, inseriti (*embedding*) in una singola fibra.

3.3 Teoria

Il principio fondamentale dietro il funzionamento di un FBG è la *riflessione di Fresnel*, secondo cui, la luce viaggiante tra due mezzi con

indice di rifrazione differente, può essere riflessa e rifratta all'interfaccia. Quando la luce si muove da un mezzo con un indice di rifrazione n_1 ad un mezzo con indice di rifrazione n_2 , può verificarsi sia una riflessione che una rifrazione della luce; le equazioni di Fresnel descrivono quale frazione della luce viene riflessa e quale rifratta. Descrivono, inoltre, lo spostamento di fase della luce riflessa.

Le equazioni, assumono che l'interfaccia sia piana ed omogenea e che la luce sia un'onda piana.

Si consideri la Fig.15

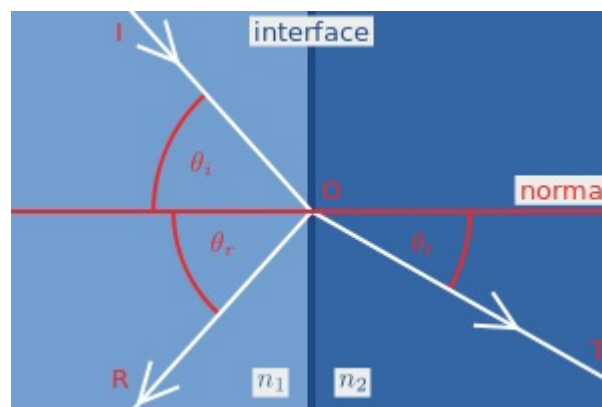


Figura 15: Variabili utilizzate nelle equazioni di Fresnel

Un raggio incidente IO colpisce l'interfaccia tra i due mezzi con indice di rifrazione n_1 ed n_2 , nel punto O. Parte del raggio viene riflesso come raggio OR e parte viene rifratto come raggio OT. Gli angoli che i raggi incidente, riflesso e rifratto, formano con la normale all'interfaccia sono, rispettivamente, θ_i , θ_r , θ_t .

La relazione tra questi angoli è data dalla *legge di riflessione*:

$$\theta_i = \theta_r$$

e dalla *legge di Snell*:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_t)} = \frac{n_2}{n_1}$$

3.3.1 Superfici multiple

Quando la luce produce riflessioni multiple tra due o più superfici parallele, i raggi di luce, generalmente, interferiscono con un ulteriore raggio, dando vita a trasmissioni e ampiezze di riflessione che dipendono dalla lunghezza d'onda della luce. L'interferenza, comunque, si vede solo quando le superfici sono ad una distanza comparabile, o più piccola, della *lunghezza di coerenza* della luce (distanza di propagazione lungo la quale, un'onda coerente, mantiene un certo *grado di coerenza*), che, per una normale luce bianca, è di pochi micrometri; può essere maggiore per la luce di un laser.

Dopo aver visto come funziona la riflessione di Fresnel, si torni a considerare, più in generale, gli FBG.

L'indice di rifrazione, si alternerà lungo una lunghezza definita. La lunghezza d'onda riflessa (λ_B), chiamata *lunghezza d'onda di Bragg*, è definita dalla relazione:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda$$

dove n_e è l'indice di rifrazione effettivo del reticolo nel core della fibra e Λ è il periodo del reticolo. L'indice di rifrazione effettivo, quantifica la velocità di propagazione della luce, comparata con quella della luce nel vuoto. n_e non dipende solo dalla lunghezza d'onda, ma anche (per guide d'onda multimodo) dal modo in cui la luce si propaga. Per tale ragione, è chiamato anche indice modale.

Si faccia riferimento alla Fig.16.

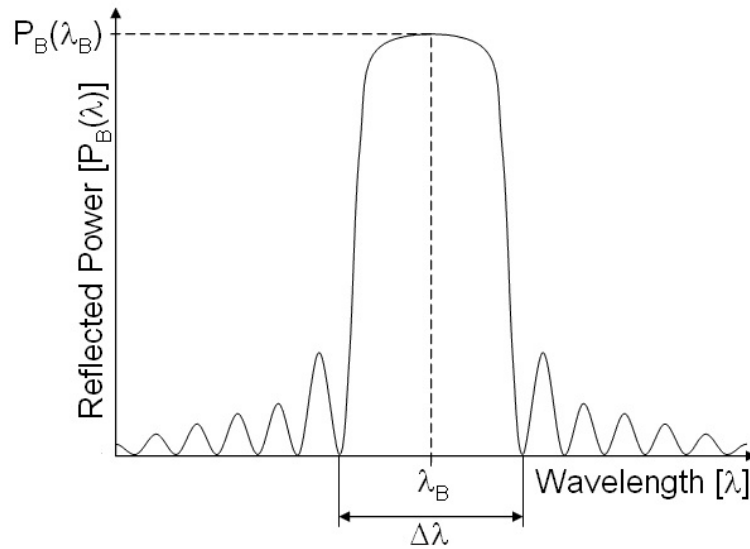


Figura 16: Potenza riflessa dall'FBG come funzione della lunghezza d'onda

La lunghezza d'onda tra i primi minimi, o la larghezza di banda ($\Delta\lambda$), è data da:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{2\delta n_0 \eta}{\pi} \right) \lambda_B$$

dove δn_0 è la variazione dell'indice di rifrazione ($n_3 - n_2$) e η è la frazione di potenza nel core. Si noti che questa approssimazione non si può applicare per reticoli deboli, dove la lunghezza del reticolo, L_g , non è grande, comparata a $\lambda_B / \delta n_0$.

La riflessione del picco ($P_B(\lambda_B)$) è data, approssimativamente, da:

$$P_B(\lambda_B) \approx \tanh^2 \left[\frac{N\eta(V)\delta n_0}{n} \right]$$

dove N è il numero di variazioni periodiche.

3.4 **Tipi di reticolo**

Il termine *tipo*, in questo contesto, è riferito al meccanismo fotosensibile, alla base del quale, le frange del reticolo sono create nella fibra. I metodi differenti di creare queste frange hanno un effetto significativo sugli attributi fisici del reticolo prodotto, in particolare, la risposta alla temperatura e l'abilità di resistere a temperature elevate. Finora, vengono riportati cinque (o sei) tipi di FBG, con differenti meccanismi fotosensibili alla loro base:

- Standard, o di tipo I
- Tipo IA
- Tipo IIA o In
- Reticoli rigenerati
- Tipo II

3.5 **Struttura del reticolo**

La struttura degli FBG può variare in base all'indice di rifrazione o al periodo del reticolo. Il periodo del reticolo può essere uniforme o graduato e localizzato o distribuito in una sovrastruttura. L'indice di rifrazione possiede due caratteristiche principali: il profilo dell'indice, e l'offset. Tipicamente, il profilo dell'indice di rifrazione può essere uniforme o *apodizzato*, e l'offset è positivo o nullo. Esistono sei strutture principali di FBG:

- Uniforme, con variazione di indice solo positiva
- Apodizzata con funzione Gaussiana
- Apodizzata con funzione a coseno rialzato
- Chirped
- Sfasamento discreto
- Sovrstruttura

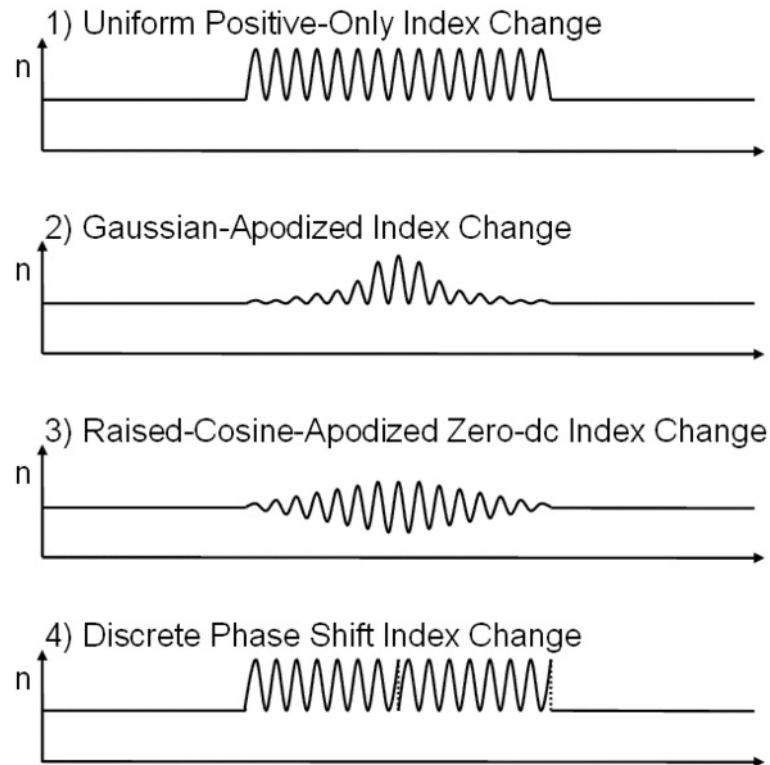


Figura 17: Profilo dell'indice di rifrazione nel core

3.5.1 Reticoli Apodizzati

Esistono, sostanzialmente, due quantità che controllano le proprietà degli FBG. Queste sono la lunghezza del reticolo, L_g , data da:

$$L_g = NA$$

e la resistenza del reticolo, $\delta n_0 \eta$.

Ci sono, comunque, altre proprietà che devono essere controllate in un FBG. Esse sono la riflettività, la larghezza di banda e l'entità dei *lobi secondari*. Il “diagramma” di una radiazione, infatti, presenta diversi lobi a vari angoli (direzioni in cui il segnale raggiunge un massimo), separati da “zeri”, angoli ai quali il segnale crolla a zero. Si vedano le figure seguenti per una maggiore chiarezza.

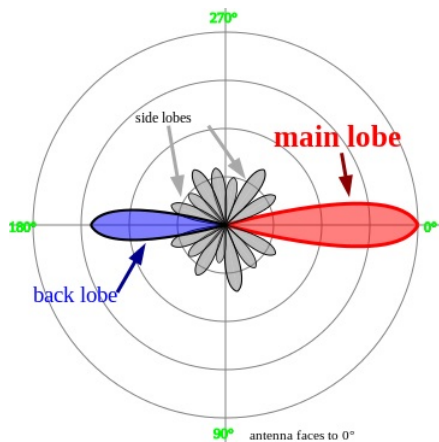


Figura 18: Tipico diagramma di radiazione

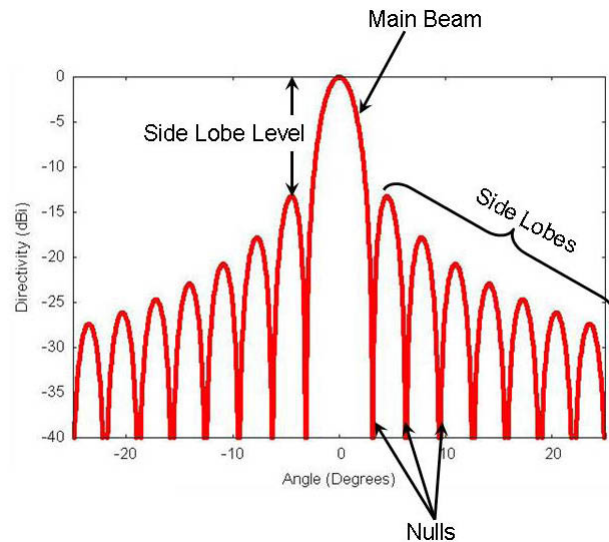


Figura 19: Tipico diagramma di radiazione in coordinate cartesiane

3.5.2 Reticoli chirped

Il profilo dell'indice di rifrazione del reticolo può essere modificato per aggiungere altre caratteristiche, come una variazione lineare del periodo del reticolo, chiamata *chirp*. La lunghezza d'onda riflessa cambia a seconda del periodo del reticolo, allargando lo spettro riflesso. Un reticolo che possiede un chirp, ha la proprietà di aggiungere *dispersione* (cioè, differenti lunghezze d'onda riflesse dal reticolo sono soggette a diversi ritardi).

3.5.3 Reticoli inclinati (tilted)

Negli FBG standard, il reticolo o la variazione dell'indice di rifrazione è lungo la fibra (l'asse ottico), ed è tipicamente uniforme attraverso la larghezza della fibra. In un FBG inclinato (TFBG), la variazione dell'indice di rifrazione è angolata rispetto all'asse ottico. L'angolo di inclinazione ha effetto sulla lunghezza d'onda riflessa e sulla larghezza di banda.

3.5.4 Reticoli a lungo periodo

Il periodo del reticolo è, tipicamente, della stessa misura della lunghezza d'onda di Bragg, come mostrato sopra (Fig.). Per un reticolo che riflette a 1500 nm, il periodo del reticolo è 500 nm, con un indice di rifrazione di 1,5. Periodi più lunghi possono essere utilizzati per raggiungere risposte

più ampie di quelle possibili con un FBG standard. Questi reticoli sono detti reticoli a lungo periodo. Hanno periodi del reticolo dell'ordine di 100 micrometri, fino a un millimetro e sono, perciò, più semplici da realizzare. La figura seguente mostra le principali strutture dell'indice di rifrazione.

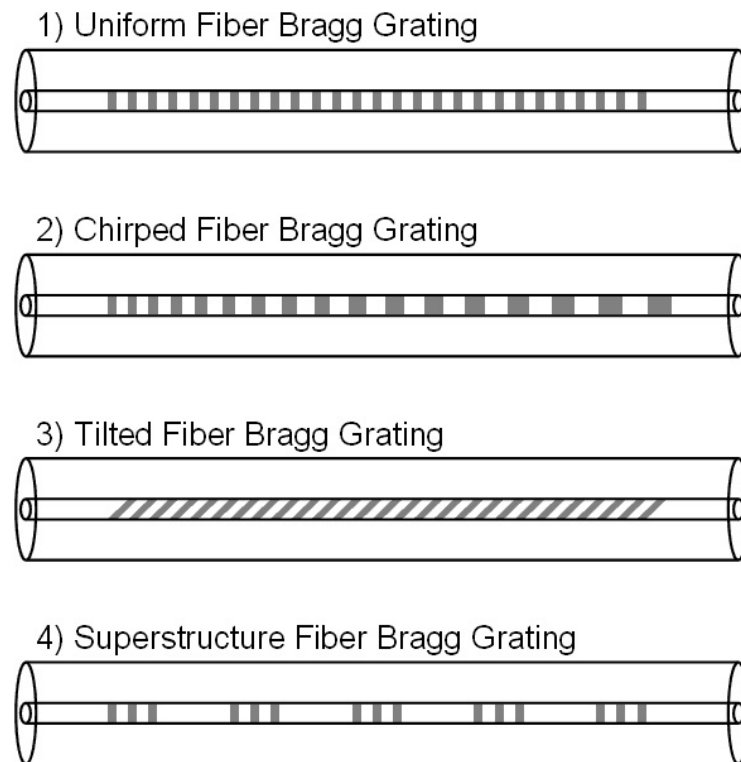


Figura 20: Strutture dell'indice di rifrazione

3.6 Applicazioni

3.6.1 Comunicazioni

L'applicazione principale degli FBG è nei sistemi di comunicazione ottica. Sono utilizzati, nello specifico, come filtri *notch* (filtri elimina banda). Sono utilizzati anche in multiplexer e demultiplexer con un circolatore ottico (componente che separa segnali ottici che viaggiano in diverse direzioni) o *add-drop multiplexer ottico* (optical add-drop multiplexer, OADM).

3.6.2 Sensori FBG

Oltre ad essere sensibile alla deformazione, la lunghezza d'onda di Bragg, è sensibile alla temperatura. Questo significa che, i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come strumenti di misura in sensori a fibre ottiche. In un sensore FBG, il misurando, causa uno spostamento nella lunghezza d'onda di Bragg, $\Delta\lambda_B$. Lo spostamento relativo della lunghezza d'onda di Bragg, $\Delta\lambda_B/\lambda_B$, dovuto ad una deformazione applicata (ε) e ad una variazione di temperatura (ΔT), è dato, approssimativamente, da:

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = C_s e + C_T \Delta T$$

oppure:

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = (1 - p_e) \varepsilon + (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T$$

Qui, C_s è il coefficiente di deformazione, correlato al coefficiente di deformazione ottico p_e . C_T è il coefficiente di temperatura, formato dal coefficiente di espansione termica della fibra, α_A , e dal coefficiente termo-ottico, α_n .

Gli FBG possono essere utilizzati direttamente come sensori per deformazione e temperatura. Possono, inoltre, essere usati come trasduttori, convertendo l'output di un altro sensore e generando una variazione di deformazione o temperatura a partire dal misurando; ad esempio, i sensori FBG a gas, utilizzano un coating assorbente che, in presenza di un gas, si espande, generando una deformazione misurabile dal reticolo. Tecnicamente, il materiale assorbente è l'elemento sensore, dato che converte un certo quantitativo di gas in una deformazione. Il reticolo di Bragg traduce la deformazione in un cambiamento della lunghezza d'onda. Nello specifico, gli FBG hanno trovato utilizzo in strumentazioni per la sismologia o come sensori di pressione per condizioni ambientali severe e

sensori di profondità in pozzi petroliferi e di gas per misurazioni sull'effetto della pressione esterna e della temperatura. Offrono significativi vantaggi rispetto ai tradizionali misuratori elettronici utilizzati per queste applicazioni, in quanto, sono meno sensibili alle vibrazioni o al calore e, di conseguenza, sono molto più attendibili. Negli anni '90, sono iniziati gli studi sull'utilizzo di FBG come sensori di deformazione e temperatura nei materiali compositi per strutture aeronautiche.

3.7 **Misura e interrogazione FBG**

In questa sezione, vengono presentate le potenzialità di misura che possiedono gli FBG e le varie tecniche di interrogazione dei sensori.

3.7.1 **Principi di misurazione**

I sensori FBG possono misurare deformazioni, temperatura, pressione, campi magnetici, ecc. La lunghezza d'onda centrale dell'FBG cambia a seconda di questi parametri.

3.7.1.1 **Deformazione**

Lo spostamento della lunghezza d'onda, $\Delta\lambda_{BS}$, per una deformazione longitudinale applicata $\Delta\varepsilon$, è dato da:

$$\Delta\lambda_{BS} = \lambda_B (1 - \rho_\alpha) \Delta\varepsilon$$

dove ρ_α è il coefficiente foto-elastico della fibra, dato da:

$$\rho_\alpha = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} - \rho_{12})]$$

dove ρ_{11} e ρ_{12} sono le componenti del tensore di deformazione della fibra ottica e ν è il coefficiente di Poisson. Per le fibre in silicio, le sensibilità alla deformazione alle lunghezze d'onda di 800 nm e 1550 nm sono, rispettivamente, $\sim 0,64 \text{ pm } \mu\varepsilon^{-1}$ e $1,15 \text{ pm } \mu\varepsilon^{-1}$. Per misure di

accelerazione, ultrasuoni e forza, le equazioni precedenti sono ancora applicabili, convertendo la deformazione nelle grandezze richieste.

Gli FBG chirped, si sono rivelati elementi che compensano le dispersioni, per sistemi di comunicazione a fibre ottiche ad alta velocità. Questi dispositivi funzionano come filtri passa-banda in cui, il passo del reticolo, varia nella lunghezza dello stesso e, l'FBG, riflette un vasto numero di lunghezze d'onda, ovvero frequenze ottiche, come mostrato in Fig.21

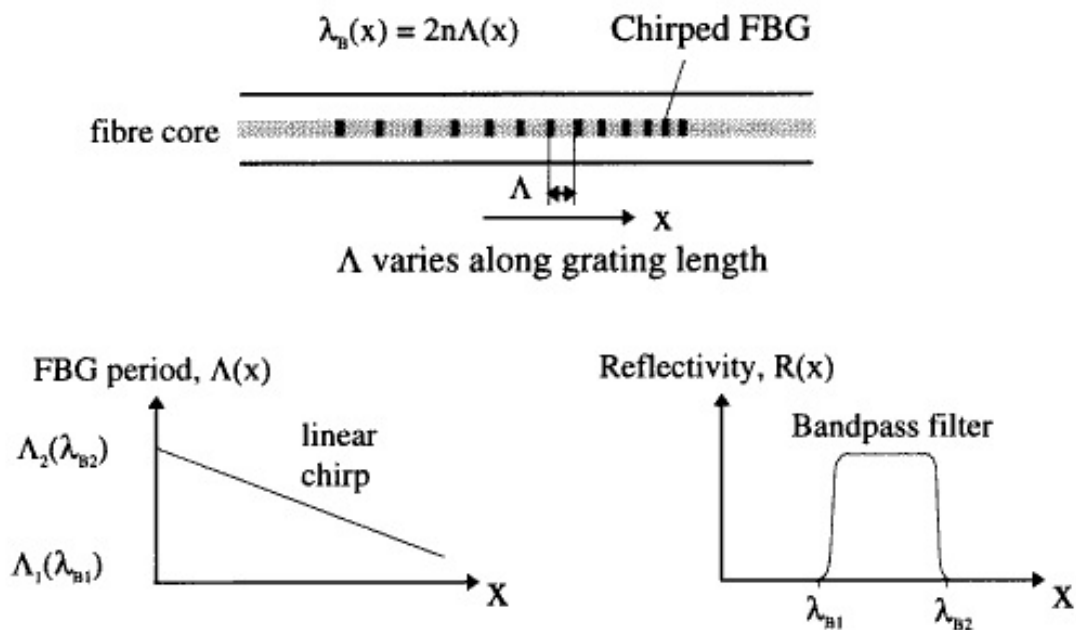


Figura 21: Sensore FBG chirped

Il principio nell'utilizzare i sensori chirped per misure di deformazione, si basa sulla variazione del punto di riflessione, δb , data da:

$$\delta b = \frac{-\lambda}{\Delta\lambda_C} B\zeta\Delta\varepsilon$$

dove ζ è una costante determinata dalle proprietà foto-elastiche della fibra e B è lunghezza del reticolo. λ è la lunghezza d'onda fissa di una sorgente e $\Delta\lambda_C = \lambda_{B1} - \lambda_{B2}$ con $\lambda_{B1} < \lambda_{B2}$. Per confronto, la variazione di lunghezza ottica, per una lunghezza di fibra B , è data da:

$$\delta l = B\zeta\Delta\varepsilon$$

Il rapporto tra le due equazioni è espresso nella forma:

$$\frac{\delta b}{\delta l} = \frac{-\lambda}{\Delta\lambda_C}$$

Si può notare che, dato che $\lambda \gg \Delta\lambda_C$, $\delta b \gg \delta l$, l'FBG chirped, fornisce un fattore di amplificazione della deformazione molto elevato.

3.7.1.2 Temperatura

Per una variazione di temperatura di ΔT , la corrispondente variazione di lunghezza d'onda $\Delta\lambda_{BT}$ è data da:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(1 + \xi)\Delta T$$

dove ξ è il coefficiente termo-ottico della fibra. Per le fibre in silicio, la sensibilità alla temperatura alle lunghezze d'onda di 800 nm e 1550 nm è, rispettivamente, $\sim 6,8 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $\sim 13 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$. La Tab.1 riassume le sensibilità alla deformazione e alla temperatura di FBG a differenti lunghezze d'onda.

Wavelength (μm)	Strain sensitivity ($\text{pm } \mu\varepsilon^{-1}$)	Temperature sensitivity ($\text{pm } ^\circ\text{C}^{-1}$)
0.83	~ 0.64	~ 6.8
1.3	~ 1	~ 10
1.55	~ 1.2	~ 13

Tabella 1: Sensibilità a deformazione e temperatura di sensori FBG a differenti lunghezze d'onda

3.7.1.3 Pressione

Per una variazione di pressione di ΔP , il corrispondente cambiamento di lunghezza d'onda $\Delta\lambda_{BP}$ è dato da:

$$\frac{\Delta\lambda_{BP}}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\lambda)}{n\lambda} = \left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right) \Delta P$$

Il contributo al cambiamento di propagazione ottica, dovuto alla variazione minima del diametro della fibra a causa della pressione applicata, è trascurabile, se comparato al cambiamento di indice di rifrazione e lunghezza fisica. Le variazioni di lunghezza fisica e indice di rifrazione sono date da:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{-(1-2\nu)P}{E}$$

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n^2 P}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11})$$

dove E è il modulo di Young della fibra. La sensibilità alla pressione risulta:

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_B \left[\frac{-(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right] \Delta P$$

Per un FBG dopato al Germanio, a 1550 nm, $\Delta\lambda_{BP}/\Delta P$ è stato misurato essere $-3 \times 10^{-3} \text{ nm MPa}^{-1}$, per un range di pressione di 70 MPa.

3.7.1.4 Campo magnetico dinamico

Gli FBG possono essere usati anche per rilevare campi magnetici dinamici, grazie all'effetto Faraday, che induce un leggero cambiamento nell'indice della fibra. In presenza di un campo magnetico longitudinale applicato all'FBG, l'indice cambia per le due polarizzazioni e, di conseguenza, si ottengono due lunghezze d'onda di Bragg, come mostrato in Fig.22.

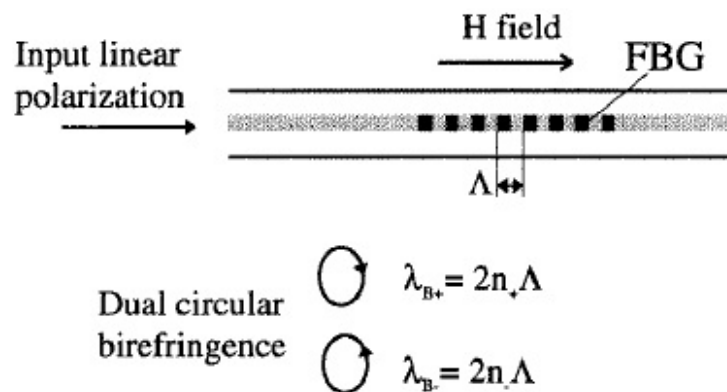


Figura 22: Divisione della risonanza di Bragg dovuta alla birifrangenza circolare indotta da un campo magnetico

$$\lambda_{B'+} = 2n_+\Lambda$$

$$\lambda_{B'-} = 2n_-\Lambda$$

dove gli indici + e – rappresentano gli indici e le lunghezze d'onda di Bragg per la polarizzazione circolare destra e sinistra della luce. Per le fibre in silice, la sensibilità a questo effetto è ridotta.

3.7.2 Tecniche di interrogazione

Sono fondamentali misure di precisione dello spostamento della lunghezza d'onda dell'FBG per ottenere buone performance del sensore. I requisiti generali per un metodo di interrogazione ideale sono i seguenti:

- Alta risoluzione su un ampio range di misurazione: è richiesto, tipicamente, un range di risoluzione che rilevi lo spostamento della lunghezza d'onda, che vada da meno di un picometro a pochi picometri; il range di risoluzione richiesto è $10^3:1-10^5:1$.
- Convenienza: il costo di un sistema di interrogazione dovrebbe essere competitivo rispetto ai convenzionali sensori ottici o elettrici
- Compatibilità con il multiplexing: un sistema di interrogazione dovrebbe poter lavorare con schemi di multiplexing, che possono rendere l'intero sistema di misura conveniente.

Gli spettrometri convenzionali hanno una risoluzione tipica di 0,1 nm, perciò sono utilizzati normalmente per valutare le proprietà ottiche degli FBG durante le procedure di fabbricazione, più che per rilevamenti di precisione dello spostamento della lunghezza d'onda. In base ai principi operativi degli strumenti utilizzati per il rilevamento dello spostamento della lunghezza d'onda, le tecniche di interrogazione possono essere classificate come metodi a *filtro selettivo*, *filtro accordabile*, *scansione con interferometro* e *scansione con interferometro a doppia cavità*, descritti in seguito.

3.7.3 Principi degli schemi di interrogazione

3.7.3.1 Filtro selettivo

Questo metodo si basa sull'uso di un filtro selettivo che possiede una relazione lineare tra spostamento delle lunghezze d'onda e cambiamenti di intensità dell'output del filtro, come mostrato in Fig.23(a). Misurando la variazione d'intensità, lo spostamento della lunghezza d'onda, indotto dal misurando, viene ottenuta. Il range di misurazione è inversamente proporzionale alla risoluzione.

3.7.3.2 Filtro accordabile

Un filtro accordabile può essere utilizzato per misurare lo spostamento della lunghezza d'onda dell'FBG e l'output è una convoluzione dello spettro del filtro e di quello dell'FBG, come mostrato in Fig.23(b). Quando lo spettro del filtro eguaglia quello dell'FBG, la convoluzione è uguale a uno, cioè, si produce il massimo output. Misurando questo punto massimo e il corrispondente cambiamento di lunghezza d'onda del filtro, si ottiene la variazione di lunghezza d'onda dell'FBG. La risoluzione di misurazione è determinata, principalmente, dal rapporto segnale-rumore del segnale di ritorno dell'FBG e da entrambe le larghezze di banda del filtro e dell'FBG. Normalmente, un approccio di questo genere, ha una risoluzione relativamente alta, oltre a un ampio range di lavoro.

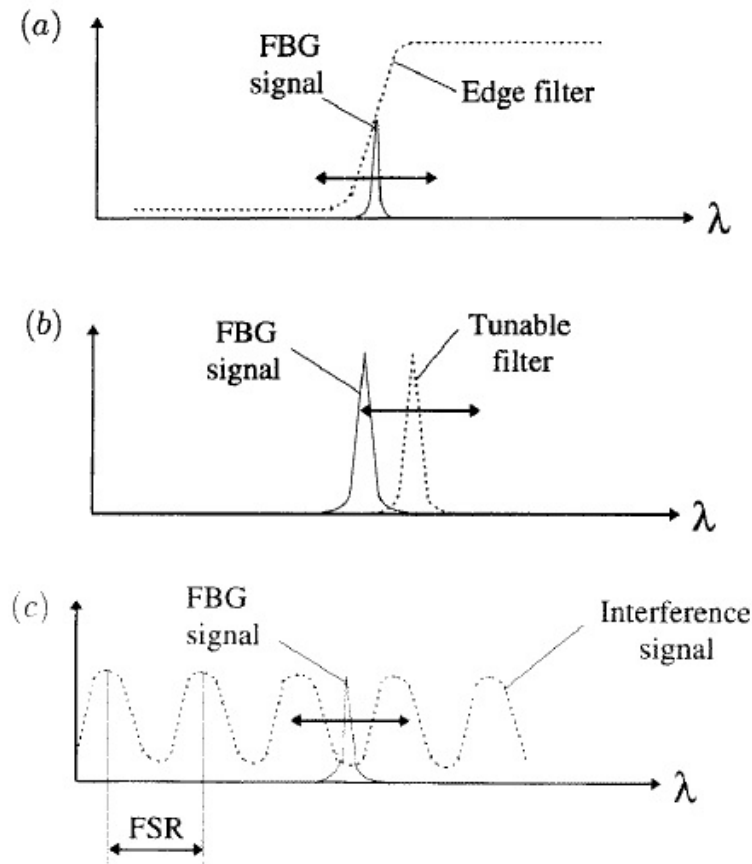


Figura 23: (a) Principio del metodo con filtro selettivo; (b) Principio del metodo con filtro accordabile; (c) Principio del metodo con interferometro

3.7.3.3 Scansione con interferometro

La variazione di lunghezza d'onda dell'FBG prodotta da deformazione e/o temperatura, può essere rilevata tramite un interferometro, utilizzato per misure di deformazione ad alta risoluzione quasi-statiche e dinamiche. Il segnale proveniente dall'interferometro (SI), come mostrato in Fig.23(c), può essere espresso come:

$$\frac{I}{I_0} = 1 + B \cos[\Delta\Phi_B + \Phi(t)]$$

dove I_0 è l'intensità della luce incidente e B è la visibilità del segnale di interferenza. $\Phi(t)$ è lo sfasamento indotto termicamente nel SI. Il SI lavora

come uno scanner di lunghezze d'onda. La variazione della lunghezza d'onda riflessa dell'FBG, indotta da deformazione o temperatura, determina un cambiamento di fase $\Delta\Phi_B$:

$$\Delta\Phi_B = \frac{-2\pi\Delta L_{SI}}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B = \frac{-2\pi\Delta L_{SI}}{\lambda_B} \xi_g \Delta Y$$

dove ΔY è la variazione di deformazione o temperatura applicata all'FBG e ΔL_{SI} è la *differenza di cammino ottico* (optical path difference – OPD) dell'interferometro. ξ_g è la sensibilità normalizzata dell'FBG a deformazione o temperatura, data da:

$$\xi_g = \frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_b}{\partial Y} .$$

Perciò, la sensibilità di fase nella risposta a deformazione o temperatura ($\Delta\Phi_B/\Delta Y$) è direttamente proporzionale all'OPD dell'interferometro. Misurando $\Delta\Phi_B$, si può ottenere la variazione di deformazione o temperatura.

3.8 **Applicazioni FBG**

Di seguito, sono presentati differenti campi in cui possono trovare applicazione gli FBG come sensori.

I sensori FBG hanno subito un continuo e rapido sviluppo dal momento in cui, per la prima volta, è stata dimostrata la loro capacità di misurare deformazioni e temperatura, negli anni '80. La ragione principale di tutto ciò è che, i sensori FBG, possiedono numerosi vantaggi rispetto ad altri tipi di sensori a fibra ottica, tra cui il potenziale costo ridotto e la capacità di multiplexing. Il meccanismo di trasduzione del segnale è la modulazione della lunghezza d'onda riflessa dall'elemento sensibile evitando, ad esempio, l'ambiguità di una misura di fase in un sensore interferometrico o la necessità di un riferimento intrinseco. I sensori FBG sono ideali per

realizzare le cosiddette *fibres-optic Smart structures* in cui, i sensori ottici, sono inseriti all'interno della struttura, per raggiungere alcuni obiettivi tecnologici, come la *health monitoring*, *l'impact detection*, *shape control* e *vibration damping*, fornendo informazioni su misure in tempo reale di deformazioni, temperatura e vibrazioni.

3.8.1 Applicazioni in grandi strutture in composito e cemento

A confronto con i tradizionali estensimetri elettrici utilizzati per misure di deformazioni in strutture in composito o cemento, i sensori FBG, hanno diversi vantaggi:

- migliore invulnerabilità a interferenze elettro-magnetiche e potenziale capacità di resistere ad ambienti severi, come le centrali elettriche
- minori dimensioni (tipicamente 125 μm di diametro), ideali per l'inserimento all'interno di compositi, senza perturbazioni nelle caratteristiche della struttura
- maggiore resistenza alla corrosione quando utilizzati in strutture all'aperto, come ponti e dighe
- migliore capacità di multiplexing, per realizzare una “mappa” di deformazione lungo una singola fibra, a differenza degli estensimetri che richiedono un grande quantitativo di cablaggi
- maggiori resistenze alle alte temperature (tipicamente ~ 300 °C)
- durata di vita maggiore, che può essere sufficiente a coprire l'intero periodo di funzionamento della struttura (ad esempio > 25 anni)

Queste caratteristiche, hanno reso i sensori FBG molto interessanti per il controllo qualità durante la costruzione, l'*health monitoring* dopo la realizzazione e *impact monitoring* di grandi strutture in composito o cemento. Dopo i primi esperimenti di embedding di sensori FBG in materiali compositi, nel 1990, è stato realizzato un grande numero di applicazioni in ponti, miniere, veicoli marini e aerei.

3.8.1.1 Ponti

Una delle prime dimostrazioni di monitoraggio di grandi strutture è stato un ponte autostradale, in cui, sono stati utilizzati tiranti in composito, invece di tiranti in acciaio, per risolvere problemi di corrosione. Dato che i tiranti in composito non vengono abitualmente utilizzati al posto di quelli in acciaio, è importante monitorarne le deformazioni, la temperatura e il degrado, utilizzando un sistema integrato di sensori in fibra ottica. I sensori FBG possono essere sfruttati per raggiungere tale obiettivo. Un sistema di array di FBG montato sui tiranti, è mostrato in Fig.24.

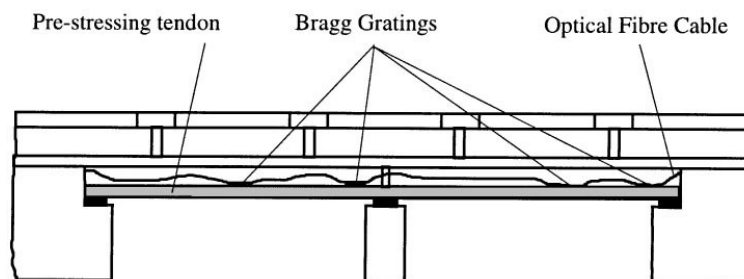


Figura 24: Schema del sistema di FBG utilizzati per monitorare il ponte

Un altro esempio di applicazione di sensori FBG in ponti è la misurazione del carico distribuito in cavi in composito utilizzati in un ponte sospeso, durante la costruzione del ponte e durante il passaggio del traffico.

3.8.1.2 Miniere

La misura di carichi e spostamenti negli scavi sotterranei di miniere e tunnel è di vitale importanza per la sicurezza. Sensori FBG mutiplexati possono sostituire i tradizionali sensori elettrici, come gli estensimetri e le celle di carico, che non possono operare in collegamento e in ambienti molto severi, con forti interferenze elettro-magnetiche, causate dalle macchine di escavazione. Sistemi di sensori FBG sono stati progettati per misure statiche di deformazione in una miniera e sulle pareti di un pozzo minerario.

3.8.1.3 Veicoli marini

I materiali compositi stanno trovando un crescente interesse nella progettazione di veicoli marini, dato che l'introduzione di questi nuovi materiali può ridurre il peso dello scafo. E' necessario avere una completa caratterizzazione del comportamento di queste strutture, in modo da raggiungere un uso ottimale del materiale di rinforzo e un risparmio di denaro. Approssimativamente, occorrono circa 100 sensori per monitorare i momenti flettenti e le forze di taglio in varie posizioni di un modello del veicolo e i risultati vengono poi trasferiti alla nave a grandezza naturale. I sensori FBG possono essere i candidati ideali per un'applicazione del genere. Un sistema di FBG progettato per misurare il momento flettente al centro di un catamarano, è mostrato in Fig.25.

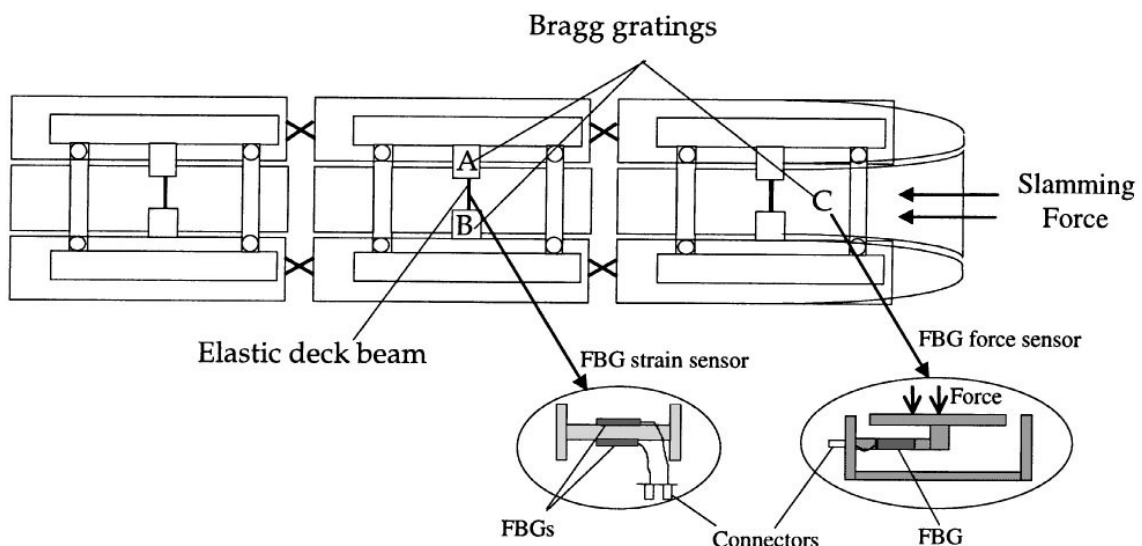


Figura 25: Schema di un veicolo marino con sensori FBG

3.8.1.4 Aerei

Oggigiorno, i materiali compositi sono abitualmente usati per la costruzione di strutture aerospaziali. A confronto con i materiali metallici, i compositi, possono avere maggiore resistenza alla fatica, minor peso, migliore rapporto resistenza/peso, capacità di ottenere forme complesse e nessun problema di corrosione. Perciò, l'utilizzo di compositi con sistemi di sensori FBG integrati, può portare a una riduzione di peso, di intervalli di ispezione e di costi di manutenzione e, di conseguenza, un aumento delle

performance.

Comunque, esiste una sfida più interessante, ovvero la realizzazione di sistemi di monitoraggio real-time (cioè durante il servizio) dello stato di salute della struttura a bordo. Dato che i sensori FBG sono sensibili sia alla deformazione, sia alla temperatura, è essenziale misurare deformazione e temperatura simultaneamente, in modo da correggere le deformazioni termiche; sono stati presentati numerosi approcci in questo senso. Un metodo semplice ed efficace spesso usato, è quello di sfruttare un FBG, non deformato, come riferimento di temperatura, ma questo approccio non è applicabile in tutte le situazioni, ad esempio, per i sensori embedded. Questo può essere dovuto a tre criticità:

- Integrare sensori sia di deformazione che di temperatura nella stessa posizione all'interno del composito per ottenere un'elevata risoluzione spaziale
- Ottenere un'adeguata accuratezza nel discriminare deformazione e temperatura
- Processare un segnale FBG distorto, se il sensore subisce una deformazione non uniforme

In poche parole, una compensazione locale ed accurata della temperatura per misure statiche di deformazione, è ancora un problema chiave da risolvere. In tal senso, può essere più semplice misurare deformazioni dinamiche, rispetto a quelle statiche, dato che le variazioni di temperatura sono, generalmente, contenute e non influenzano la misura. Misure dinamiche di deformazione possono essere sfruttate per analisi di vibrazioni e impatti sulla struttura, ugualmente desiderabili.

In generale, per sensori inseriti in compositi, l'ideale è misurare la deformazione lungo ogni asse e, inoltre, la temperatura in varie zone, dato che, deformazioni trasversali, possono essere dello stesso ordine di quelle longitudinali, in alcune applicazioni.

Molti ricercatori hanno dimostrato, il "semplice" funzionamento degli FBG inseriti nei compositi o in strutture in cemento, per misure di deformazione; ad ogni modo, è necessario un lavoro più intenso per realizzare sistemi

FBG *cost-effective*, capaci di misurare, contemporaneamente, deformazioni statiche, dinamiche e temperatura, con sufficiente risoluzione e accuratezza. Con un sistema di questo tipo, il sensore FBG avrebbe la capacità di sfruttare a pieno le sue potenzialità e, magari, dominare il mercato dell'health monitoring di strutture in composito e cemento.

3.8.2 Applicazioni nell'industria dell'energia elettrica

Come per altre applicazioni dei sensori a fibra ottica, gli FBG, sono ideali per essere utilizzati nell'industria dell'energia elettrica, grazie alla loro immunità ad interferenze elettromagnetiche. Inoltre, gli FBG possono essere scritti in fibre per le telecomunicazioni standard (1550 nm di lunghezza d'onda), perciò, si può operare su lunghe distanze, grazie alla ridotta perdita nella trasmissione del segnale. Con i sensori FBG sono stati misurati i carichi delle linee di trasmissione di potenza, la temperatura dell'avvolgimento di trasformatori elettrici e forti correnti elettriche.

3.8.2.1 Monitoraggio del carico di una linea di trasmissione di potenza

Un carico meccanico eccessivo su una linea di trasmissione di potenza elettrica causato, ad esempio, da forti nevicata, può condurre a pericolosi incidenti. In particolare, per le linee poste in aeree montane, non esiste un accesso semplice per l'ispezione. Pertanto, è necessario un monitoraggio on-line, per misurare le variazioni di carico sulla linea. E' stato dimostrato il funzionamento di un sistema di FBG con più di 10 sensori, distribuito su una distanza di oltre 30 km, come mostrato in Fig.26.

