

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Aeronautica



**MONITORAGGIO DELLA FORATURA DI MANUFATTI IN  
COMPOSITO MEDIANTE SENSORI A FIBRA OTTICA**

Relatore: Prof. Luca Angelo DI LANDRO

Co-relatore: Ing. Luca CASTELNOVO

Tesi di Laurea di:

Alessandro BERETTA Matr. 770936

Anno Accademico 2011 – 2012



# Indice

Indice.....	I
Indice delle figure .....	IV
Indice delle tabelle .....	VI
Sommario .....	VII
Abstract .....	VII
1. Introduzione .....	1
2. Tecnologia RTM.....	5
2.1 Generalità .....	5
2.2 Fasi del processo RTM.....	6
2.3 Caratteristiche del processo.....	7
2.4 Legge di Darcy e permeabilità .....	8
2.5 Difetti di produzione .....	9
3. Fibre ottiche e sensori FBG.....	13
3.1 Generalità .....	13
3.2 Struttura.....	13
3.3 Principio di funzionamento .....	14
3.4 Sensori FBG .....	15
3.5 Sistema di acquisizione .....	18
4. Produzione in RTM.....	21
4.1 Stampo e sistema d'infusione.....	21
4.2 Prova di viscosità resina LY564 .....	23
4.3 Prima infusione .....	25
4.4 Seconda infusione .....	27
4.5 Prima infusione con inglobamento di sensori FBG .....	29
4.4.1 Analisi del segnale ottico .....	30
4.4.2 Valutazione qualità prodotto finito .....	32
5. Materiali ibridi .....	33
5.1 Generalità .....	33
5.2 Prima infusione ibridi con inglobamento di sensori FBG.....	35

5.2.1	Analisi del segnale ottico.....	37
5.3	Seconda infusione ibridi con inglobamento di sensori FBG .....	40
5.3.1	Analisi del segnale ottico.....	41
5.4	Primo incollaggio ibridi.....	43
5.4.1	Monitoraggio dell'incollaggio .....	44
5.5	Secondo incollaggio ibridi.....	45
6.	Foratura Carbonio.....	47
6.1	Foratura di composito con rinforzo in fibra di carbonio.....	47
6.1.1	Caratteristiche di lavorazione .....	47
6.1.2	Delaminazione .....	48
6.1.3	Schematizzazione del fenomeno.....	50
6.1.4	Parametri di controllo .....	51
6.2	Prima foratura CFRP .....	54
6.2.1	Dati provini.....	54
6.2.2	Strumenti di lavoro .....	54
6.2.3	Caratteristiche di lavorazione .....	55
6.2.4	Primo provino .....	57
6.2.5	Secondo provino .....	61
6.2.6	Terzo provino.....	66
6.3	Seconda foratura CFRP .....	69
6.3.1	Dati provini.....	69
6.3.2	Strumenti di lavoro .....	69
6.3.3	Caratteristiche di lavorazione .....	69
6.2.4	Analisi dei risultati.....	70
6.4	Depurazione del segnale dal contributo termico .....	75
6.4.1	Prova in camera ambientale.....	75
6.4.2	Elaborazione del segnale .....	76
7.	Foratura FML.....	83
7.1	Teoria.....	83
7.2	Prima foratura ibrido.....	84
7.2.1	Dati provini .....	84

7.2.2 Strumenti di lavoro.....	84
7.2.3 Caratteristiche di lavorazione.....	84
7.2.4 Analisi dei risultati.....	86
7.3 Seconda foratura ibrido.....	89
7.3.1 Dati provini.....	89
7.3.2 Strumenti di lavoro.....	90
7.3.3 Caratteristiche di lavorazione.....	90
7.3.4 Analisi dei risultati.....	91
7.4 Terza foratura ibrido.....	95
7.4.1 Dati provini.....	95
7.4.2 Strumenti di lavoro.....	95
7.4.3 Caratteristiche di lavorazione.....	95
7.4.4 Analisi dei risultati.....	96
8. Conclusioni.....	103
Bibliografia.....	109