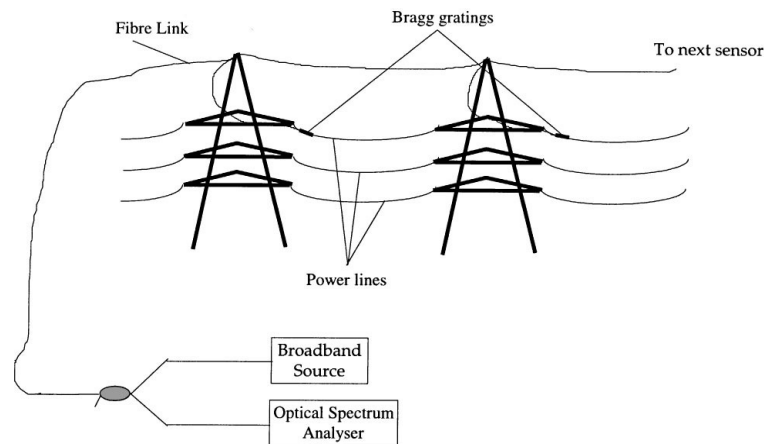


Figura 26: Diagramma schematico del sistema FBG di monitoraggio di una linea di trasmissione elettrica

Al di là delle caratteristiche tecniche, questo è un ottimo esempio dell'applicazione di sensori FBG per il monitoraggio remoto su lunghe distanze, in ambienti severi.

3.8.2.2 Misura della temperatura dell'avvolgimento

La conoscenza della distribuzione locale di temperatura presente in alti voltaggi e in attrezzature ad alta potenza, come generatori e trasformatori, è essenziale per capire il loro funzionamento e per verificare prodotti nuovi o modificati. Attrezzature difettose o danneggiate, possono essere scoperte monitorando continuamente le variazioni di temperatura degli avvolgimenti, che riflettono la qualità del sistema di raffreddamento. Dei sensori FBG sono stati utilizzati per misurare la temperatura degli avvolgimenti di un trasformatore ad alto voltaggio; è stata raggiunta un'accuratezza di ± 3 °C, per monitoraggi sul lungo periodo.

3.8.2.3 Misura della corrente elettrica

I sensori a fibra ottica che sfruttano l'effetto Faraday, sono stati studiati e sviluppati intensamente, per misure di forti correnti ad elevati voltaggi nella distribuzione di potenza. I problemi legati alla birifrangenza indotta, alla temperatura e alle vibrazioni, però, hanno limitato l'applicazione di queste tecniche. Recentemente, sono stati svolti passi in avanti, grazie all'utilizzo di sensori FBG.

3.8.3 Applicazioni in medicina

La maggioranza dei sensori commerciali utilizzati in medicina è elettricamente attivo, perciò, non è appropriata per l'utilizzo in numerose applicazioni mediche, in particolare, in presenza di forti campi a frequenze delle microonde/onde radio o in presenza di ultrasuoni o radiazioni laser associate a trattamenti di ipertermia, a causa del riscaldamento della testa del sensore e del tumore circostante, dovuto alla presenza di conduttori metallici e interferenze elettro-magnetiche di correnti e voltaggi nei conduttori, che portano a letture erranee. I sensori a fibra ottica possono risolvere questi problemi, in quanto, sono virtualmente dielettrici. Una gamma di sensori a fibra ottica in miniatura, basati sulla modulazione dell'intensità, è stata recentemente commercializzata con successo. In parole povere, questi sensori sono tutti sensori puntuali, che possono fornire letture su un piccolo volume del corpo umano. Nonostante il multiplexing di tali sensori puntuali sia possibile, rimane difficile da ottenere in pratica, a causa delle limitazioni nelle dimensioni della sonda. Utilizzando le uniche proprietà di multiplexing dei sensori FBG è possibile realizzare sistemi di sensori quasi-distribuiti in un'unica fibra. E' stato, infatti, sviluppato un certo numero di sistemi di sensori di temperatura e ultrasuoni.

3.8.3.1 Temperatura

E' stato realizzato un nuovo sistema di sensori FBG per la temperatura, nel quale, gli spostamenti di lunghezza d'onda indotti dalla temperatura, sono rilevati con alta risoluzione. E' stata ottenuta una risoluzione di 0.1 °C e un'accuratezza di $\pm 0,2$ °C, in un range di temperatura di 30-60 °C (come mostra la Fig.27), il che, incontra o supera, le richieste di molte applicazioni mediche.

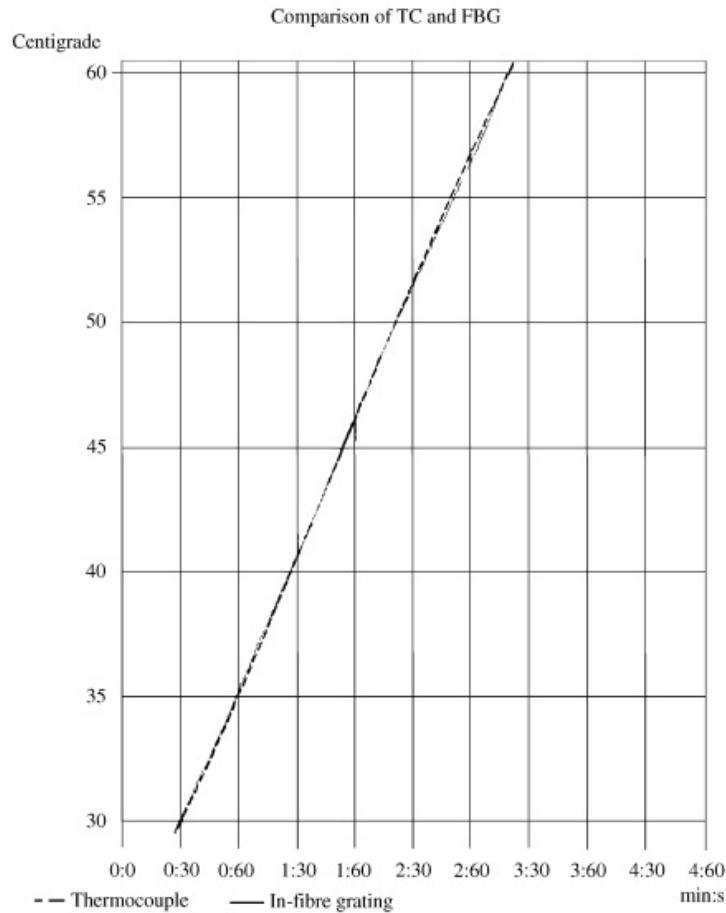


Figura 27: Confronto tra sensori FBG e termocoppia

E' stato realizzato anche un altro sistema, che è stato testato in una macchina con un campo magnetico di $\sim 4,7$ T; è stata raggiunta una risoluzione di $0,1$ °C e un'accuratezza di $\pm 0,5$ °C, in un range di 25-60 °C. Fig. mostra i risultati sperimentali ottenuti con cicli di temperatura sugli FBG. Tutti i sensori lavorano bene e le transizioni improvvise che occorrono alla temperatura sono viste immediatamente dai sensori.

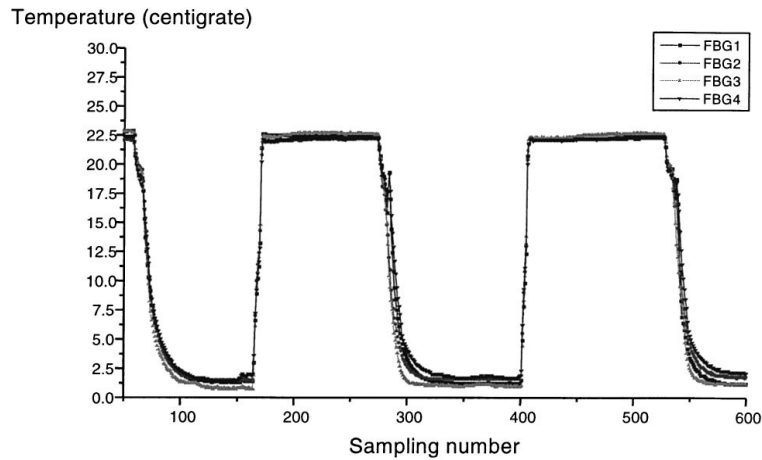


Figura 28: Risultati di misure di temperatura con sensori FBG

La risoluzione spaziale è determinata, principalmente, dalla *cross-talk* (interferenza) termica tra sensori adiacenti, dovuta alla trasmissione del calore lungo la fibra. Può essere complicato determinare il valore esatto della risoluzione spaziale per via teorica, per via delle complesse condizioni di trasferimento del calore coinvolte, come la convezione tra la fibra e il mezzo circostante.

I sensori FBG possono essere usati anche per misurare l'efficienza del cuore, basandosi sul metodo della termodiluizione tramite catetere, nel quale, il medico, inietta nel paziente una soluzione fredda, per misurare l'output di sangue dal cuore. Un catetere flottante viene inserito nell'atrio destro del cuore, permettendo l'iniezione diretta della soluzione, per misurare la temperatura del sangue nell'arteria polmonare. Combinando la lettura della temperatura con le pulsazioni, si può determinare quanto sangue pompa il cuore. E' stato sviluppato un catetere con sensore FBG, al posto di un catetere convenzionale con un termistore o una termocoppia. I risultati preliminari hanno dimostrato un buon accordo con gli output delle termocoppia elettrica.

3.8.3.2 Ultrasuoni

Come per il monitoraggio della temperatura, riguardo alla sicurezza nell'operare in presenza di campi ad alta radiofrequenza, un sensore ad ultrasuoni, richiede il monitoraggio della potenza dalle attrezzature

diagnostiche ad ultrasuoni usate in molte applicazioni mediche. I dispositivi piezoelettrici sono i sensori più comuni, ma sono sensibili alle interferenze elettro-magnetiche e alle distorsioni di segnale ed è difficile determinare direttamente i campi ultrasonici a causa delle limitazioni della grandezza della sonda. I sensori FBG possono superare questi problemi e possono misurare il campo di ultrasuoni in diversi punti simultaneamente, grazie alla possibilità di multiplexing.

3.8.4 Applicazioni per il settore chimico

I sensori FBG possono essere usati anche per misure chimiche, in base al fatto che, la lunghezza d'onda centrale di un FBG, varia al variare dell'indice di rifrazione, ovvero la variazione della concentrazione chimica, tramite l'interazione del campo evanescente tra l'FBG e gli agenti chimici.

Un nuovo tipo di reticolo, detto *reticolo a lungo periodo* (long period grating – LPG), è risultato più sensibile al cambiamento di indice di rifrazione del materiale attorno al cladding, rispetto agli FBG normali. Ogni variazione dell'indice di rifrazione del materiale attorno al cladding, modifica le proprietà dello spettro di riflessione, generando picchi di perdite. Dato che gli LPG sono sensibili anche alle variazioni di temperatura, la compensazione di quest'ultima è possibile.

4 Structural Health Monitoring di componenti in materiale composito

All'interno del campo della Structural Health Monitoring, le fibre ottiche, sono state utilizzate per monitorare una varietà di indicatori della “salute strutturale” di un ampio range di materiali, come cemento, materiali compositi e leghe di metallo. Comunque, una porzione significativa delle ricerche pubblicate, è concentrata nell'integrazione di fibre ottiche in materiali compositi avanzati.

I compositi in fibra esibiscono una particolare varietà di modi di rottura, non osservabili nei loro equivalenti metallici, come la delaminazione, la frattura della matrice e la frattura delle fibre. Inoltre, con il progredire dell'utilizzo di materiali compositi in diversi settori ingegneristici e in condizioni di lavoro spesso severe, risulta chiara la ragione delle continue ricerche nello sviluppo di strutture composite “intelligenti”, capaci di monitorare il proprio stato di salute.

In questa sezione sono presentati, dettagliatamente, gli articoli più interessanti trovati durante la ricerca bibliografica, i quali, hanno fornito l'input nel decidere che tipo di lavoro svolgere per questa tesi.

Verranno ora elencati, uno ad uno, seguendo la stesura originale. Alcune parti, non strettamente correlate alla Strucutral Health Monitoring, sono state omesse.

4.1 *Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors* di S.Takeda, Y.Okabe, T.Yamamoto, N.Takeda

4.1.1 Abstract

In questo lavoro, sono stati utilizzati FBG di piccolo diametro per l'individuazione di delaminazioni di bordo in compositi in fibra di carbonio quasi-isotropi.

4.1.2 Introduzione

E' noto che, la delaminazione di bordo, avviene facilmente sotto carichi ciclici, perché la tensione normale o di taglio interlaminare, diventa massima in corrispondenza dei bordi liberi. Perciò, diventa molto importante individuare delaminazioni di bordo, per contribuire alla garanzia di affidabilità delle strutture e ad una manutenzione più economica.

- Principio dell'individuazione di delaminazione di bordo tramite sensori FBG

I sensori FBG presentano una variazione periodica dell'indice di rifrazione su una certa lunghezza di una fibra ottica single-mode. Quando una luce a banda larga viene mandata in un sensore FBG, un raggio a banda ristretta viene riflesso. La lunghezza d'onda centrale della luce riflessa, λ , è data da:

$$\lambda = 2n * \Lambda$$

dove n e Λ sono l'indice di rifrazione medio e il periodo del reticolo. Quando al sensore FBG sono applicate una deformazione assiale, ε_1 , e due deformazioni trasversali, ε_2 e ε_3 , n e Λ sono espresse da:

$$n = n_0 - \frac{n_0^3}{2} \left[P_{12} \varepsilon_1 + (P_{11} + P_{12}) \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} \right]$$

$$\Lambda = (1 + \varepsilon_1) \Lambda_0$$

In queste equazioni, n_0 e Λ_0 , sono l'indice di rifrazione medio e il periodo del reticolo iniziali, ad un livello di deformazione nullo, e P_{11} e P_{12} sono le costanti di Pockel. Quando viene applicata una deformazione uniforme, lo spettro si sposta, mantenendo la sua forma originale perché, sia n che Λ , rimangono uniformi lungo il reticolo. D'altro canto, lo spettro è molto sensibile a deformazioni non uniformi; la forma dello spettro cambia in

base alle deformazioni non uniformi, causate dalle delaminazioni di bordo. Tali delaminazioni, possono essere rivelate monitorando le variazioni nella forma dello spettro.

Dato che sensori FBG di diametro normale possono agire da difetto interno, in quanto il diametro del cladding è di $125\ \mu\text{m}$ (quasi uguale allo spessore di un foglio di pre-preg), sono stati sviluppati sensori FBG di piccolo diametro. Tali sensori sono costruiti in fibre ottiche di piccolo diametro, rivestite in poliammide. I diametri di core e cladding sono, rispettivamente, $6,5$ e $40\ \mu\text{m}$; il diametro del coating è $52\ \mu\text{m}$. La lunghezza del reticolo è $10\ \text{mm}$, e il periodo è circa $0,5\ \mu\text{m}$.

4.1.3 Test di trazione statico

- Osservazione della crescita della delaminazione di bordo

Per valutare la crescita della delaminazione, sono stati condotti test di trazione a temperatura ambiente, alla velocità di $0,5\ \text{mm/min}$. Il materiale usato è un laminato in fibra di carbonio, T700/2500 (Toray Industries, Inc.) e la configurazione del laminato è quasi-isotropa $[+45/-45/0/90]_s$. Dopo il ciclo di cura (2 ore a $130\ ^\circ\text{C}$ e 4 bar), il provino è stato portato alle dimensioni di $140 \times 30 \times 1,0\ \text{mm}$, come mostrato in Fig.29.

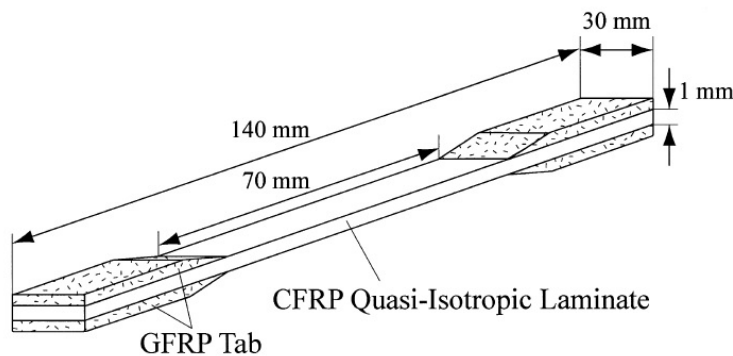


Figura 29: Dimensioni provino

Il materiale utilizzato e la configurazione del laminato, sono stati scelti perchè la delaminazione di bordo possa verificarsi facilmente. La

deformazione e il carico sono stati misurati tramite un estensimetro applicato sulla superficie ed una cella di carico.

Innanzitutto, la delaminazione si è propagata lungo la direzione del carico in maniera rapida e, successivamente, per la larghezza del provino. La delaminazione di bordo è stata osservata dopo aver scaricato il provino, in seguito a una deformazione dell'1.6 %. La Fig.30 mostra una foto al microscopio di una delaminazione osservata al bordo del provino.

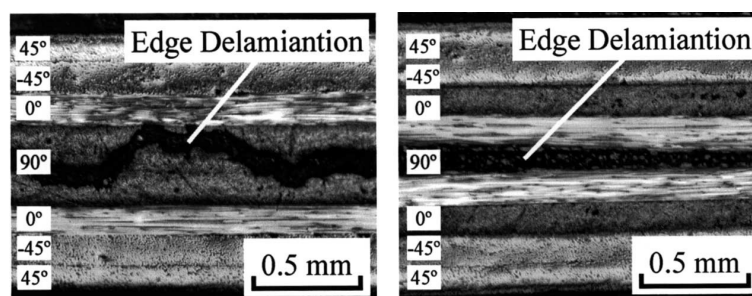


Figura 30: Foto al microscopio del provino: parallela al carico (a) e perpendicolare (b)

La delaminazione si propaga nell'interfaccia tra gli strati $0^\circ/90^\circ$ o tra le irregolarità di uno strato a 90° .

4.1.4 Individuazione di delaminazione di bordo sotto carico ciclico

- Esperimenti

Per l'individuazione della delaminazione, i sensori FBG sono stati inseriti nel laminato, come nelle prove precedenti. Il sensore FBG con reticolo di 10 mm è stato posto a partire dal centro del provino, come mostrato in Fig. 31.

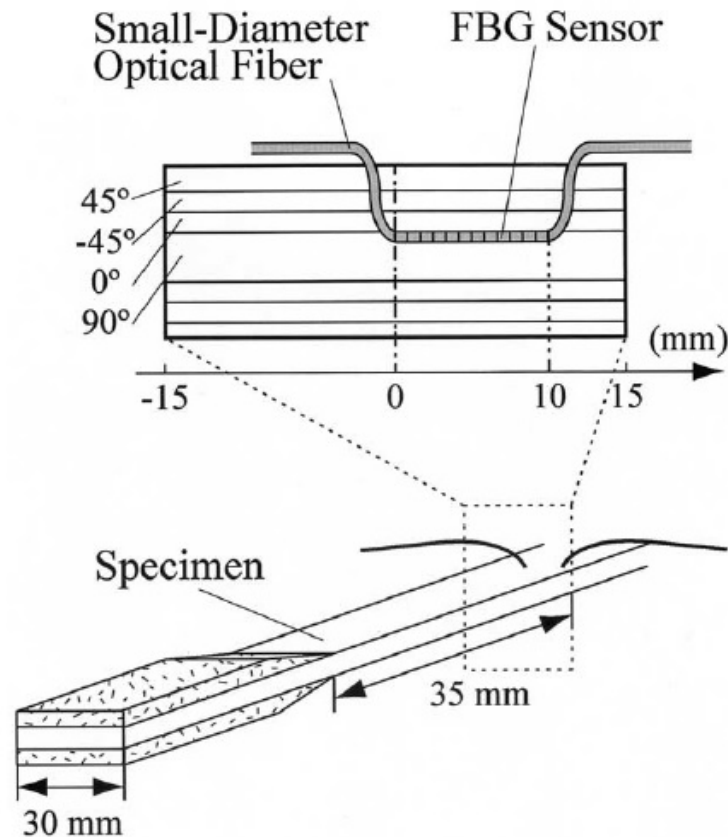


Figura 31: Sensore FBG inserito nel laminato

E' stato applicato un carico ciclico a temperatura ambiente, da 0 a 440 MPa. Il carico massimo è stato impostato per essere circa la metà dell'UTS rilevato precedentemente. La frequenza del ciclo è 5 Hz. Il carico è stato fermato ad un pre-determinato numero di cicli ed è stato misurato lo spettro del sensore FBG a livelli di tensione di 0 e 220 MPa.

- Spettro riflesso

E' stata definita una lunghezza di delaminazione in direzione trasversale, L_{ed} . La crescita della delaminazione in funzione del numero di cicli è presentata in Tab.2.

	Number of cycles ($\times 10^{-6}$)	Edge delamination length (mm)
Step 0	0	0
Step 1	1	2.8
Step 2	20	5.2
Step 3	100	7.4
Step 4	1000	9.0

Tabella 2: Lunghezza di delaminazione all'aumentare dei cicli

Gli spettri misurati dopo aver scaricato il provino, sono mostrati in Fig. Prima di applicare il carico, lo spettro presentava un solo picco. All'aumentare della delaminazione, non si osserva un drastico cambiamento della forma dello spettro. D'altro canto, lo spettro misurato a 220 MPa, cambia forma all'aumentare della delaminazione.

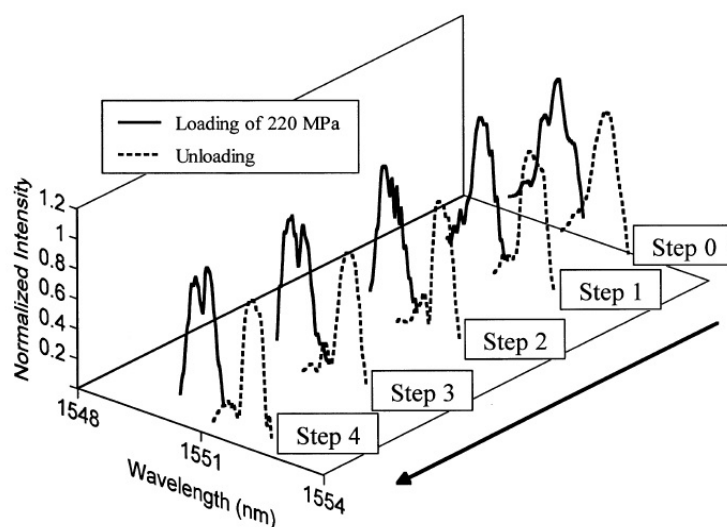


Figura 32: Spettri riflessi misurati

Quando la punta della delaminazione raggiunge il sensore (step 3), lo spettro si divide in due. Al crescere della lunghezza di delaminazione (dallo step 3 allo step 4), l'intensità della lunghezza d'onda maggiore, aumenta. La dipendenza dello spettro riflesso dalla lunghezza di delaminazione e dalle condizioni di carico, è stata poi valutata teoricamente.

4.1.5 Verifica dei risultati sperimentali

Per confermare i dati misurati, lo spettro riflesso è stato misurato tramite analisi teoriche.

I risultati sperimentali sono poi stati comparati con quelli teorici. La posizione della delaminazione è stata osservata tramite microscopio, come visibile in Fig.33. La Fig.34 compara lo spettro misurato a $L_{ed} = 9$ mm sotto carico e quello calcolato, assumendo che la delaminazione sia presente al centro dello strato a 90° .

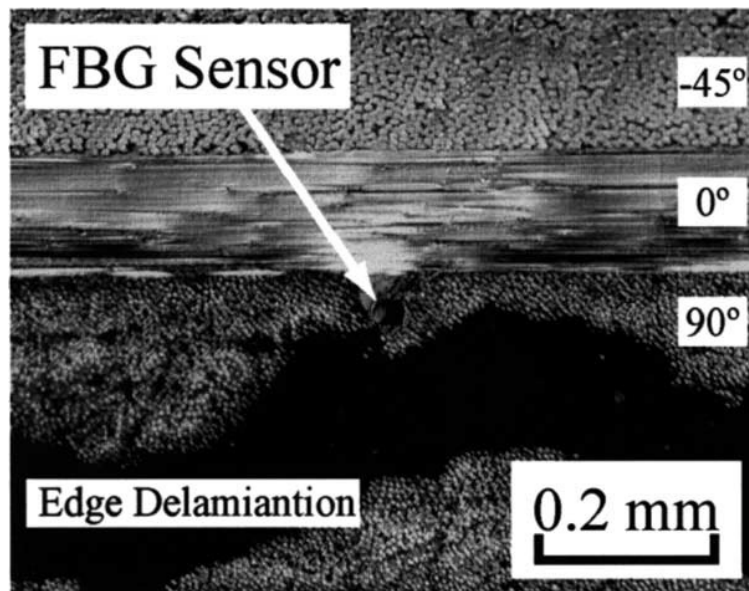


Figura 33: Foto al microscopio del provino dopo il ciclo di carico

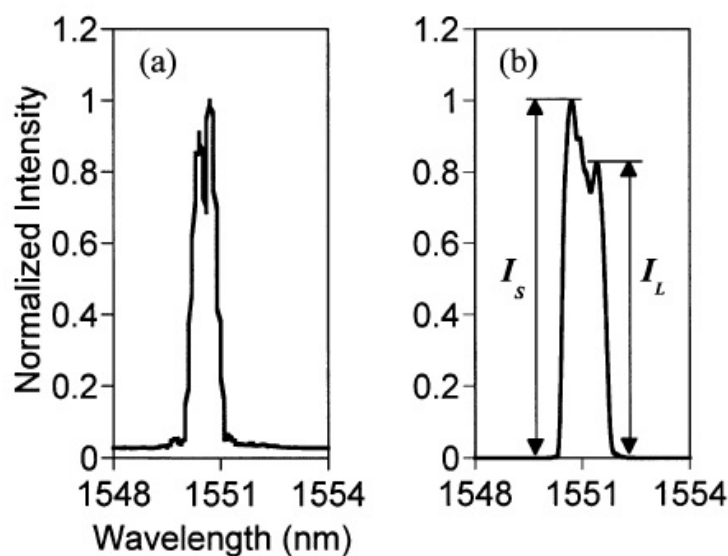


Figura 34: Raffronto tra spettro misurato (a) e calcolato (b) a $L_{ed} = 9$ mm ad un carico di 220 MPa

In questi due spettri, il rapporto d'intensità dei due picchi, è differente, ma questo può essere dovuto a un errore nel calcolo di L_{ed} .

Da questi risultati, le intensità dei picchi a maggiore e minore lunghezza d'onda corrispondono, rispettivamente, alle lunghezze delle aree delaminate e in adesione. Perciò, il rapporto tra i due picchi, I_L/I_S , viene definito come un indicatore per valutare l'entità della delaminazione. I_L e I_S sono le intensità dei picchi a maggiore e minore lunghezza d'onda, rispettivamente. La Fig.35 riporta il grafico logaritmico del rapporto d'intensità rispetto a L_{ed} .

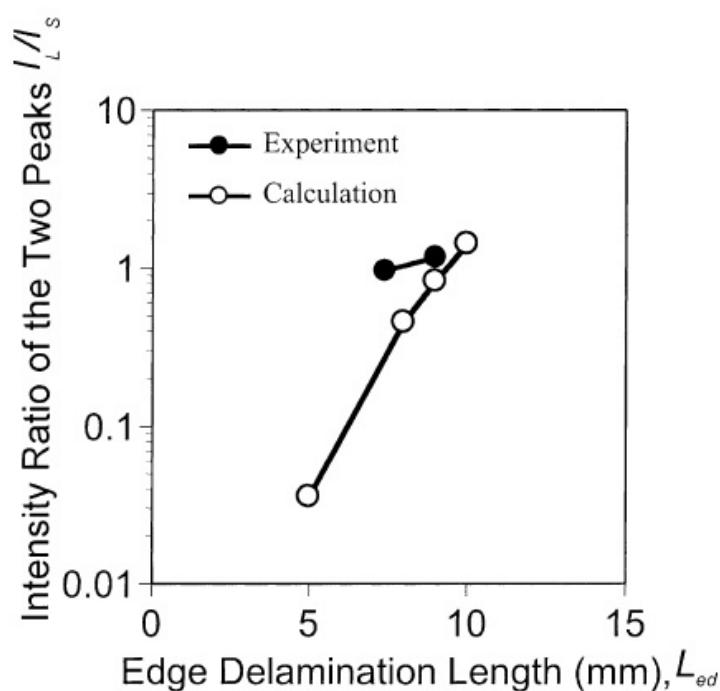


Figura 35: Rapporti di intensità dei picchi rispetto a L_{ed}

C'è una notevole differenza tra i valori misurati e quelli calcolati, ma gli andamenti sono uguali: I_L/I_S aumenta all'aumentare di L_{ed} .

4.1.6 Conclusioni

Lo spettro riflesso cambia sensibilmente a causa della crescita della delaminazione e la tendenza a cambiare è la stessa ottenuta teoricamente. È stato dimostrato che la delaminazione del bordo può essere valutata quantitativamente, monitorando lo spettro riflesso di sensori FBG di piccolo diametro.

Esistono alcuni problemi in questa tecnica di individuazione di delaminazione: dato che il sensore può monitorare una piccola zona di laminato, dovrebbe essere posto dove ci si aspetta che la delaminazione si verifichi. Inoltre, i due picchi dello spettro non possono essere identificati quando le tensioni termiche residue nel laminato sono ridotte, perché il gap di deformazione tra zone in adesione e zone delaminate si riduce.

Questa tecnica di individuazione è efficace per un utilizzo pratico quando lo spettro può essere misurato sotto condizioni di carico.

4.2 *Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors* di S.Takeda, Y.Okabe, N.Takeda

4.2.1 Abstract

Sono stati utilizzati sensori FBG di piccolo diametro per l'individuazione di delaminazione in compositi in fibra di carbonio.

4.2.2 Introduzione

Il processo di rottura di laminati CFRP sotto carichi statici o dinamici, è caratterizzato da danneggiamenti microscopici, come fratture della matrice e delaminazioni. In particolare, la delaminazione causa una riduzione della rigidità e porta, spesso, a rotture catastrofiche. Per individuare la delaminazione, sono state proposte tecniche come l'utilizzo di raggi-X o il C-scan, ma richiedono molto tempo per un'ispezione. In questo lavoro, viene proposta una tecnica di ispezione in tempo reale.

Per prevenire il deterioramento dei laminati, sono stati usati sensori con diametro esterno di 52 μm . Il sensore FBG è stato inserito nello strato a 0° , a contatto con l'interfaccia $0^\circ/90^\circ$. Quando la delaminazione nasce, a partire da un provino pre-fratturato, lo spettro riflesso viene misurato.

4.2.3 Esperimento

○ Materiali

Il provino per questo esperimento è un laminato CFRP con fibre T800H/3631 (Toray Industries, Inc.). La configurazione del laminato è cross-ply $[90_{10}/0_4/90_{10}]$ e le dimensioni del provino sono 140 x 20 x 2,7 mm. Come mostrato in Fig.36, tramite un test di flessione a 4 punti, cresce una delaminazione lineare.

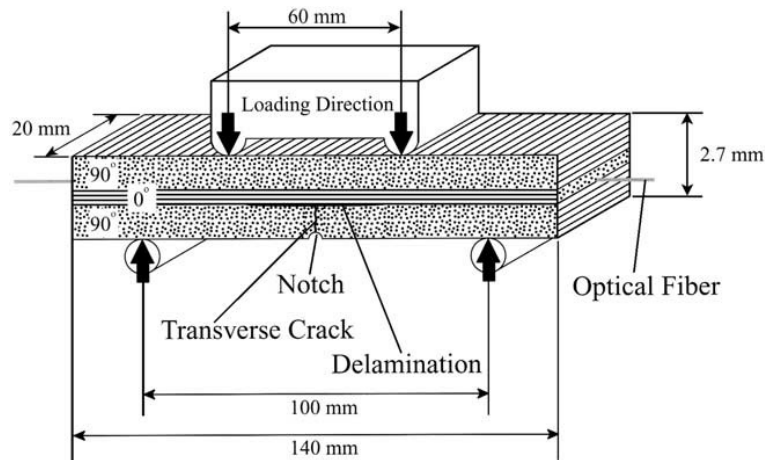


Figura 36: Laminato con delaminazione sotto flessione a 4 punti

Per far avvenire la delaminazione a partire dalla punta della frattura trasversale, è stato creato un intaglio al centro del provino. La frattura trasversale avviene dalla radice dell'intaglio e si propaga nell'interfaccia 0°/90°. Per esaminare l'effetto del punto iniziale di delaminazione, un sensore FBG è stato inserito in posizioni differenti, come mostrato in Fig.37.

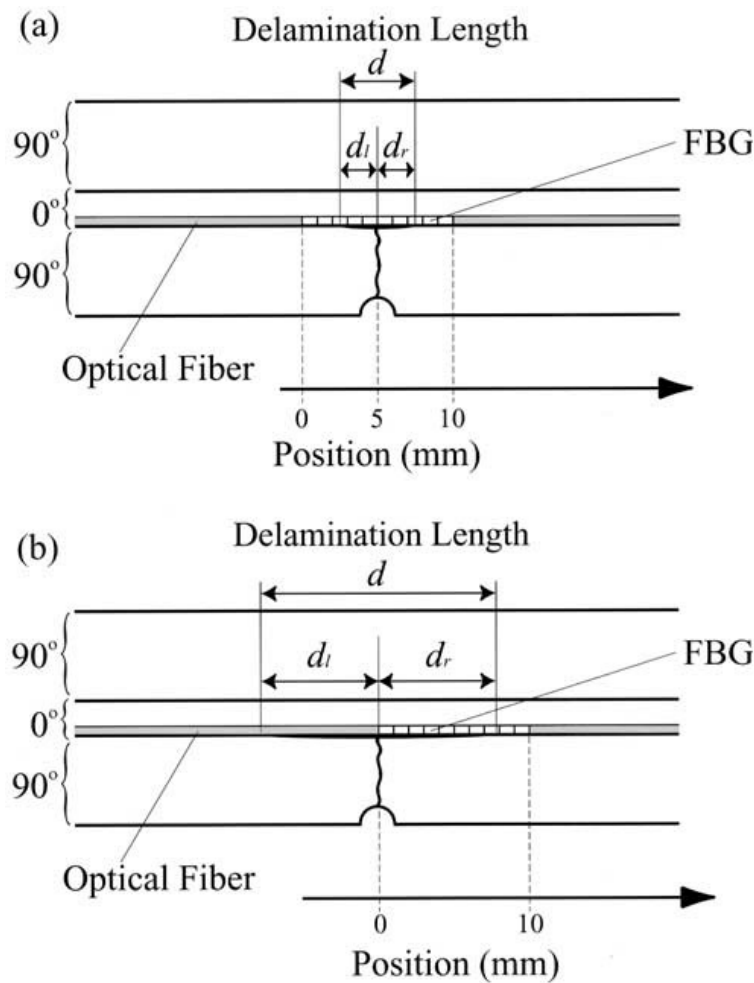


Figura 37: Inserimento del sensore FBG in due posizioni: Tipo A (a) e Tipo B (b)

La delaminazione è iniziata al centro del sensore nel provino di Tipo A, mentre è iniziata alla fine del sensore, nel provino di Tipo B. La lunghezza di delaminazione è stata divisa nella parte di sinistra, d_l , e nella parte di destra, d_r . Il sensore FBG è sensibile alla delaminazione che cresce all'interfaccia $0^\circ/90^\circ$ poiché, il sensore, è posto a contatto con tale interfaccia.

○ Misurazioni

Il carico quasi-statico è stato applicato tramite flessione a 4 punti, a temperatura ambiente. La velocità di applicazione del carico è di 0,5 mm.

La fibra ottica è stata illuminata tramite una sorgente di luce ad emissione spontanea amplificata (amplified spontaneous emission – ASE), il cui range di lunghezza d'onda è maggiore di 40 nm. Dopo aver scaricato il provino, lo spettro di riflessione è stato ottenuto tramite un analizzatore di spettro. In queste misure, la risoluzione di lunghezza d'onda e l'accuratezza dell'analizzatore di spettro sono 0,1 nm e $\pm 0,3$ dB, rispettivamente.

4.2.4 Calcolo teorico dello spettro di riflessione

Lo spettro di riflessione è stato simulato anche teoricamente. Nel calcolo, è stato assunto che, il sensore FBG, fosse influenzato solo dalla deformazione assiale e che, la fibra ottica, aderisse perfettamente alla matrice.

Dalle analisi, è stata ottenuta la distribuzione di deformazione 25 μm sopra l'interfaccia $0^\circ/90^\circ$, dove la fibra è stata inserita.

Sono state poi calcolate le distribuzioni di n e Λ , a partire dalla distribuzione di deformazione.

4.2.5 Risultati e discussione

- Risposta del sensore alla crescita della delaminazione

La Fig.38 mostra una fotografia a raggi-X del provino con la delaminazione.

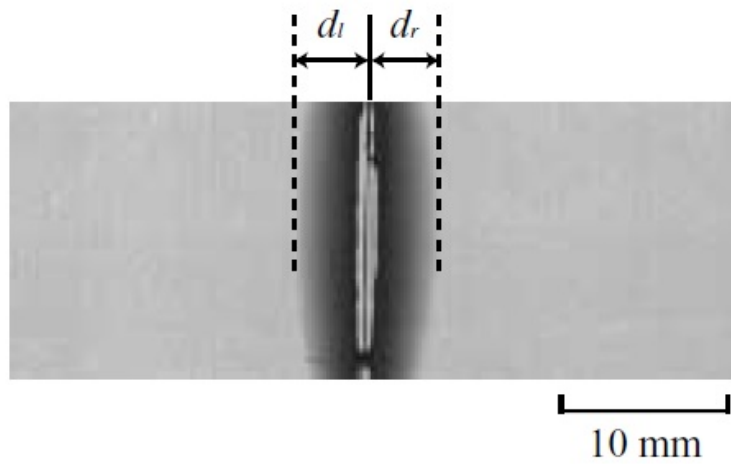


Figura 38: Delaminazione osservata tramite fotografia a raggi-X fatta dalla superficie superiore del provino

La lunghezza di delaminazione è stata misurata a vari step, in modo da studiare la relazione tra la variazione nello spettro riflesso e la grandezza della delaminazione. Le lunghezze di delaminazione del Tipo A e del Tipo B sono riassunte nelle Tab.3 e 4.

Delamination length in Type A test

Steps	d_l (mm)	d_r (mm)	$d_l + d_r$ (mm)
0	0	0	0
1	1.8	2.0	3.8
2	2.8	3.0	5.8
3	4.0	4.0	8.0
4	4.6	4.8	9.4
5	6.2	5.8	12.0

Tabella 3: Lunghezza di delaminazione nel test di Tipo A

Delamination length in Type B test

Steps	d_l (mm)	d_r (mm)	$d_l = d_l + d_r$ (mm)
0	0	0	0
1	2.0	2.0	4.0
2	2.6	2.8	5.4
3	3.2	3.4	6.6
4	4.2	4.2	8.4
5	5.2	5.0	10.2
6	6.6	6.4	13.0
7	9.0	8.4	17.4
8	9.8	9.0	18.8
9	11.4	10.2	21.6

Tabella 4: Lunghezza di delaminazione nel test di Tipo B

E' stata analizzata per prima, la risposta del sensore nel test di Tipo A. Le Fig39 e 40. mostrano lo spettro di riflessione ottenuto dall'esperimento, a vari step dello sviluppo della delaminazione, corrispondenti agli step da 0 a 5, nella Tab.3.

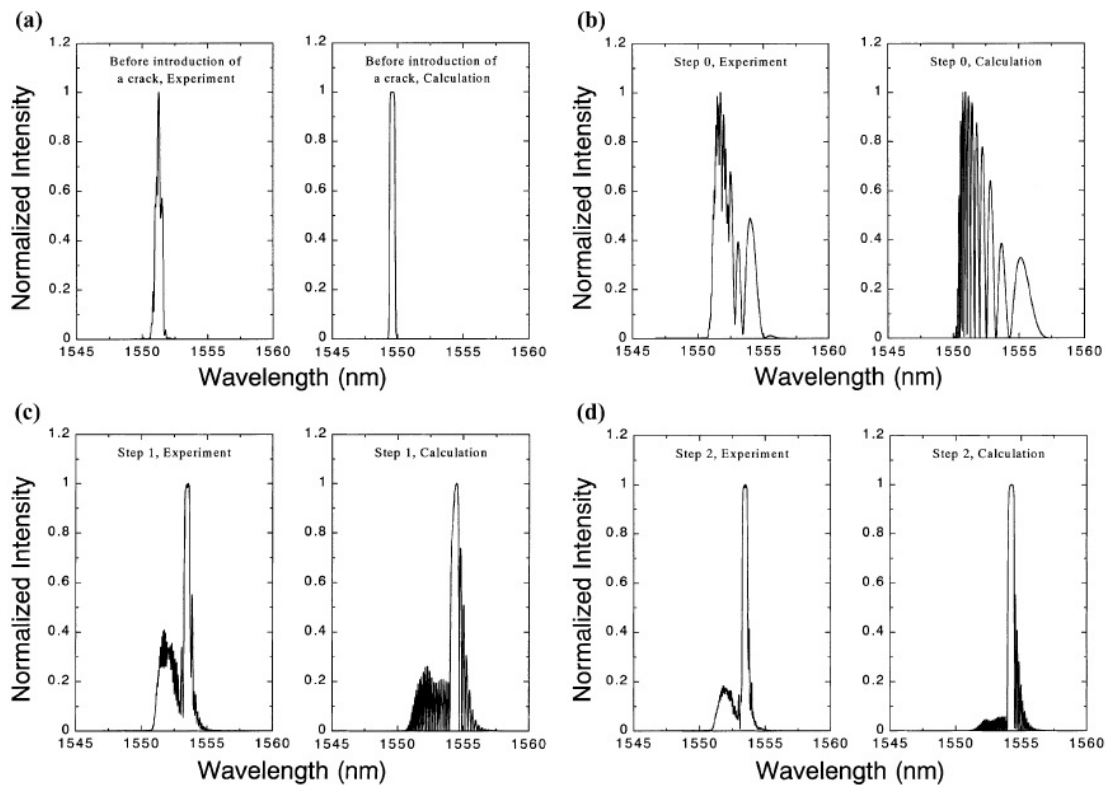


Figura 39: Spettro di riflessione agli step 0-5 nel test di tipo A (1)

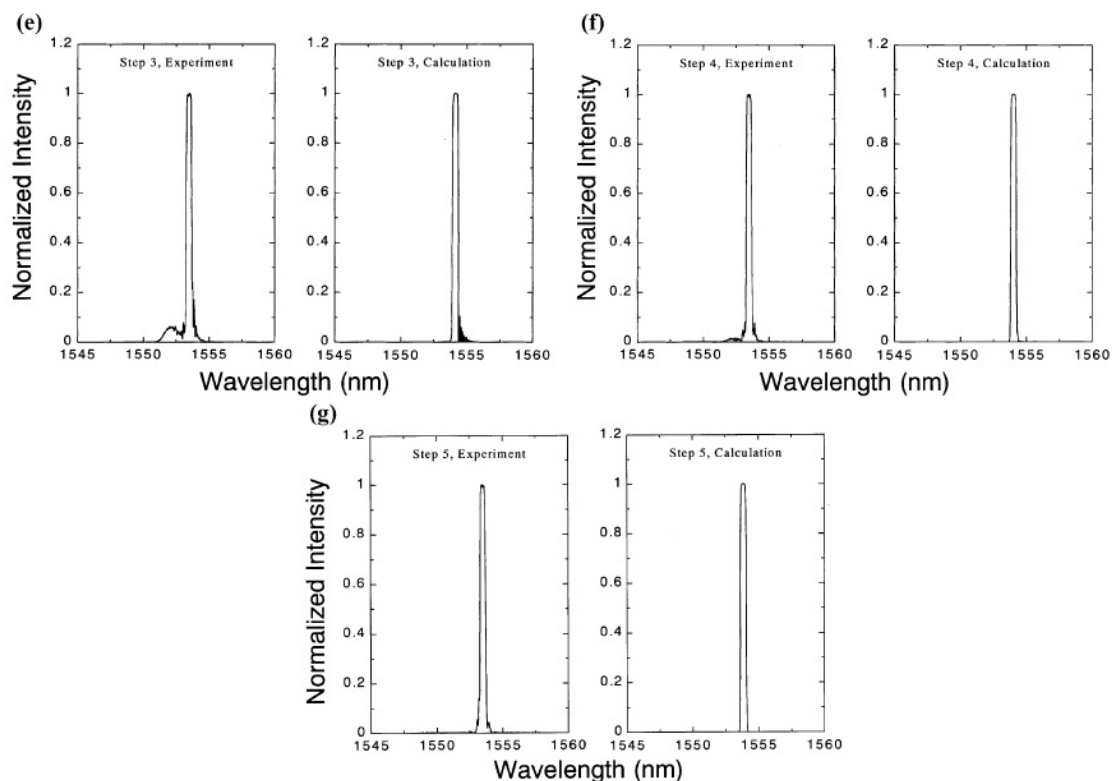


Figura 40: Spettro di riflessione agli step 0-5 nel test di Tipo A (2)

Senza fratture nel provino, lo spettro presenta un picco di dimensioni ristrette. Dopo il verificarsi della frattura, lo spettro si allarga e presenta alcuni picchi, a causa della distribuzione di deformazione non assiale nel sensore. Quando la delaminazione si presenta, a partire dalla punta della frattura, lo spettro presenta un picco largo e alcune componenti attorno ad esso. Successivamente, l'intensità di queste componenti minori diminuisce, all'aumentare della lunghezza di delaminazione. Dato che questa tendenza appare sia nello spettro calcolato che in quello misurato, è confermato che, questi cambiamenti nello spettro, sono causati dal progredire della delaminazione. Risulta presente una piccola differenza nelle intensità delle componenti minori, tra quelle misurate e quelle calcolate; tale differenza, può essere dovuta allo spostamento del sensore durante l'inserimento.

Successivamente, è stata discussa la risposta del sensore alla delaminazione nel Test B. Le Fig.41 e 42 mostrano lo spettro di riflessione ottenuto a vari step di delaminazione, corrispondenti agli step da 0 a 9, in Tab.4.

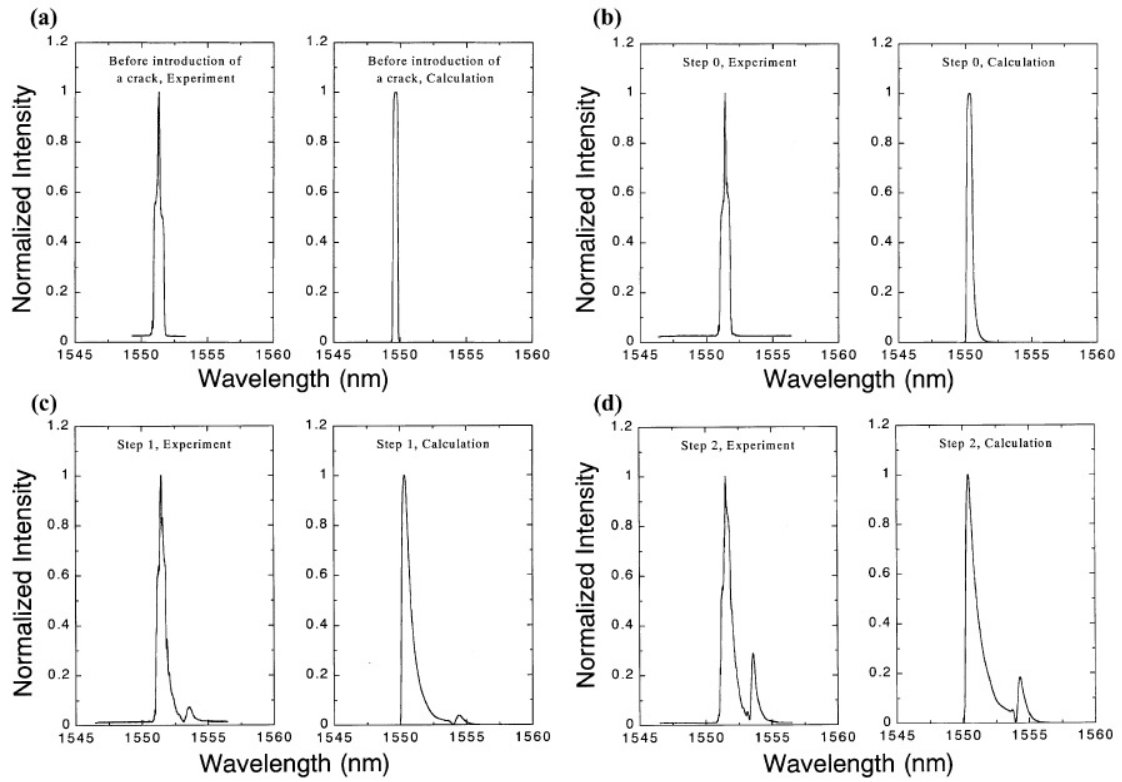


Figura 41: Spettro di riflessione del Test B (I)

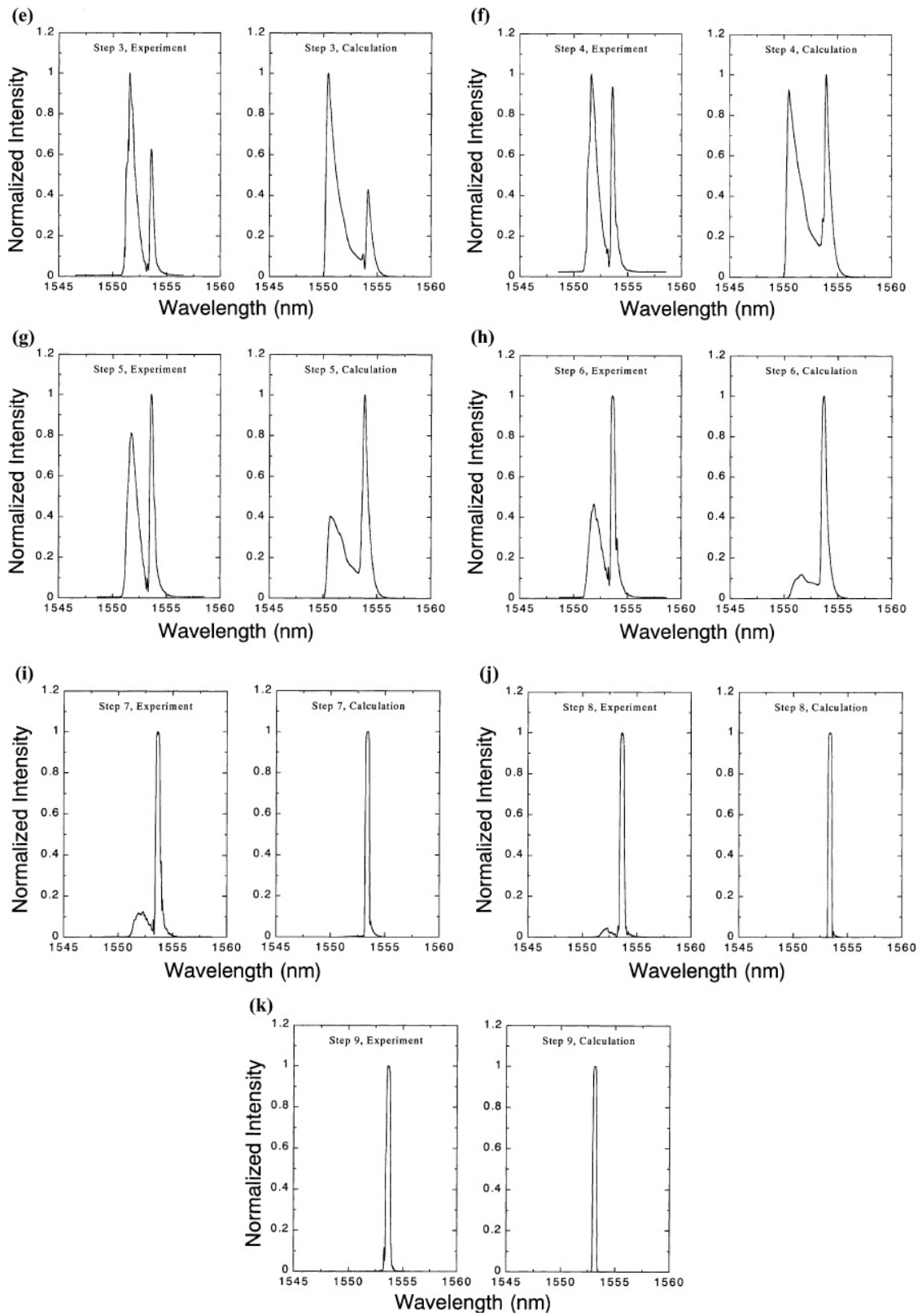


Figura 42: Spettro di riflessione del Test B (2)

La frattura trasversale, appare alla fine del sensore in questo test e influisce sulla distribuzione di deformazione, solo sulla parte finale del sensore. Qui, l'intensità delle componenti a maggiore lunghezza d'onda, aumenta sensibilmente. Dopo lo sviluppo della delaminazione, a partire dalla punta della frattura, l'intensità dei picchi a maggiore lunghezza d'onda, aumenta all'aumentare della delaminazione, sia nello spettro misurato che in quello calcolato. Dopo il test di Tipo B, sono state osservate delaminazioni interlaminari.

- Previsione della lunghezza di delaminazione

E' risultato che la forma dello spettro riflesso è sensibile alla lunghezza di delaminazione. In particolare, le intensità dei due picchi nello spettro ottenuto nel test B, cambiano in base alla lunghezza d'onda. La relazione tra i due picchi e la distribuzione assiale di deformazione nell'FBG, è stata esaminata in base ai calcoli teorici. Come mostra la Fig.43, la forma dello spettro di riflessione, non dipende dalla lunghezza d_l . Questo indica che, la forma dello spettro, dipende unicamente dalla lunghezza di delaminazione all'interno del sensore.

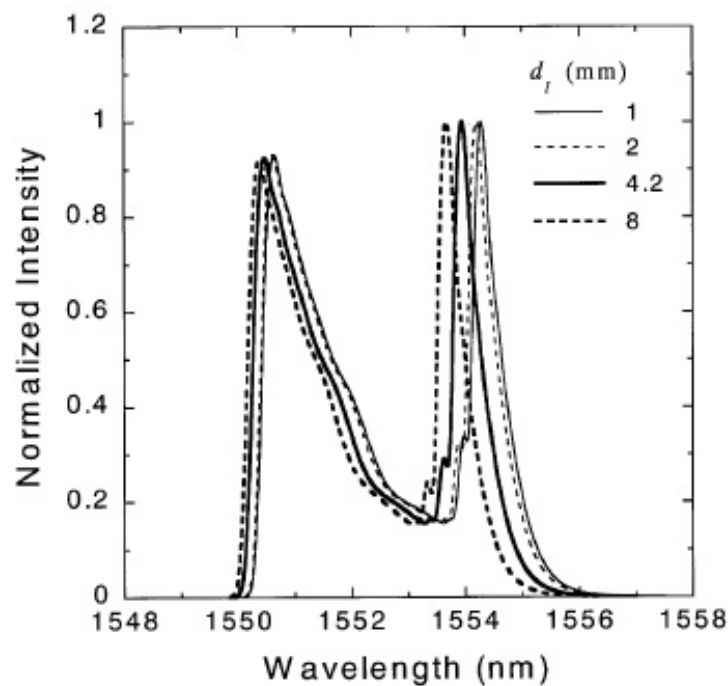


Figura 43: Influenza della lunghezza di delaminazione sullo spettro

Come nell'articolo precedente, è stato definito il rapporto di intensità tra i due picchi I_L/I_S , come indicatore della lunghezza di delaminazione, dove I_L e I_S sono le intensità dei picchi a maggiore e minore lunghezza d'onda, rispettivamente. La Fig.44 mostra il diagramma logaritmico del rapporto d'intensità rispetto alla lunghezza di delaminazione.

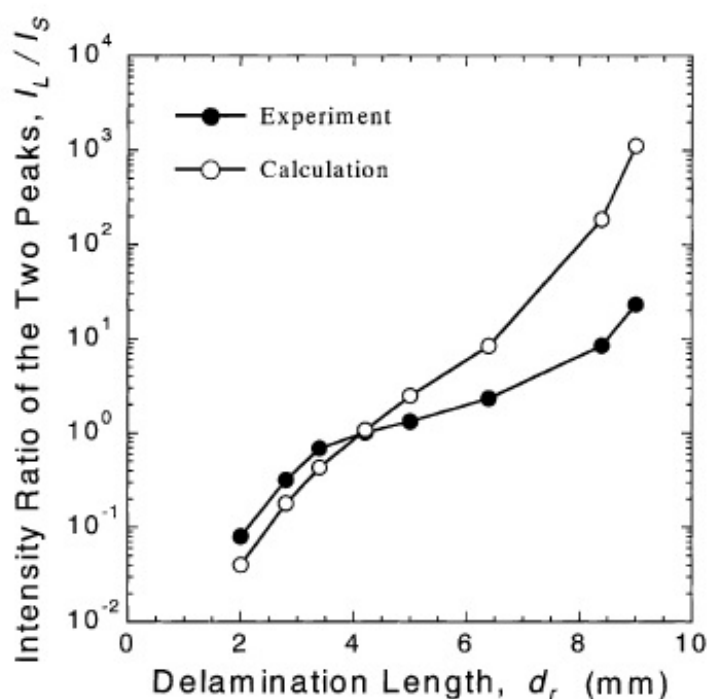


Figura 44: Rapporto di intensità dei due picchi rispetto alla lunghezza di delaminazione

Una lunghezza di delaminazione inferiore a 4,2 mm è stata stimata bene dal rapporto I_L / I_S . Quando la delaminazione supera i 4,2 mm, il rapporto I_L / I_S non corrisponde perfettamente a quello calcolato; la differenza è causata da un errore di misurazione della lunghezza di delaminazione. In conclusione, il rapporto I_L / I_S , risulta comunque un efficace indicatore per prevedere la lunghezza di delaminazione.

4.2.6 Conclusioni

Lo spettro di riflessione, cambia sensibilmente forma, all'aumentare della lunghezza di delaminazione e, tale cambiamento, è confermato dai calcoli teorici. Si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Dal confronto tra gli spettri ottenuti e quelli calcolati, è confermato che la forma dello spettro dipende fortemente dalla distribuzione non uniforme di deformazione, dovuta alla delaminazione.
- Quando la delaminazione parte fuori dal sensore, il rapporto tra le

intensità dello spettro è un buon indicatore della lunghezza di delaminazione.

4.3 **Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors di S. Takeda, S. Minakuchi, Y. Okabe, N. Takeda**

4.3.1 **Abstract**

I sensori FBG sono stati inseriti in un laminato CFRP [0₄/90₄/0₄]. Utilizzando un peso in caduta, è stato effettuato un test di impatto a diversi livelli di energia.

4.3.2 **Introduzione**

Nei compositi, si verificano micro-daneggiamenti, sotto l'applicazione di carichi “fuori dal piano”. Specialmente, impatti a bassa velocità, possono facilmente produrre delaminazioni e fratture della matrice, invisibili sulla superficie dei laminati.

Sono state sviluppate diverse tecniche di monitoraggio ma, nessuna di queste, permette di valutare quantitativamente la grandezza di una delaminazione.

In questo studio, sono stati utilizzati FBG per monitorare lo sviluppo di una delaminazione. Sono state utilizzate fibre di piccolo diametro per non deteriorare le proprietà meccaniche dei laminati.

4.3.3 **Esperimento**

- Procedura per i test di impatto

I provini sono laminati di composito in fibra di carbonio (T700S/2500, Toray Industries, Inc.). La configurazione del laminato è cross-ply [0₄/90₄/0₄] e le dimensioni sono 100 x 100 x 1,5 mm. Il test di impatto è stato condotto a temperatura ambiente, ad energie di impatto di 1.0, 2.0 e 3.0 J. Dopo il test, risulta visibile una piccola indentazione nel punto

d'impatto e appare una frattura dovuta a flessione, nella superficie inferiore del provino. Per osservare i difetti interni, i provini sono stati esaminati tramite C-scan e microscopio ottico. La Fig.45 mostra i difetti tipici: delaminazioni interlaminari alle interfacce $0^\circ/90^\circ$ superiori e inferiori, fratture dovute a taglio nello strato a 90° e fratture dovute a flessione nello strato inferiore a 0° . In particolare, la delaminazione nell'interfaccia $0^\circ/90^\circ$ inferiore, presenta una forma “ad arachide”, e l'area di delaminazione aumenta all'aumentare dell'energia di impatto.

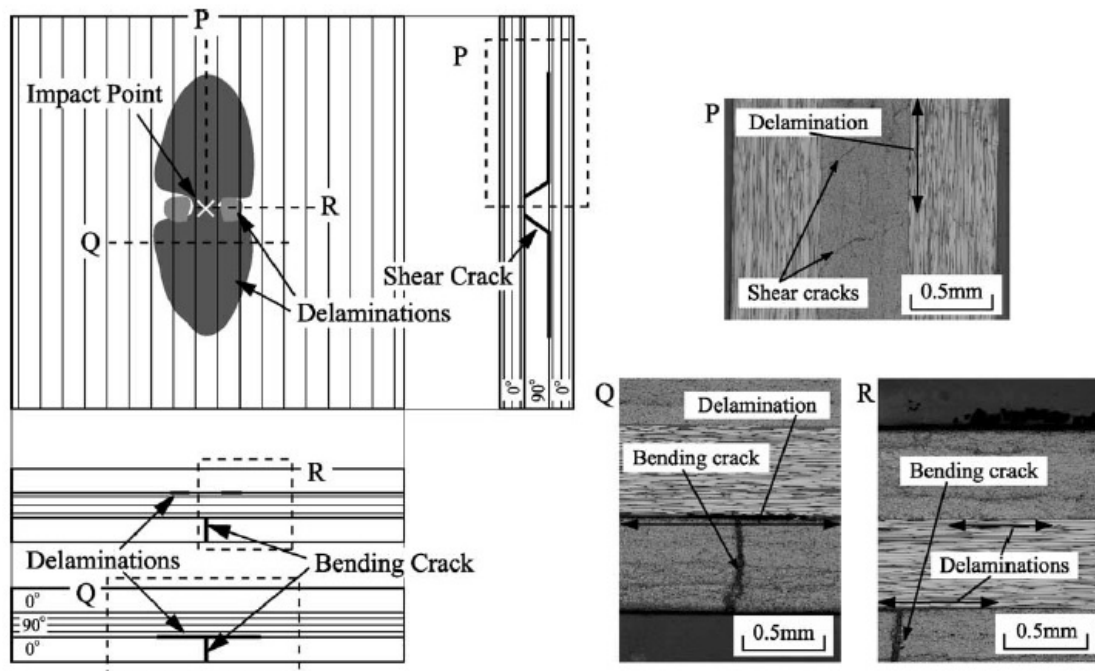


Figura 45: Illustrazione e micrografie del laminato soggetto ad impatto a bassa velocità

Dato che la delaminazione in figura è un difetto critico tra quelli presenti, è stato inserito un sensore FBG nello strato a 90° , in contatto con l'interfaccia $0^\circ/90^\circ$ inferiore, come mostrato in Fig.46.

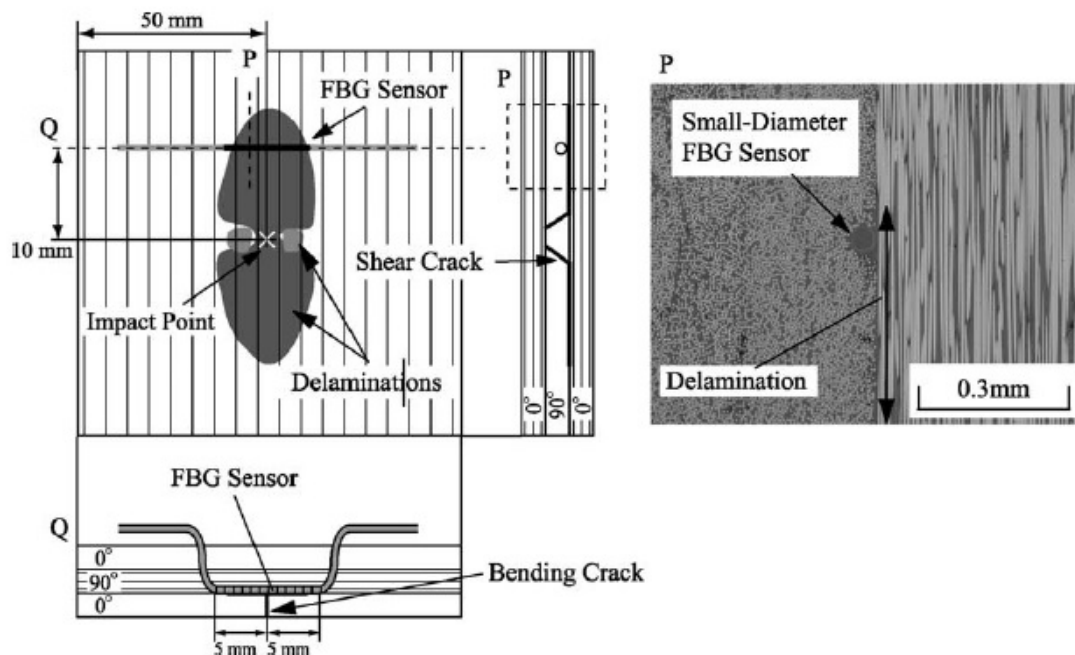


Figura 46: Sensore FBG inserito nel provino

Il sensore è stato posizionato a 10 mm dal punto d'impatto, e la frattura dovuta a flessione passa sotto il centro del sensore. Il diametro del sensore rivestito in poliammide è 52 μm , il core e il cladding hanno, rispettivamente, diametri di 6,5 e 40 μm . La lunghezza del reticolo è 10 mm e il periodo è circa 0,53 μm .

La fibra ottica è illuminata da una sorgente di luce ad emissione spontanea amplificata, il cui range di lunghezza è più di 40 nm. Prima e dopo il test d'impatto, è stato ottenuto lo spettro di riflessione, tramite un analizzatore ottico di spettro.

- Monitoraggio dello sviluppo della delaminazione

In Fig.47 sono mostrati gli spettri di riflessione e le fotografie della delaminazione interlaminare presente all'interfaccia 0°/90° inferiore.

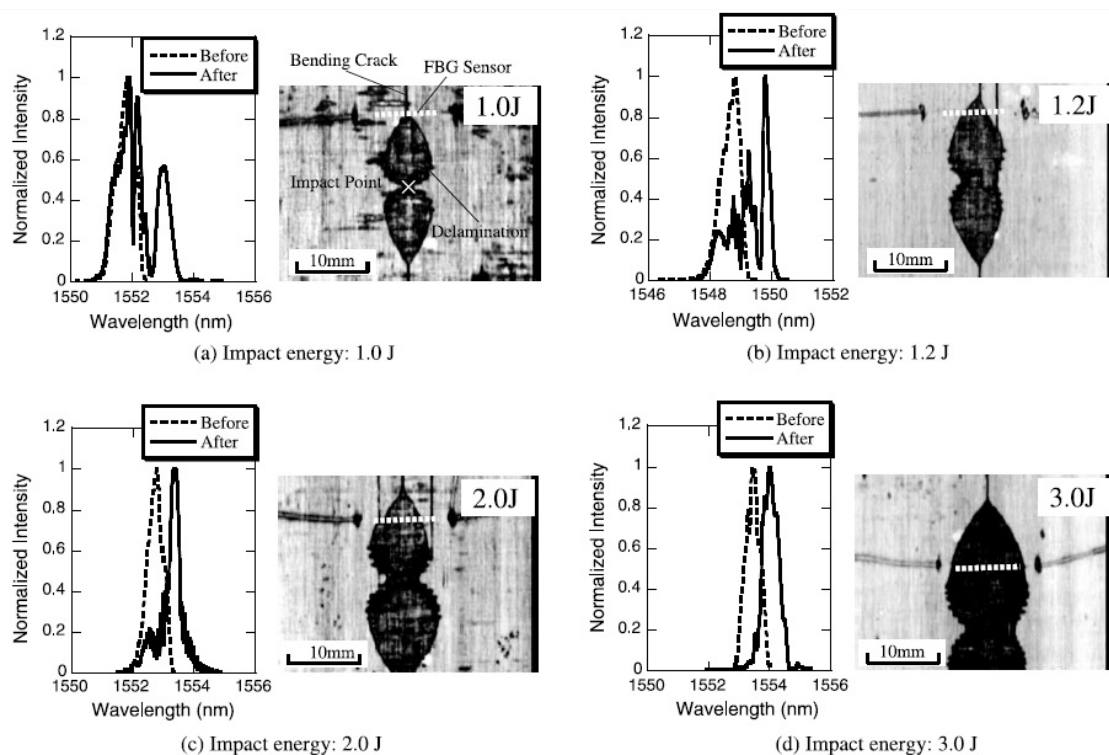


Figura 47: Spettri misurati e fotografie della delaminazione

Prima dell'applicazione del carico, la forma dello spettro cambia a causa dello sviluppo della delaminazione. All'aumentare dell'energia di impatto, l'area di delaminazione passante per il sensore aumenta e, il picco a maggiore lunghezza d'onda, si allarga. Quando l'area di delaminazione copre l'intero sensore, ad un'energia di impatto di 3,0 J, lo spettro spostato a maggiori lunghezze d'onda, mantiene la sua forma. Questi risultati, indicano che, la crescita della delaminazione in un laminato CFRP, può essere monitorata dal cambiamento di forma dello spettro. Per chiarire la relazione tra la forma dello spettro e la grandezza di delaminazione, lo spettro è stato simulato teoricamente.

4.3.4 **Analisi**

- Procedura per il calcolo dello spettro di riflessione

Per prima cosa, è stata calcolata la distribuzione di deformazione nel

provino danneggiato, tramite un'analisi FEM.

Successivamente, partendo dalla distribuzione di deformazione, sono state calcolate la distribuzione di indice di rifrazione medio e di periodo medio del reticolo.

Infine, è stato simulato lo spettro, a partire dalle due distribuzioni.

- Valutazione della crescita della delaminazione

La Fig.48. mostra lo spettro calcolato e la distribuzione assiale di deformazione, a vari livelli di energia di impatto. Questi spettri corrispondono a quelli di Fig. 47.

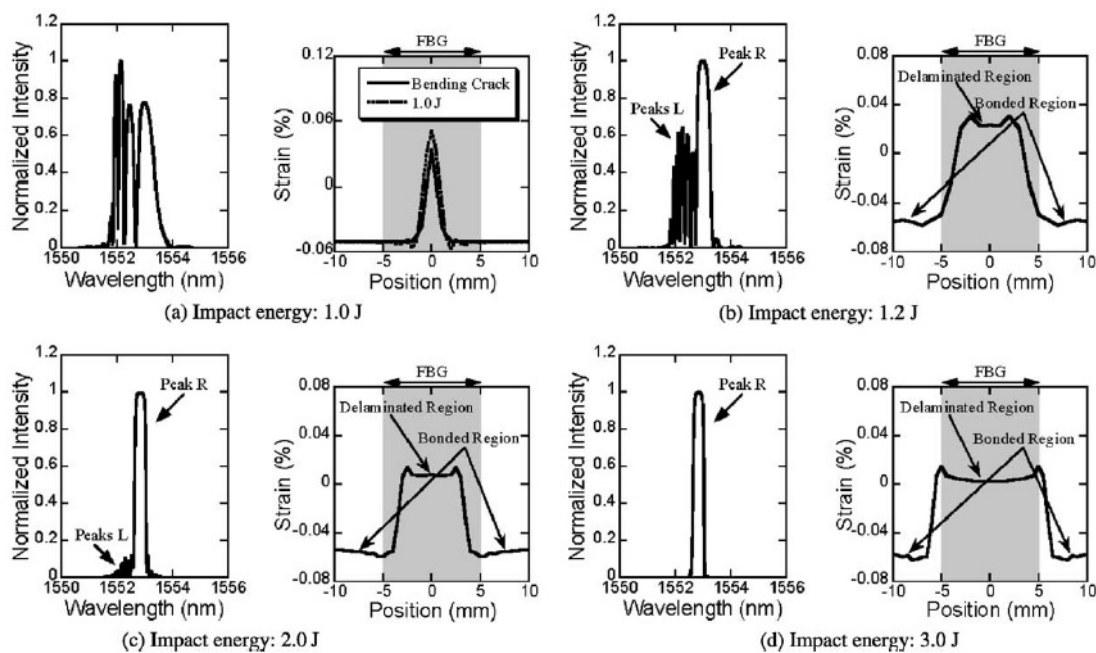


Figura 48: Spettri di riflessione calcolati e distribuzione assiale di deformazione

Dato che la distribuzione assiale di deformazione è la predominante, tra le varie deformazioni, le variazioni di spettro, possono essere discusse attraverso questa. I dati calcolati, riproducono bene la tendenza di cambiamento dello spettro misurato. Quando la punta della delaminazione raggiunge il sensore, all'energia di 1,0 J, lo spettro presenta vari picchi, come mostrato in Fig. 48(a). La lunghezza d'onda della luce riflessa è

differente, in base alla posizione nel reticolo, perché la concentrazione di tensione, dovuta al danneggiamento, è applicata al sensore. Perciò, il cambiamento nello spettro, è causato dalla comparsa della frattura dovuta a flessione e dalla delaminazione. Inoltre, la forma dello spettro, è fortemente influenzata dalla presenza della frattura dovuta a flessione.

Dall'altra parte, quando l'area di delaminazione copre parzialmente il sensore, a 1,2 J, lo spettro presenta un picco sulla parte destra (picco R) e uno sulla parte sinistra (picco L), come mostrato in Fig. 48(b). Ciò avviene, perché la lunghezza d'onda del picco R corrisponde alla deformazione uniforme di una regione delaminata nella distribuzione di deformazione. Il picco L è causato dal gradiente di deformazione presente tra la zona delaminata e quella non delaminata. Quando l'area di delaminazione aumenta, a 2,0 J, l'intensità del picco R aumenta, come visibile in Fig. 48(c). In base a questi risultati, l'aumento di intensità del picco R, risulta rappresentativa dell'incremento dell'area di delaminazione nel sensore. Quando l'area delaminata copre l'intero sensore, a 3,0 J, lo spettro presenta un solo picco, come prima del test. Questo è dovuto al fatto che, la deformazione uniforme, corrispondente alla regione delaminata, è applicata all'intera lunghezza del sensore. La lunghezza d'onda del picco è identica a quella del picco R in Fig. 48(b) e (c).

Per valutare il danneggiamento dovuto all'impatto nel dettaglio, è stato definito il rapporto tra le intensità dei picchi, I_R/I_L , come mostrato in Fig. 49(a). Viene utilizzato questo rapporto perché, il picco R, indica la grandezza della delaminazione. Quando la forma dello spettro è caratterizzata, principalmente, da due picchi, le intensità di questi ultimi, possono essere un buon indicatore della dimensione della delaminazione. In Fig. 49b) è presentato il grafico logaritmico di I_R/I_L rispetto alla lunghezza di delaminazione.

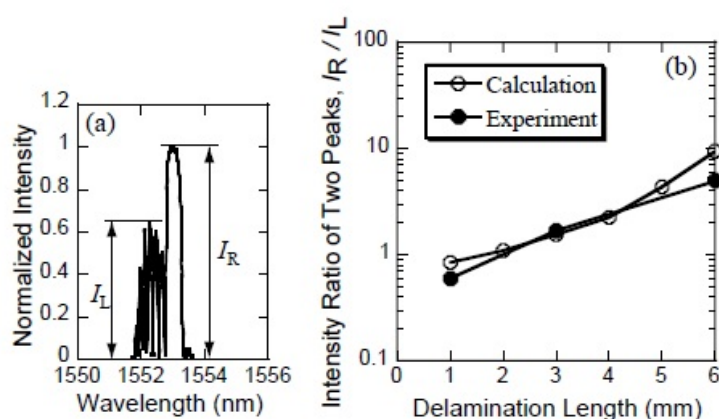


Figura 49: Valutazione della dimensione della delaminazione. (a) Definizione delle intensità dei due picchi e (b) curve logaritmiche del rapporto di intensità rispetto alla lunghezza di delaminazione

La lunghezza di delaminazione è definita come la larghezza di delaminazione che copre il sensore FBG. Sia i risultati misurati, che quelli sperimentali, mostrano che il valore di I_R/I_L aumenta all'aumentare della lunghezza di delaminazione.

Questo porta ad affermare che, lo sviluppo della delaminazione, può essere valutato tramite le variazioni nello spettro, utilizzando un sensore FBG di piccolo diametro.

4.3.5 Conclusioni

Il sensore FBG è stato posizionato nello strato a 90° , in contatto con l'interfaccia inferiore $0^\circ/90^\circ$, per monitorare la delaminazione nell'interfaccia $0^\circ/90^\circ$. Lo spettro di riflessione cambia sensibilmente, in base alle dimensioni della delaminazione. Successivamente, l'influenza della delaminazione sullo spettro, è stata chiarita da simulazioni teoriche dello spettro. Inoltre, la lunghezza di delaminazione, è stata valutata attraverso il rapporto di intensità dei due picchi dello spettro. Si può concludere, che la presente tecnica, la quale sfrutta sensori FBG di piccolo diametro, è efficace nel monitorare e valutare la delaminazione di un laminato CFRP, dovuta ad impatto.

4.4 **Detection of transverse cracks in CFRP laminates using embedded fiber Bragg grating sensors di Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka e N. Takeda**

4.4.1 **Abstract**

In questo studio, sono stati usati sensori FBG per individuare fratture trasversali, che causano distribuzioni di deformazione nel reticolo, all'interno di laminati CFRP cross-ply.

4.4.2 **Introduzione**

La rottura di un laminato CFRP comprende danneggiamenti microscopici, come fratture trasversali e delaminazioni. In particolare, le fratture trasversali nei piani fuori dall'asse, avvengono a stress molto minori del carico di rottura del laminato; diventa importante, rilevare la presenza di fratture trasversali in tempo reale, per un uso più efficace di laminati CFRP. In questo studio, sono stati applicati sensori FBG per individuare fratture trasversali nei compositi. I sensori FBG, tra le varie proprietà, sono molto sensibili a distribuzioni di deformazione non uniformi lungo il reticolo. La distribuzione di deformazione influenza la forma dello spettro. Perciò, i sensori, possono individuare difetti che causano una distribuzione non uniforme di deformazione.

Per individuare le fratture, un sensore non rivestito, è stato inserito nello strato a 0° , in contatto con lo strato a 90° , dove appare la frattura.

4.4.3 **Procedura sperimentale**

○ Materiali

I sensori utilizzati, sono stati prodotti in fibre ottiche single mode. Le fibre, presentano un rivestimento in resina di $250\ \mu\text{m}$ di diametro; il core e il cladding hanno, rispettivamente, un diametro di $10\ \mu\text{m}$ e $125\ \mu\text{m}$. Il reticolo è lungo $10\ \text{mm}$ e il periodo è circa $530\ \text{nm}$.

Questi sensori, sono stati inseriti in compositi in fibra di carbonio (T800H/3631, Toray Industries Inc.), come mostrato in Fig.50.

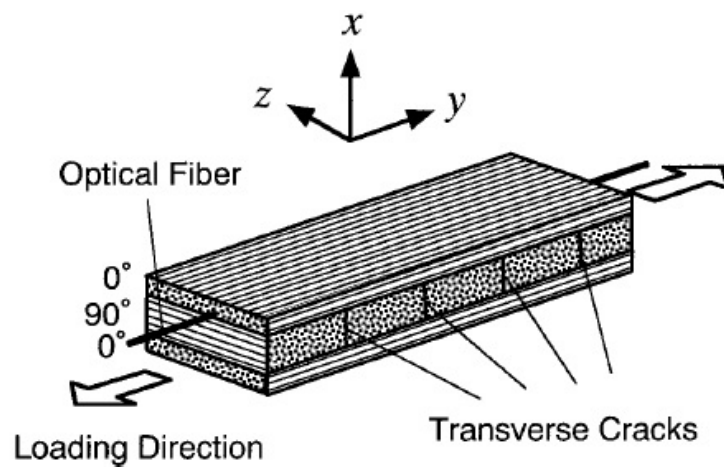


Figura 50: Sensore inserito nel composito

Il rivestimento in resina è stato rimosso prima dell'inserimento del sensore. La configurazione del laminato è cross-ply $[0_2/90_4/0_2]$. Fig.51 mostra la sezione del laminato.

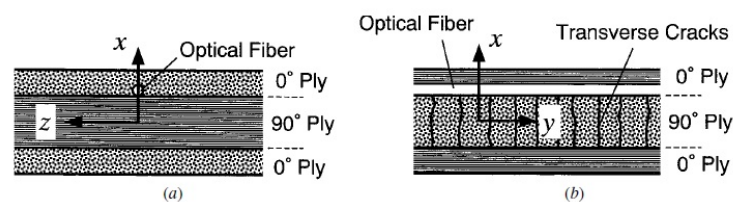


Figura 51: Sezione del laminato: (a) perpendicolare alla direzione del carico e (b) parallela alla direzione del carico

Inserendo il sensore a contatto con lo strato a 90° , senza il rivestimento in resina, questo è sensibile alle fratture trasversali che si verificano nello spessore e per la larghezza dello strato a 90° . Inoltre, dato che la fibra ottica è inserita nello strato a 0° parallelo alle fibre di carbonio, la regione “ricca di matrice”, è talmente piccola che non deteriora la rigidità del laminato. La geometria e le dimensioni del provino sono illustrate in Fig.52.

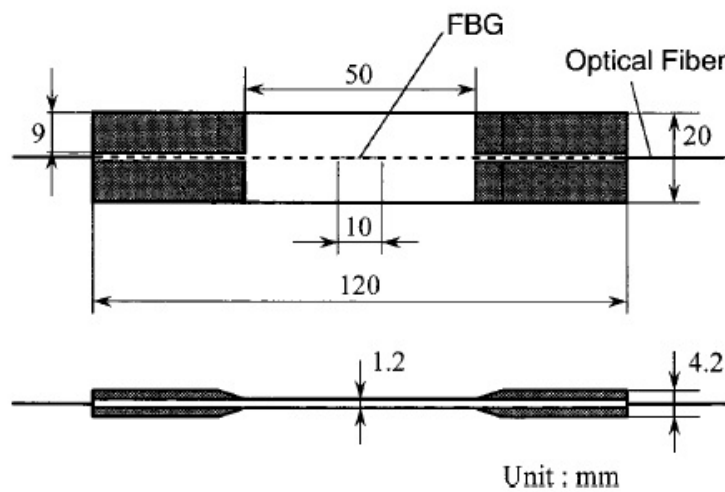


Figura 52: Geometria e dimensioni del provino

○ Misure

E' stato applicato un carico di trazione quasi statico a temperatura ambiente; la velocità di applicazione del carico è 0,5 mm/min. La deformazione è stata misurata attraverso un estensimetro attaccato alla superficie superiore del provino mentre, la tensione, è stata misurata con una cella di carico. La fibra ottica è stata illuminata con una sorgente di luce a led, il cui range di lunghezze d'onda va da 1290 a 1680 nm. Lo spettro di riflessione è stato ottenuto con un analizzatore di spettro, fermando la macchina di prova a diversi livelli di deformazione. La risoluzione e l'accuratezza dell'analizzatore di spettro sono, rispettivamente, 0,05 nm e $\pm 0,3$ dB. Contemporaneamente, una superficie laterale lucidata del provino, è stata replicata su un film di acetato di cellulosa, con metil-acetato come solvente. Attraverso questo "replica film", si può contare il numero di fratture nello strato a 90° dopo il test.

4.4.4 Risultati sperimentali

Fig.53 mostra la tensione σ e la densità di fratture ρ misurate, in funzione della deformazione ϵ , misurata dall'estensimetro.

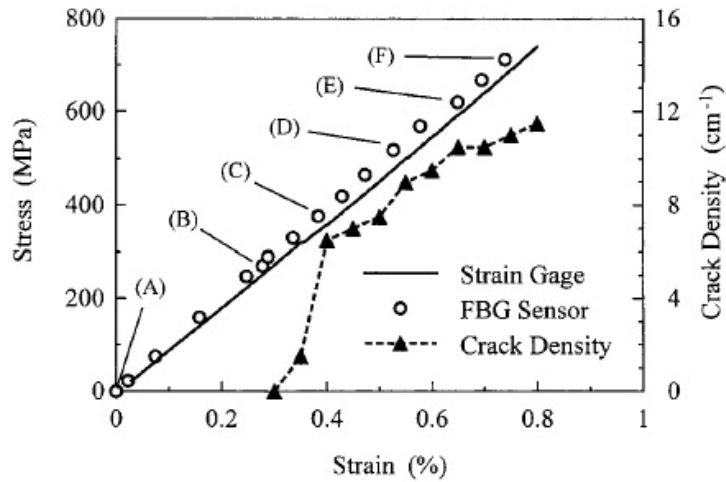


Figura 53: Densità di fratture e tensione in funzione della deformazione

La densità di fratture è definita come il numero di fratture trasversali per unità di lunghezza lungo la direzione del carico nello strato a 90°. In questo grafico, i cerchi, sono plottati sfruttando anche la deformazione ε_f , ottenuta dallo spostamento $\Delta\lambda$ della lunghezza d'onda del picco massimo dello spettro di riflessione. La relazione tra ε_f e $\Delta\lambda$ è espressa dalla seguente equazione, assumendo che il core sia isotropo e la temperatura non vari durante il test:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{n_0^2}{2} [p_{12} - \nu_f (p_{11} + p_{12})] \right) \varepsilon_f$$

λ_0 è la lunghezza d'onda centrale dello spettro di riflessione e n_0 è l'indice di rifrazione medio del reticolo dopo l'embedding del sensore nel provino e prima dell'applicazione del carico. ν_f è il coefficiente di Poisson della fibra ottica e p_{11} e p_{12} sono i coefficienti di deformazione ottica, dove gli indici 1 e 2 denotano, rispettivamente, la direzione assiale e trasversale della fibra ottica.

In Fig.54 sono rappresentati gli spettri di riflessione per differenti deformazioni.

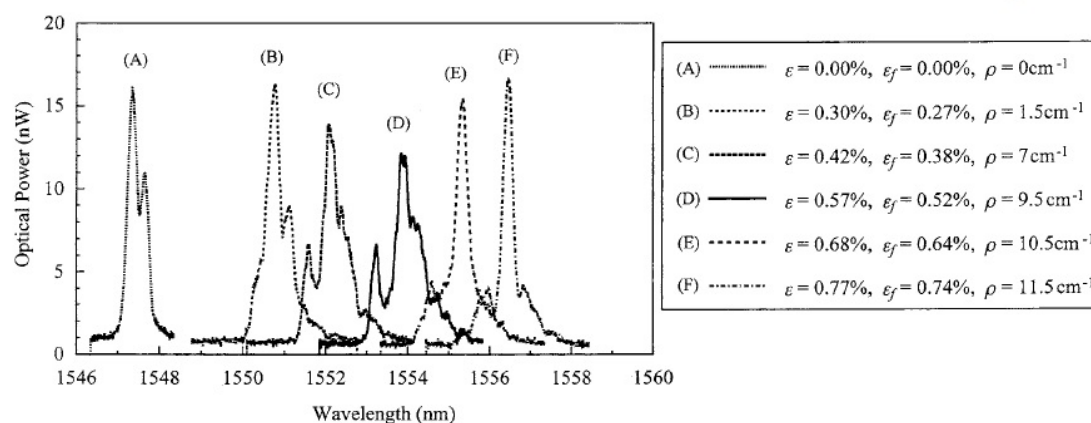


Figura 54: Spettri di riflessione misurati per varie deformazioni. Corrispondono ai dati (A)-(F) di Fig. 53

All'aumentare della densità di fratture, la forma dello spettro si distorce; l'intensità del picco maggiore diminuisce, compaiono alcuni picchi attorno ad esso e lo spettro si allarga. Quando la densità di fratture si avvicina alla saturazione, lo spettro torna a restringersi e il picco maggiore si alza nuovamente. Questo cambiamento nella forma dello spettro, ci si aspetta sia dovuto alla distribuzione di deformazione causata dalle fratture trasversali nello strato a 90° .

4.4.5 Analisi

Per confermare l'ultima supposizione, è stato calcolato teoricamente lo spettro. Nel calcolo, è stato ipotizzato che, il sensore, sia influenzato unicamente dalla distribuzione di deformazione assiale e la fibra ottica aderisca perfettamente alla matrice dello strato a 0° .

Per prima cosa, è stata calcolata la distribuzione non uniforme di deformazione causata dalle fratture trasversali. La posizione delle fratture è stata determinata dal film replicante.

Successivamente, sono state calcolate la distribuzione del periodo del reticolo Λ e l'indice di rifrazione medio n lungo il reticolo, a partire dalla distribuzione assiale di deformazione ϵ_y ; è stato poi calcolato lo spettro di riflessione.

Gli spettri calcolati, rispetto a quelli misurati, presentano spostamenti delle lunghezze d'onda maggiori; questo è dovuto, principalmente, ad ipotesi di

calcolo. I risultati calcolati, comunque, riproducono molto bene la variazione della forma dello spettro, così come il cambiamento del picco più alto, la larghezza dello spettro e la posizione dei picchi. Questi dati, suggeriscono che, il cambiamento dello spettro, sia dovuto all'apparizione di fratture trasversali. Quando la densità di fratture è bassa, la distribuzione di deformazione è non uniforme, e lo spettro riflesso è disturbato. Quando la densità di fratture si avvicina alla saturazione, ogni intervallo tra due fratture vicine diminuisce e la variazione assiale di deformazione si riduce. Lo spettro diventa, perciò, ristretto e presenta un solo picco.