## Indice delle figure

Figura 1. Esempio di componente aeronautico realizzato in RTM. ....	5
Figura 2. Flusso della resina con punti d'iniezione differenti. ....	8
Figura 3. Possibile causa di presenza di zone non impregnate. ....	10
Figura 4. Formazione di una bolla. ....	11
Figura 5. Struttura di una fibra ottica. ....	14
Figura 6. Riflessione totale. ....	15
Figura 7. Principio di funzionamento del sensore FBG. ....	16
Figura 8. Variazione del segnale alla modalità di deformazione. ....	17
Figura 9. Schema del sistema di acquisizione. ....	18
Figura 10. Sorgente-interrogatore <i>OTTOLIGHT</i> . ....	18
Figura 11. Stampo e controstampo in alluminio. ....	21
Figura 12. Particolare interno ed esterno dell'ingresso delle fibre ottiche nello stampo. ....	22
Figura 13. Schema di funzionamento del reometro. ....	23
Figura 14. Interpolazione dei valori di viscosità e individuazione del tempo di reticolazione. ....	24
Figura 15. Disposizione tessuto di Carbonio nello stampo. ....	25
Figura 16. Analisi al microscopio ottico dell'interno e del bordo. ....	26
Figura 17. Analisi al SEM dell'interno e ingrandimento di una zona con una microbolla. ....	26
Figura 18. Analisi al microscopio ottico di due difetti. ....	28
Figura 19. Analisi al SEM dell'interno e ingrandimento di un difetto. ....	28
Figura 20. Immagine radiografica del provino. ....	29
Figura 21. Segnale ottico dei due sensori registrato nella fase d'infusione. ....	30
Figura 22. Segnale ottico dei due sensori registrato nella fase di reticolazione. ....	31
Figura 23. Immagini al microscopio ottico dell'interno del pezzo. ....	32
Figura 24. Utilizzo del <i>GLARE</i> nella fusoliera dell' <i>Airbus A380</i> . ....	33
Figura 25. Confronto comportamento statico dei componenti. ....	34
Figura 26. Struttura di un FML. ....	34
Figura 27. Posizione FBG nell'ibrido a "sandwich". ....	35
Figura 28. Disposizione fibra sulla lamina in lega di alluminio precedentemente sabbiata. ....	36
Figura 29. Sezione del "sandwich" ibrido e presenza di percorsi preferenziali. ....	37
Figura 30. Segnale ottico dei due sensori durante l'infusione. ....	37
Figura 31. Segnale ottico dei due sensori durante la reticolazione. ....	38
Figura 32. Provino ibrido realizzato in RTM. ....	39
Figura 33. Segnale ottico dei due sensori durante l'infusione. ....	41
Figura 34. Segnale ottico dei due sensori durante la reticolazione. ....	42
Figura 35. Realizzazione ibrido tramite incollaggio. ....	44
Figura 36. Disposizione all'interno della pressa a piani riscaldati. ....	44

Figura 37. Segnale ottico proveniente dai due sensori.....	45
Figura 38. Differenza fra buona qualità del foro e presenza di delaminazioni. ..	49
Figura 39. Delaminazione <i>peel-up</i> (a sinistra) e delaminazione <i>push-out</i> (a destra).....	50
Figura 40. Schematizzazione del <i>push-out</i> .....	51
Figura 41. Effetto della velocità di avanzamento. ....	52
Figura 42. Effetto della velocità di taglio.....	52
Figura 43. Effetto del raggio di curvatura sul raggio di delaminazione.....	53
Figura 44. Effetto del raggio di foratura sull'inizio della delaminazione. ....	54
Figura 45. Cella di carico e centro di lavorazione <i>CNC Kern EVO</i> .....	55
Figura 46. Punta utilizzata.....	56
Figura 47. Schema del sistema di lavorazione e acquisizione. ....	56
Figura 48. Numerazione dei fori e sistema di riferimento. ....	57
Figura 49: Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del primo provino. ....	58
Figura 50. Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori. ....	59
Figura 51. Segnale ottico dei fori 2, 9 e 12. ....	60
Figura 52. Segnale della cella di carico. ....	61
Figura 53. Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del secondo provino.....	62
Figura 54. Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.....	63
Figura 55. Segnale ottico dei fori 1 e 8. ....	64
Figura 56. Segnale ottico dei fori 5 e 6.....	65
Figura 57. Segnale della cella di carico. ....	65
Figura 58. Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del terzo provino.....	66
Figura 59. Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.....	67
Figura 60. Segnale ottico dei fori 3 e 4. ....	68
Figura 61. Segnale della cella di carico. ....	68
Figura 62: Analisi al microscopio di una punta nuova e una usurata. ....	70
Figura 63. Disposizione fori.....	70
Figura 64. Massimi di forza per ogni foro per una punta nuova (nero) e una usurata (rosso).....	71
Figura 65. Segnale di forza con l'utilizzo di una punta nuova (NEW). ....	72
Figura 66. Segnale di forza con l'utilizzo di una punta usurata (US).....	72
Figura 67. Filtraggio utilizzato.....	73
Figura 68. Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.....	74
Figura 69. Segnale ottico dei fori 11 e 12.....	74
Figura 70. Segnale ottico dei fori 13 e 14.....	75
Figura 71. Temperatura e segnale ottico durante la prova in camera ambientale. ....	76
Figura 72. Sequenza di immagini della termocamera durante un foro. ....	77
Figura 73. Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 1, 3, 6 e 8.....	79
Figura 74. Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 5, 6 e 8.....	80