Tali risultati mostrano che, la comparsa di fratture trasversali, può essere individuata a partire dalle modifiche che subisce lo spettro di riflessione.

- Dipendenza della larghezza dello spettro dalla densità di fratture

Con l'aumento della densità di fratture, la larghezza dello spettro cambia sia per i risultati sperimentali, sia per quelli calcolati. Pertanto, la larghezza dello spettro, definita come la larghezza a metà del massimo (full width at half maximum – FWHM), è disegnata come funzione della densità di fratture, in Fig.55.

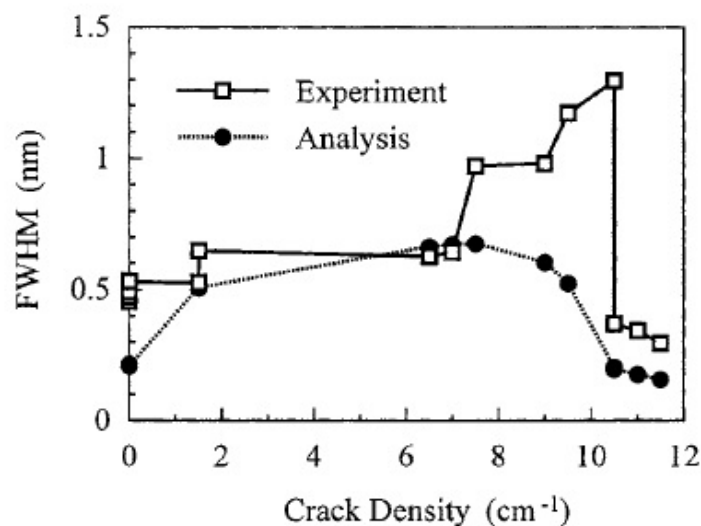


Figura 55: Relazione tra larghezza dello spettro e densità delle fratture

Nei risultati sperimentali, la FWHM aumenta drasticamente a circa 7 cm^{-1} di densità di fratture. Dall'altra parte, i dati calcolati, mostrano l'incremento di FWHM nelle fasi iniziali di accumulo di fratture. Questa differenza è dovuta allo spettro dopo la fabbricazione del provino e agli effetti degli stress termici residui. In ogni caso, considerando i risultati teorici, la larghezza dello spettro può essere un buon indicatore per valutare quantitativamente la densità di fratture in tempo reale.

Inoltre, per confermare la relazione tra larghezza dello spettro e densità di fratture, è stata calcolata la larghezza dello spettro per la densità media di fratture di 18 provini. La densità media di fratture e i range di dispersione dei 18 provini sono mostrati in Fig.56.

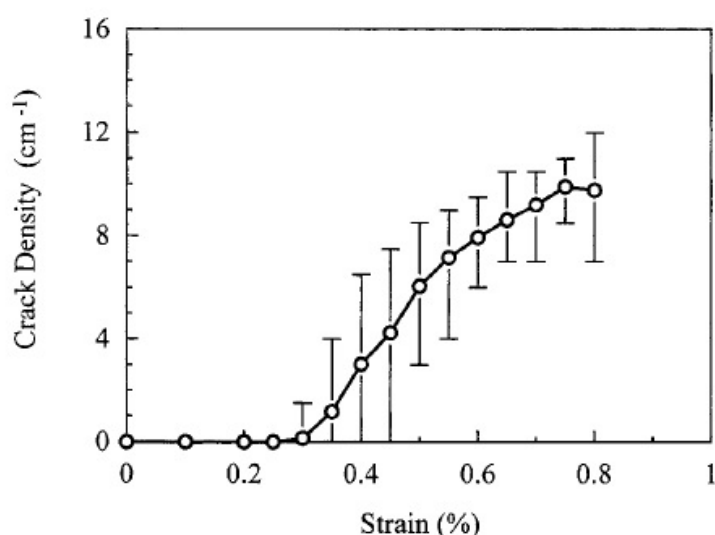


Figura 56: Densità media di fratture di 18 provini testati

Dato che la deformazione alla quale compare la prima frattura è differente a seconda del provino, le bande di incertezza sono ampie. Nel calcolo dello spettro, è stato assunto che le fratture fossero egualmente distanziate, dato che la posizione delle fratture non è nota. La FWHM calcolata è presentata in Fig.57.

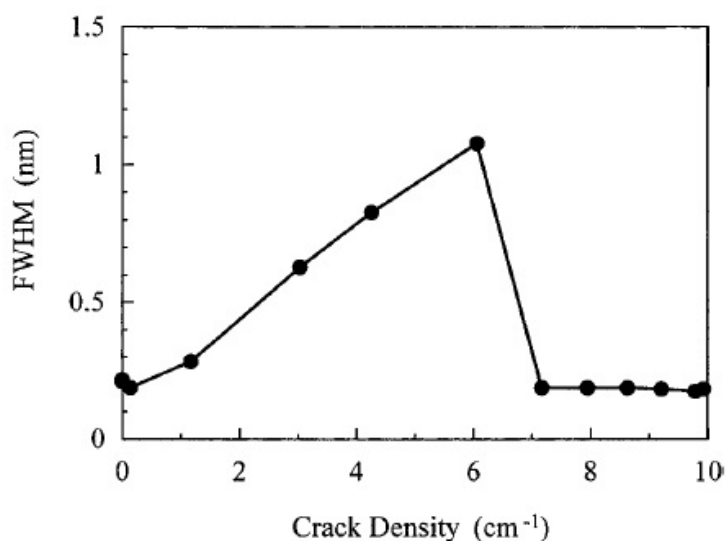


Figura 57: Larghezza dello spettro calcolata per la densità media di fratture di Fig. 56

L'immagine dimostra che la FWHM aumenta decisamente insieme alla densità di fratture, prima della saturazione. E' stato quindi dimostrato che, la larghezza dello spettro, può essere utilizzata per valutare la densità di fratture.

E' stato affrontato anche l'effetto degli stress termici residui sulla forma dello spettro ma, questo, verrà omesso, in quanto non è di interesse in questa sezione dell'elaborato.

4.4.6 Conclusioni

Un sensore FBG non rivestito è stato inserito nello strato a 0° di un laminato CFRP per individuare fratture trasversali; all'aumentare del carico applicato e, di conseguenza, delle fratture, la forma dello spettro di riflessione si è distorta sensibilmente.

Lo spettro, è stato poi calcolato teoricamente; questo, ha mostrato caratteristiche molto simili a quelle dello spettro ottenuto sperimentalmente. In base a ciò, è stato confermato che, le variazioni nello spettro, sono causate dalla distribuzione non uniforme di deformazione, indotta dalle fratture trasversali. La presenza di fratture può, dunque, essere individuata grazie ai cambiamenti nella forma dello spettro riflesso.

Inoltre, la FWHM, è risultata un buon indicatore quantitativo della densità

di fratture.

Un problema di questa tecnica è che, il sensore FBG, può rilevare fratture, soltanto nelle sue vicinanze. Se questa tecnica viene applicata in grandi strutture in composito, i sensori dovrebbero essere posizionati dove ci si aspetta si verificheranno delle fratture. Pertanto, si dovrebbe sfruttare la deformazione media misurata da sensori quasi-distribuiti, per localizzare le aree danneggiate. Se è presente una frattura trasversale, lo spettro riflesso è distorto e, la deformazione determinata dallo spostamento della lunghezza d'onda, non è in accordo con la deformazione media.

4.5 *Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack location in composites* di **Y. Okabe, R. Tsuji, N- Takeda**

4.5.1 **Abstract**

In questo studio, sono stati applicati sensori FBG “chirped”, per identificare la posizione di fratture in laminati CFRP, dal momento che, lo spettro di riflessione di un FBG chirped, è espresso come funzione della posizione lungo il reticolo.

4.5.2 **Introduzione**

Come visto, ad esempio, nell'articolo precedente, la quantità di fratture presenti in un laminato CFRP, può essere determinata, analizzando lo spettro riflesso di un sensore FBG; non può essere però determinata la posizione di tali fratture. Per rendere questo possibile, in questo studio, sono stati introdotti sensori FBG chirped, che presentano uno spettro allargato, funzione della posizione all'interno del reticolo. I sensori chirped sono stati introdotti nel laminato come qualsiasi sensore già visto e la posizione delle fratture è stata ottenuta direttamente dalla lettura della deformazione dello spettro riflesso.

- Sensori FBG chirped

Per una spiegazione più approfondita, si rimanda al Capitolo. La Fig.58

riassume la differenza, in termini di indice di rifrazione e spettro riflesso, tra un FBG standard e uno chirped.

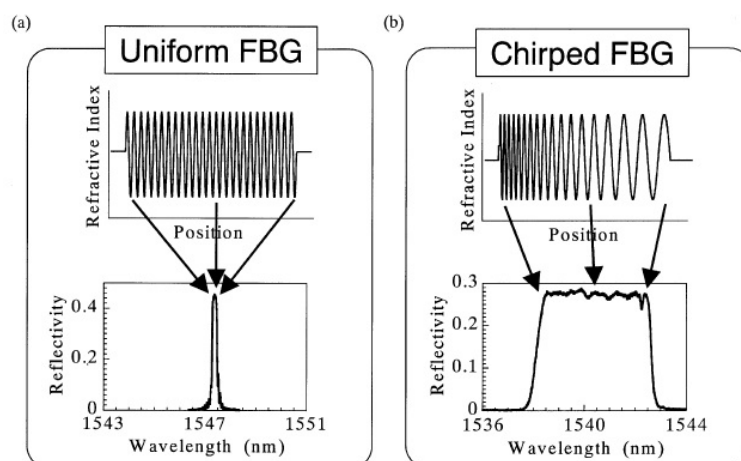


Figura 58: Profili di indice di rifrazione e spettro di riflessione di FBG: (a) uniforme e (b) chirped

In questo studio, sono stati usati due tipi di sensori chirped. Il primo, è stato realizzato in una fibra ottica di dimensioni normali, con core a cladding di 8 μm e 125 μm di diametro, rispettivamente e rivestimento esterno in poliammide di 150 μm di diametro. Il secondo tipo, è un sensore realizzato per essere inserito in uno strato di 125 μm di spessore, senza alterare le caratteristiche meccaniche del laminato. I diametri di core, cladding e rivestimento in poliammide sono, rispettivamente, 6,5, 40 e 52 μm . Il reticolo dei sensori è lungo 50 mm e la FWHM dello spettro di riflessione è 4,5 ~ 5,0 nm.

4.5.3 Procedura sperimentale

I sensori sono stati inseriti in un composito in fibra di carbonio T800H/3631 (Toray Industries, Inc.). La configurazione del laminato è cross-ply [02/904/02]. Come mostrato in Fig.59, la fibra ottica è posizionata nello strato a 0° del laminato, per individuare le fratture trasversali che si creano nello strato a 90°.

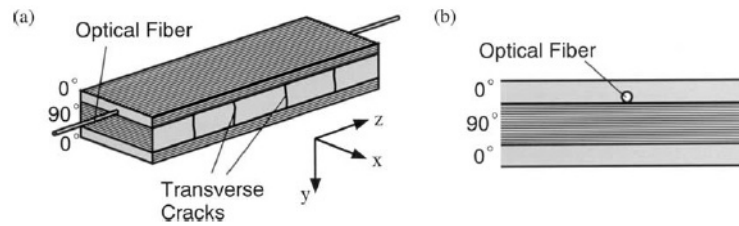


Figura 59: Posizionamento del sensore nel laminato e configurazione del laminato

La geometria e le dimensioni del provino sono riassunte in Fig.60.

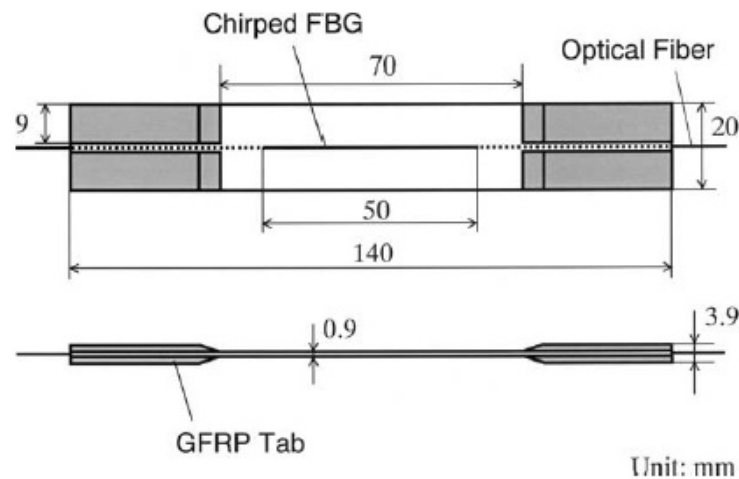


Figura 60: Geometria e dimensioni del provino

E' stato applicato un carico di trazione quasi statico, a temperatura ambiente; la velocità di applicazione del carico è 0,25 mm/min. La deformazione è stata misurata attraverso un estensimetro attaccato alla superficie del provino e il carico applicato è stato registrato attraverso una cella di carico. La fibra ottica è stata illuminata da una sorgente di luce ad emissione spontanea amplificata, il cui range di lunghezza d'onda è superiore a 40 nm. Lo spettro di riflessione è stato ottenuto, dopo lo scaricamento, tramite un analizzatore ottico di spettro. E' stata, inoltre, replicata una superficie del provino, su un film di acetato di cellulosa, con metil-acetato come solvente. Dal film replicante, è stato possibile osservare la posizione delle fratture nello strato a 90°, dopo il test. La regione di osservazione è di 60 mm, comprendente la posizione del sensore, lungo 50

mm.

- Risultati sperimentali per il sensore chirped di dimensioni normali

Fig.61 mostra la tensione σ e la densità di fratture ρ misurate, come funzione della deformazione ϵ . La densità di fratture è definita come il numero di fratture trasversali per unità di lunghezza nello strato a 90° lungo la direzione del carico.

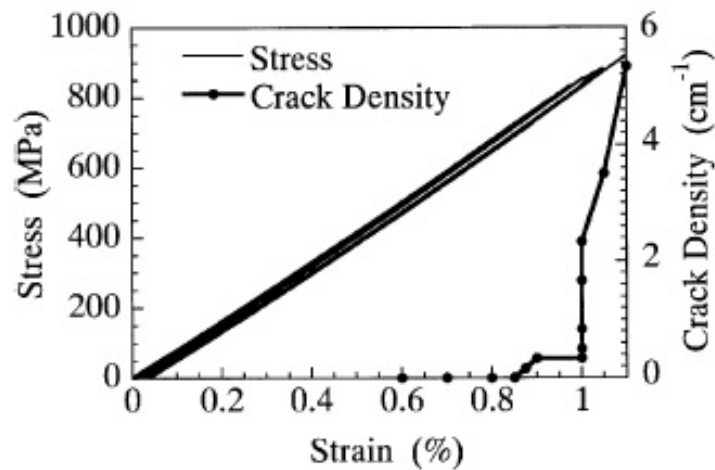


Figura 61: Tensione e densità di fratture in funzione della deformazione

Gli spettri di riflessione misurati, dopo aver scaricato il provino a diverse tensioni, sono mostrati in Fig.62 e 63.

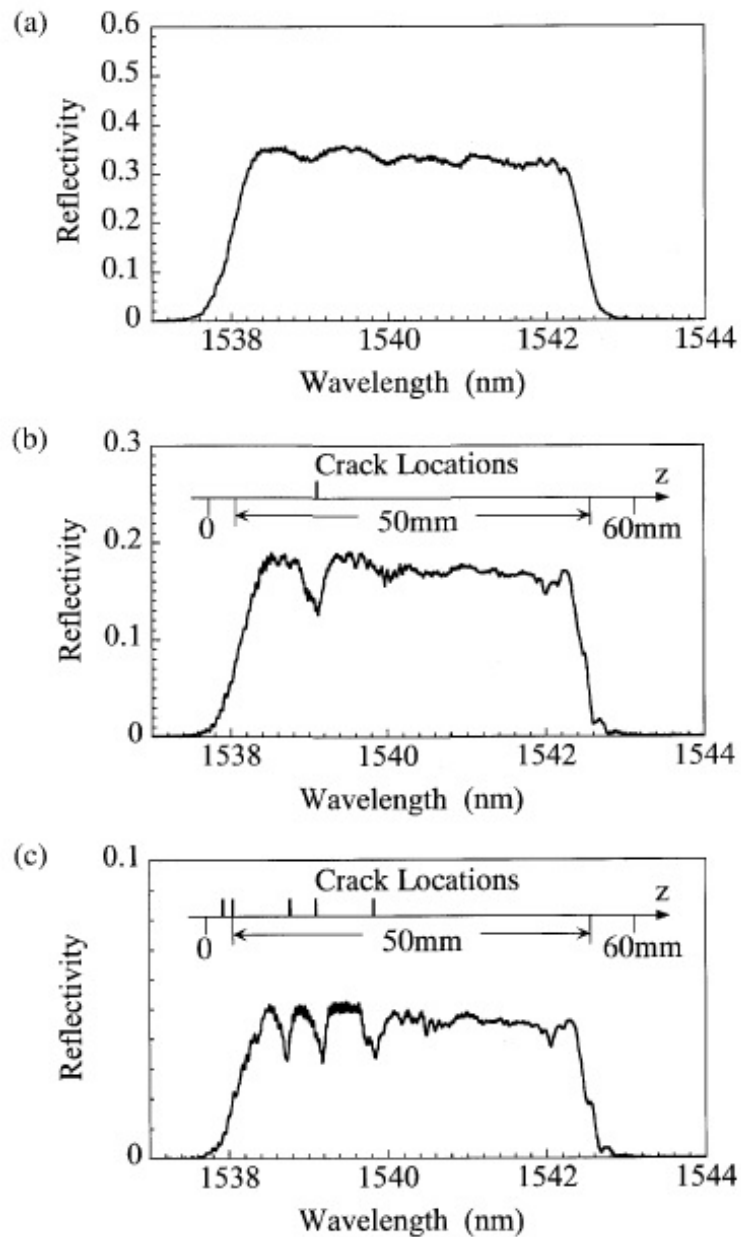


Figura 62: Spettri di riflessione del sensore normale misurati dopo lo scaricamento a diversi valori di ϵ_{max} : (a) $\epsilon_{max} = 0,0 \%$, 0 fratture; (b) $\epsilon_{max} = 0,875 \%$, 1 frattura; (c) $\epsilon_{max} = 0,95 \%$, 5 fratture

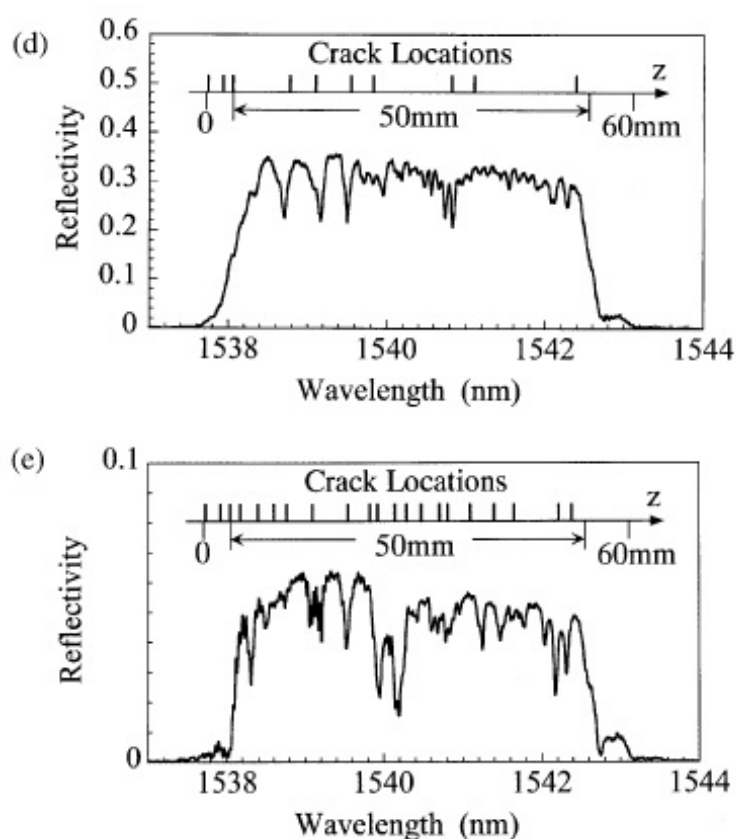


Figura 63: Spettri di riflessione del sensore normale misurati dopo lo scaricamento a diversi valori di ϵ_{max} : (d) $\epsilon_{max} = 0,975 \%$, 10 fratture e (e) $\epsilon_{max} = 1,05 \%$, 21 fratture

Nelle figure precedenti, sono indicate anche le posizioni delle fratture, ottenute dal film di replica, per una lunghezza di 60 mm. Dato che è stata replicata la superficie sul film, sono state osservate solo le fratture apparse sul film. Ad ogni modo, una fotografia a raggi-X, ha mostrato che tutte le fratture sono penetrate nell'intera larghezza, perciò, la posizione delle fratture osservate nel bordo del provino, corrisponde a quella al centro del provino, dove è posizionato il sensore.

Quando la prima frattura appare, ad una deformazione di 0,875 %, lo spettro riflesso misurato dopo lo scaricamento, presenta una valle in corrispondenza della posizione della frattura (Fig. 62(b)). All'aumentare del numero di fratture trasversali, le componenti attorno alla lunghezza d'onda corrispondente alla posizione della frattura, vengono disturbate (Fig. 62(c))

e 63(d)). Quando la densità di fratture è vicina alla saturazione, lo spettro presenta talmente tante valli che, identificare la posizione delle fratture, risulta difficile (Fig. 63(e)).

- Analisi per il sensore di dimensioni normali

Per valutare la relazione tra la posizione delle fratture e i cambiamenti dello spettro, è stato calcolato lo spettro teoricamente. Nel calcolo, è stato assunto che, il sensore, sia influenzato solo dalla distribuzione assiale di deformazione e che, la fibra ottica, aderisca perfettamente alla matrice.

E' stata calcolata la distribuzione di deformazione e la distribuzione dell'indice di rifrazione medio e del periodo del reticolo.

A partire da questi dati, è stato calcolato lo spettro. In Fig.64 è presentato lo spettro calcolato, corrispondente a quello di Fig. 62(c) e 63(d).

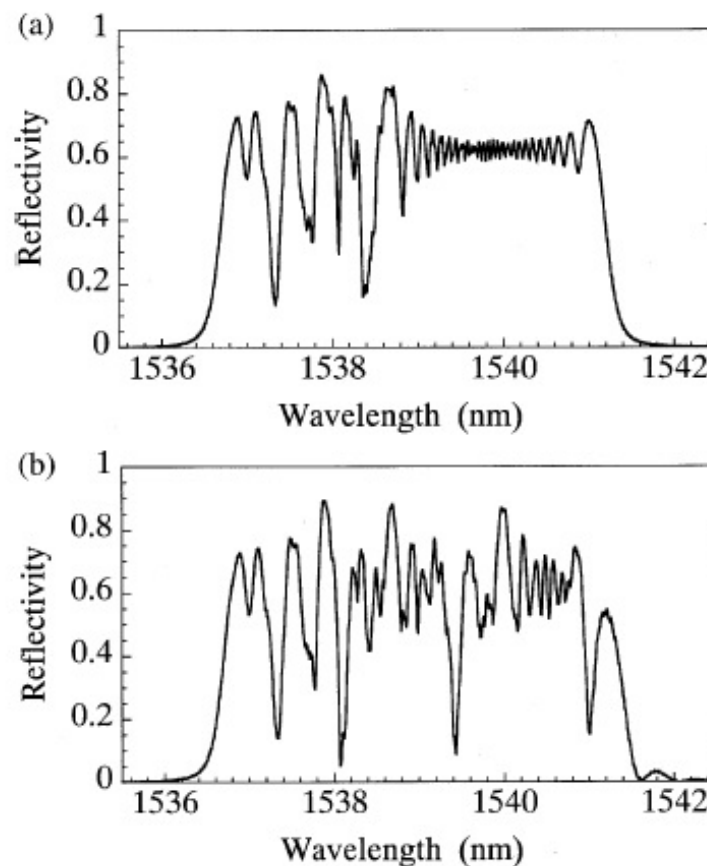


Figura 64: Spettro calcolato

I risultati simulati presentano lunghezze d'onda centrali minori e maggiori variazioni della riflettività, rispetto ai dati sperimentali.

A parte questo, la posizione della valli nello spettro calcolato, è quasi la stessa di quella nello spettro misurato. Questi risultati indicano che, la posizione delle fratture trasversali, può essere identificata direttamente dalla forma dello spettro riflesso del sensore chirped.

- Risultati per il sensore di piccolo diametro

In questo esperimento, la velocità di applicazione del carico è stata ridotta a 0,125 mm/min, per evitare un aumento improvviso della densità di fratture. Fig.65 mostra la tensione σ e la densità di fratture ρ in funzione della deformazione ε .

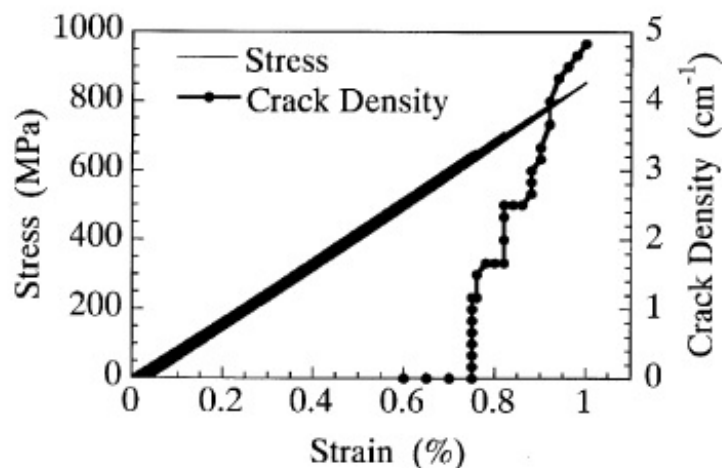


Figura 65: Tensione e densità di fratture in funzione della deformazione

Nel caso di sensore di piccolo diametro, le valli nello spettro, tendono a sparire, dopo aver scaricato il provino alla tensione di 0 N. Perciò, lo spettro di riflessione, è stato misurato dopo aver scaricato il provino ad una deformazione dello 0,4 %, come mostrato in Fig.66 e Fig.67 Nelle figure, sono riportate anche le posizioni delle fratture.

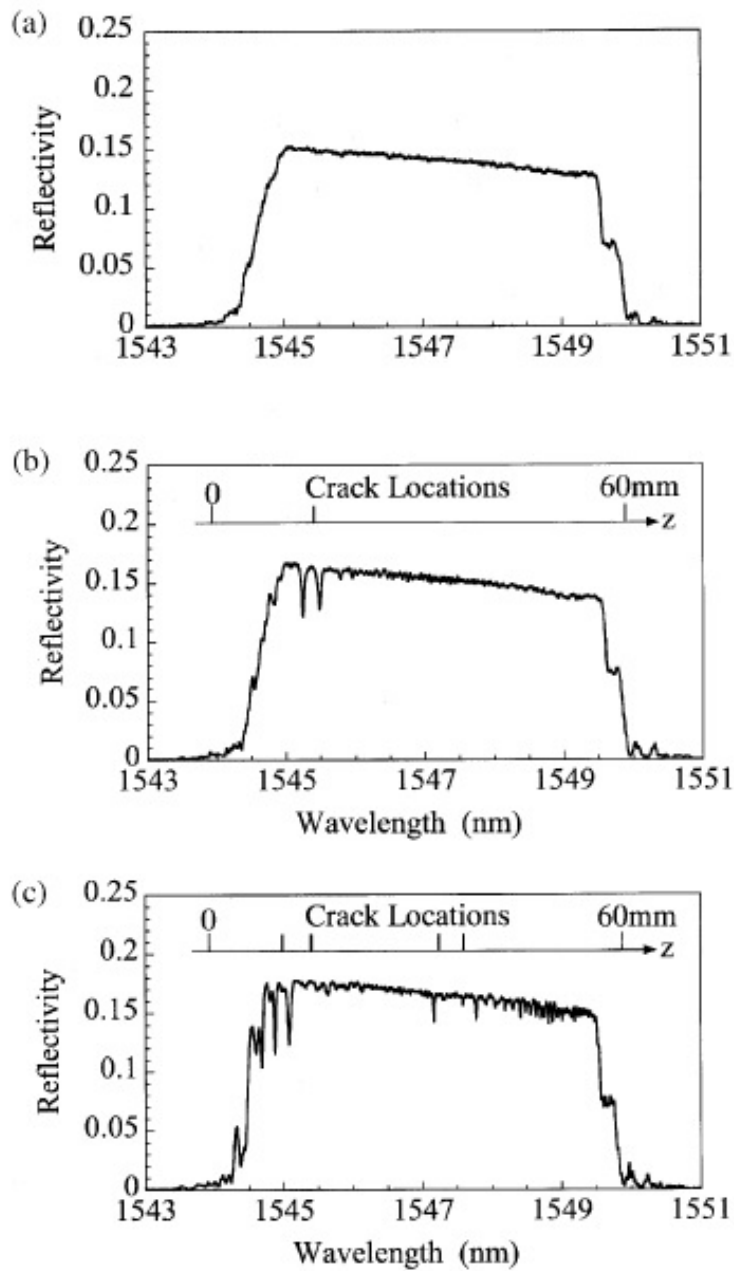


Figura 66: Spettro di riflessione misurato dopo lo scaricamento da diversi valori di ϵ_{max} ad una deformazione dello 0,4 %: (a) $\epsilon_{max} = 0,0$ %, nessuna frattura; (b) $\epsilon_{max} = 0,75$ %, 1 frattura; (c) $\epsilon_{max} = 0,75$ %, 4 fratture

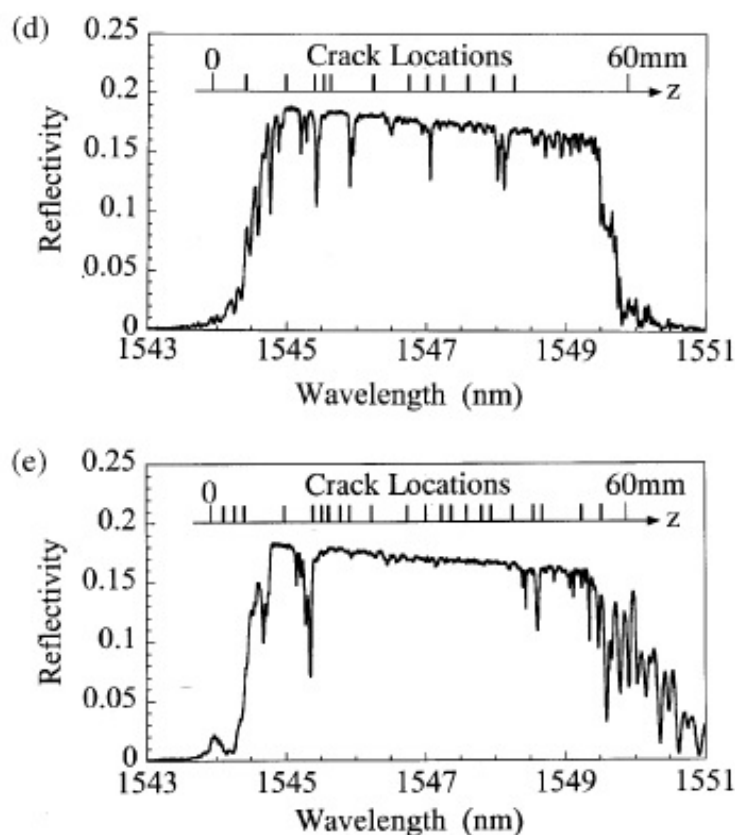


Figura 67: Spettro di riflessione misurato dopo lo scaricamento da diversi valori di ϵ_{max} ad una deformazione dello 0,4 %: (a) $\epsilon_{max} = 0,0$ %, nessuna frattura; (d) $\epsilon_{max} = 0,82$ %, 12 fratture; (e) $\epsilon_{max} = 0,92$ %, 22 fratture

Questi spettri presentano valli anche attorno alle lunghezze d'onda corrispondenti alle posizioni delle fratture. Queste valli, sono più strette di quelle presenti nello spettro del sensore di dimensioni normali, perciò, i sensori di piccolo diametro, hanno una risoluzione spaziale maggiore. D'altro canto, però, le deformazioni sono instabili perchè le valli non rimangono chiaramente dopo lo scaricamento. Durante il processo di caricamento/scaricamento, alcune valli scompaiono. Inoltre, compaiono due valli in corrispondenza di una frattura, negli spettri di Fig.66(b) e 66(c). La ragione principale della differenza di risposta, tra sensori normali e sensori piccoli, può essere la diversità di proprietà ottiche.

4.5.4 **Conclusioni**

In questa ricerca, sono stati utilizzati due tipi di sensori chirped: uno di dimensione normale e uno di diametro ridotto.

Riguardo al sensore normale, all'aumentare delle fratture, lo spettro presenta valli alle lunghezze d'onda corrispondenti alla posizione delle fratture. Queste variazioni dello spettro, sono state confermate anche da calcoli teorici. Mentre l'individuazione di fratture è semplice nelle prime fasi della deformazione, questa, risulta più complicata quando la densità di fratture è prossima alla saturazione, a causa del grande numero di valli presenti nello spettro. Successivamente, è stato ripetuto il test con il sensore di 52 μm di diametro. Anche in questo caso, lo spettro presenta valli in corrispondenza delle fratture ma, stavolta, le valli sono più strette e meno stabili rispetto al caso precedente. La differenza tra i due sensori, è risultata, tramite calcoli teorici, l'ampiezza della modulazione dell'indice Δn . Δn deve quindi essere ottimizzata, per una efficace misura. Ad ogni modo, la posizione delle fratture, può essere determinata direttamente dallo spettro, sia per sensori normali, sia per quelli di piccolo diametro.

5 **Prove sperimentali**

Prima di elencare il materiale e le attrezzature utilizzati per la realizzazione delle prove sperimentali, si richiama l'obiettivo di queste prove. L'intenzione, è quella di osservare il comportamento degli FBG all'interno di provini in composito, caratterizzati da due layup differenti. I provini saranno sottoposti a test di trazione, per verificare la risposta dei sensori; parallelamente, sarà analizzata la microstruttura dei provini, al fine di correlare il danneggiamento del materiale, allo spettro riflesso dai sensori FBG.

5.1 **Materiali**

- Pre-pregs

Sono stati utilizzati pre-pregs di due tipi: un unidirezionale e un plain weave, entrambi forniti da Riba. Di seguito, vengono riportate le caratteristiche tecniche del tessuto, del sistema resinoso e delle fibre dell'unidirezionale (la scheda tecnica di quest'ultimo non era disponibile).

E' stato scelto un pre-impregnato unidirezionale da laminare con una stratificazione di tipo cross-ply (specificata nel seguito), in modo da ottenere una configurazione analoga al provino utilizzato nell'articolo numero 4, indicato in precedenza.

Si è poi optato per un pre-impregnato plain weave con caratteristiche, quindi, differenti, in modo da analizzare il comportamento dei sensori FBG in una configurazione di laminato differente. Ulteriori dettagli saranno specificati nel seguito.

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica

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

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

SCHEDA TECNICA

Codice articolo PGG200P0142

Rev. 2 28 Apr 03

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

Caratteristiche generali del sistema resinoso:

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

(1) Misurato con DSC - 20°C/min

Caratteristiche del tessuto impregnato:

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

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

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

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

Figura 68: Scheda tecnica pre-impregnato plain weave

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica

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

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

Rev. 7 13 Apr 07

SISTEMA RESINOSO EPOSSIDICO DT120

Caratteristiche generali:

Natura del formulato	Epossidico termoidurente tenacizzato
Temperatura di cura	110 ÷ 145°C (vedi ciclo raccomandato)
Gel Time	8 ÷ 13 min @ 120°C
T _g dopo ciclo di cura	115 ÷ 120°C dopo 90 min @ 120°C (1)
Viscosità	Alta (2)
Shelf life minima	4 settimane @ 20°C 12 mesi @ -18°C
Trasparenza	Discreta
Stabilità all'ingiallimento	Molto buona
Autoadesività	Molto buona
Applicazioni indicate	Dove siano richiesti: - alta resistenza all'impatto - buona trasparenza - alto livello di finitura superficiale

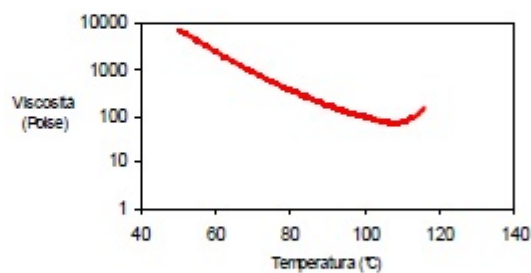
DELTApreg

- (1) Misurata con DSC alla velocità di scansione di 20°C/min
(2) Viscosità complessa misurata a 60°C maggiore di 2.000 Poise (frequenza 10 rad/sec)

Caratteristiche reologiche:

Il sistema resinoso DT120 è caratterizzato da una viscosità molto controllata, che consente l'ottenimento di laminati con una frazione volumetrica di fibra costante in ogni punto, senza eccessiva fuoriuscita attraverso il sacco da vuoto o lungo i bordi. Di sotto è riportato il profilo della viscosità.

Curva di viscosità
(riscaldamento costante 2°C/min)



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

Figura 69: Scheda tecnica sistema resinoso (1)

Caratteristiche meccaniche dei laminati:

Tessuto e fibra di rinforzo:

Le caratteristiche meccaniche qui riportate si riferiscono ad un preimpregnato a base di tela di carbonio tipo HS 3K da 195 g/m², denominato GG200P-DT120-42 (vedi relativa Scheda Tecnica).

In questo caso la fibra è Tenax HTA 5131 – 3K.

Contenuto di fibra:

58% in peso, corrispondente a 49÷50% in volume.

Fabbricazione dei pannelli:

Stampaggio in autoclave alla pressione di 6 bar, con piastra metallica superiore.

Ciclo termico di indurimento:

- riscaldamento a +2°C/min da temperatura ambiente fino a 120°C
- 120°C costanti per 90 min
- raffreddamento a -4°C/min fino a 60°C

Risultati:

Si riportano i valori medi ottenuti su 6 provini, scartando il valore più alto e quello più basso.

Test	Norma	Resistenza	Modulo
ILLS	EN2563	58 MPa	-
Flessione	EN2562	966 MPa	53 Gpa
Compressione	EN2850-B1	594 MPa	57 Gpa
Trazione	EN2561-B	817 MPa	60 GPa

Tutti i test sono stati effettuati a 23°C nella direzione dell'ordito (0°)

DELTApreg

Figura 70: Scheda tecnica sistema resinoso (2)

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica



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

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

Date: 10.08.2012

Inspection certificate 3.1 / 201202016

(DIN EN 10204: 2005)

Tenax®-J UTS50 F13 12K 800tex

Subject: Vs Ordine 293/00 del 09.05.12

Order: 330332

Delivery note: 436614

Charge: 11431335_00006 Quantity: 912 kg

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

Toho Tenax Europe GmbH
 Quality Control

Wim Caenen

Toho Tenax Europe GmbH
 P.O. 8007 - 52525 Heinsberg - Germany
 E-mail: sales@tohotenax.eu.com
 Internet: www.tohotenax.eu.com

Management
 Eckhard Schöten (President)
 Fred Horst
 Toru Kamikawa

Wupperts: 4826 8255
 VAT No.: DE 224770291

Bank Account
 Bank of Tokyo-Mitsubishi (LFJ)
 Account: 2152 288
 Bank Code: 500 107 00

Figura 71: Caratteristiche fibra impiegata nel pre-impregnato unidirezionale

- Fibre ottiche

L'azienda SestoSensor ha fornito 4 fibre ottiche con reticoli FBG, di tipo standard. Una fibra si è spezzata, in corrispondenza del reticolo, nelle prime fasi di utilizzo, quindi, non è stato più possibile usarla; un'altra si è rotta a causa di un problema della pressa.

Sono riassunte, di seguito, le caratteristiche delle fibre realmente utilizzate, prima dell'embedding.

Fibra	Provino	λB a riposo (nm)	Larghezza (nm)	Riflessione (dB)
1	UD	1535,09	0,17	10
2	PW	1554,88	0,2	10

Tabella 5: Proprietà delle fibre ottiche utilizzate

- Estensimetri

Sono stati utilizzati estensimetri in dotazione al MasterLab di Forlì, dei quali vengono riportate le caratteristiche.

Estensimetro	Provino	Gage Factor @ 24° C
1	UD	2,110 ± 0,5%
2	PW	2,110 ± 0,5%

Tabella 6: Proprietà degli estensimetri utilizzati

5.2 Macchinari e strumenti

- Pressa

La pressa utilizzata per le prove di trazione è una Itlasigma, in dotazione al MasterLab di Forlì, dotata di carico massimo applicabile di 100 kN.

- Autoclave

Anche l'autoclave per la realizzazione di oggetti in materiale composito è in dotazione al MasterLab; di seguito una foto della macchina.



Figura 72: Autoclave in dotazione al MasterLab

L'autoclave è completamente gestibile da uno schermo touchscreen, dal quale possono essere impostati tutte le variabili del processo di cura: temperature, pressioni, tempi di permanenza, gradienti di salita e discesa. Una termocoppia, all'interno dell'autoclave, viene posta il più vicino possibile al pezzo da curare, in modo che la temperatura che deve raggiungere l'oggetto, sia quella impostata nell'autoclave.

- Interrogatore di sensori FBG

Si tratta dello strumento più importante per il tipo di lavoro svolto. L'apparecchio di Fig.73 è realizzato direttamente dall'azienda SestoSensor.



Figura 73: Interrogatore di sensori FBG

L'interrogatore è dotato di 16 canali ai quali possono essere collegate le fibre ottiche con sensori FBG (previa adeguata "connettorizzazione"). Attraverso un cavo Ethernet, l'interrogatore può essere collegato a un personal computer, grazie al quale, si può analizzare lo spettro degli FBG. L'interrogatore dispone di un proprio indirizzo IP; collegandosi ad esso, si può gestire direttamente lo strumento attraverso il pc. Nell'immagine seguente, è proposta una delle schermate che si possono ottenere dal pc.

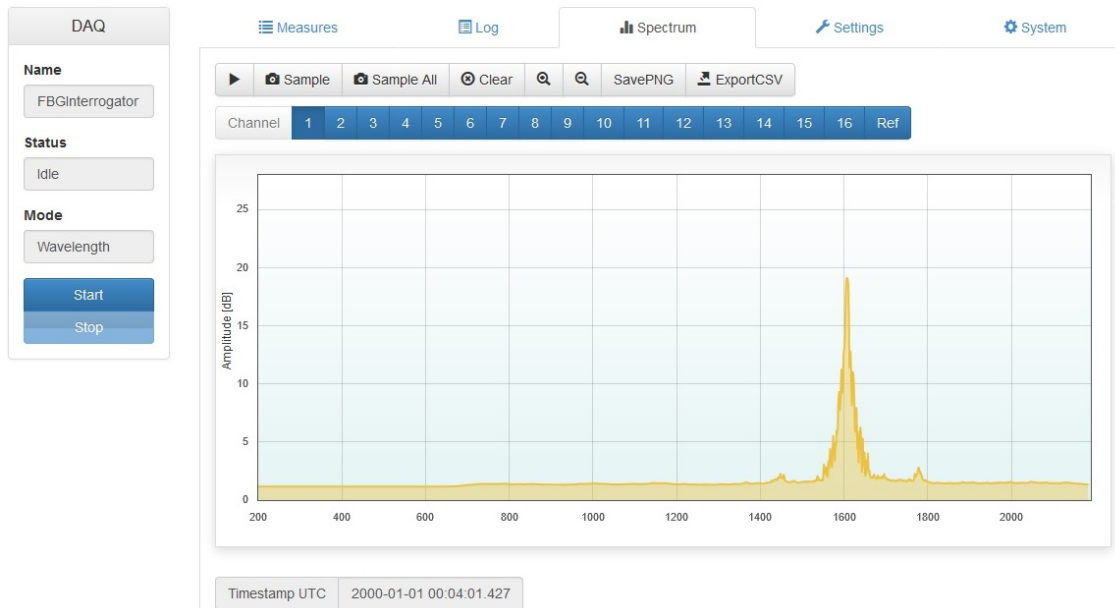


Figura 74: Schermata di controllo dell'interrogatore

Nella pagina Measures, è possibile leggere, in tempo reale, la lunghezza d'onda di picco, rilevata dall'interrogatore, mentre, nella pagina Log, si può tener traccia di tutte le lunghezze d'onda calcolate in precedenza. La pagina Spectrum (presentata in Fig74.) permette di analizzare visivamente lo spettro captato dall'interrogatore. E' possibile avere una visualizzazione in tempo reale che consente, quindi, di apprezzare il comportamento dello spettro, quando l'FBG è sottoposto a deformazioni. Altrimenti, è possibile, tramite i tasti Sample e SampleAll, "bloccare" lo spettro in un dato istante di tempo; a questo punto, è possibile salvare un'immagine dello spettro, oppure, salvare il file CSV dello spettro. Il file CSV (comma-separated values), non è altro che un file di testo che, se importato in un foglio di calcolo, presenta una colonna con le lunghezze d'onda misurate dallo spettro e una colonna con le ampiezze (in Decibel) dello spettro. Ponendo le lunghezze d'onda su un asse X e le ampiezze su un asse Y, si può ricostruire lo spettro.