Figura 75. Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 3 e 5.....	81
Figura 76. Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 14 e 17.....	82
Figura 77. Punta utilizzata. ....	85
Figura 78. Disposizione fori .....	85
Figura 79. Confronto tridimensionale del segnale ottico di ciascun foro.....	86
Figura 80. Segnale ottico dei fori 1 e 2.....	87
Figura 81. Segnale ottico dei fori 5 e 6.....	88
Figura 82. Segnale ottico del foro 9.....	88
Figura 83. Segnale ottico dei fori 13 e 14.....	89
Figura 84. Disposizione fori. ....	91
Figura 85: Segnale ottico dei fori 3 e 4.....	92
Figura 86: Segnale ottico dei fori dal 5 al 10.....	93
Figura 87: Segnale ottico dei fori 24 e 23.....	93
Figura 88: Segnale ottico dei fori 20, 19, 18 e 17.....	94
Figura 89. Disposizione fori .....	95
Figura 90. Confronto del segnale di forza utilizzando diversa punta .....	97
Figura 91. Confronto del segnale di forza raddoppiando la velocità di avanzamento e utilizzando una punta nuova .....	97
Figura 92. Confronto del segnale di forza raddoppiando la velocità di avanzamento e utilizzando una punta usurata .....	98
Figura 93. Segnale di forza registrato durante uno scollamento .....	98
Figura 94. Segnale ottico registrato dai due sensori per i fori 4 e 5, in cui non avviene scollamento.....	99
Figura 95. Segnale ottico registrato dai due sensori per i fori 12, 13, 16 e 17 quando avviene scollamento.....	100
Figura 96. Confronto fra i segnali ottici e i segnali di forza per i fori 4 e 5, in cui non avviene scollamento.....	101
Figura 97. Confronto fra i segnali ottici e i segnali di forza per i fori 13 e 16, in cui avviene scollamento.....	102

## Indice delle tabelle

Tabella 1. Proprietà meccaniche di alcune leghe metalliche e alcune fibre di rinforzo. ....	1
Tabella 2. Dati dei provini e di lavorazione. ....	57
Tabella 3: Parametri di lavorazione .....	85
Tabella 4. Tempi di foratura. ....	87
Tabella 5. Parametri di lavorazione .....	90
Tabella 6. Tabella di foratura.....	91
Tabella 5. Parametri di lavorazione. ....	96



## Sommario

In questo lavoro si affronta il monitoraggio, tramite sensori a fibra ottica, della foratura di manufatti in composito (con fibra in carbonio) e ibridi (CFRP/Lega-Al) per evidenziare condizioni di danneggiamento che possono nascere in questa fase. In particolare si vuole valutare se questo sistema di controllo possa essere in grado di valutare condizioni critiche di lavorazione durante l'operazione stessa e intervenire in tempo reale. Lo studio si è sviluppato in una prima fase con la produzione di componenti in composito, con rinforzo in fibra di carbonio e matrice epossidica, tramite tecnologia RTM e di componenti ibridi realizzati sia tramite incollaggio che tramite RTM. La direzione intrapresa è stata quella di ottimizzare il processo d'infusione, al fine di garantire la minore presenza di difetti nei prodotti finiti; inoltre sono stati affrontati i problemi d'inglobamento dei sensori a fibra ottica nonché le tecniche di individuazione della fibra ottica tramite radiografia o analisi termica. Nella seconda fase, si è quindi proceduto alla foratura dei manufatti prodotti (variando i parametri di lavorazione), monitorata tramite sensori a fibra ottica, e alla successiva analisi ed elaborazione del segnale ottico registrato e il confronto con il segnale proveniente da una cella di carico.

**Parole chiave:** Composito, Carbonio, Ibrido, RTM, Foratura, Sensore FBG

## Abstract

In this paperwork the monitoring of the drilling process of CFRP and Al/composite hybrid laminates was investigated using fiber optic's sensors in order to detect possible damage conditions that may occur in this phase. Specifically it was evaluated if this type of sensor is able to identify critical conditions during drilling and intervenes in real time. This study has been developed in a first phase with the manufacturing of carbon fiber/epoxy matrix components using RTM process and with the manufacturing of hybrid components through RTM and bonding. In this phase, the optimization of infusion's process, in order to ensure the least amount of defects in the components manufactured was ensued; furthermore the problems related to fiber optics insertion and to their individuation within laminates through X-ray and thermal analysis were addressed.

In the second phase of this work, the monitoring of drilling of manufactured components with varying process parameters and the study of the registered signal was investigated and discussed.

**Keywords:** Carbon Fiber Composite, FML, RTM, Drilling, FBG Sensor



# 1. Introduzione

In molti settori industriali, come quello nautico, quello automobilistico ma soprattutto quello aeronautico, l'esigenza di utilizzare componenti strutturali con caratteristiche di elevate prestazioni meccaniche, basso peso e provenienti da un processo produttivo relativamente economico sono fra gli indici di merito presi maggiormente in considerazione. Le prime due richieste sono pienamente soddisfatte dall'utilizzo di materiali compositi (fibra di carbonio, vetro o aramidiche) che presentano indici di efficienza strutturale maggiori di quelli dei materiali tradizionali [12] (Tabella 1).

**Tabella 1.** Proprietà meccaniche di alcune leghe metalliche e alcune fibre di rinforzo.

	Peso specifico, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Modulo di Young, E (GPa)	E/ $\gamma$ (10 <sup>6</sup> m)	$\sigma^R$ (MPa)
Lega Alluminio	26.3	73	2.8	500
Titanio	46.1	115	2.5	1500
Acciaio	76.6	207	2.7	2000
Vetro S	24.4	86	3.5	3500
Carbonio (alta resistenza)	18	228-262	14	3000-4500
Carbonio (alto modulo)	18	353-393	21	2500

In alcuni casi tuttavia, la richiesta di economicità e di ripetibilità del processo produttivo hanno premiato le leghe metalliche in quanto la produzione di componenti con materiali compositi presenta maggiori investimenti (autoclave), maggior intervento umano (laminazione classica o spray) e limitata produzione in serie.

Queste richieste hanno gettato le basi della tecnologia RTM, che già parzialmente impiegata nel settore nautico e automobilistico, si sta recentemente diffondendo anche nell'industria aerospaziale. L'utilizzo di stampi chiusi, la ripetibilità del processo, i tempi d'infusione contenuti e l'assenza di un impianto costoso come l'autoclave, predispongono infatti questa tecnologia alla produzione in serie mantenendo comunque le caratteristiche di prestazione dei materiali compositi.

Nel settore aeronautico, inoltre, il monitoraggio dello stato di salute di un componente, risulta essere di fondamentale importanza per individuare un programma d'ispezione e manutenzione in un settore in cui un danno in un elemento può comportare gravi conseguenze. Alla base della filosofia di

manutenzione *fail safe* vi è la consapevolezza che un componente, quando esce dalla linea di produzione, presenti già dei difetti che si propagheranno in proporzione ai livelli di sollecitazione a cui sarà sottoposto nella vita operativa. Sorge quindi il bisogno di monitorare lo stato del componente sia nella fase di produzione, e quindi in quella di lavorazione, che durante il suo utilizzo.

Tuttavia questa necessità comporta l'introduzione di sensori che possono essere ingombranti, invasivi o creare concentrazioni di sforzo deleterie per il pezzo stesso. L'utilizzo di sensori a fibra ottica (e FBG) inglobati all'interno del materiale composito permette un controllo dello stato di salute che non presenta problemi d'intrusività e non genera cricche, grazie alle ridotte dimensioni del sensore; inoltre, l'inglobamento all'interno del componente non ne modifica le prestazioni.

Dal punto di vista della lavorazione le tecniche convenzionali (come la foratura), nei materiali compositi, possono portare a *delaminazione* con conseguente degrado delle proprietà teoriche del materiale; pertanto, sarebbe opportuno monitorare sia la fase di produzione sia quella di lavorazione per individuare immediatamente eventuali danneggiamenti.