L'interrogatore fornito dalla SestoSensor, ha richiesto numerose ore di lavoro per poter essere sfruttabile al meglio.

Il problema principale, è consistito nell'impostare l'interrogatore in modo che percepisce, con la massima precisione possibile, lo spostamento dello spettro. Ulteriore tempo è stato utilizzato per aggiornare il software dello strumento e per gestire il salvataggio dei file CSV.

Nelle figure seguenti è presentato un sistema utilizzato per valutare la corretta lettura dello spettro.



Figura 75: Sistema per la regolazione dell'interrogatore

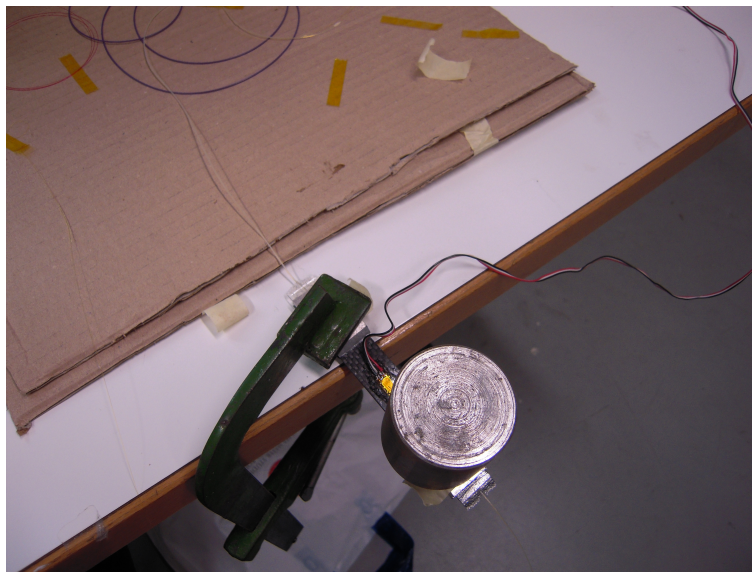


Figura 76: Dettaglio del sistema di regolazione dell'interrogatore

- Giuntatrice

Altro strumento di proprietà di SestoSensor, serve per collegare la fibra ottica all'interno del provino, con una fibra ottica avente all'estremità un connettore che consente il collegamento all'interrogatore. Il funzionamento

dello strumento di Fig.77 è chiarito in seguito.



Figura 77: Giuntatrice

- Strain indicator

Lo Strain Indicator (Fig.78), in dotazione al MasterLab, permette di visualizzare le deformazioni lette dall'estensimetro. Gli estensimetri sono stati montati solo sui due provini con fibra ottica.

Per regolare lo Strain Indicator, occorre regolare il Gage Factor sul valore proprio dell'estensimetro montato e la lettura della deformazione sul valore nullo, quando l'estensimetro è a riposo.

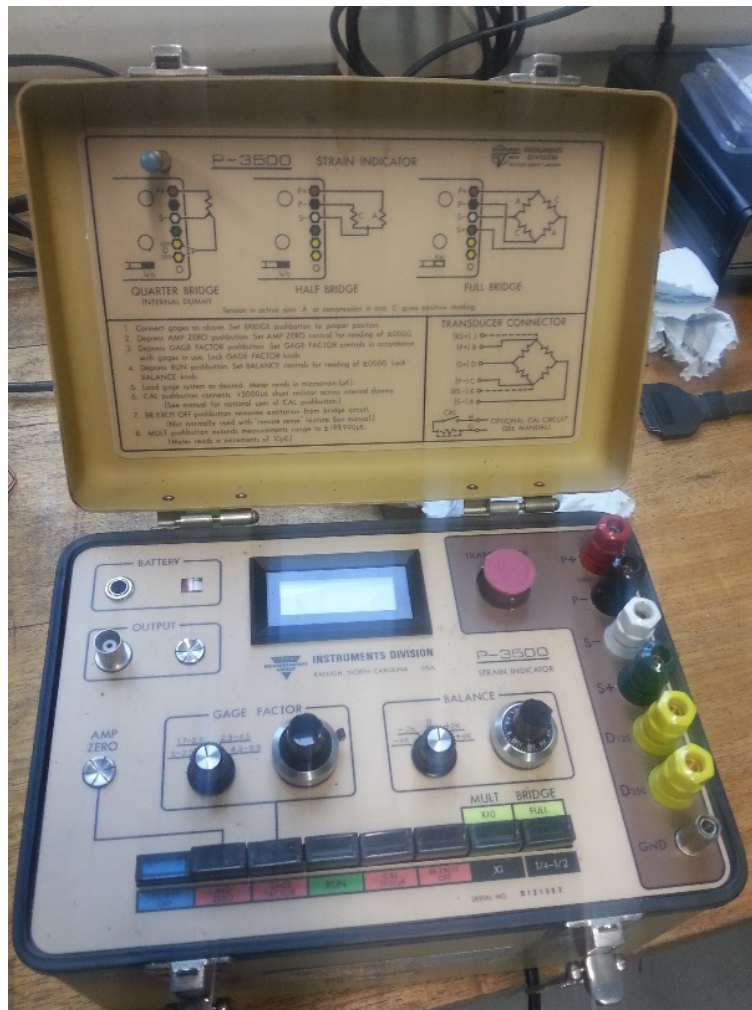


Figura 78: Strain Indicator

5.3 Svolgimento prove

5.3.1 **Laminazione provini ed embedding delle fibre**

Per realizzare i test di trazione, devono essere preparati i provini. La prima fase consiste nella laminazione degli strati di materiale, e nell'embedding delle fibre.

I pre-impregnati di unidirezionale e plain weave sono stati forniti da Riba, come già indicato, pre-tagliati, in quadretti di dimensioni 120 x 120 mm. Nella figura seguente sono mostrate le dimensioni nominali di ogni provino.

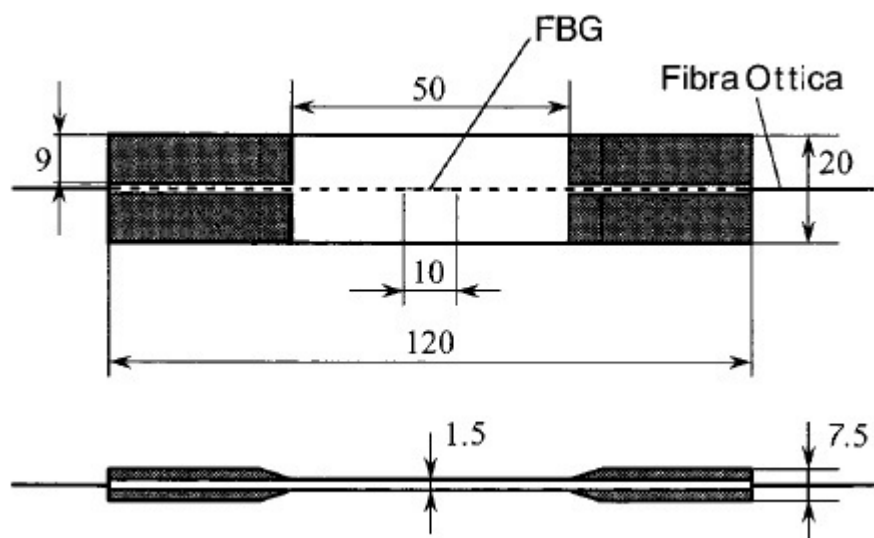


Figura 79: Geometria e dimensioni nominali dei provini

Le dimensioni mostrate sono da intendere come indicative; per provini di dimensioni ridotte, come in questo caso, è facile ottenere differenze significative tra un provino e l'altro. Per brevità, non vengono indicate le dimensioni dei provini senza fibra ottica, in quanto, differiscono da quelle indicate, minimamente. Infine, bisogna tener conto dello spessore dei pre-impregnati: quello unidirezionale, ha uno spessore di $\sim 0,3$ mm (come già ricordato, non era disponibile la scheda tecnica di questo materiale, per cui, lo spessore esatto non era noto) mentre, il plain weave, ha uno spessore di $0,223$ mm. Per ottenere uno spessore di $\sim 1,5$ mm, sono stati impilati 5 strati di unidirezionale e 7 strati di plain weave.

L'unidirezionale è stato laminato secondo una stratificazione cross-ply, con i due strati esterni orientati a 0° e il cuore di 3 strati orientato a 90° . Questo tipo di stratificazione, come indicato nei paper presentati in precedenza, permette di osservare, con facilità, le fratture trasversali che si manifestano negli strati a 90° ; in tal modo, è possibile monitorare il danneggiamento del materiale.

Prima di inserire la fibra ottica nel laminato, è necessario compiere due operazioni: inserire una guaina in Teflon su una parte di fibra e rimuovere il rivestimento in Kapton attorno alla zona del reticolo; la prima operazione, permette di proteggere la fibra nella zona di uscita dal laminato, mentre, la

seconda operazione, permette di ottenere un reticolo più sensibile.

Due tratti di guaina in Teflon, lunghi circa 30 cm, sono stati inseriti attorno alla fibra, ad ogni estremità; il Teflon è stato posizionato all'interno del laminato per una lunghezza di circa 1 cm, sufficiente ad assicurare protezione alla fibra all'uscita dal laminato, ma non eccessiva da influire sullo spessore del laminato. Per assicurare che la guaina in Teflon rimanga in posizione, essa viene incollata alla fibra ottica grazie ad una resina a presa rapida.

La presenza del Kapton, invece, andrebbe a ridistribuire le tensioni che agiscono sul reticolo, compromettendo la corretta misura dell'FBG. Per rimuovere il Kapton, è necessario utilizzare un acido molto forte; riscaldando l'acido e immergendo la fibra in corrispondenza del reticolo, il Kapton viene eliminato. A questo punto, la fibra risulta, proprio nella zona del reticolo, risulta molto fragile (una delle fibre in dotazione, infatti, si è rotta ancora prima dell'embedding). Bisogna quindi effettuare l'embedding velocemente.

La fibra ottica è stata sistemata circa al centro del quadrato di materiale, immediatamente dopo il primo strato (quindi più vicina possibile alla lamiera inferiore, su cui si appoggia il laminato), orientata lungo le fibre di rinforzo del pre-impregnato. Sono poi stati appoggiati i rimanenti strati, secondo lo schema già illustrato.

In Fig.80 si può notare la fibra ottica privata del rivestimento (si nota dalla colorazione bianca) in corrispondenza del reticolo e parte della guaina in Teflon, mentre in Fig.81 è rappresentato il laminato completo, pronto per il ciclo di cura.

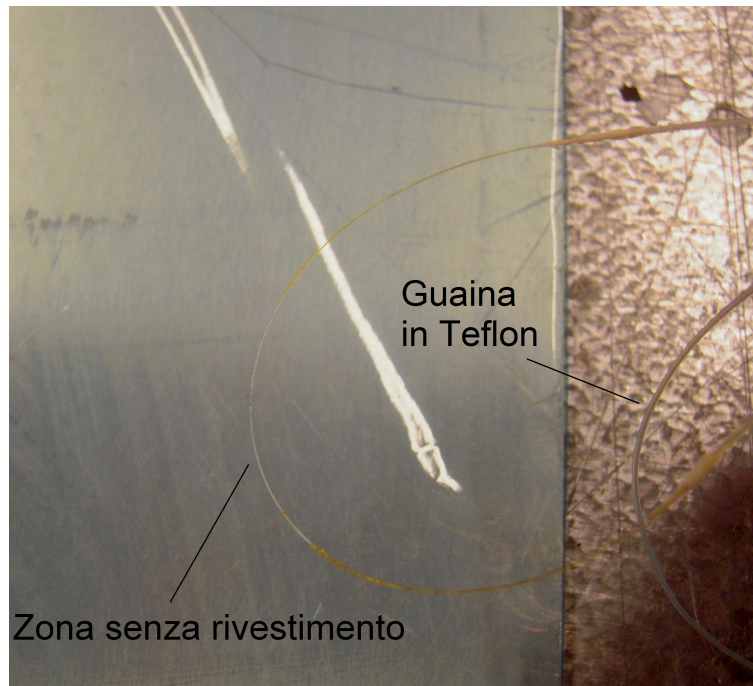


Figura 80: Fibra ottica con guaina in Teflon e Kapton rimosso nella zona del reticolo

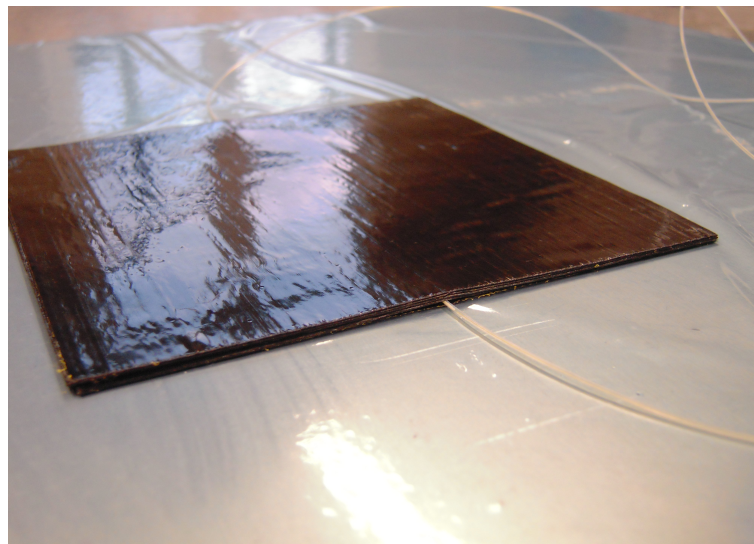


Figura 81: Laminato con fibra ottica

In Fig.82 è presentato il laminato pronto per il ciclo di cura; è stata utilizzata una grande lastra in alluminio, che potesse contenere la fibra ottica, ovviamente arrotolata, per ridurre gli ingombri. Sulla lastra è stato poso del film distaccante. Sopra al laminato è stata appoggiata un'altra

piastra in alluminio, di dimensioni ridotte, anch'essa avvolta con il distaccante. Per proteggere la fibra dal flusso di resina, sono state poste delle strisce di gomma e, tutta la fibra è stata coperta da distaccante.

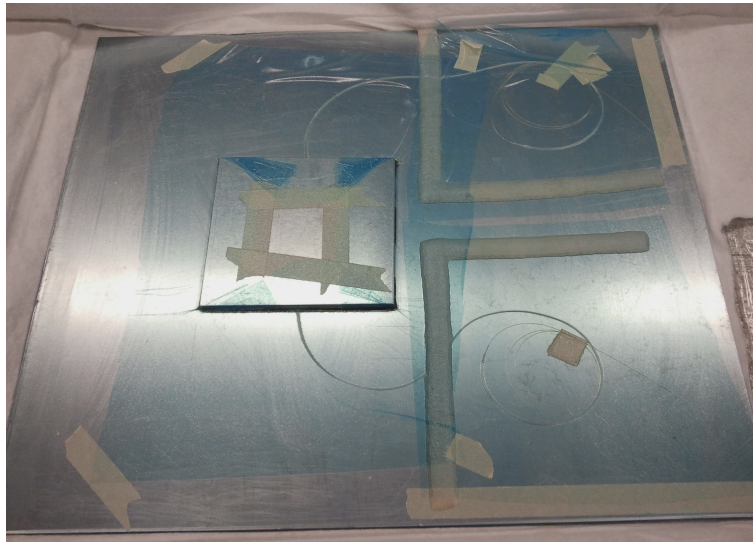


Figura 82: Laminato pronto per il ciclo di cura



Figura 83: Dettaglio del sistema di protezione della fibra ottica

5.3.2 Cura in autoclave

Dopo le precedenti operazioni, il laminato è pronto per essere curato. E' stato quindi applicato il bleeder, atto a contenere eventuale resina in

eccesso ed è stato poi realizzato il sacco per il vuoto, inserita la valvola per la pompa a vuoto e sigillato il sacco.

In Fig.84 è presentato il sacco posto in autoclave.

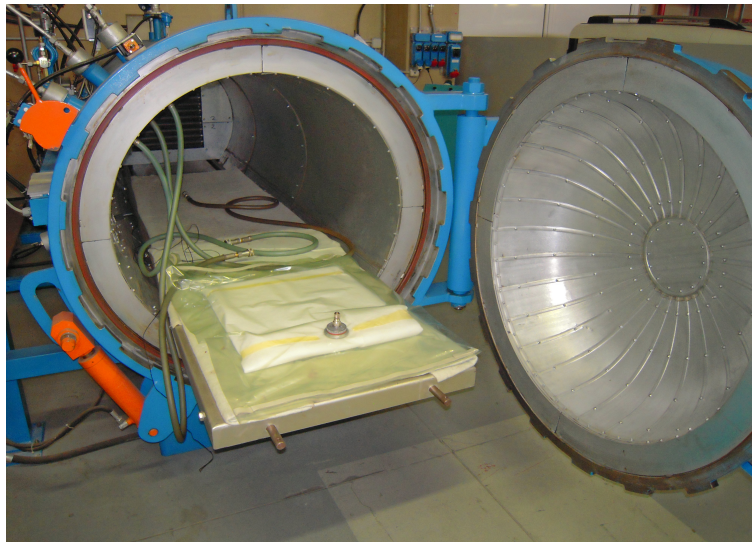


Figura 84: Sacco pronto per il ciclo di cura

Il ciclo di cura previsto dalla scheda tecnica della resina DT120, prevedeva un ciclo di 90 min a 120 °C ad una pressione di 6 bar. In questo caso, però, si è preferito realizzare un ciclo di cura meno severo, con l'obiettivo di preservare la fibra ottica. Il ciclo di cura utilizzato perciò prevede le seguenti fasi:

- riscaldamento a 3 °C/min fino a 90°C;
- applicazione di pressione a 0,2 bar/min fino a 3 bar;
- mantenimento temperatura e pressione per 6 h;
- raffreddamento a 1 °C/min fino a 40°C;
- rilascio della pressione a 1 bar/min fino a pressione atmosferica.

In Fig.85 è mostrato il grafico relativo al ciclo di cura.

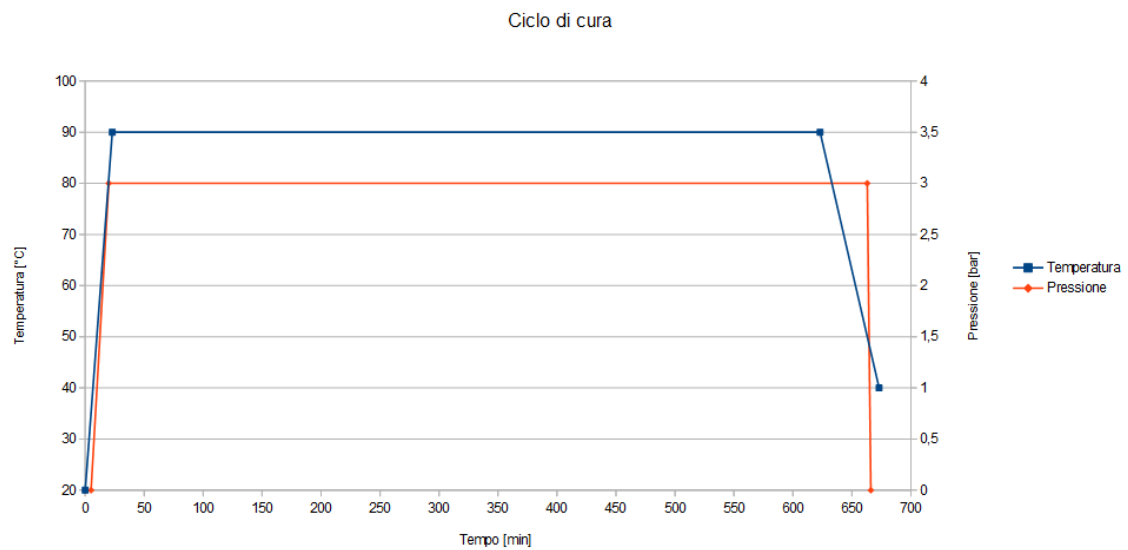


Figura 85: Ciclo di cura

In Fig.86 e 87 sono mostrati i laminati dopo l'estrazione.

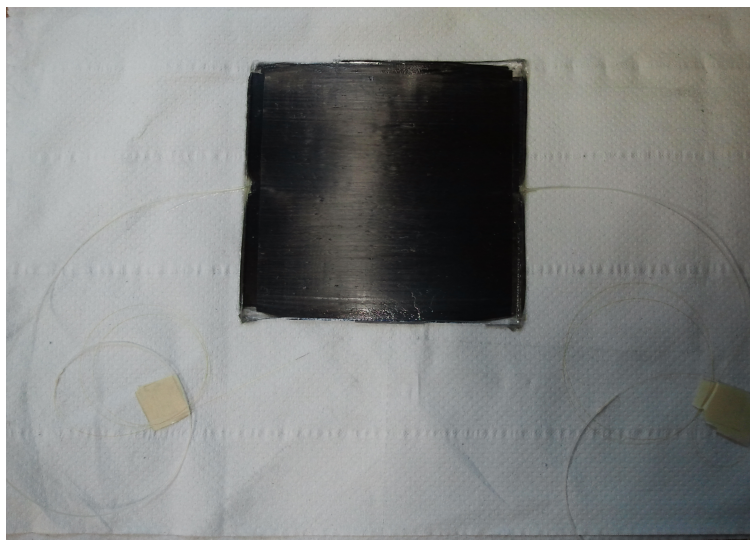


Figura 86: Laminato in UD dopo l'estrazione

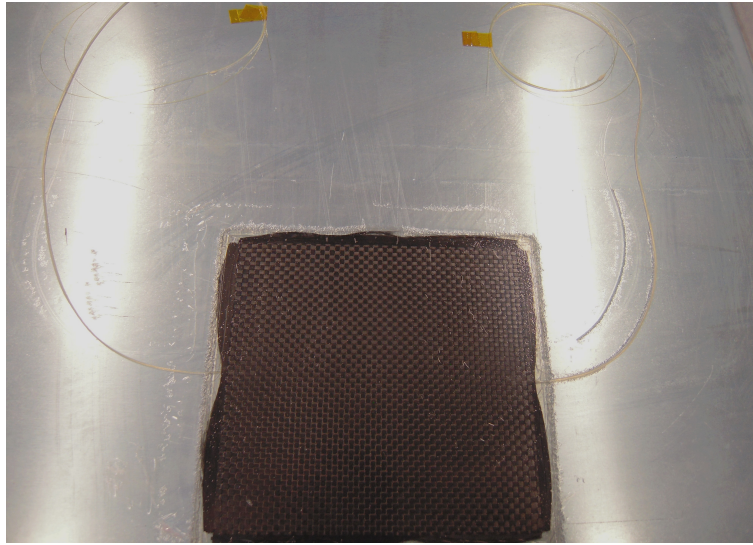


Figura 87: Laminato in tessuto dopo l'estrazione

5.3.3 Taglio dei provini

Dopo aver estratto i laminati, è necessario tagliarli, per ottenere i provini da testare. Il taglio viene fatto con una sega circolare, con lama in diamante, a secco. Vengono inoltre eliminate le parti di resina in eccesso (vedi Fig.87), portando i provini alle dimensioni nominali.

Per proteggere la fibra ottica durante l'operazione di taglio, evitando che rimanga impigliata o venga tranciata per sbaglio, sono stati predisposti due piccoli sacchetti, come visibile in Fig.88.

In Fig.89, invece, si possono vedere i provini in unidirezionale dopo il taglio.



Figura 88: Sacchetti per proteggere la fibra ottica



Figura 89: Provini in UD dopo il taglio

5.3.4 Applicazione dei tab

Dopo aver ottenuto i provini dai laminati, bisogna applicare i tab in alluminio alle estremità dei provini. La funzione dei tab è quella di fornire una superficie per l'afferraggio dei provini nella pressa; i tab, se possibile, devono prevedere uno smusso a 45° nella zona interna, per ridurre la concentrazione di tensioni, altrimenti presente.

Prima di incollare i tab, devono essere eseguite alcune operazioni, fondamentali per una buona riuscita dell'incollaggio: occorre, innanzitutto,

carteggiare le superfici di incollaggio, quindi, sia la superficie inferiore del tab, sia le zone esterne del provino, con carta abrasiva. Dopo il carteggio, si devono decapare le superfici, utilizzando un apposito sgrassatore ed evitando di sporcarle nuovamente. Dopo aver seguito questo procedimento, è stata quindi applicata una resina bi-componente, avente una resistenza a taglio di 25 – 30 kN, sufficiente a resistere ai carichi da applicare nei test di trazione. La resina utilizzata, alla temperatura dei laboratori (non oltre 22 °C), ha richiesto circa 24 ore per una completa polimerizzazione. Per garantire un buon incollaggio, è stato posto, sopra i provini, un peso che garantisse una sufficiente pressione sulla resina. Ovviamente, tra i provini e il peso, come tra i provini e il banco di lavoro, è stato posto del film distaccante, per evitare che della resina fuoriuscisse e incollasse i provini ad altri oggetti (vedi Fig.90).

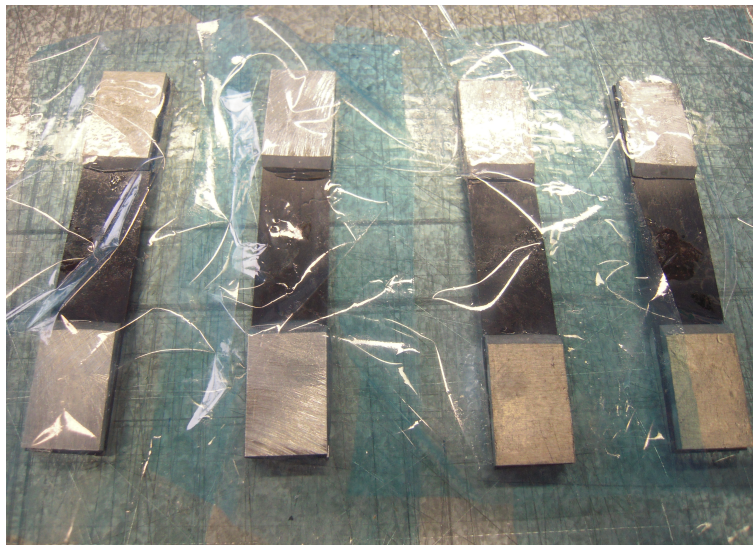


Figura 90: Distaccante posto "a protezione" dei provini

5.3.5 Lucidatura dei provini

Una fase decisiva dello studio, prevede l'analisi al microscopio dei provini, per valutare lo stato della struttura interna del materiale. Per riuscire ad osservare il materiale al microscopio, è necessario lucidare la superficie da guardare. I provini sono stati lucidati tramite una macchina a disco rotante, con dischi abrasivi a grana differente; si è partiti da dischi con grana grossa, che erode molto materiale, senza raggiungere una finitura elevata, per poi

passare a dischi con grana fine, che permettono di ottenere una finitura superficiale ottimale.

In Fig.91 sono mostrati i dischi abrasivi utilizzati.

In Fig.92 è mostrata la macchina utilizzata. Il disco montato, è quello a grana più fine; per migliorare ulteriormente la finitura, su quest'ultimo, viene spruzzato del diamante spray.

Ogni passata, tranne quella con l'ultimo disco, viene effettuata in acqua.

In Fig.93 è mostrato il sistema “artigianale” per lucidare i provini con fibra ottica evitando che, questa, si rompa durante l'operazione.



Figura 91: Dischi abrasivi. Partendo dall'alto, sono ordinati per dimensione del grano minore



Figura 92: Macchina per la lucidatura con disco a grana più fine e diamante spray

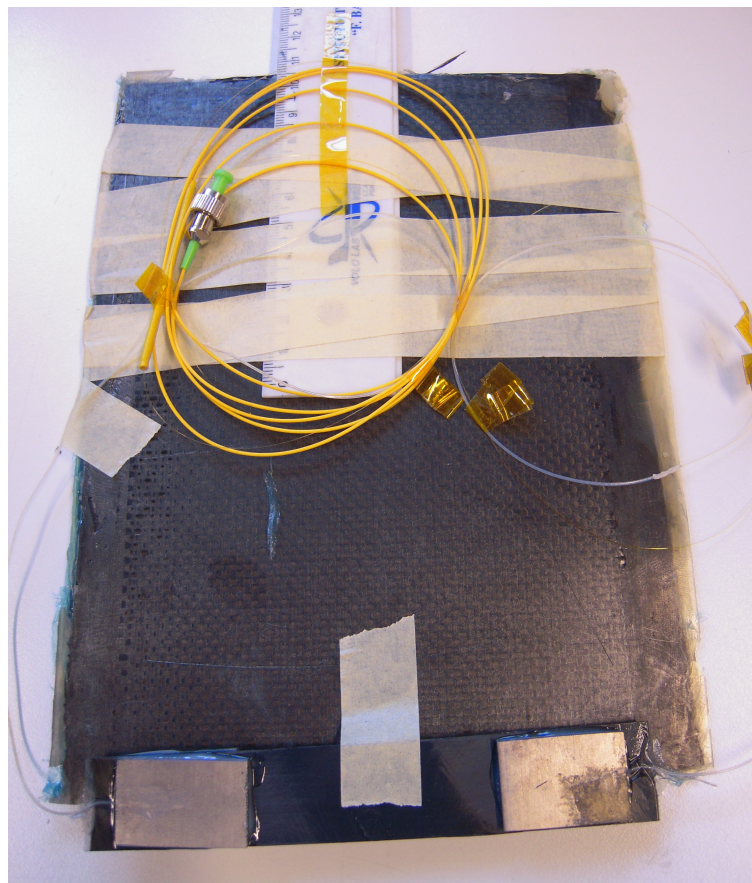


Figura 93: Sistema per non danneggiare la fibra ottica durante la lucidatura del provino

5.3.6 Connettorizzazione delle fibre ottiche

Per poter collegare le fibre ottiche all'interrogatore di FBG, è necessario prima collegarle ad un ulteriore tratto di fibra che presenta l'adeguato connettore per lo strumento. In Fig. si può notare un provino con fibra già connettorizzata (trattandosi questa di un'attività eseguibile senza un preciso ordine temporale). I due provini aventi le fibre ottiche, sono stati portati all'azienda SestoSensor, dove è stata realizzata questa operazione.

Innanzitutto, la fibra ottica, deve essere privata, alle estremità, del rivestimento in Kapton; questo permette di avere una fibra nuda, che sarà poi collegata alla parte connettorizzata. Come visto in precedenza, tale operazione, viene eseguita con l'ausilio di un acido molto forte riscaldato. La fibra con il connettore, deve essere privata della guaina che la riveste, per una lunghezza di alcuni cm poi, entrambe le fibre, devono essere tranciate, con uno strumento apposito (mostrato in Fig.94), per assicurarsi che le superfici che verranno a contatto, siano perfettamente piane.

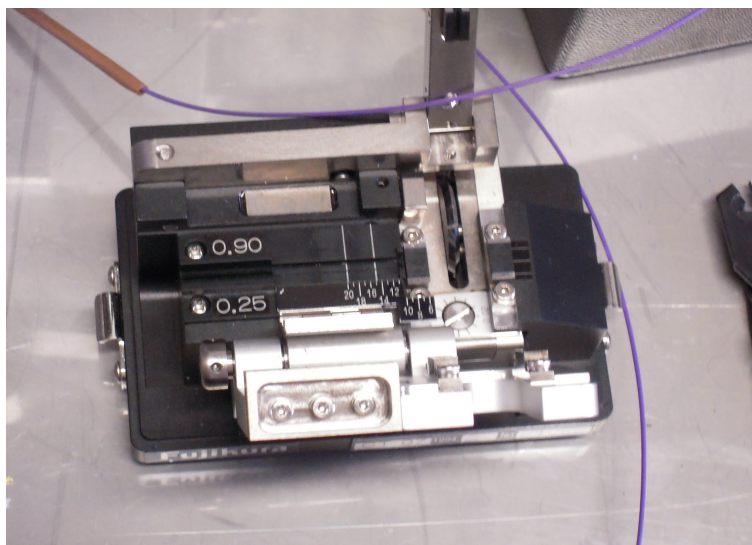


Figura 94: Strumento per tranciare le fibre

A questo punto, le due fibre vengono inserite nella giuntatrice che, tramite un laser riesce a individuarne la posizione reciproca, le allinea e le salda assieme (Fig.95).



Figura 97: Applicazione della guaina protettiva

A questo punto, il provino deve essere maneggiato con molta cura, in quanto, è pronto per essere utilizzato; se la fibra ottica si rompesse, potrebbe non essere più utilizzabile. In Fig.98 è mostrato il “sistema di trasporto” del provino.

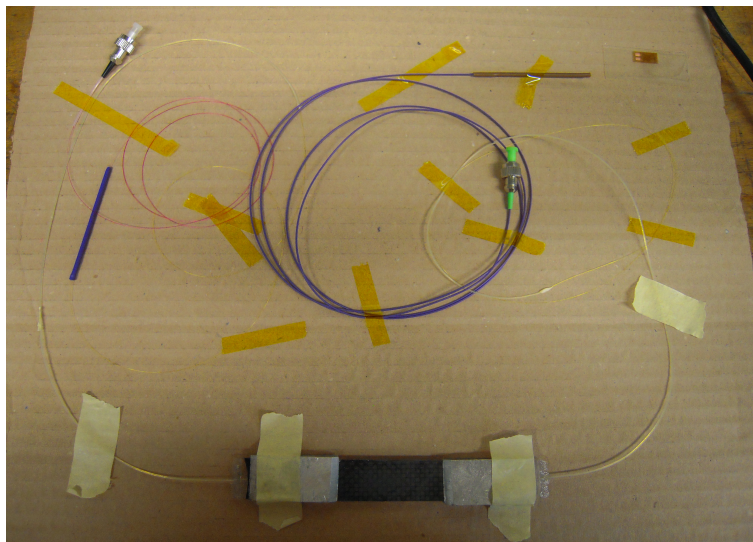


Figura 98: "Sistema di trasporto" del provino connettorizzato

5.3.7 Test preliminari sui provini non strumentati

Prima di iniziare i test sui provini con fibre ottiche ed estensimetri, si è

ritenuto opportuno testare i provini non strumentati, per ottenere indicazioni sulle caratteristiche meccaniche dei due materiali.

Sono stati eseguiti test di trazione; la pressa è stata impostata ad una velocità di 0,5 mm/min e il test è stato fermato a determinati “step” di carico. I provini sono stati serrati sulla pressa ad altezza di metà tab circa, con una distanza di circa 8,5 – 9 cm tra gli afferraggi. Per valutare il comportamento del materiale, a livello di microstruttura, sono stati analizzati i provini al microscopio, ad ogni step di carico. I provini sono stati caricati fino a rottura, per valutare anche il carico di rottura del materiale.

In Fig.99 è mostrata la sistemazione di un provino sulla pressa.

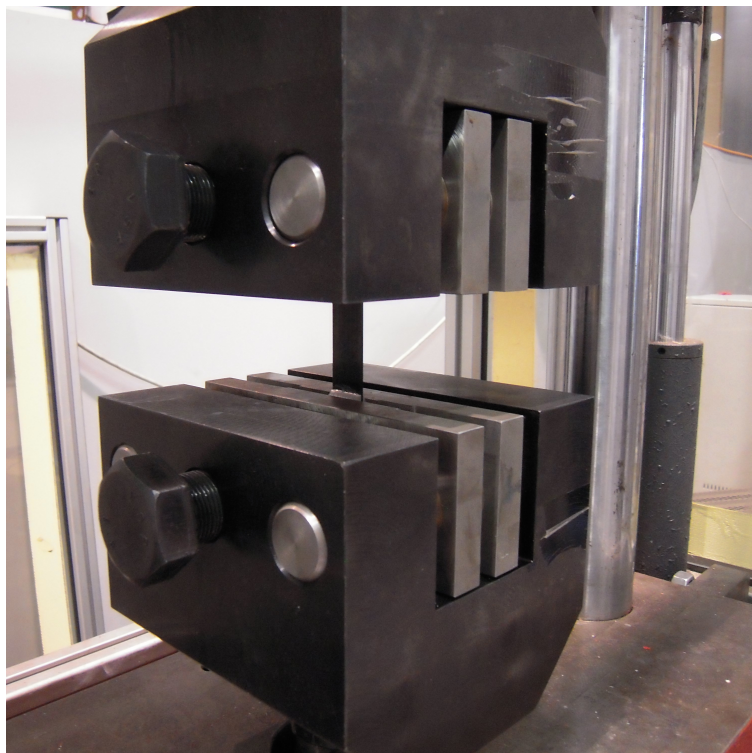


Figura 99: Provino montato sulla pressa

5.3.8 Analisi al microscopio

Come già indicato, i provini sono stati analizzati al microscopio ottico. Date le dimensioni dello spessore dei provini, con un ingrandimento 5X è stato possibile osservare l'intero spessore del materiale; con ingrandimenti

di 10, 20 o 50X, sono state analizzate con cura zone di interesse. In Fig.100, è mostrata la sistemazione di un provino strumentato sul microscopio, operazione che ha comportato qualche difficoltà in più. L'utilizzo di pasta modellabile, ha spesso facilitato il posizionamento dei provini.

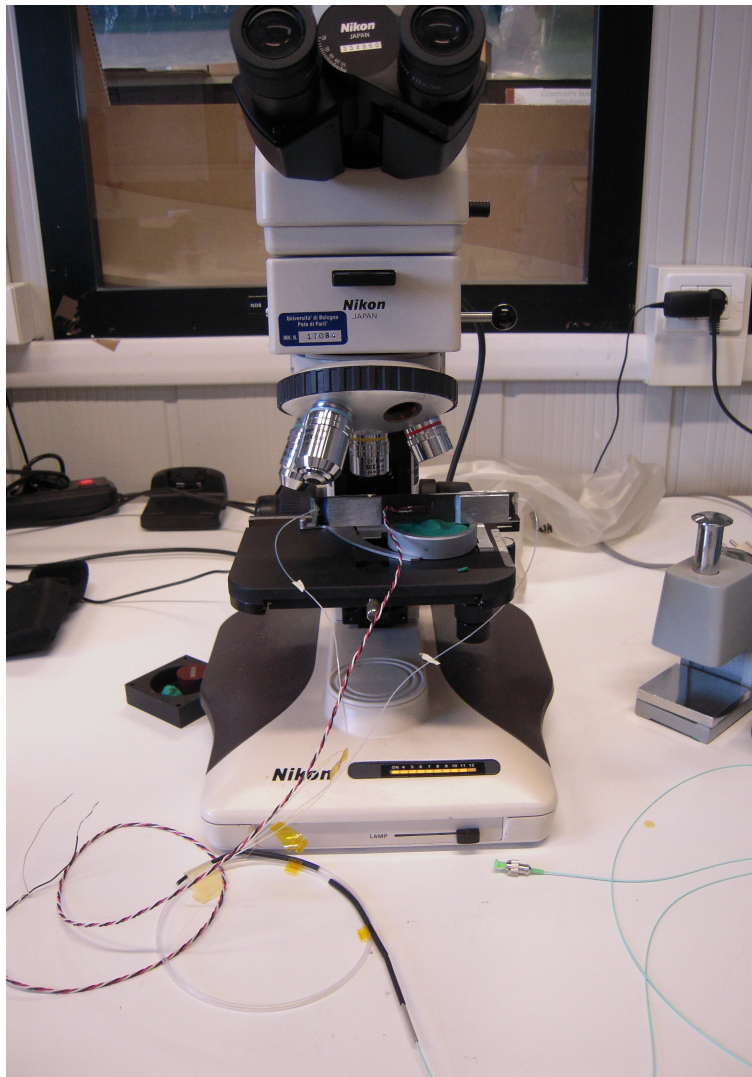


Figura 100: Provino strumentato sul microscopio

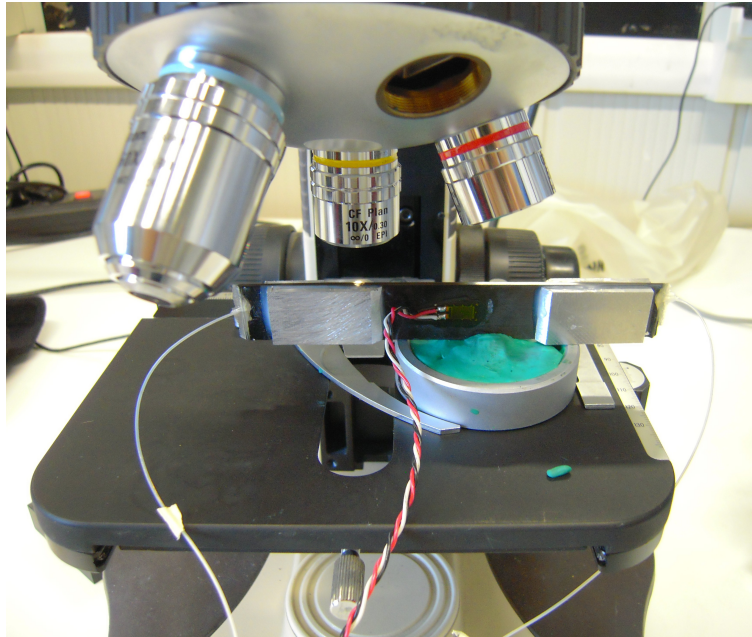


Figura 101: Provino strumentato sul microscopio (ingrandimento)

5.3.9 Test di trazione sui provini strumentati

Dopo aver esaminato il comportamento del materiale, grazie ai test preliminari, si è passati ai test di trazione “veri e propri”, sui provini strumentati con fibra ottica ed estensimetro. La procedura seguita è rimasta la stessa dei test precedenti, riguardo agli step di carico e alle analisi al microscopio.

In questo caso, è stata anche registrata la deformazione misurata dall'estensimetro, per avere un'indicazione ulteriore sulle proprietà dei materiali; ci si è assicurati, dopo ogni rimontaggio del provino sulla pressa (lo smontaggio dopo ogni step di carico si è reso necessario per analizzare i provini al microscopio), che la deformazione misurata, fosse nulla. Ulteriore aspetto di queste prove, è stata la misurazione dello spettro fornito dall'FBG; questa parte è esplicitata nella sezione seguente.

In queste prove, è risultato fondamentale prestare la massima attenzione all'intero sistema di misura, in particolare, per evitare la rottura delle fibre ottiche. Le prossime immagini mostrano l'intero sistema di misura.