Le strumentazioni a oggi disponibili per il controllo della lavorazione si basano su sensori posti sullo strumento di lavorazione, quali encoder, accelerometri e celle di carico; questo tipo di strumentazione consente un corretto monitoraggio dei parametri della lavorazione ma questi si riferiscono allo strumento di lavorazione e non al pezzo oggetto della lavorazione. Per questo l'inglobamento della fibra ottica può dare delle informazioni che arrivano direttamente dal pezzo da lavorare.

Inoltre l'utilizzo di sensori FBG unito alla tecnologia RTM (o VaRTM) si presta a fornire informazioni utili per risolvere le problematiche di rilevazione dei difetti durante l'intero ciclo produttivo. Infatti, durante la produzione fornisce lo stato di avanzamento della resina, la temperatura raggiunta, il grado di reticolazione e la presenza di possibili zone non bagnate. Durante la lavorazione fornisce le informazioni necessarie per capire se vi è stata o meno delaminazione. Nella successiva fase di utilizzo il sensore monitora istante per istante i livelli di sforzo che verranno poi utilizzati per determinare il programma d'ispezione, manutenzione o sostituzione del componente.

L'utilizzo di materiali compositi fibra-matrice ha permesso di superare le condizioni di carico massime ammissibili delle leghe metalliche tradizionali. Tuttavia, l'utilizzo di tali materiali in campo aeronautico non è privo di complicazioni, a causa della loro natura elasto-fragile e della loro sensibilità al condizionamento ambientale. Inoltre, questi materiali sono intrinsecamente anisotropi e presentano risposta alle sollecitazioni non sempre facilmente prevedibili. Al fine di sfruttare in modo sinergico le proprietà di diversi materiali, sono a volte impiegati componenti in materiali ibridi, ottenuti

dall'accoppiamento di laminati compositi e metalli. Questo introduce ulteriori difficoltà di previsione del comportamento globale, sia in fase di produzione che nella vita operativa. Anche per questi materiali nasce quindi l'esigenza di adeguati sistemi di monitoraggio.

Questo lavoro di tesi è rivolto allo sviluppo di sistemi di monitoraggio con sensori a fibra ottica durante le fasi produttive con tecnologia RTM. In questo contesto, inoltre è stata analizzata la possibilità di monitoraggio delle fasi di successiva lavorazione, quale la foratura, mediante gli stessi sensori inglobati. Il lavoro può essere suddiviso in due fasi principali:

*Produzione dei laminati con sensori FBG inglobati.* Produzione di manufatti in composito mediante RTM e di componenti ibridi carbonio-alluminio sia tramite RTM che incollaggio.

*Monitoraggio della lavorazione.* Foratura dei laminati prodotti e monitoraggio della lavorazione tramite i sensori FBG.



## 2. Tecnologia RTM

### 2.1 Generalità

Con l'acronimo RTM (*Resin Transfer Moulding*) s'intende il processo produttivo di laminati in composito tramite l'iniezione di resina in pressione all'interno di uno stampo chiuso in cui è presente una preforma di fibre. Questa tecnologia di produzione era inizialmente applicata al settore nautico mentre ora sta prendendo piede anche in altri settori quali quello automobilistico e quello aeronautico.



**Figura 1.** Esempio di componente aeronautico realizzato in RTM.

In alcuni casi questo metodo è preferito a quello classico di produzione dei compositi in autoclave; i motivi di questo successo si devono al basso costo dei macchinari, alla possibilità di realizzare prodotti di grandi dimensioni, alla ripetibilità e quindi alla possibilità di effettuare una produzione in serie. Inoltre si possono realizzare prodotti finiti complessi senza la necessità di giunzioni successive che portano a un aumento dei tempi, a un maggiore utilizzo della manodopera e al calo delle prestazioni meccaniche.

Vi sono però alcuni aspetti per i quali il metodo classico è preferito; infatti, dato che la preforma non deve avere un intreccio di fibre troppo fitto per consentire alla resina di muoversi, la percentuale di fibre può non raggiungere i valori della laminazione in autoclave. Inoltre se i pezzi sono complessi, il costo di realizzazione dello stampo sale e il materiale con cui viene realizzato deve essere scelto in base alla resina da utilizzare e ai parametri d'infusione (tipicamente pressione e temperatura). Infine è necessario uno studio accurato del flusso di resina per evitare difetti d'impregnazione.

## 2.2 Fasi del processo RTM

La tecnologia RTM si differenzia in infusione classica in pressione oppure assistita dal vuoto [2,3].