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica

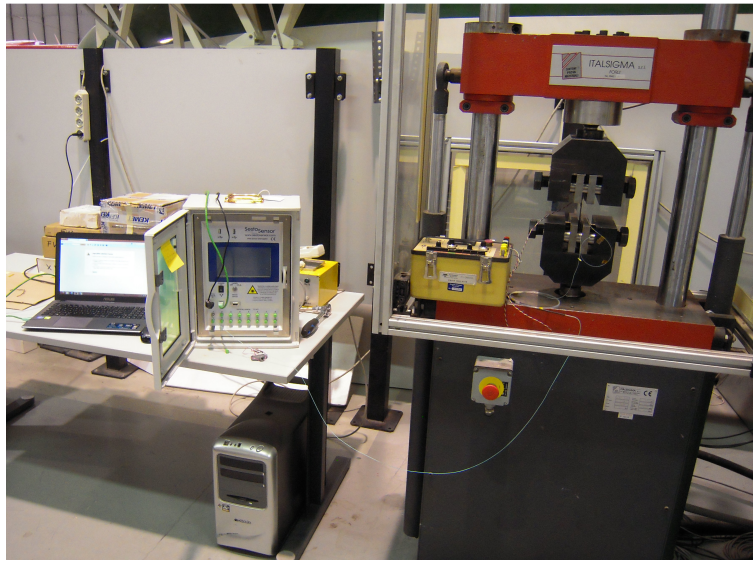


Figura 102: Intero sistema di misura

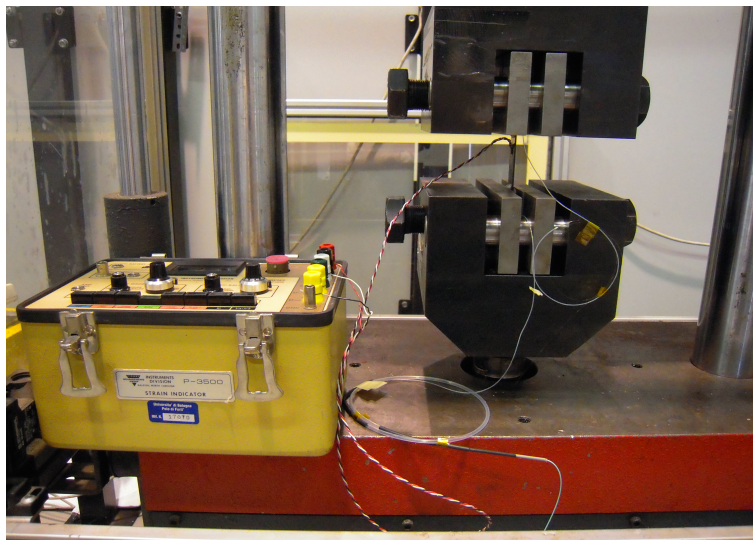


Figura 103: Dettaglio collegamento provino - Strain Indicator

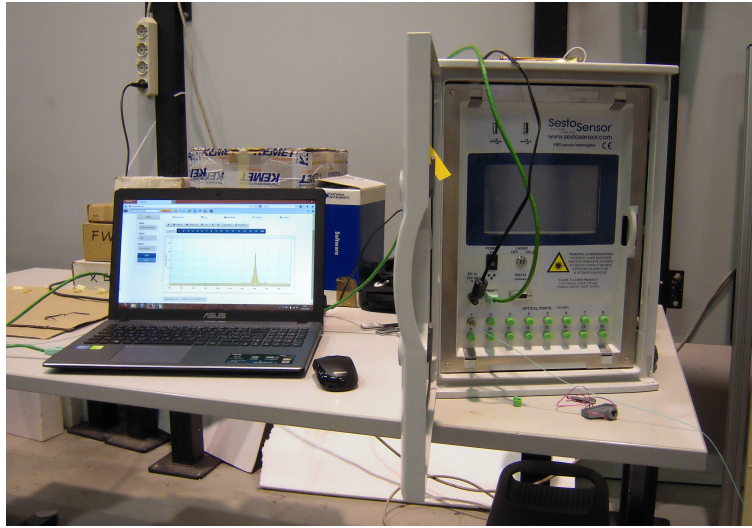


Figura 104: Dettaglio collegamento Interrogatore FBG - PC

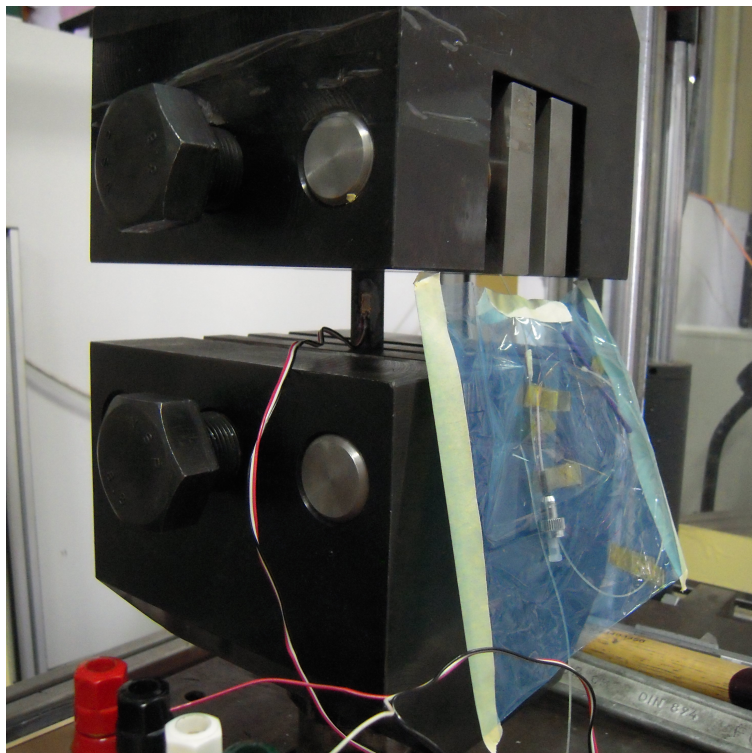


Figura 105: Protezione del connettore aggiuntivo

5.3.10 Registrazione degli spettri

L'aspetto principale di questi test e, se vogliamo, dell'intero lavoro, è quello di valutare lo spettro riflesso dal reticolo di Bragg.

Per effettuare le misure, la fibra ottica è stata collegata all'interrogatore e, questo, al PC.

Si è deciso di effettuare 3 tipi diversi di misurazione:

- Una registrazione dello spettro in condizioni di provino “a riposo”, ovvero, quando il provino si trova sulla pressa ma semplicemente appoggiato (l'equivalente di avere il provino appoggiato su un tavolo, ad esempio). In sostanza, si tratta di misurare lo spettro quando non vi è deformazione del provino;
- una misura dello spettro in condizioni di “serraggio”, cioè, quando il provino è montato sulla pressa e stretto tra gli afferraggi, quindi, pronto per essere caricato. Questo tipo di misura, di fatto non necessaria ai fini dello studio, si è resa utile per verificare che tra uno step di carico e il successivo, non cambiassero le condizioni di partenza;
- una registrazione dello spettro in condizioni di “carico”, quando il provino è sottoposto ad uno sforzo di trazione. La misura dello spettro è stata effettuata mettendo in pausa la pressa (sempre a determinati carichi), garantendo, quindi, che il provino rimanesse in trazione. Su questo tipo di procedimento c'è da fare una piccola precisazione: mettendo in pausa la pressa, ad esempio a 10 kN, questa non rimane perfettamente ferma ad una forza di 10 kN, ma oscilla attorno a tale valore, perciò, la misura dello spettro, di fatto, non è mai stata effettuata esattamente ai carichi indicati. Inoltre, anche lo spettro registrato dall'interrogatore, non è fisso, ma oscilla leggermente; ciò vuol dire che, a seconda dell'istante in cui esso viene “congelato” (in modo da salvarne i dati), potrebbe essere lievemente diverso da quello visibile, ad esempio, sempre a 10 kN. Queste discrepanze, tra misure realizzabili idealmente e misure effettuate nella pratica, in realtà, sono assolutamente trascurabili; per completezza, però, si è ritenuto di doverle specificare.

5.3.11 Riepilogo delle fasi dei test di trazione su provini strumentati

In sostanza, la procedura completa di svolgimento dei test di trazione sui provini strumentati, si può riassumere nelle seguenti fasi:

1. Montaggio del provino sulla pressa
2. Controllo della deformazione tramite Strain Indicator
3. Registrazione spettro a riposo tramite Interrogatore FBG
4. Serraggio provino
5. Registrazione spettro
6. Avvio della pressa
7. Messa in pausa della pressa ad un carico di 4 kN (fermare la pressa a carichi inferiori può creare problemi di instabilità)
8. Registrazione spettro sotto carico
9. Smontaggio provino
10. Analisi del provino al microscopio
11. Ripetizione di tutti i passaggi, salendo col carico, ad ogni prova, di 1 kN
12. Termine delle prove quando lo spettro registrato risulta troppo disturbato

6 Analisi dei risultati

In questa sezione, vengono presentati i risultati ottenuti dalle prove sopra menzionate, pertanto, verranno ripetute le modalità di prova solo se necessario. Si ricordi che, d'ora in poi, la stratificazione in tessuto (plain weave) sarà abbreviata con PW.

6.1 Caratteristica meccanica dei provini in UD

Con i test preliminari, sono stati testati 3 provini privi di fibra ottica; l'obiettivo dei test, era valutare la densità di fratture che si sviluppa nella struttura del materiale, in seguito all'applicazione di carichi di trazione sempre crescenti. Inoltre, grazie a questi test, si è ottenuta anche la caratteristica meccanica del materiale.

In Fig.106 è mostrata la caratteristica meccanica dei 3 provini senza fibra ottica e del provino con fibra ottica al suo interno.

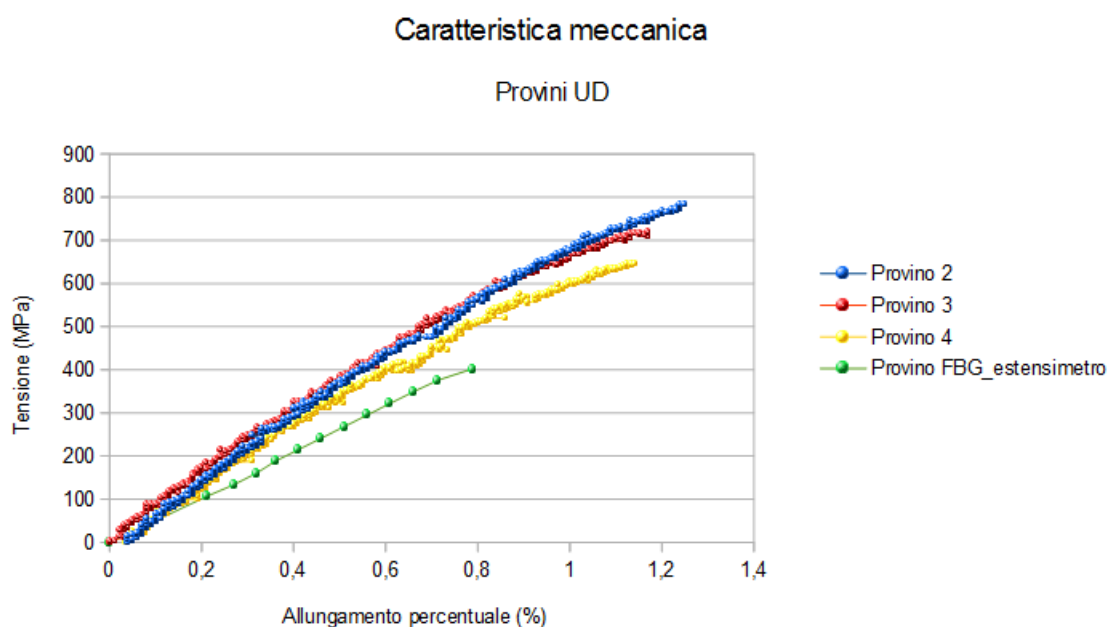


Figura 106: Caratteristica meccanica provini UD

Si tenga presente subito tale distinzione: i valori graficati per i provini 2,3 e

4 (il provino 1 si è rotto a compressione, a causa di un malfunzionamento della pressa) sono stati ottenuti dal file CSV, fornito dal software di controllo della pressa, mentre, i valori relativi al provino con fibra, sono stati presi dalle misure dell'estensimetro. Ciò spiega le piccole differenze tra le curve: innanzitutto, anche l'estensimetro può registrare deformazioni non del tutto corrette ma, i valori forniti dal software della pressa, sono sicuramente meno attendibili. Questo perché, tali punti, sono frutto di una misurazione effettuata sugli afferraggi, il che comporta, considerare anche tutti i giochi presenti nella macchina. Ovviamente, questo porta a letture di allungamento meno precise. Inoltre, è pressoché impossibile che la pressa, all'inizio di un test di trazione, registri una forza nulla, a fronte di uno spostamento (impostabile) nullo. Ciò significa che, i dati visibili nel grafico, sono stati “shiftati”, per ottenere curve che avessero, per quanto possibile, l'origine comune. Non solo: alcuni valori sono stati eliminati, in quanto, all'aumentare del carico, a volte, si è reso necessario ri-serrare il provino tra gli afferraggi, perché, la pressa, non era più in grado di tirare il provino, essendosi, questo, leggermente allentato. La curva avrebbe assunto quindi un andamento non veritiero.

Ovviamente, i punti che compongono la curva relativa al provino con FBG, sono molti di meno, rispetto agli altri (la frequenza di campionamento della pressa era impostata a 5 Hz); inoltre, il provino con FBG, non è stato portato a rottura.

Alla luce di questi fatti, le caratteristiche meccaniche dei provini, risultano comunque molto simili e in linea con le caratteristiche del materiale: la struttura dei laminati, possiede un comportamento quasi esclusivamente elastico fino a rottura. Il provino 2, che ha sopportato una forza maggiore, ha resistito fino a circa 800 MPa, con un allungamento percentuale a rottura dell'1,2 %, mentre, gli altri, presentano un carico e un allungamento a rottura, leggermente inferiori.

I due tipi di lettura dell'allungamento, cioè tramite lo spostamento degli afferraggi e grazie all'estensimetro, sono sostanzialmente in accordo e portano ad avere caratteristiche meccaniche analoghe.

6.2 Densità delle fratture nei provini in UD

Come già spiegato, l'obiettivo principale dei test sui provini non strumentati, era verificare l'insorgere e lo svilupparsi di fratture nel cuore dei provini, costituito da 3 strati di unidirezionale, orientato a 90° (perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico). La particolare stratificazione consente, al componente, di avere una certa resistenza a trazione, garantita dai due strati esterni a 0° e dalla resistenza della matrice in resina epossidica dei 3 strati interni; al contempo, la presenza di questi 3 strati a 90° , determina una struttura con scarsissima resistenza al carico di trazione e, quindi, soggetta alla nascita di fratture trasversali, che si propagano lungo tutti i 3 strati.

Ad ogni nuova applicazione di un carico, il numero di fratture è stato contato tramite un'analisi al microscopio. Per ottenere la densità di fratture, è stata considerata una lunghezza “utile” di circa 8,5 cm, pari alla distanza tra il centro dei due tab, zona in cui avveniva l'afferraggio nella pressa e, oltre la quale, ovviamente, non sono state rilevate fratture (Fig.107).

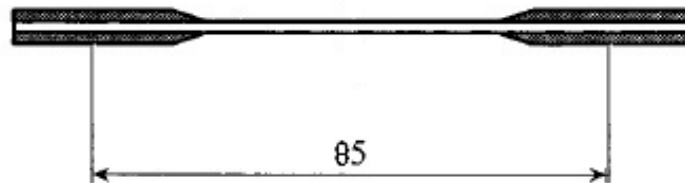


Figura 107: Lunghezza utile per il calcolo della densità di fratture

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

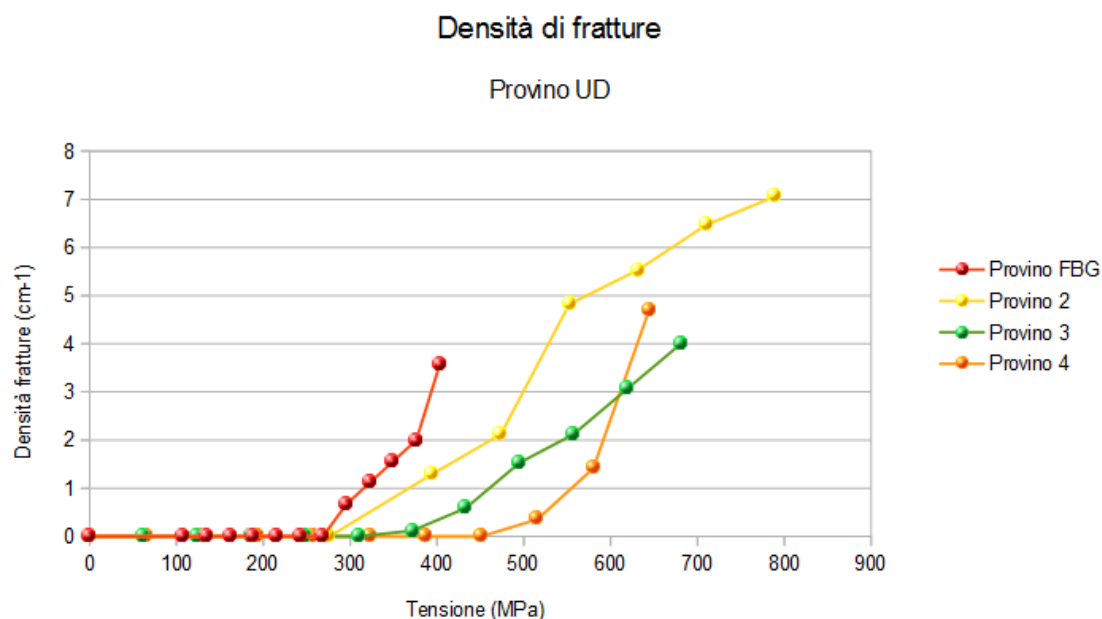


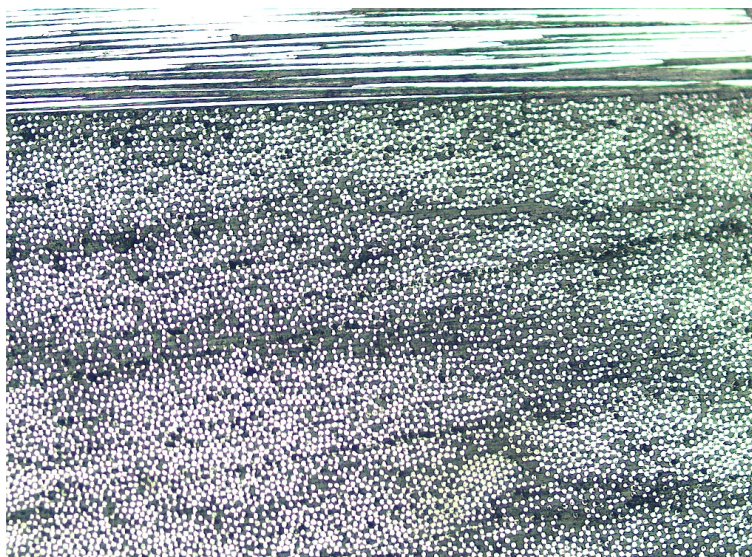
Figura 108: Densità di fratture

Come prima, il provino con FBG non è stato portato a rottura, perciò la “densità di fratture a rottura” è inferiore rispetto agli altri provini. Il provino 2 è quello che era giunto a un valore di carico di rottura più elevato e, infatti, presenta una densità di fratture molto elevata: circa 7 fratture/cm, al momento della rottura, corrispondenti a 60 fratture contate nel provino. In generale si nota, chiaramente, l'andamento crescente del numero di fratture, all'aumentare del carico. Si può anche osservare che, per ogni provino, non compaiono fratture fino ad una tensione di 350 – 400 MPa. Ciò, permette di ritenere che, fino a circa il 50% del carico di rottura, il materiale è intatto, salvo poi, presentare difetti, via via crescenti, quando si supera questo valore di soglia. Occorre precisare che, non sempre, nello step tra un carico e il successivo, si è passati da contare 0 fratture a contarne una; più spesso, ad un carico, ad esempio di 8 kN, non si notavano fratture mentre, alla successiva analisi a 10 kN, si contavano già 4-5 cricche. Per i provini non strumentati, infatti, si è deciso di ripetere le misure ogni 2 kN, per venire incontro alle difficoltà di gestione della pressa, dovute a carichi relativamente bassi rispetto a quello massimo applicabile; è stata fatta questa scelta, per evitare di incorrere in instabilità

della macchina e per “scongiorare” la ripetizione di due misure quasi identiche, data la non elevatissima precisione della pressa. Il provino con FBG, invece, è stato analizzato a step di 1 kN in quanto, in questo caso, c'era la necessità di registrare anche lo spettro riflesso dal sensore (questo spiega la presenza di più punti nel grafico).

6.3 Analisi al microscopio dei provini in UD

Di seguito vengono mostrate alcune micrografie dei provini in UD. In Fig.109 è mostrato un provino, prima che presenti difetti a livello di struttura.



*Figura 109: Provino in UD non danneggiato.
Ingrandimento 10X*

In figura, si può notare l'interfaccia tra lo strato a 0° (in alto) e quelli a 90° . Dello strato in alto, è possibile vedere le fibre longitudinali che corrono per la lunghezza del provino mentre, negli strati a 90° , si vedono le singole fibre, all'interno della matrice; ovviamente, durante il processo di cura, la resina si muove, perciò, si vedono zone in cui questa è maggiormente presente e, altre, in cui il rapporto fibre/matrice è molto elevato. In Fig.110 è possibile vedere un ingrandimento dell'interfaccia $0^\circ/90^\circ$.

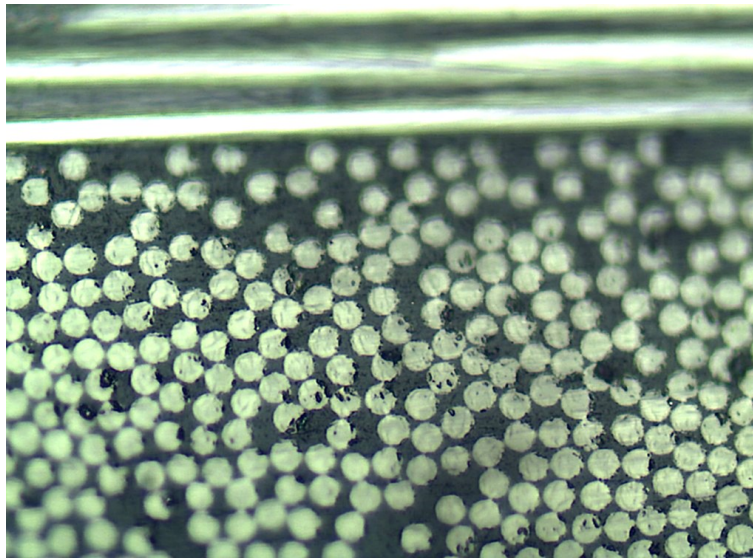


Figura 110: Interfaccia 0°/90°. Ingrandimento 50X

In Fig.111, invece, è possibile osservare come si presenta una frattura trasversale.

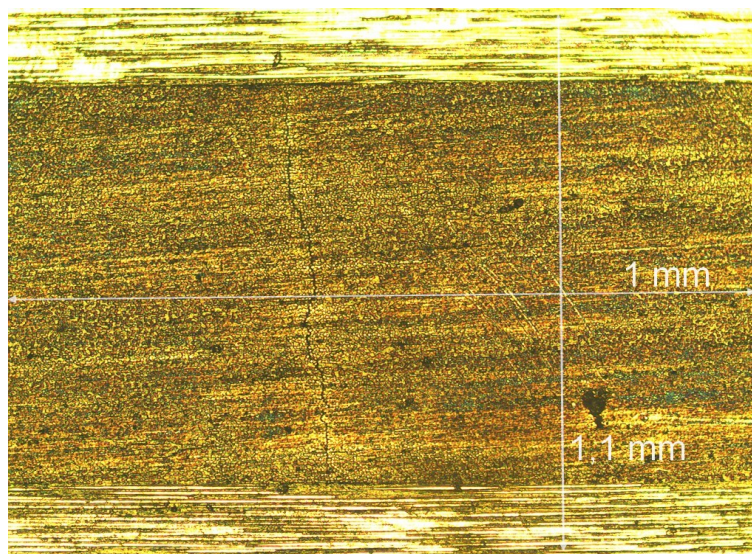


Figura 111: Frattura trasversale. Ingrandimento 5X

La frattura appare, in modo molto chiaro, come una linea scura (che indica, quindi, la presenza di molta resina), che attraversa tutti i 3 strati a 90° e “termina” all'interfaccia 0°/90°. Gli strati a 0°, infatti, resistono decisamente di più allo sforzo di trazione, avendo le fibre orientate nella

stessa direzione di applicazione del carico. Perché la frattura si propaghi anche nello strato a 0° , le fibre dovrebbero essere, letteralmente, strappate; ciò richiederebbe forze decisamente elevate: chiaramente, per la struttura che ha, il provino giunge a rottura ben prima.

In Fig,112, è proposto un ingrandimento della frattura.

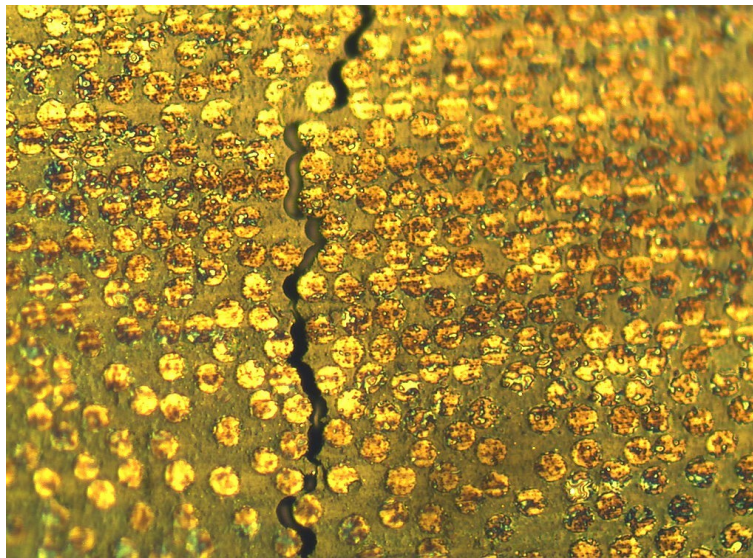


Figura 112: Frattura. Ingrandimento 50X

Con l'ingrandimento, è chiaramente visibile la spaccatura che porta al distacco delle fibre. Aumentando il carico, la cricca porta alla nascita di delaminazioni nell'interfaccia $0^\circ/90^\circ$; nell'immagine seguente, si può notare la presenza di tali difetti, quando il provino arriva a rottura.

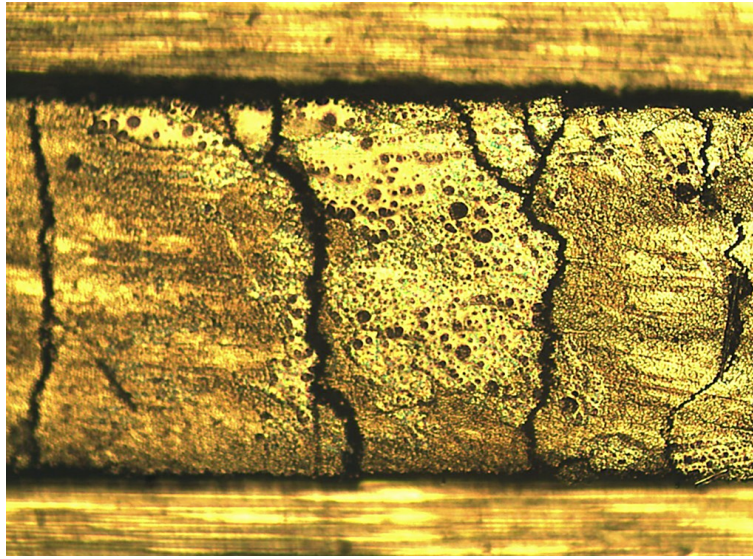
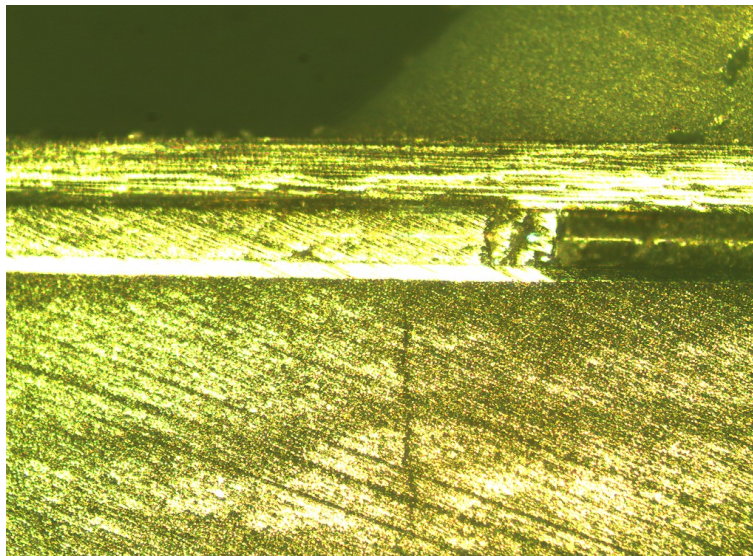


Figura 113: Delaminazioni all'interfaccia 0°/90° e cricche trasversali alla rottura del provino

Come si nota dalla figura, al momento della rottura, le cricche si allargano notevolmente e c'è un distacco degli strati a 90° da quelli a 0°. Quando la densità di fratture raggiunge valori elevati, la resistenza del materiale subisce un calo e, aumentando il carico, il provino giunge a rottura.

Nelle immagini seguenti, viene mostrata la fibra ottica all'interno del laminato.



*Figura 114: Fibra ottica all'interno dell'UD (1)
Ingrandimento 10X*

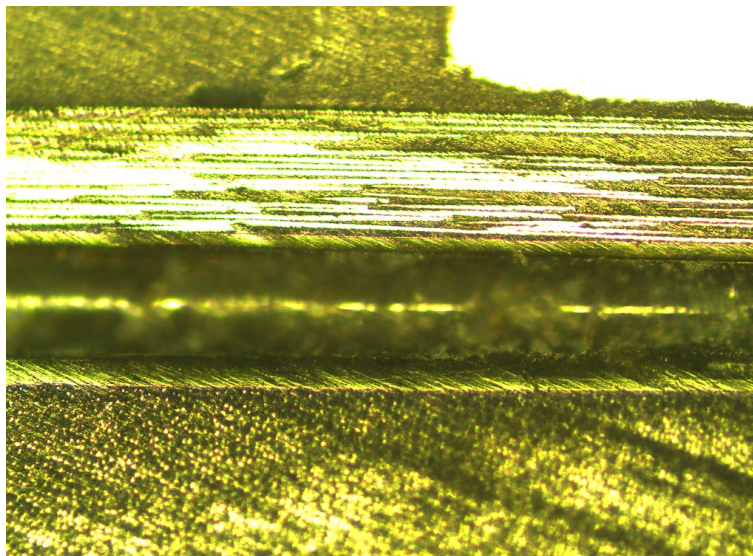


Figura 115: Fibra ottica all'interno dell'UD (2) Dettaglio del core della fibra. Ingrandimento 10X

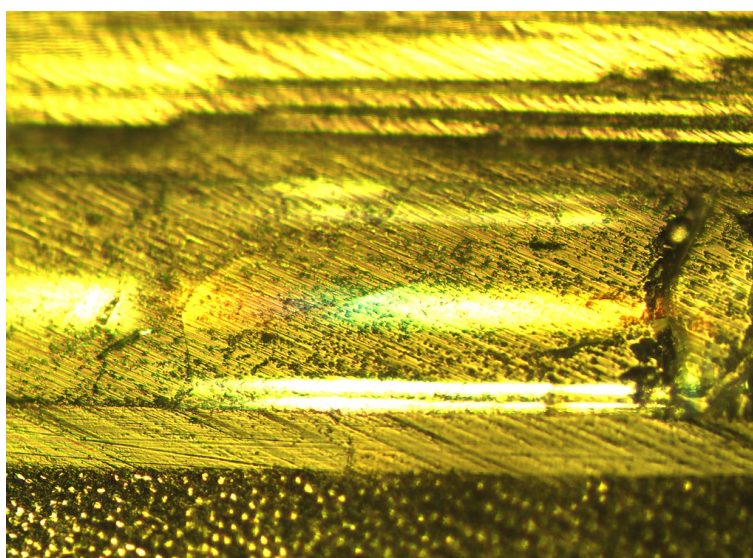


Figura 116: Fibra ottica all'interno dell'UD (3) Dettaglio del core della fibra. Ingrandimento 20X

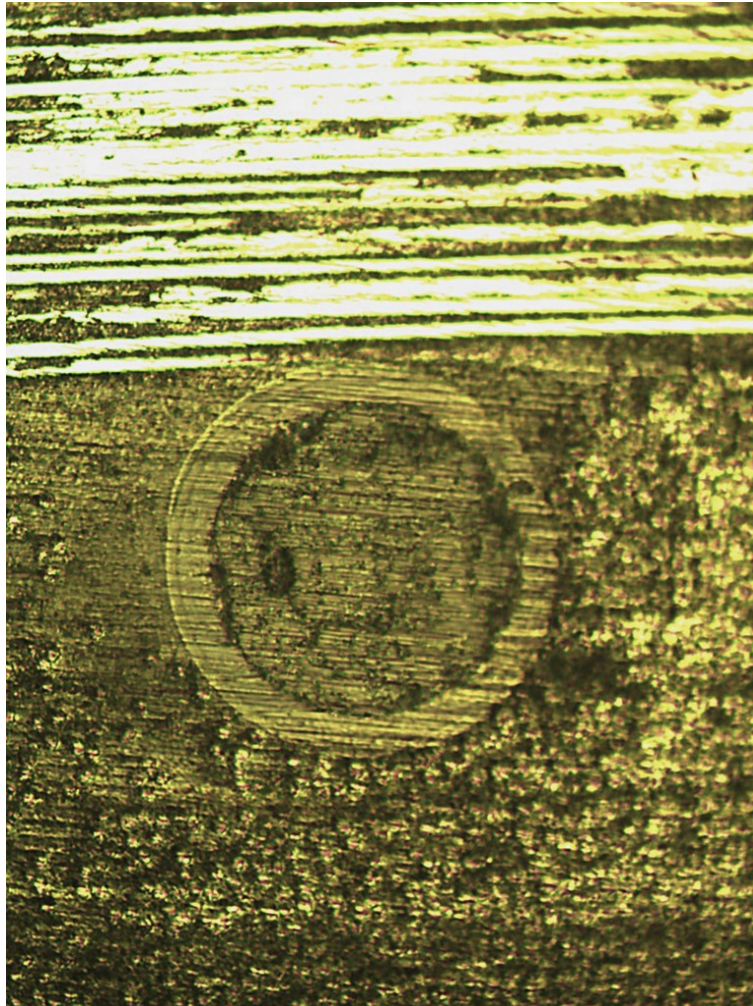


Figura 117: Fibra ottica all'interno dell'UD (5) Vista frontale. Ingrandimento 20X

6.4 **Analisi degli spettri del provino in UD**

Una volta chiarite le modalità di rottura del materiale, si è passati all'analisi degli spettri riflessi dal sensore FBG inserito nel provino in UD. Verranno ora proposti gli spettri a riposo.

6.4.1 **Spettri a riposo**

Come già spiegato, questi spettri, sono stati registrati in condizioni di deformazione nulla. Il provino è stato montato sulla pressa, senza essere serrato (l'equivalente di appoggiare il provino sul tavolo, ad esempio). Dopo essersi assicurati che la deformazione misurata dall'estensimetro

fosse effettivamente nulla, si è registrato lo spettro. Una volta terminata la prova di trazione (arrivando al carico prestabilito), si è ripetuta la misura. Pertanto, nei grafici seguenti, i carichi e le tensioni indicate, sono da intendersi esclusivamente come “istanti temporali”, ovvero, in quale momento è stato registrato lo spettro, cioè, ad esempio, dopo la prova a 6 kN, dopo quella a 10 kN, eccetera. Il termine “carichi”, deve quindi essere inteso, più che altro, come “prove”.

Le seguenti immagini raffigurano gli spettri misurati.

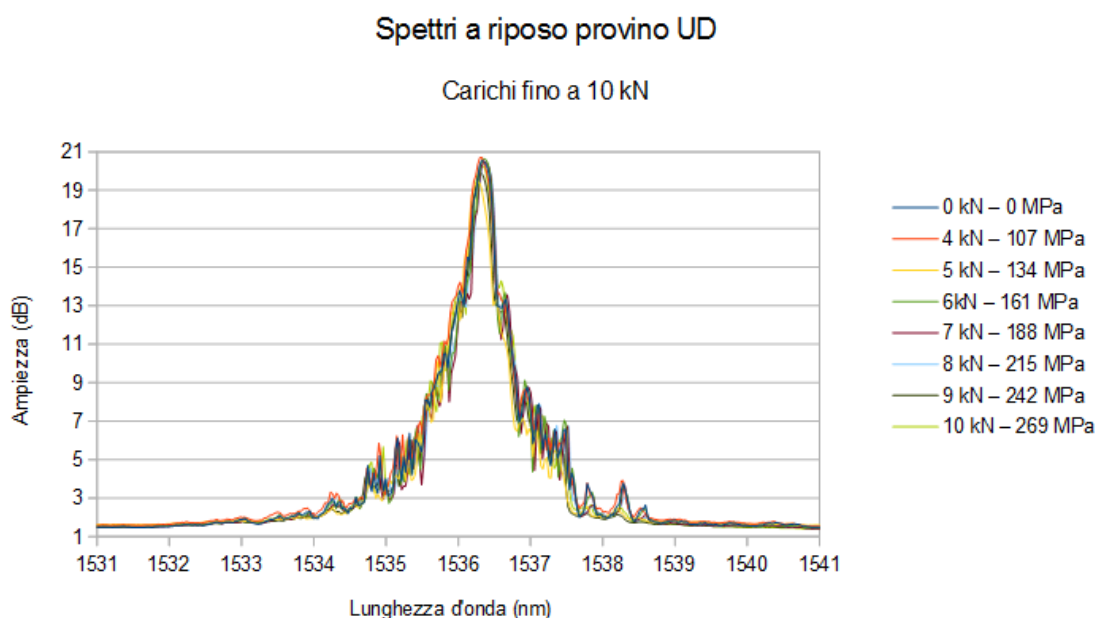


Figura 118: Spettri a riposo provino UD (1)

Gli spettri misurati, a riposo, fino a 10 kN (269 MPa), sono, praticamente, sovrapponibili. La campana dello spettro risulta ristretta, mentre, la lunghezza d'onda di Bragg, si attesta attorno al valore di 1536,33 nm e l'ampiezza a poco meno di 20 dB. La forma dello spettro risulta regolare, senza la presenza di picchi secondari o disturbi evidenti. Tutti questi dati, sono in accordo con le previsioni teoriche; infatti, finché la deformazione del provino rimane in campo elastico, riportando il materiale in condizioni come quelle di partenza, cioè a riposo, ci si aspetta che, come il materiale non “ha memoria” della deformazione subita, così, lo spettro, non presenti

segnali di qualche evento che abbia modificato la struttura del materiale in modo permanente.

La figura seguente, invece, presenta gli spettri, dopo la comparsa delle prime fratture. Giunti al carico di 11 kN, infatti, si è assistito alla presenza di 6 fratture all'interno del provino.

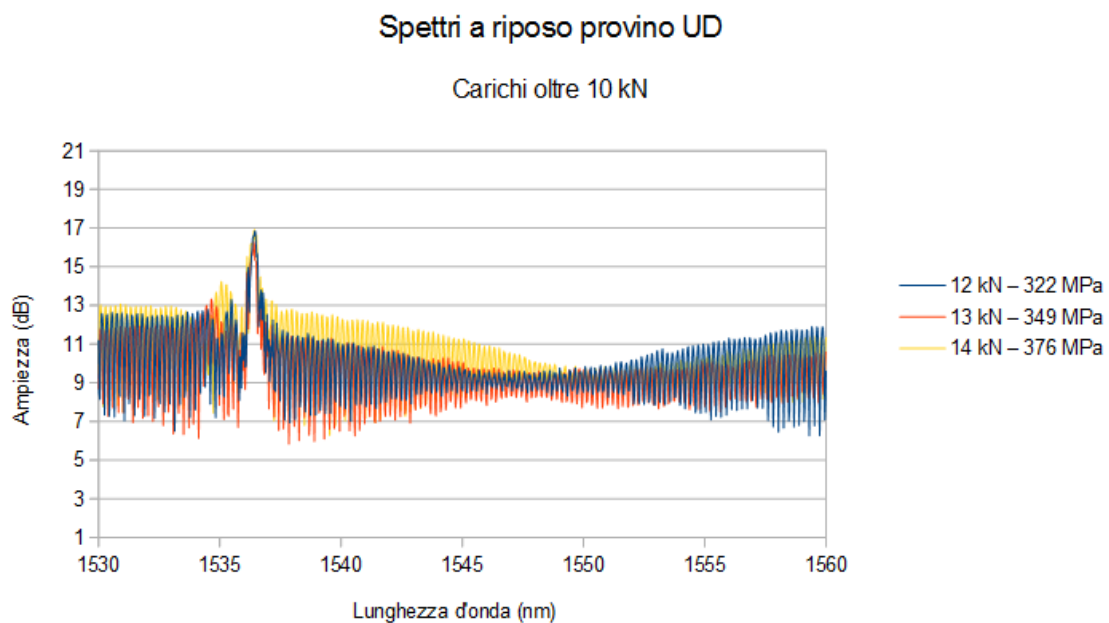


Figura 119: Spettri a riposo provino UD (2)

Come si può notare, gli spettri cambiano completamente aspetto; non è più evidente, come prima, una campana di forma regolare, ma è visibile, solamente una ristretta zona in cui è presente un picco. L'ampiezza di tale picco, si riduce da circa 21 dB a meno di 17 dB. All'esterno di questo picco, è presente una zona ricca di ondulazioni e disturbi del segnale, che si estende per tutta la larghezza dello spettro. In Fig,120, è mostrato un ingrandimento della zona adiacente ai picchi massimi.

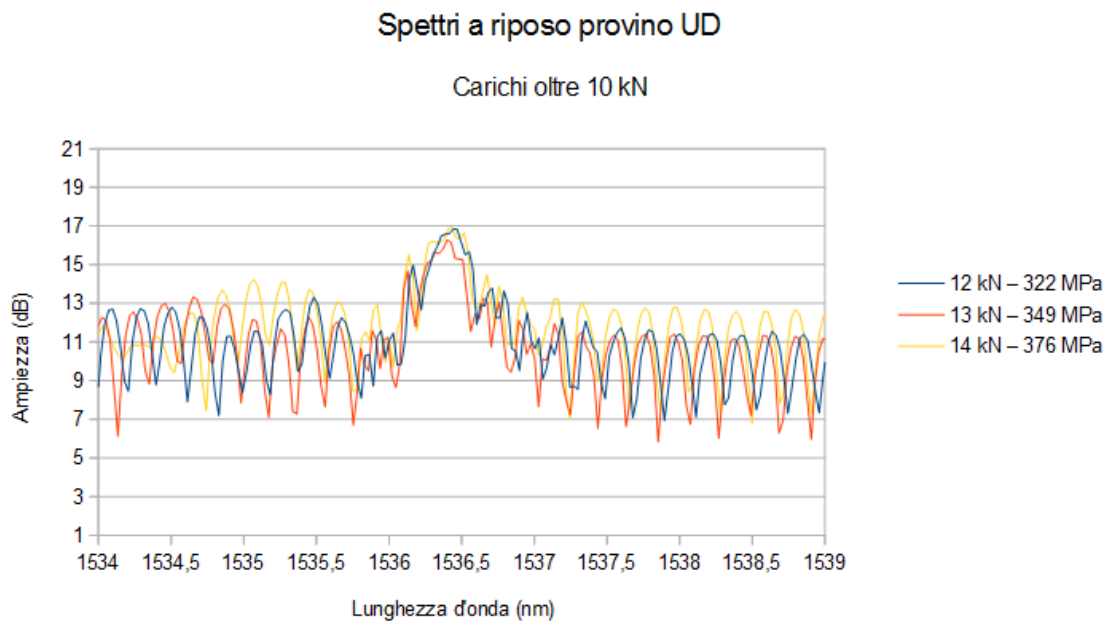


Figura 120: Spettri a riposo provino UD (2)_ingrandimento

Dall'immagine precedente, si può apprezzare meglio, il numero e l'entità dei picchi secondari che circondano quello principale. La lunghezza d'onda di Bragg, risulta leggermente superiore a quella dei casi precedenti.

Dal punto di vista fisico, uno spettro di tale aspetto, può essere ricondotto alla rottura della fibra ottica. Se è comunque visibile un picco superiore agli altri, ciò significa che, il reticolo di Bragg, non è stato completamente danneggiato e riesce a riflettere, comunque, parte del segnale che gli viene mandato. La presenza dei disturbi, invece, può essere dovuta a zone, in cui, la fibra ottica risulta danneggiata. Il fatto che ciò accada, esattamente appena vengono osservate delle fratture dentro al provino, è un indizio in più, per affermare che è proprio la presenza di queste, a determinare un danneggiamento della fibra. Si tenga presente che, la fibra ottica, è posta all'interfaccia $0^{\circ}/90^{\circ}$, proprio per risultare sensibile alla presenza di fratture. Il contatto, da una parte, con le fibre a 0° e, dall'altra, con le fibre a 90° , determina tensioni non esclusivamente lungo una direzione, a causa proprio del tipo di stratificazione; tensioni di questo tipo, possono portare alla situazione in esame.

6.4.2 Spettri sotto carico

Le figure seguenti mostrano gli spettri sotto carico, quindi, registrati mettendo la pressa in pausa durante l'applicazione del carico.

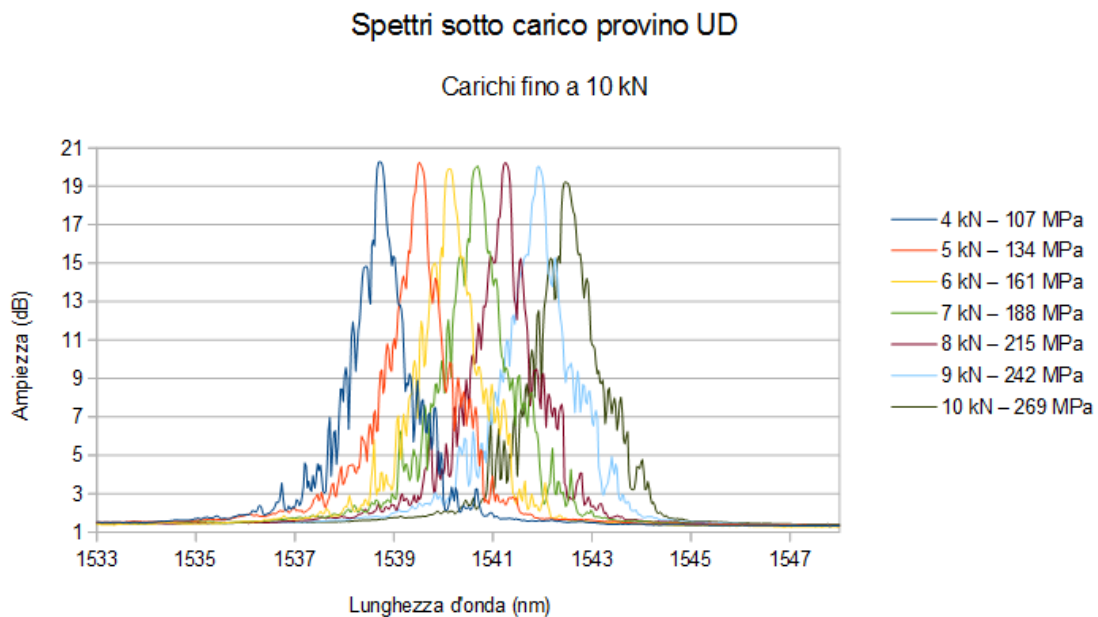


Figura 121: Spettri sotto carico provino UD (1)

Fino a che il provino è integro, la forma degli spettri è analoga a quella a riposo. La campana è ben visibile, non compaiono picchi secondari e, al di fuori della campana, non sono presenti disturbi del segnale.

Al contempo, all'aumentare del carico applicato, la campana si sposta verso lunghezze d'onda maggiori, in accordo con le ipotesi teoriche, secondo cui, una deformazione positiva (relativa ad un carico di trazione), porta a un aumento della lunghezza d'onda di Bragg. L'incremento, visivamente, sembra essere lineare, in funzione del carico ma, quest'aspetto, verrà discusso nel seguito.

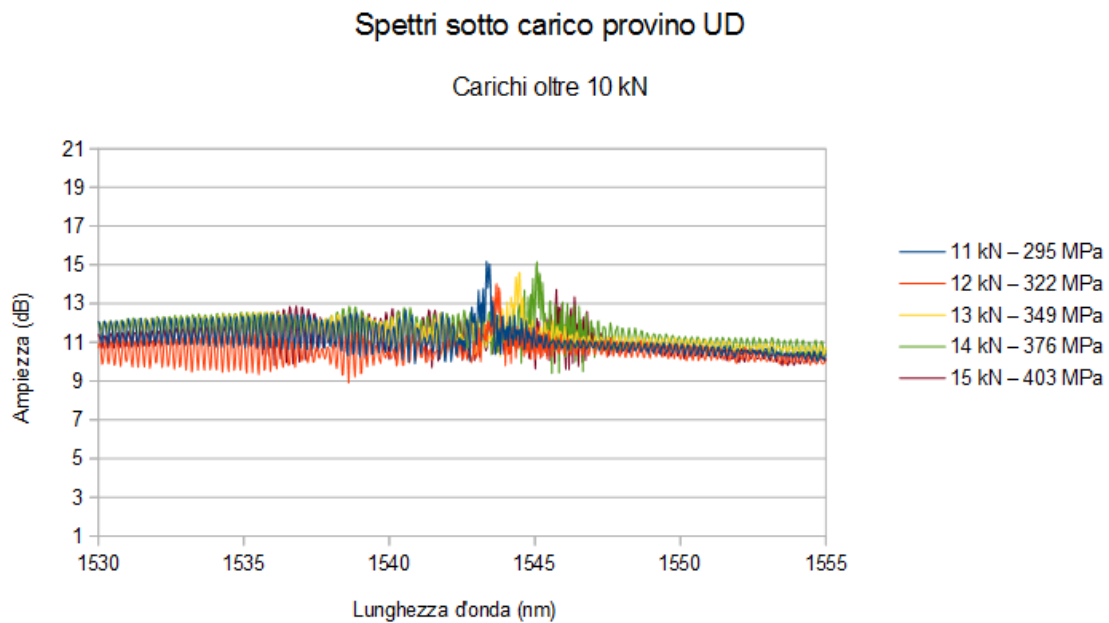


Figura 122: Spettri sotto carico provino UD (2)

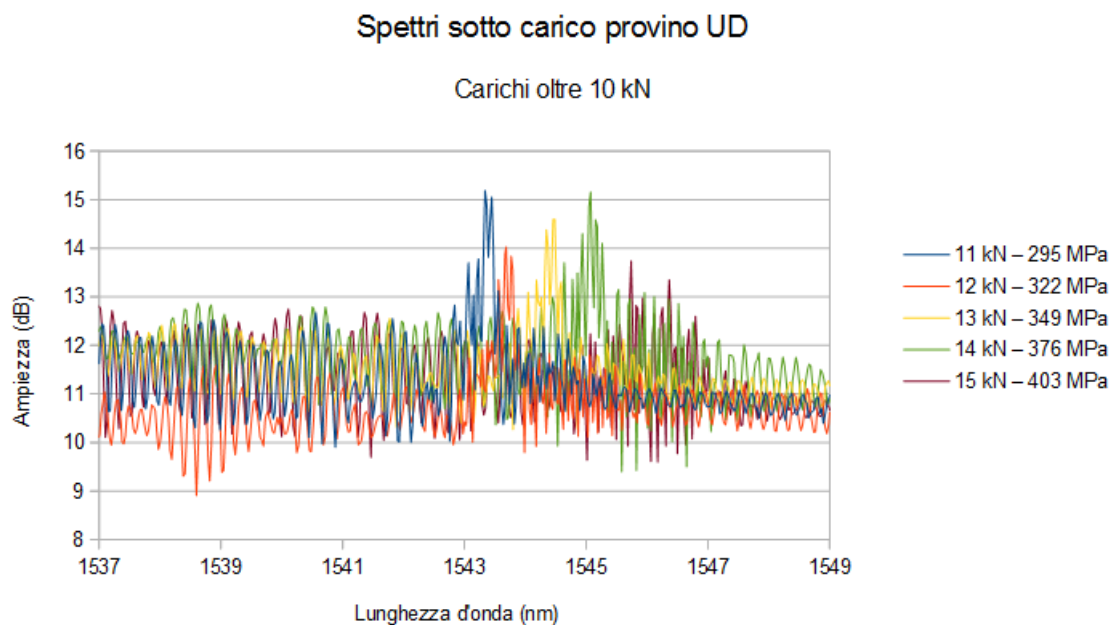


Figura 123: Spettri sotto carico provino UD (2)_ingrandimento

Anche sotto carico, dopo la comparsa di cricche nel materiale, gli spettri registrati, subiscono un cambiamento notevole. Valgono le stesse

considerazioni fatte per il caso a riposo, riguardo alla motivazione fisica che spiega l'aspetto dello spettro.

La lunghezza d'onda di Bragg, continua a “percepire” l'applicazione del carico, spostandosi verso lunghezze d'onda maggiori.

6.5 Caratteristica meccanica dei provini in PW

Tenendo presente le considerazioni fatte per l'altro provino, in Fig.124, vengono presentate le caratteristiche meccaniche ottenute dai provini in tessuto.

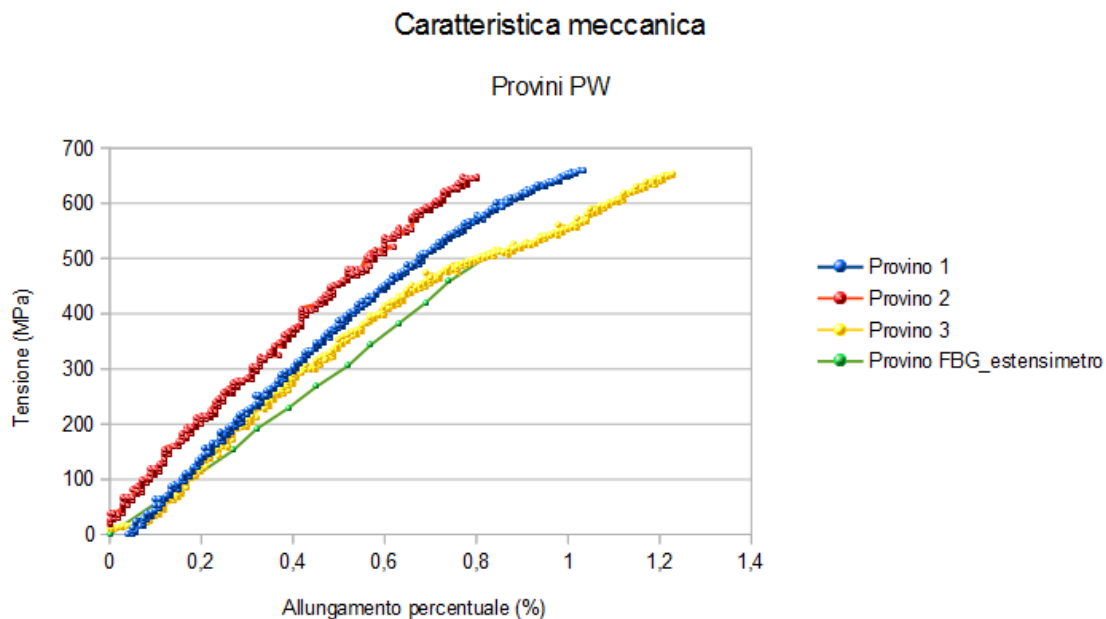


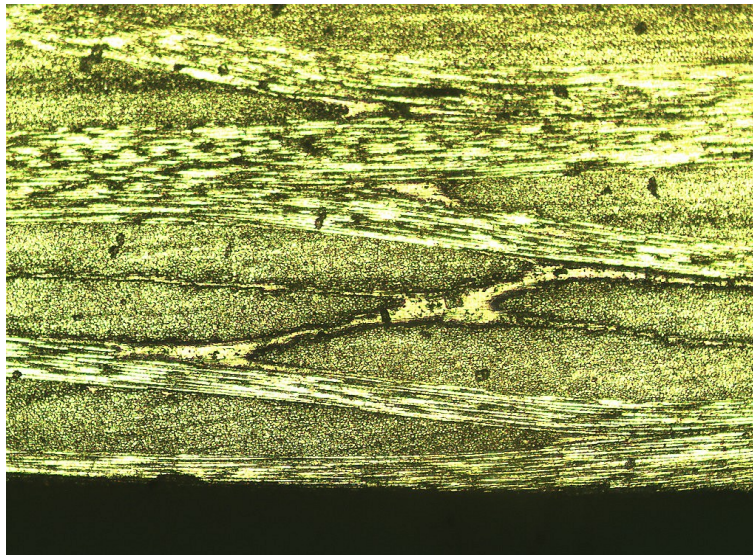
Figura 124: Caratteristica meccanica provini PW

Con considerazioni analoghe al caso dei provini in UD, si può notare che, i provini in tessuto, mostrano un carico di rottura pressoché identico, salvo raggiungere tale valore ad allungamenti percentuali differenti. Come prima, questo può dipendere dall'adattamento dei dati forniti dal software della pressa. Il provino con FBG, mostra una caratteristica meccanica del tutto simile agli altri provini.

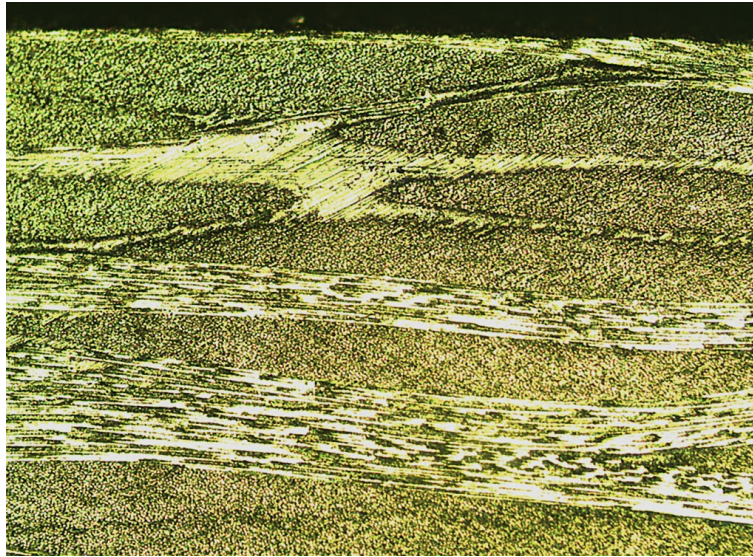
6.6 **Analisi al microscopio dei provini in PW**

La struttura dei provini in tessuto, è molto diversa da quella dei provini in UD; è stata fatta una scelta di questo tipo, proprio per cercare di trasferire le conoscenze acquisite dall'unidirezionale (grazie anche a un parziale confronto con ricerche bibliografiche), a questo tipo di materiale. Dal punto di vista della micrografia, si notano, in modo chiaro, le differenze tra i due materiali.

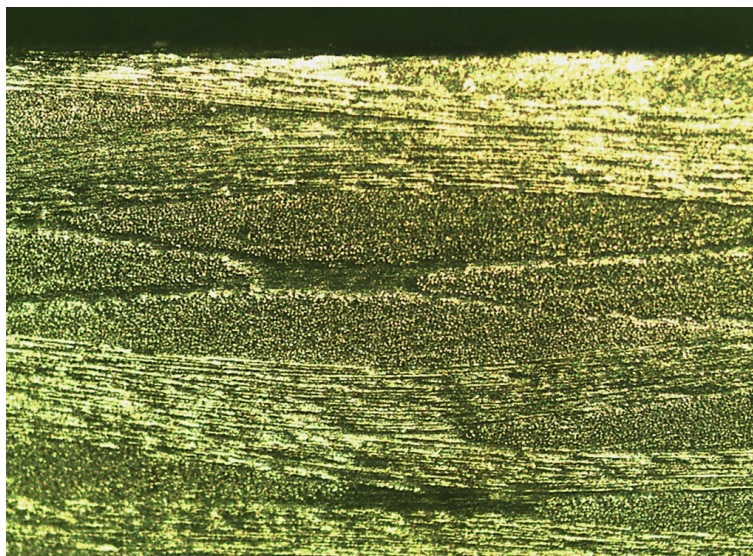
Nelle figure successive, sono mostrate alcune micrografie dei provini in PW.



*Figura 125: Micrografia di un provino in PW (1)
Ingrandimento 10X*



*Figura 126: Micrografia di un provino in PW (2)
Ingrandimento 10X*



*Figura 127: Micrografia di un provino in PW (3)
Ingrandimento 10X*

Le foto mostrano la struttura più “disordinata”, tipica di un plain weave, in cui le fibre a 0° e 90° sono intrecciate. Si possono, infatti, notare le fibre a 0° , avere un andamento ondulato lungo il provino. Questo, perché, si trovano, alternativamente, sopra e sotto alle fibre a 90° . Si possono poi vedere delle zone particolari, in cui, è presente una predominanza di resina; il significato di queste zone non è completamente chiaro. Innanzitutto, sono

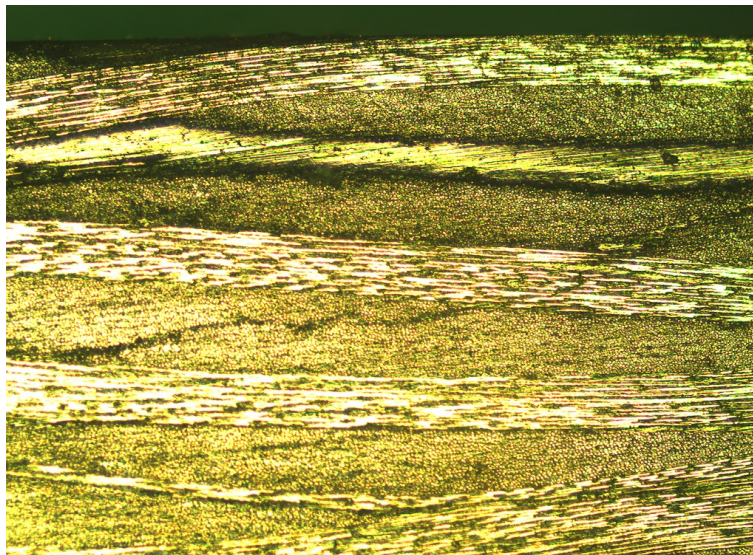
state osservate ancora prima di caricare il provino, il che vuol dire, che non si tratta di difetti comparabili alle cricche osservate nell'UD. Può trattarsi, semplicemente, di zone, in cui, l'adesione tra gli strati di materiale, non è avvenuta in maniera perfetta: di conseguenza, la resina, grazie alla sua viscosità, ha occupato i “vuoti” creatisi.

La presenza di questi vuoti, si estende per tutta la struttura del provino, indicando che non si tratta di difettosità localizzate.

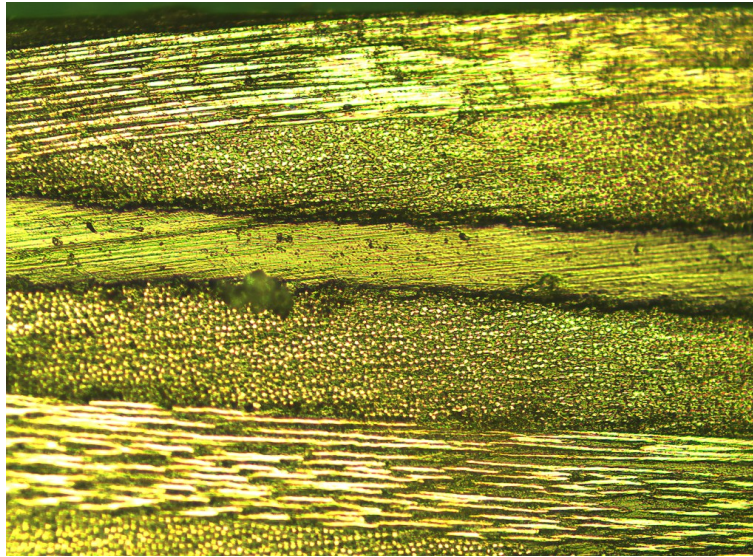
Inoltre, all'aumentare del carico, non si è assistito a un cambiamento sostanziale delle caratteristiche di queste zone; potrebbero essere leggermente aumentate di dimensioni, in relazione allo sforzo di trazione, ma tale eventualità non è risultata misurabile.

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

Le figure successive, mostrano la fibra ottica all'interno del provino.



*Figura 128: Fibra ottica all'interno del PW (1)
Ingrandimento 10X*



*Figura 129: Fibra ottica all'interno del PW (2)
Ingrandimento 10X*

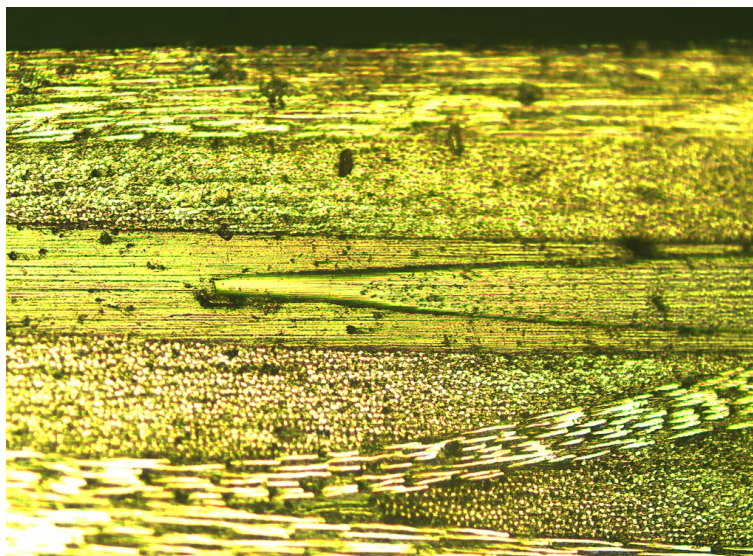


Figura 130: Fibra ottica all'interno del PW (3) Cladding sezionato dal piano di taglio del provino. Ingrandimento 10X

Nelle immagini seguenti, si può vedere la fibra ottica all'interno del provino, frontalmente, avendo tagliato il provino secondo un piano ortogonale rispetto ai casi precedenti.

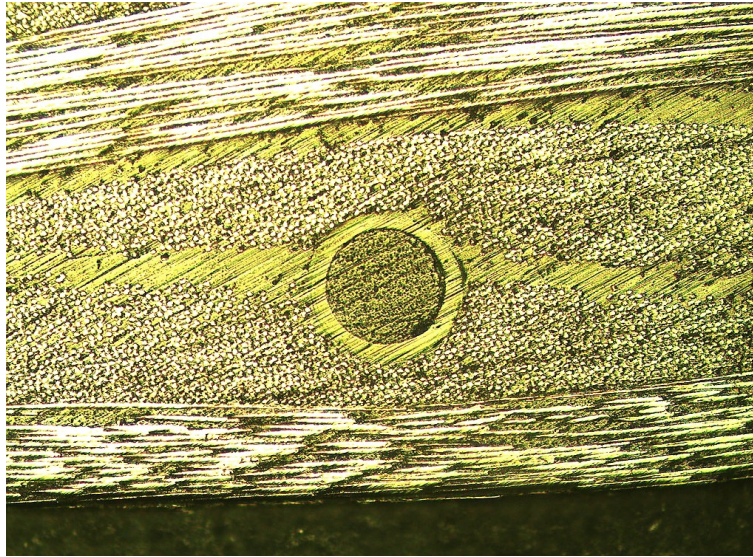


Figura 131: Fibra ottica all'interno del PW (4) Vista frontale. Ingrandimento 10X

Nell'immagine precedente, si può notare la piccola *resin rich region* attorno alla fibra ottica. L'estensione di questa zona, caratterizzata da una predominanza di resina, è talmente minima, che non influisce sulle proprietà meccaniche del provino. Questo conferma che le fibre ottiche scelte e il tipo di embedding, non costituiscono un elemento di indebolimento del materiale (in accordo con le previsioni fatte sulla base delle ricerche bibliografiche).

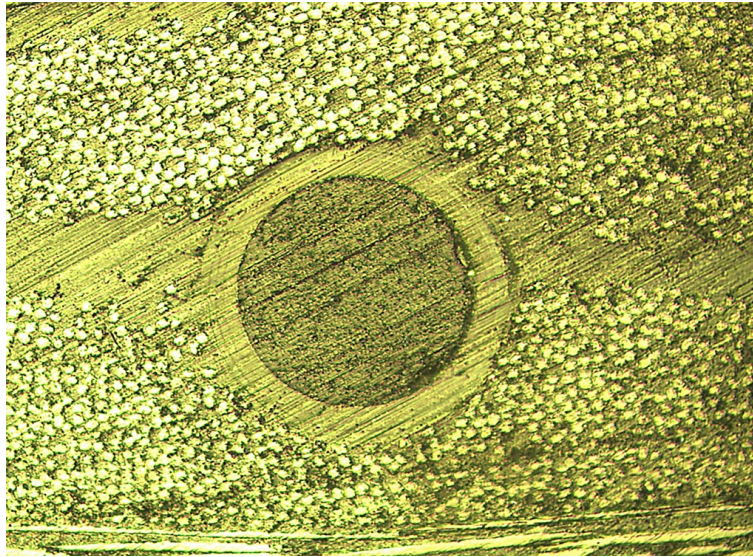


Figura 132: Fibra ottica all'interno del PW (5) Vista frontale. Ingrandimento 20X

6.7 Analisi degli spettri del provino in PW

In mancanza di una valutazione quantitativa del danneggiamento del materiale, si è proceduto con l'analisi degli spettri.

6.7.1 **Spettri a riposo**

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

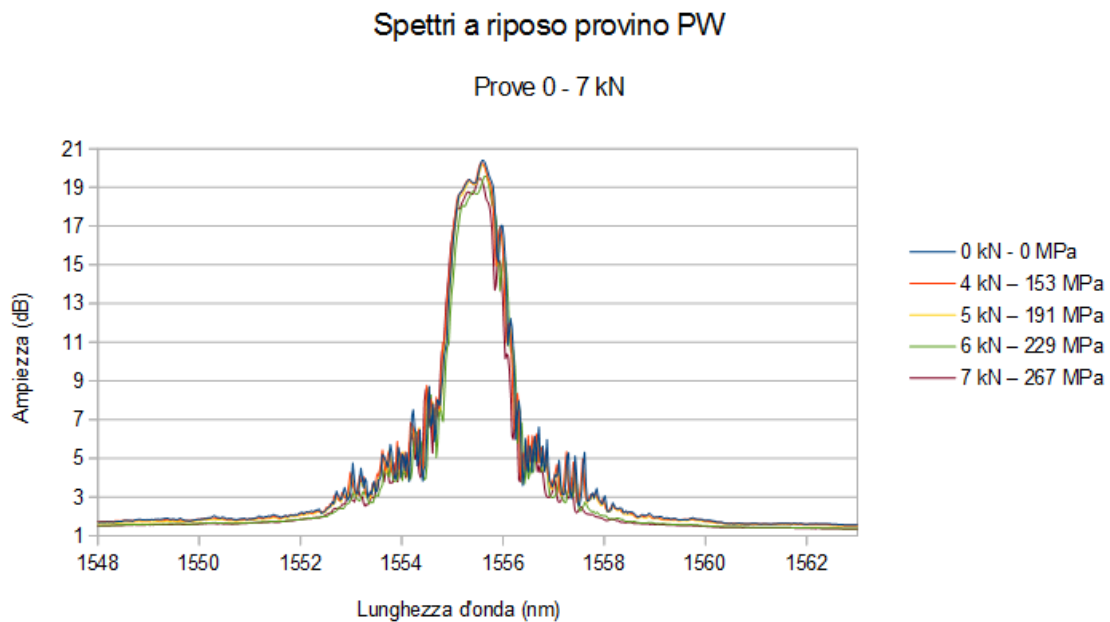


Figura 133: Spettri a riposo del provino in PW (1)

Fino ad un carico di 7 kN, corrispondente ad una tensione di 267 MPa, gli spettri hanno una forma molto simile a quelli ottenuti per il provino in UD; la campana risulta stretta e non presenta picchi secondari di entità rilevante. Il “disturbo” ai lati della campana, non è assente, ma non inficia la qualità del segnale.

La lunghezza d'onda di Bragg è circa 1555,5 nm e l'ampiezza del picco circa 20 dB; valori che rimangono praticamente immutati.

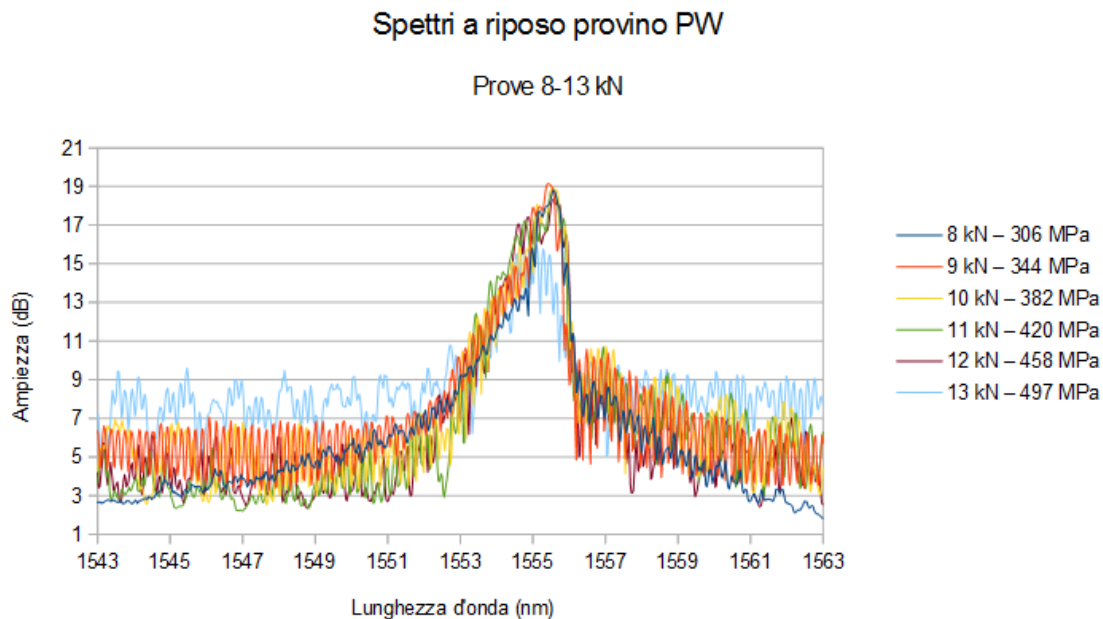


Figura 134: Spettri a riposo del provino in PW (2)

Ad 8 kN (306 MPa), lo spettro inizia a presentare una forma distorta; in particolare, si può notare la comparsa di numerosi picchi e l'allargamento della campana verso sinistra, a lunghezze d'onda minori di quella di picco. All'aumentare del carico, lo spettro si deforma sempre più. Si noti, ad esempio, la curva relativa al carico di 8 kN e la curva relativa al carico di 13 kN; la prima, non si discosta molto dalle curve fino a 7 kN, la seconda, presenta uno spettro molto distorto, con numerosi picchi attorno alla campana.

Facendo riferimento alle considerazioni fatte per l'UD, in questo caso, non si ha un raffronto tra gli spettri e la struttura osservata al microscopio. Di fatto, però, lo spettro cambia notevolmente, a partire da una tensione di 306 MPa; se, per l'UD, lo spettro cambiava drasticamente a 296 MPa, cioè ad una tensione pari a quasi il 50% del carico di rottura, anche in questo caso, ci troviamo di fronte ad un valore analogo. I provini in PW non strumentati, infatti, hanno presentato un carico di rottura attorno ai 650 MPa, perciò, analogamente a quanto successo per l'UD, a circa metà del carico di rottura, lo spettro inizia a deformarsi. Non si possono trarre conclusioni certe, ma, i numeri, lasciano riflettere; uno spettro che, a riposo, rimane deformato, è

sicuramente indice di qualche “evento” avvenuto all'interno del provino.

6.7.2 Spettri sotto carico

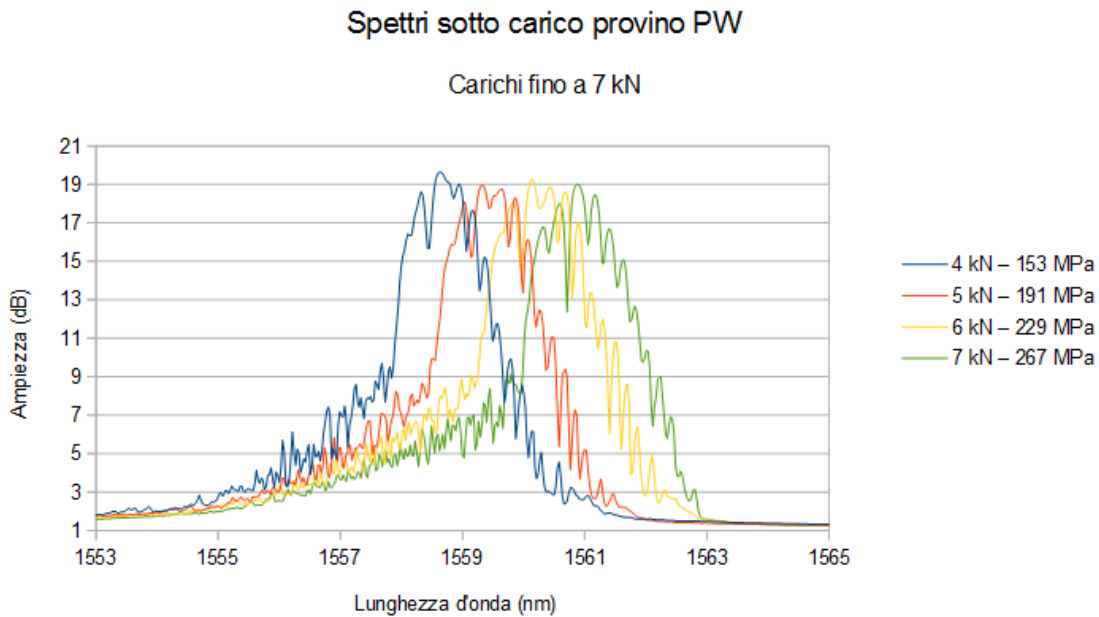


Figura 135: Spettri sotto carico del provino in PW (1)

Durante l'applicazione del carico, gli spettri registrati, mostrano un aspetto leggermente diverso da quello mostrato a riposo. La campana risulta allargata e compaiono diversi picchi attorno a quello principale. La forma dello spettro, però, si mantiene molto simile all'aumentare del carico e, come per l'UD, la lunghezza d'onda di Bragg aumenta, in funzione della tensione applicata.

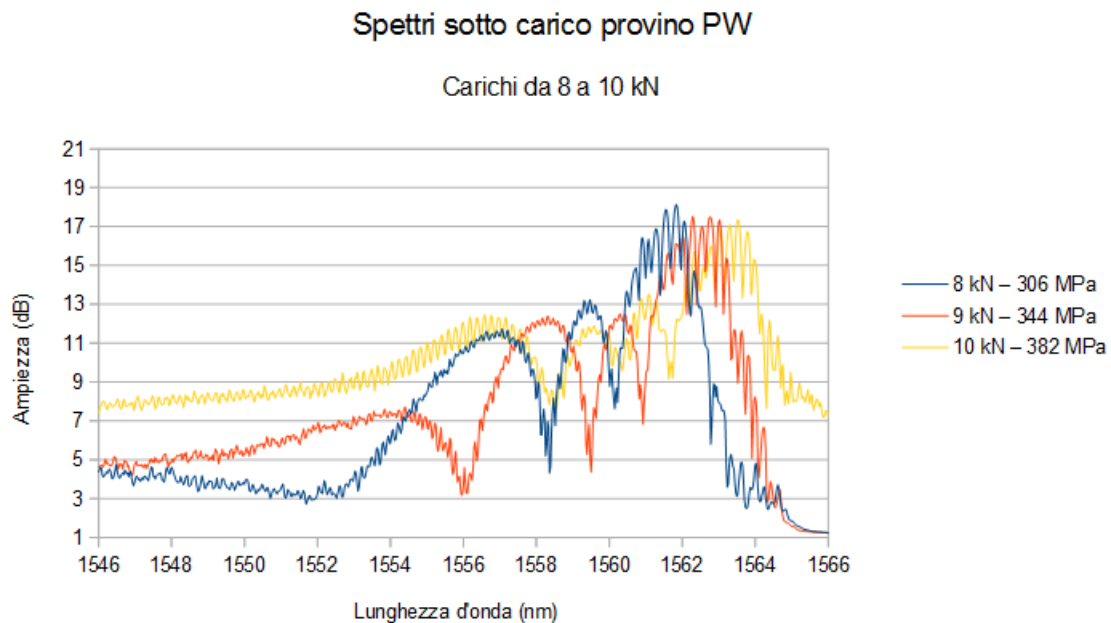


Figura 136: Spettri sotto carico del provino in PW (2)

A partire sempre da 8 kN, gli spettri cominciano a deformarsi, presentando delle particolari ondulazioni a sinistra della campana. La “sensibilità” della lunghezza d'onda di Bragg sembra non risentire di questo aspetto, ma, lo spettro, risulta sicuramente “peggiore” rispetto ai precedenti. Di fatto, a 8 kN (306 MPa), sia lo spettro a riposo, che quello sotto carico, avvertono un cambiamento.

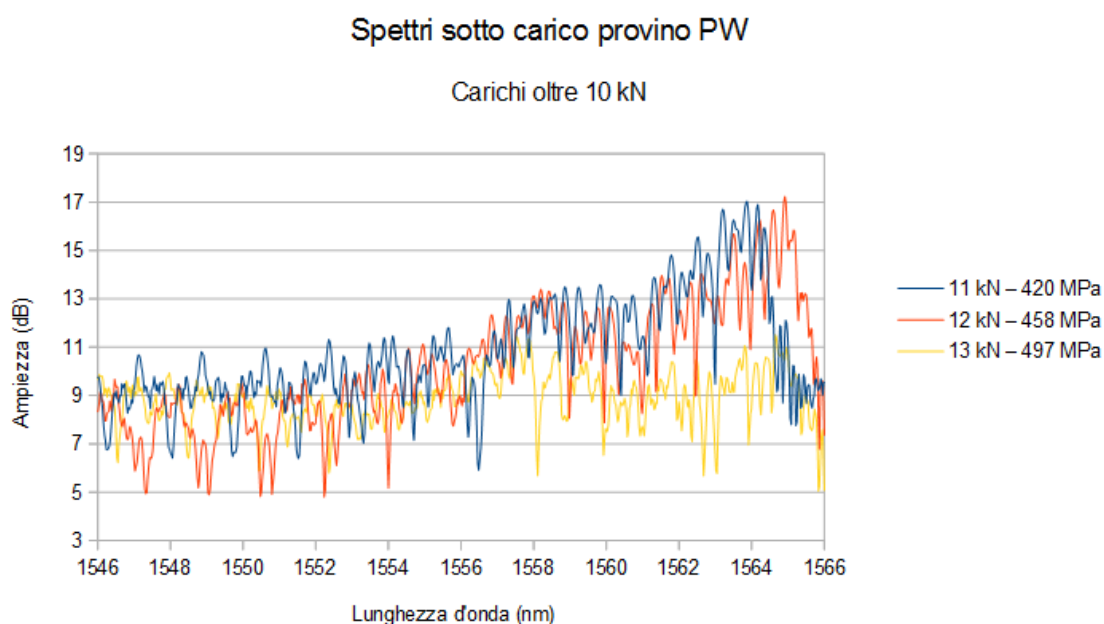


Figura 137: Spettri sotto carico del provino in PW (3)

In questo caso, proseguendo con le prove, lo spettro si compromette ancora di più, segno che la fibra ottica è quasi del tutto deteriorata. A 13 kN, ad una tensione di quasi 500 MPa, addirittura, non è quasi più distinguibile un picco; in questa situazione, anche il reticolo è talmente “in crisi”, che non c'è quasi più riflessione del segnale.

Per il provino in tessuto, si è notata, in sostanza, una leggera differenza tra gli spettri a riposo e quelli sotto carico, a livello di forma dello spettro; al di là di questo, però, in entrambe le situazioni, gli spettri hanno subito importanti distorsioni a 8 kN, corrispondenti ad una tensione di 306 MPa, pari a circa la metà del carico di rottura. Questa, risulta essere, una chiara indicazione che “qualcosa” è successo nella struttura del materiale.

Inoltre, a differenza dell'UD, qui, il deterioramento dello spettro, appare più graduale. Questa circostanza, può essere indagata, facendo riferimento alla struttura stessa del tessuto. Se nel provino in unidirezionale, il cuore del provino, è caratterizzato da 3 strati identici, a 90°, è chiaro che, quella, è la zona meno resistente di tutto il provino. Le cricche, infatti, nascono in quella zona e, lì, si propagano, fino ad arrivare all'interfaccia 0°/90°, dove è posta la fibra ottica. Una frattura che giunge sulla fibra ottica, può

spezzarla di netto o, comunque, generare degli stress che cambiano radicalmente le proprietà di riflessione della fibra stessa.

Nel caso del tessuto, le fibre a 0° e 90° si intrecciano, per tutto il volume del provino, senza distinzioni di zona; non esiste, a priori, una zona più debole. Ciò vuol dire che, l'inizio del danneggiamento, essendo locale, può avvenire in una zona lontana dalla fibra ottica; all'aumentare del carico, possono sorgere difetti in altre zone. In sostanza, dato che ogni strato del materiale resiste allo stesso modo, la fibra ottica non avrà una zona in cui trova un forte gradiente di tensione da una parte all'altra dello spessore, ma presenterà molte zone in cui le proprietà di riflessione variano leggermente; questo spiega, perché, gli spettri, da una prova all'altra, non presentano “peggioramenti” drastici.

6.8 **Risposta del sensore alla deformazione**

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = C_s \varepsilon$$

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

Monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring) di laminati CFRP tramite reticoli di Bragg in fibra ottica

Provino	Carico (kN)	Tensione (MPa)	Allungamento percentuale (%)	λ_0 (nm)	λ picco (nm)	Gage Factor	Gage Factor medio	Variazione percentuale	
UD	0	0,0	0,00	1536,32	1536,32	-	0,78	-	
	4	107,4	0,21	1536,32	1538,72	0,74	0,78	-5,1	
	5	134,3	0,27	1536,27	1539,51	0,78	0,78	0,0	
	6	161,2	0,32	1536,36	1540,13	0,77	0,78	-1,3	
	7	188,0	0,36	1536,37	1540,69	0,78	0,78	0,0	
	8	214,9	0,41	1536,38	1541,24	0,77	0,78	-1,3	
	9	241,7	0,46	1536,30	1541,93	0,79	0,78	1,3	
	10	268,6	0,51	1536,32	1542,46	0,78	0,78	0,0	
	11	295,5	0,56	1536,42	1543,34	0,82	0,78	5,1	
	12	322,3	0,61	1536,44	1543,69	0,77	0,78	-1,3	
	13	349,2	0,66	1536,40	1544,48	0,80	0,78	2,6	
	14	376,0	0,71	1536,43	1545,07	0,79	0,78	1,3	
	PW	0	0,0	0,00	1555,61	1555,61	-	0,76	-
		4	152,8	0,27	1555,57	1558,64	0,73	0,76	-3,9
5		191,0	0,32	1555,61	1559,33	0,75	0,76	-1,3	
6		229,2	0,39	1555,65	1560,13	0,74	0,76	-2,6	
7		267,4	0,45	1555,54	1560,87	0,76	0,76	0,0	
8		305,6	0,52	1555,57	1561,84	0,78	0,76	2,6	
9		343,8	0,57	1555,42	1562,29	0,77	0,76	1,3	
10		382,0	0,63	1555,54	1563,52	0,81	0,76	6,6	
11		420,2	0,69	1555,56	1563,87	0,77	0,76	1,3	
12		458,4	0,74	1555,56	1564,91	0,81	0,76	6,6	

Tabella 7: Calcolo del Gage Factor (Strain Coefficient) delle fibre ottiche

Come si può notare dalla tabella, nel caso dell'UD, il valore medio di Gage Factor è esattamente uguale al valore teorico di 0,78 mentre, per il PW, il valore medio è di 0,76. Per l'UD, la variazione percentuale rispetto al valore medio, non supera il 5,1% mentre, nel caso del PW, è leggermente superiore, ma non arriva al 7%.

I dati riportati, mostrano che, gli FBG, si comportano molto bene come estensimetri, consentendo quindi un utilizzo pratico, dove fossero più appetibili dei classici estensimetri (si rimanda al relativo capitolo per una trattazione estesa delle applicazioni).

Come controprova, è stato usato il valore medio di Gage Factor delle due fibre, per ottenere, a ritroso, l'allungamento percentuale “rilevato” dalla fibre; questo, è stato confrontato con i valori letti dall'estensimetro.

Provino	Carico (kN)	Tensione (MPa)	λ_0 (nm)	λ picco (nm)	Gage Factor medio	Allungamento percentuale da spettro (%)	Allungamento percentuale estensimetro (%)	Variazione percentuale (%)	
UD	0	0,0	1536,32	1536,32	0,78	0,00	0,00	0,00	
	4	107,4	1536,32	1538,72	0,78	0,20	0,21	-4,78	
	5	134,3	1536,27	1539,51	0,78	0,27	0,27	0,00	
	6	161,2	1536,36	1540,13	0,78	0,31	0,32	-3,13	
	7	188,0	1536,37	1540,69	0,78	0,38	0,36	0,00	
	8	214,9	1536,38	1541,24	0,78	0,41	0,41	0,00	
	9	241,7	1536,3	1541,93	0,78	0,46	0,46	0,00	
	10	268,6	1536,32	1542,46	0,78	0,51	0,51	0,00	
	11	295,5	1536,42	1543,34	0,78	0,59	0,56	5,36	
	12	322,3	1536,44	1543,69	0,78	0,60	0,61	-1,64	
	13	349,2	1536,4	1544,48	0,78	0,67	0,66	1,52	
	14	376,0	1536,43	1545,07	0,78	0,72	0,71	1,41	
	PW	0	0,0	1555,61	1555,61	0,76	0,00	0,00	0,00
		4	152,8	1555,57	1558,64	0,76	0,28	0,27	-3,70
5		191,0	1555,61	1559,33	0,76	0,31	0,32	-3,13	
6		229,2	1555,65	1560,13	0,76	0,38	0,39	-2,56	
7		267,4	1555,54	1560,87	0,76	0,45	0,45	0,00	
8		305,6	1555,57	1561,84	0,76	0,53	0,52	1,92	
9		343,8	1555,42	1562,29	0,76	0,58	0,57	1,75	
10		382,0	1555,54	1563,52	0,76	0,68	0,63	7,94	
11		420,2	1555,56	1563,87	0,76	0,70	0,69	1,45	
12		458,4	1555,56	1564,91	0,76	0,78	0,74	6,78	

Tabella 8: Calcolo dell'allungamento percentuale misurato dall'FBG

Anche questi risultati, dimostrano la validità degli FBG, considerando anche che, gli estensimetri stessi, non hanno una precisione elevatissima. Occorre però fare una precisazione: il valore di λ_0 utilizzato, come anticipato, è quello della fibra a riposo, dopo il processo di cura. Come noto, il ciclo di cura, induce delle tensioni residue nel laminato. Conoscendo il valore “reale” di λ_0 , cioè quello della fibra quando viene acquistata, si può risalire alla deformazione che genera il processo di cura.

Provino	λ_0	λ riposo media	Gage Factor medio	ϵ ciclo di cura	Tensione residua
UD	1535,09	1536,36	0,78	0,11	59,37
PW	1554,88	1555,58	0,76	0,06	29,18

Tabella 9: Tensioni residue del ciclo di cura

La relazione tra allungamento percentuale e tensione, è stata ottenuta dalla caratteristica meccanica dei provini. Come si può notare, il processo di cura è risultato poco severo per le proprietà di laminati e fibra ottica, inducendo delle tensioni residue molto basse.

6.9 Lunghezza d'onda di Bragg

Per il calcolo dello Strain Coefficient, sono state utilizzate le lunghezze d'onda di Bragg, ovvero, le lunghezze d'onda alle quali, il picco dello spettro di riflessione, raggiunge la sua ampiezza massima. Le immagini seguenti, mostrano con più chiarezza, l'andamento di questo parametro, in funzione della tensione applicata.

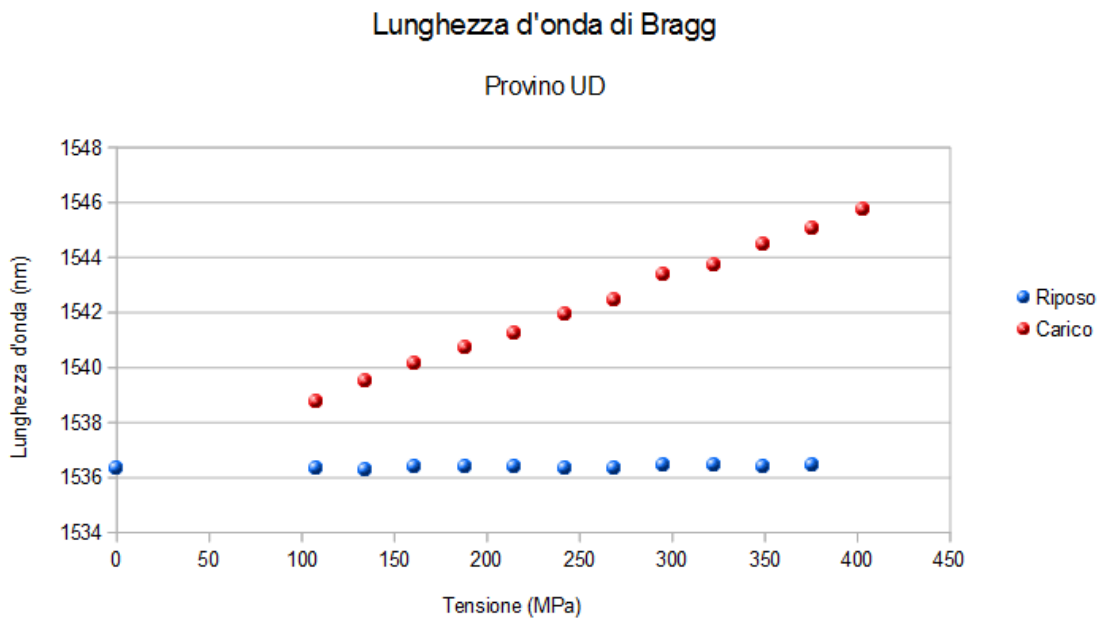


Figura 138: Lunghezza d'onda di Bragg del provino in UD

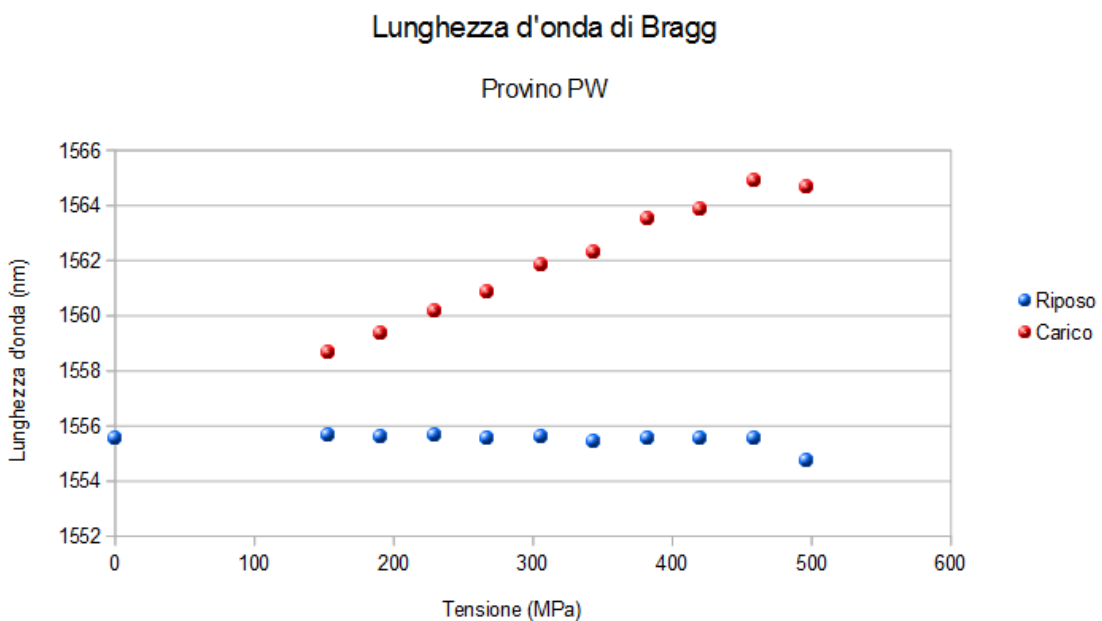


Figura 139: Lunghezza d'onda di Bragg del provino in PW

Come mostrano le immagini, tutte le curve sono quasi approssimabili a delle rette; solo le curve del PW presentano qualche punto che si discosta leggermente dalla linea di tendenza.

In Fig.140 è mostrato il confronto, in condizioni di applicazione del carico, tra le fibre ottiche dei due provini.

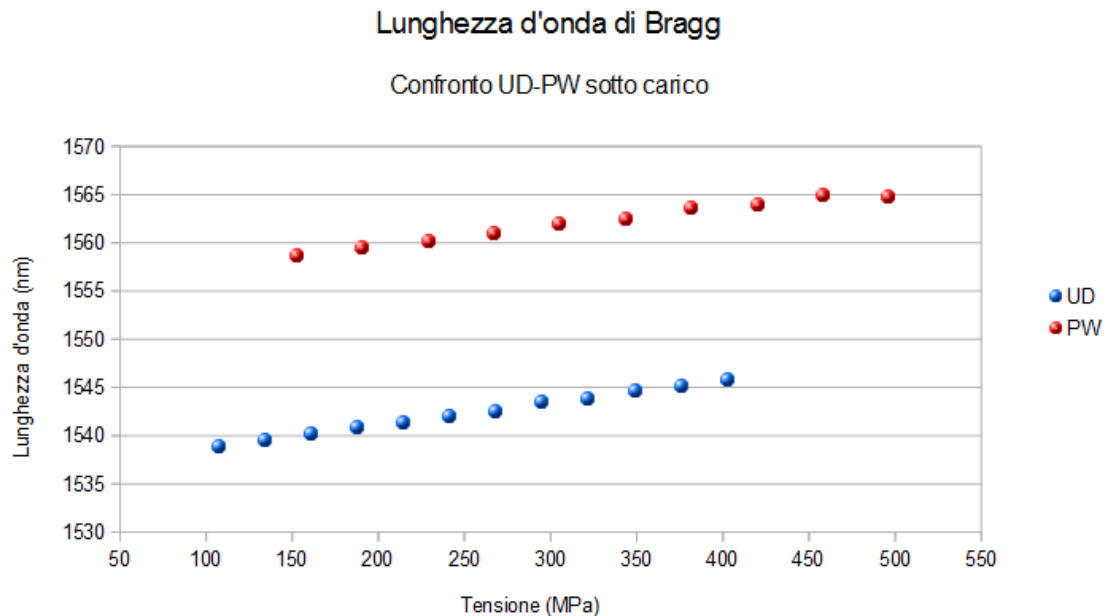


Figura 140: Confronto tra le lunghezze d'onda di Bragg sotto carico

Come già dimostrato analiticamente, col calcolo del Gage Factor, gli andamenti sono quelli che ci si attendeva.

6.10 Analisi della FWHM (Full Width at Half Maximum)

Per discutere del comportamento dei sensori FBG, i ricercatori, hanno proposto diversi parametri, con l'obiettivo di fornire indicazioni quantitative e non solo qualitative, sulle caratteristiche dello spettro e, di conseguenza, sulla struttura dei componenti. Tra le varie soluzioni proposte, risultano interessanti il calcolo dell'intensità dei picchi secondari [4] e la larghezza dello spettro a metà dell'ampiezza massima (FWHM) [2]. Il primo parametro, è stato sfruttato, principalmente, nei casi in cui si desiderava individuare e monitorare le delaminazioni, non le cricche. In alcuni studi, sono stati ottenuti spettri che presentavano due picchi singoli e

distinti tra di loro; questo consentiva un calcolo dell'intensità dei due picchi, con relative considerazioni. In questo studio, quasi nessuno spettro ha riportato forme e caratteristiche simili a quelli sopra citati; al momento della comparsa di difetti, gli spettri hanno “prodotto” una grande quantità di picchi secondari. Se si considerano, ad esempio, gli spettri sotto carico del provino in PW, si noteranno diversi picchi attorno a quello di intensità maggiore. Questo caso, può essere spiegato, con un'analogia tra i casi “bibliografici” e il presente. Negli studi precedenti a questo, si analizzavano, come anticipato, le delaminazioni in provini con struttura cross-ply; una delaminazione, non è altro che una zona, in cui avviene un distacco tra due strati orientati ortogonalmente. Ebbene, stando agli studi riportati, la presenza di una delaminazione, determinerebbe la comparsa di un picco secondario nello spettro dell'FBG, di intensità comparabile a quella del picco “principale”. Tornando al provino in PW utilizzato in questo studio, si può pensare alle zone, indicate e mostrate in precedenza, dove le fibre degli strati non erano completamente in adesione, come a delle particolari delaminazioni; con tale presupposto, si può pensare che, dato il numero di queste zone, lo spettro presenti non solo uno, ma più picchi secondari. Si tratta, comunque, di supposizioni. In sostanza, il parametro di rapporto di intensità tra i picchi dello spettro, non è stato utilizzato.

Al contrario, la FWHM, è stata utilizzata, da alcuni ricercatori, per correlare le caratteristiche geometriche dello spettro, all'entità del danno presente nel materiale. In particolare, è stata proposta una correlazione tra FWHM e densità di fratture in un provino cross-ply.

Si è deciso quindi di cercar di valutare la FWHM degli spettri ottenuti in questo lavoro.

6.10.1 FWHM degli spettri relativi al provino in UD

Stando agli studi sopra citati, ci si aspettava di poter calcolare agevolmente la FWHM, in modo da poter confrontare i dati “teorici”, con quelli ottenuti da questo studio. In realtà, il sensore, ha mostrato un comportamento totalmente diverso, rispetto a quello dell'articolo []; nello studio consultato, il sensore mostra uno spettro a campana, seppur deformato, anche quando

la densità di fratture raggiunge valori elevati. In questo caso, al contrario, lo spettro, è risultato “compromesso”, non appena sono state rilevate fratture all'interno del provino. Con un picco massimo difficilmente riconoscibile e una forma tutt'altro che a campana, è risultato quasi impossibile misurare la FWHM.

In Fig.141, comunque, sono riportati i dati ottenuti.

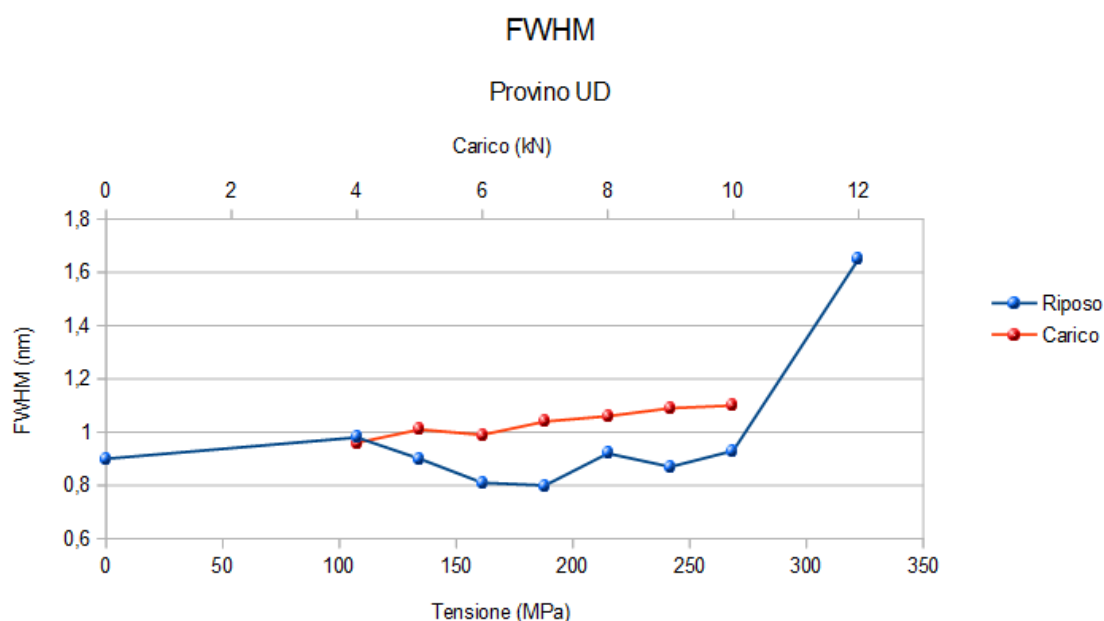


Figura 141: FWHM dello spettro relativo al provino in UD

La FWHM, a riposo, presenta valori oscillanti, attorno ad un valore di 0,9 nm, che passano poi, improvvisamente, a oltre 1,6 nm, in corrispondenza di un carico di 12 kN, ovvero in presenza di fratture all'interno del provino. Purtroppo, non è stato possibile misurare la FWHM a 11 kN, esattamente il carico al quale si presentano le prime fratture.

Sotto carico, la FWHM ha un incremento praticamente lineare, all'aumentare della tensione; le misure, però, terminano a 10 kN, perchè, come spiegato sopra, quando sono comparse le prime fratture nel materiale, non è stato più possibile calcolare la FWHM.

In Fig.142 è possibile vedere lo stesso grafico “modificato”, cioè, dopo aver eliminato alcuni dati.

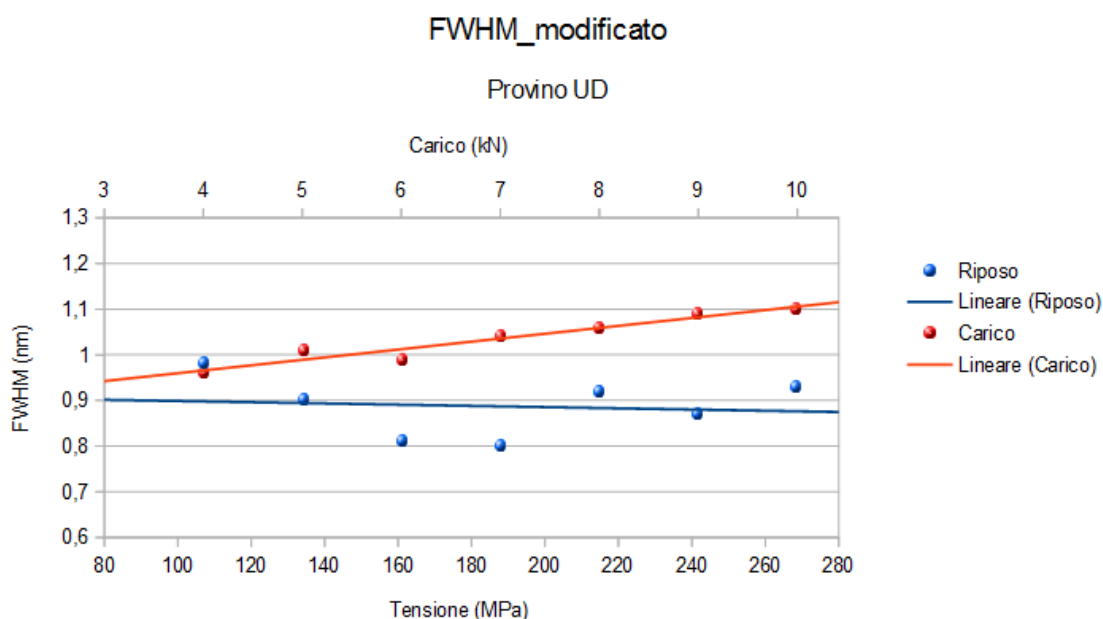


Figura 142: FWHM dello spettro relativo al provino in UD. Grafico modificato

Se si esclude il valore a riposo a 0 kN (per esclusivi motivi di visualizzazione) e il valore, sotto carico, a 12 kN, si ottiene il grafico di Fig.. Sono stati inseriti anche gli andamenti dei valori; come si poteva intuire dal grafico precedente, la FWHM a riposo, per il provino senza difetti, presenta un andamento quasi lineare, anche se i valori si discostano leggermente dal valore medio. Sotto carico invece, si riesce ad apprezzare meglio l'aumento di FWHM all'aumentare della tensione. Se si esclude il dato a 4 kN, ad ogni prova, la FWHM presenta valori diversi tra misurazioni a riposo e sotto carico, nonostante gli spettri, visivamente, risultino molto simili tra loro. Questo aspetto sarà ripreso in seguito.

6.10.2 FWHM degli spettri relativi al provino in PW

Analogamente a sopra, viene proposto il grafico della FWHM misurata per il provino in PW.

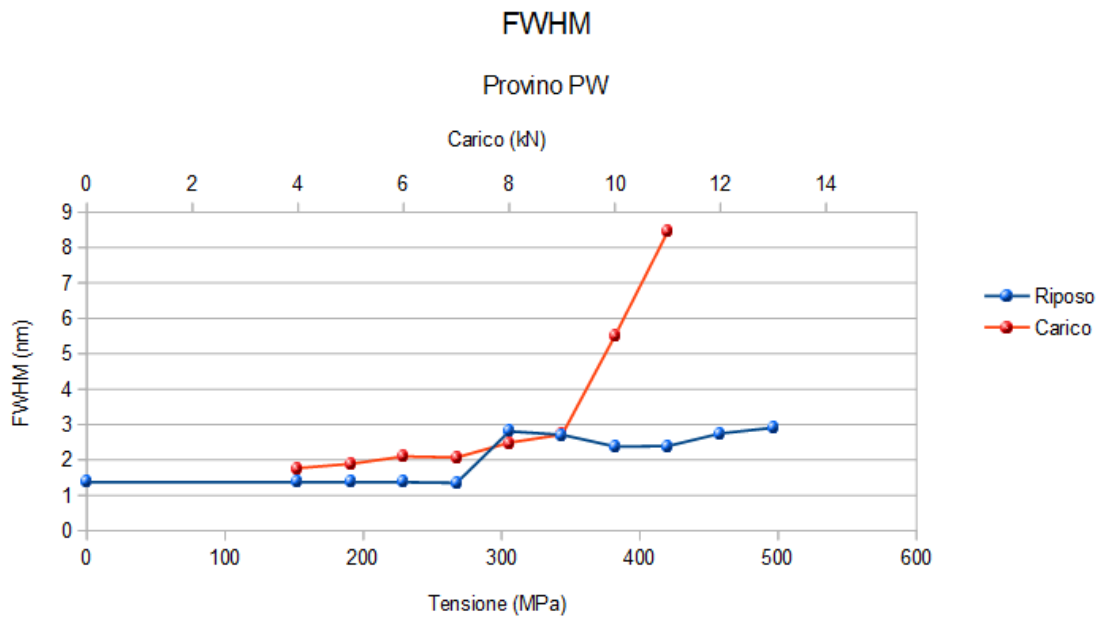


Figura 143: FWHM degli spettri relativi al provino in PW

In questo caso, si possono riscontrare andamenti leggermente differenti. Innanzitutto, è stato possibile calcolare il valore di FWHM per carichi più elevati, rispettivamente, 13 kN a riposo e 11 kN sotto carico, entrambi casi, in cui, lo spettro risulta deformato (probabile indicazione della presenza di difetti interni). La FWHM presenta un andamento analogo a quello visto per il provino in UD; aumenta all'aumentare del carico e, a partire da 8 kN (carico, per il quale, lo spettro inizia a deformarsi), presenta un aumento deciso. Riguardo alla situazione a riposo, invece, il comportamento della FWHM è particolare: fino a 7 kN, si attesta ad un valore costante, per poi compiere uno “scalino” e portarsi ad un valore, pressoché costante, più elevato.

Anche in questo caso viene proposto un grafico modificato.

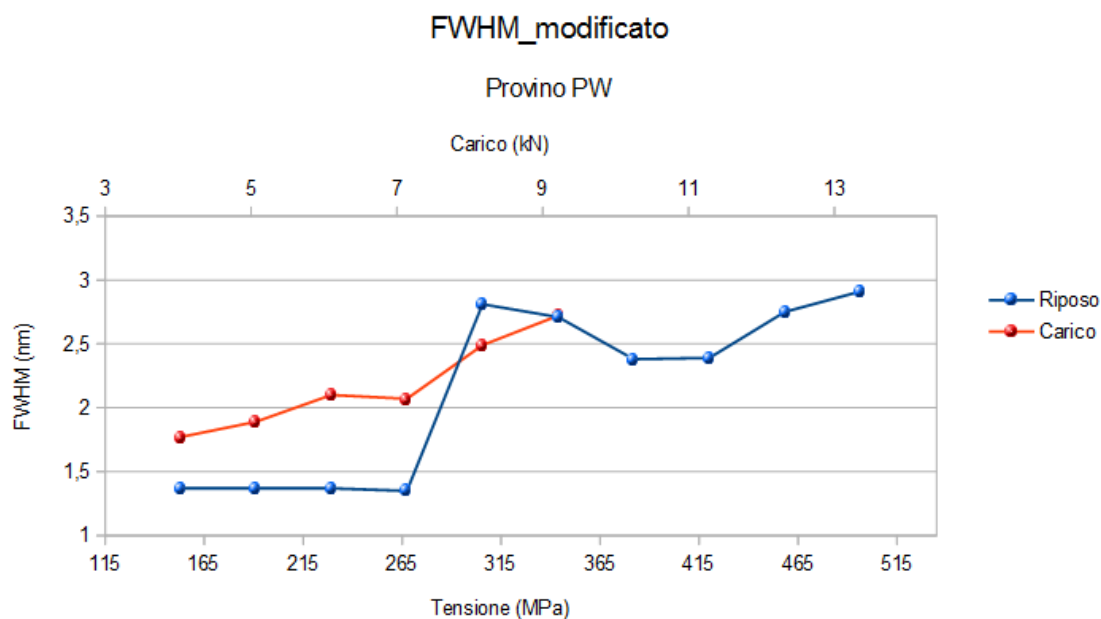


Figura 144: FWHM degli spettri relativi al provino in PW. Grafico modificato

Se si considerano, per le misure sotto carico, solo i valori fino a 9 kN, si apprezza meglio l'aumento, quasi lineare, di FWHM all'aumentare della tensione. Con una scala differente, si nota il “doppio comportamento” della FWHM in condizioni di riposo; i valori misurati, presentano due scalini distinti, caratteristici delle due situazioni riscontrate: “spettri regolari” e “spettri deformati”.

Purtroppo, per i motivi già spiegati, non è stato possibile effettuare le stesse misure, sotto carico, per il provino in UD.

Alla luce, però, delle considerazioni fatte, si può ipotizzare che, la FWHM, sia un parametro utile per individuare la presenza di difetti nella struttura dei laminati. Se si considerano i valori a riposo, finché i provini sono integri, FWHM si aggira attorno a valori costanti. Non appena compaiono difetti, il valore di FWHM subisce un cambiamento drastico; fermo restando che, per il provino in UD, non è possibile “proseguire il discorso”, visto l'andamento riscontrato per il provino in PW, si può ritenere che, i valori di FWHM si portino ad un livello superiore, in quanto lo spettro risulta deformato, a causa del danneggiamento del materiale.

L'andamento della FWHM, sotto carico, è risultato analogo per i due

provini: ha mostrato un aumento lineare all'aumentare del carico applicato, fino alla comparsa di difetti, per poi subire un aumento notevole.

Se, però, la FWHM, indica la probabile presenza di un danno, occorre fare un ragionamento ulteriore. Per entrambi i provini, la FWHM misurata sotto carico, presenta, ad eccezione dei carichi bassissimi, valori maggiori di quella misurata a riposo. Questo, porterebbe a concludere che, durante l'applicazione del carico, il sensore FBG, avverte la presenza di un danno non ancora visibile al microscopio o tramite un'analisi visiva dello spettro riflesso. Questa notevole sensibilità dell'FBG, può essere dovuta alla rimozione del rivestimento in Kapton in corrispondenza del reticolo; il Kapton, infatti, oltre a proteggere (fisicamente) il reticolo, riduce le tensioni che agiscono sulla fibra ottica.

Se la circostanza appena descritta, si rivelasse veritiera (a fronte di un numero di test maggiore), ciò aprirebbe una doppia strada, in merito allo Structural Health Monitoring. In pratica, una manutenzione effettuata su una struttura a riposo, potrebbe non essere sufficiente per rilevare la presenza di un danneggiamento interno alla struttura; ripetendo il monitoraggio sotto carico, si potrebbe scoprire la non integrità della struttura. A quel punto, risulterebbe fondamentale, decidere come monitorare la struttura, sia dal punto di vista di “cosa” si vuole vedere, sia dal punto di vista di “come” si vuole fare un controllo strutturale.

7 Conclusioni e sviluppi futuri

Alla luce dell'analisi dei risultati appena svolta, si possono trarre le conclusioni di questo lavoro.

Riguardo al provino in UD, l'analisi al microscopio, è sicuramente semplice, il che consente, di correlare facilmente, il danneggiamento del materiale alla risposta del sensore FBG; in questo caso, il sensore, non si è comportato come previsto, mostrando una (quasi certa) rottura della fibra ottica, inaspettata, impedendo misurazioni quantitative sullo spettro, dopo tale evento. La presenza, però, di cricche, contemporaneamente alla distorsione dello spettro, lascia immaginare che, quest'ultima, non sia stata casuale, ma provocata dalle cricche sviluppatesi nel cuore del provino. L'indicazione fornita dal sensore, perciò, sembra essere prettamente qualitativa: fino ad una determinata tensione, il materiale è integro, oltre questa tensione, è danneggiato.

Al contempo, il sensore, continua a percepire l'applicazione del carico, misurando correttamente la lunghezza d'onda di Bragg; anche se il laminato è danneggiato, si possono, quindi, ottenere informazioni relative alla tensione che sopporta e alla deformazione che subisce; il calcolo dello Strain Coefficient, ha confermato questa proprietà.

La FWHM, infine, si è dimostrata un parametro valutabile in modo duplice: se, da un lato, a causa della forma dello spettro, oltre a un certo carico, non è stato possibile calcolarne un valore, dall'altro, ha mostrato un comportamento diverso, a riposo e sotto carico. Come già affermato, ciò può portare ad un diverso utilizzo del sensore FBG, in ottica di SHM.

Anche l'analisi del provino in PW ha mostrato aspetti positivi e negativi. Innanzitutto, dall'analisi al microscopio, non è stato possibile correlare la struttura del materiale, alla tensione applicata, in mancanza di difetti evidenti o quantificabili. A questo punto, bisogna affidarsi all'analisi dello spettro riflesso dall'FBG, per valutare il danno interno al laminato. Gli spettri ottenuti, hanno mostrato un comportamento diverso da quello degli spettri precedenti: in questo caso, la deformazione dello spettro, iniziata ad un valore di tensione pressoché identico per i due casi (pari a circa il 50%

del carico di rottura), è stata più graduale. Non c'è stato un evento “catastrofico” che ha danneggiato irrimediabilmente la fibra, compromettendo la lettura dello spettro, ma, il danno interno al materiale, deve aver agito in maniera distribuita su tutta la fibra ottica. Ad ogni modo, alla tensione già indicata, anche lo spettro a riposo è risultato modificato, chiaro segnale che la struttura del materiale ha subito una modifica permanente. Queste considerazioni possono essere avvallate dalla struttura particolare del plain weave, che non favorisce la creazione di difetti evidenti e localizzati, come accade, invece per una stratificazione cross-ply in unidirezionale.

Anche in questo caso, il sensore FBG, si è comportato come un buon estensimetro, continuando a leggere, correttamente, la lunghezza d'onda di Bragg, all'aumentare del carico. Le variazioni percentuali di Gage Factor e di deformazioni lette dall'FBG, rispetto all'estensimetro, sono contenute entro il 7%.

L'analisi della FWHM ha, per il PW, mostrato risultati interessanti. Per i valori misurati sotto carico, le considerazioni sono analoghe a quelle fatte per l'UD: FWHM aumenta all'aumentare della tensione. In questo caso, essendo state possibili misure per più carichi, si nota, anche, un aumento notevole di FWHM per elevate tensioni. La FWHM a riposo, presenta due scalini distinti, rispettivamente, prima e dopo, il valore di tensione per il quale si nota una deformazione dello spettro. Questi due andamenti, permettono valutazioni sia qualitative che quantitative del danneggiamento del materiale.

Passando a considerazioni di carattere generale, lo Structural Health Monitoring, è un campo di ricerca innovativo, che si sta sviluppando, con crescente interesse, da circa vent'anni; per i “tempi della meccanica”, si tratta, quindi, di un'area di studio veramente giovane. La ricerca bibliografica svolta, ha confermato questo dato; esistono molti lavori indirizzati all'utilizzo di sensori FBG per le problematiche dello SHM ma, la complessità e la varietà di caratteristiche che offrono, nello specifico, i compositi, fanno sì che rimangano ancora inesplorate vastissime aree di studio. Il difetto principale, degli studi analizzati, è risultato, inevitabilmente, la specificità degli stessi; vale a dire che, le considerazioni

che si possono fare su un determinato caso, non sempre, possono essere trasferite ad altre situazioni. Se da un lato, ad esempio, prove di trazione e prove di flessione, possono essere considerate analoghe, a seconda del tipo di tensione che provocano in determinate zone del laminato, la stessa cosa, non è valida per le proprietà dei compositi. Uno degli aspetti fondamentali, da tenere presente, se si vogliono affrontare studi di SHM su compositi, è la forte dipendenza delle proprietà meccaniche del materiale, dalle fibre di rinforzo utilizzate, dal loro orientamento, dal tipo di matrice, dal tipo di stratificazione. L'anisotropia dei materiali in composito, determina una grande incertezza, prima di tutto, sul comportamento del materiale e, in secondo luogo, sul comportamento dei reticoli di Bragg. Appare chiara, in sostanza, la necessità di riferirsi a casi già affrontati, per verificare, innanzitutto, se si ottengono risultati simili o, quantomeno, comparabili; questa tesi ha previsto questa necessità, come principio cardine. Tra gli articoli reperiti in bibliografia, solo una decina, sono stati ritenuti realmente vicini all'idea, che si aveva, di SHM, applicabile alla problematica proposta da Riba Composites. Tra questi, ogni articolo, presentava situazioni di carico diverse, materiali differenti, tipologie di danni da individuare e modalità di monitoraggio differenti. Una parte cospicua del lavoro, è stata la scelta del tipo di lavoro da svolgere, in termini, appunto, di materiali, carichi, ecc, sempre in ottica del raggiungimento dell'obiettivo finale.

Un altro aspetto da considerare, è la scelta del tipo di fibre ottiche da utilizzare; la selezione, deve essere effettuata, soprattutto, in base alle caratteristiche del materiale in cui, la fibra, dovrà essere inserita. Innanzitutto è necessario che, la fibra, non costituisca un indebolimento per il componente; secondariamente, la fibra, deve essere scelta in modo che abbia l'adeguata sensibilità, in relazione a cosa si vuole misurare e alla precisione che si vuole ottenere. Fortunatamente, i lavori già svolti dall'Università, hanno velocizzato questa parte di lavoro.

Sempre grazie alle tesi precedenti, era già stata acquisita, un certa manualità nell'utilizzo delle fibre ottiche; queste, infatti, sono oggetti molto delicati e, spesso, a causa del ridotto spessore, addirittura difficili da vedere. E' fondamentale maneggiare le fibre ottiche con la massima attenzione, per evitare rotture improvvise. Questo aspetto, probabilmente,

potrebbe rivelarsi molto delicato, se esportato in una realtà aziendale: se in un laboratorio universitario, possono esserci due persone che lavorano assieme con una fibra ottica, “controllandosi” a vicenda e lavorando con calma, in un ambiente lavorativo, questo, è applicabile fino a un certo punto. La realizzazione di componenti con fibre ottiche all'interno, è un'operazione che richiede molto più tempo della stessa lavorazione, senza fibre ottiche. Chiaramente, questo incide sulla produttività e, di conseguenza sul prezzo del componente. Risulta banale, la necessità di utilizzare, questo sistema di monitoraggio, solo su strutture dal costo elevato, in modo da ammortizzare il costo delle fibre ottiche (e dell'eventuale acquisto di un interrogatore, quello utilizzato in questo studio ha un prezzo che si aggira intorno ai 30 – 40000 €).

Riguardo a sviluppi futuri, appare chiara, innanzitutto, la necessità di proseguire i test già effettuati, per osservare il comportamento di altri sensori. Il numero di FBG utilizzato in questa tesi era limitato, a causa dell'elevato costo; si consideri che, una singola fibra ottica, con reticolo FBG, ha un costo superiore ai 200 €.

Inoltre, non è stato possibile utilizzare due fibre ottiche con reticolo chirped, sulle quali, sarebbero stati portati avanti test, con finalità differenti. I reticoli chirped, infatti, sembra siano in grado di individuare la localizzazione di un difetto nella struttura del materiale; si tratta, sicuramente, di una proprietà di notevole interesse, da studiare, senza alcun dubbio.

Quello che rimane di questa tesi, è un lavoro pionieristico, in un campo della meccanica di recentissimo sviluppo. Si consideri che, nella vastissima bibliografia consultata, solamente qualche ricerca, presentava caratteristiche analoghe allo studio effettuato sul provino in UD, mentre, non è stato trovato nessun studio su un materiale PW.

I risultati sono incoraggianti: non resta ora che, proseguire, con fiducia, nel lavoro.

8 **Riferimenti**

- [1] Y.J. Rao. Recent progress in application of in-fibre Bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering* 31 (1999)
- [2] Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka, N. Takeda. Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors. *Smart Mater. Struct.* 9 (2000)
- [3] Y. Okabe, R. Tsuji, N. Takeda. Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites. *Composites: Part A* 35 (2004)
- [4] S. Takeda, Y. Okabe, N. Takeda. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors. *Composites: Part A* 33 (2002)
- [5] S. Takeda, Y. Okabe, T. Yamamoto, N. Takeda. Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small-diameter FBG sensors. *Composites Science and Technology* 63 (2003)
- [6] S. Takeda, S. Minakuchi, Y. Okabe, N. Takeda. Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors. *Composites: Part A* 36 (2005)
- [7] Stefano Chiozzini. Sviluppo di un sistema di monitoraggio dello stato di deformazione di un albero da imbarcazione in materiale composito tramite Reticoli di Bragg in fibra ottica. Tesi di Laurea.
- [8] Amina Frozzi. Applicazione di reticoli di Bragg per il monitoraggio della deformazione di strutture in materiali compositi prodotti tramite la tecnologia in autoclave. Tesi di Laurea.

- [9] Raman Kashyap. Fiber Bragg Gratings.
- [10] KSC Kuang and WJ Cantwell. Use of conventional optical fibers and fiber Bragg gratings for damage detection in advanced composite structures: A review.
- [11] Yun-Jiang Rao. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas.Sci. Technol.* 8 (1997)
- [12] L.Zhang, W.Zhang, I.Bennon. In-fiber grating optic sensors.
- [13] R.P.Beukema. Embedding Technologis of FBG sensors in composites: Technologies, applications and practical use. *6th European workshop on Structural Health Monitroing.*
- [14] I.McKenzie, R.Jones, I.H.Marshall, S.Galea. Optical fibre sensors for health monitoring of bonded repair systems. *Composite Structures* 50 (2000)
- [15] D.R.Hjelme, L.Bjerkan, S.Neegard, J.S.Rambech, and J.V. Aarsnes. Aplication of Bragg grating sensors in the characterization of scaled marine vehicle models.
- [16] C.Y. Wei, S.W.James, C.C. Ye, N.D.Dykes, R.P.Tatam, and P.E.Irving. Strain capability of optical fibreBragg grating sensing in composite smart structures.
- [17] V.M.Murukeshan, P.Y.Chan, Lin Seng Ong, and A.Asundi. Intracore fiber Bragg gratings for strain measurement in embedded composite structures.
- [18] K.S.C. Kuang, R.Kenny, M.P. Whelan, W.J. Cantwell and P.R. Calker. Residual strain measurement and impact response of optical fibre Bragg grating sensors in fibre metal laminates. *Smart. Mater. Struct.* 10 (2001)

- [19] K.Wood, T.Brown, R.Rogowski and B.Jensen. Fiber optic sensors for health monitoring of morphing airframes: I.Bragg grating strain and temperature sensor. *Smart. Mater. Struct.* 9 (2000)
- [20] W.Du, X.M.Tao, H.Y. Tam, C.L.CHoy. Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites. *Composite Structures* 42 (1998)
- [21] K.S.C.Kuang, R.Kenny, M.P. Whelan, W.J. Cantwell, P.R.Chalker. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials. *Composites science and technology* 61 (2001)
- [22] E.Bocherens, S.Boueasseau, V.Dewynter-Marty, S.Py, M.Dupont, P.Ferdinand and H.Berger. Damage detection in a radome sandwich material with embedded fiber optic sensors. *Smart.Mater.Struct.* 9 (2000)
- [23] S.Mall, S.B.Dosedel, M.W.Holl. The performance of graphite-epoxy composite with embedded optical fibers under compression. *Smart.Mater.Struct.* 5 (1996)
- [24] N.Takeda, S.Minakuchi. Recent development of structural health monitoring technologies for aircraft composite structures in Japan.
- [25] J.Canning, M.Stevenson. Investigation of embedded near infrared fibre Bragg grating (FBG) sensors (830 nm) in structural health monitoring of glass fibre composite structures.
- [26] B.Moslehi, R.J.Black, F.Faridian. Multifunctional fiber Bragg grating system for load monitoring of composite wings.
- [27] H.C.H.Li, I.Herszberg, A.P.Mouritz, C.E. Davis, S.C. Galea. Sensitivity of embedded fibre optic Bragg grating sensors to disbond in bonded composite ship joints. *Composite structures* 66 (2004)

[28] J.Silva, T.C. Devezas, A.P.Silva, J.A.M.Ferreira. Mechanical characterization of composites with embedded optical fibers. *Journal of composite materials* (2005)

[29] S.Yashiro, N.Takeda, T.Okabe, H.Sekine. A new approach to predicting multiple damage states in composite laminates with embedded FBG sensors. *Composite science and technology* 65 (2005)

[30] www.wikipedia.it

[31] www.ribacomposites.it

9 **Ringraziamenti**

E così, siamo alla fine di tutto...Avrei potuto semplificarci la vita, facendo come per la tesi triennale, in cui, la sezione "ringraziamenti" non c'era proprio. D'altronde, chi devo ringraziare? Qualcuno è venuto in 5 anni a dare un esame al posto mio? Ovviamente scherzo.

Ma rimaniamo per un attimo seri. Perciò, ringrazio: il professor Donati, per avermi proposto questa tesi interessante e per il sostegno (a volte morale, anche se via mail) durante questi mesi; la professoressa Di Sante, per essere stata un riferimento e aver indirizzato spesso il lavoro; Enrico Dolcini, ancora una volta per il tirocinio presso Riba, per aver creduto (non ultimo, "economicamente") nel lavoro che abbiamo fatto e per il tempo che mi ha dedicato, quando c'erano da tirare le somme di tutto quanto; l'immenso Paolo Proli, col quale sono stato a contatto giornate intere: la sua disponibilità, le sue conoscenze e lo spirito d'aiuto che ha mostrato, non lo scorderò facilmente; Filippo Bastianini, per averci fornito gran parte del materiale e per il supporto "tecnico", insieme a Davide Bicchecchi, che ha svolto parte del "lavoro sporco" per darci una mano.

Non nascondo che è stata una tesi molto sofferta, piena di problematiche e strapiena di sfortune, ma grazie all'apporto di tutte queste persone, alla fine ce l'abbiamo fatta e speriamo sia andata bene!

Il pensiero ora va a questi 5 anni; se avessi un libro a disposizione, inizierebbe qui il capitolo "riflessioni". Sono stati 5 anni, tutto sommato tranquilli: dopo tanti anni passati sui banchi, il mondo dell'università, fortunatamente, non mi ha colto di sorpresa e, vuoi per caso, vuoi per mie capacità, è filato tutto liscio. Ho il grande onore e orgoglio di poter dire che concludo gli studi in corso, come pochissimi altri miei compagni, con cui ho stretto una bella amicizia, che va al di là di un corso condiviso; al voto non guardo, perché non mi sono mai voluto privare dei miei spazi, per qualche voto in più. Mi sono sempre impegnato, cercando di ottenere il massimo, continuando a vivere la mia vita normale, anzi, antepoendo spesso il piacere al dovere. E credo sia giusto così. Siamo giovani, c'è sempre tempo per preoccuparsi delle responsabilità.

Che dire? Non so cosa ha in serbo per me il futuro, sono curioso di scoprirlo ma anche impaurito. E sono curioso, ancor di più, di scoprire cosa voglio io dal mio futuro.

In tutto questo, come scordare le persone che mi stanno intorno? La mia famiglia, i miei amici...Forse, poche volte, ho veramente avuto bisogno di loro, sono testardo e, spesso, preferisco fallire, più che accettare un aiuto. Ma so che loro ci sono, e ci saranno sempre. Allora non posso fare altro che ringraziarli di cuore, per quello che fanno, ma, soprattutto, per qualsiasi cosa sarebbero disposti a fare per me.

Grazie a tutti, è stato bello.

Michael Argelli