Il processo RTM può essere suddiviso in cinque fasi:

Preparazione dello stampo. Prima di chiudere lo stampo è necessario trattare l'interno con un agente distaccante al fine di evitare che la resina aderisca e venga quindi facilitata la fase finale di estrazione del pezzo.

Preparazione della preforma. Questa fase consiste nel taglio e nel posizionamento dei tessuti all'interno dello stampo con orientazione e percentuale di fibre che varia a seconda delle caratteristiche meccaniche che si vogliono ottenere; in questo lavoro, il taglio del tessuto secco è stato realizzato seguendo la direzione delle fibre per avere una disposizione delle lamine a  $0^\circ$ - $90^\circ$ .

Iniezione della resina. La resina, dopo essere stata degassata (per evitare che vengano iniettate anche le bolle d'aria inglobate nella miscelazione con l'indurente), viene iniettata in pressione e/o aspirata dal vuoto, a temperatura ambiente o riscaldata a seconda delle caratteristiche della resina scelta. Spesso è necessario scaldare la resina prima di iniettarla per diminuire la sua viscosità e quindi migliorare le sue caratteristiche di bagnabilità; in questo caso, anche lo stampo deve essere mantenuto a temperatura uguale o maggiore.

Reticolazione. Una volta iniettata tutta la resina, viene aumentata la temperatura per consentire la reticolazione, che può avvenire in più cicli di cura (cura e post-cura). L'energia termica fornita permette all'indurente, miscelato con la resina, di formare dei ponti di reticolazione e a far raggiungere alla resina la consistenza solida.

Raffreddamento e estrazione. Il pezzo viene fatto raffreddare gradualmente fino a temperatura ambiente, per evitare sbalzi termici che possono compromettere l'integrità del pezzo, e successivamente viene estratto e rifinito.

I processi RTM e RTM assistito da vuoto si differenziano per la fase d'iniezione; infatti, nel primo la resina viene iniettata in pressione e in uscita la pressione è  $1\text{atm}$ ; nel secondo caso l'infusione della resina è aiutata dalla creazione del vuoto all'interno dello stampo, la quale ha anche la fondamentale funzione di eliminare i vuoti e le bolle d'aria che potrebbero rendere difettoso il prodotto finito.



Il processo RTM prevede la presenza di stampo e controstampo mentre il processo assistito da vuoto prevede la presenza dello stampo e di un sacco da vuoto posizionato al di sopra.

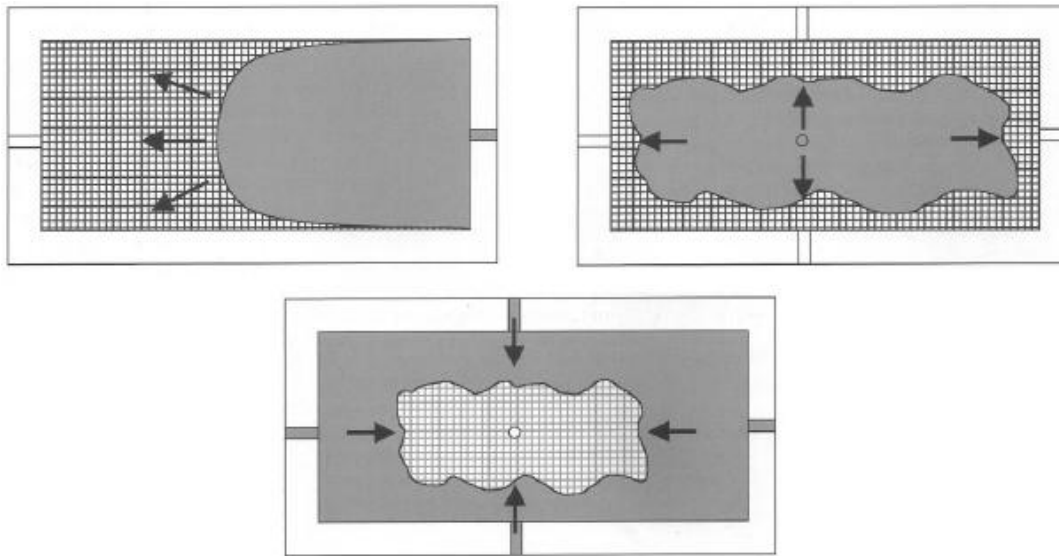
L'RTM classico permette di avere un maggiore controllo della velocità della resina e quindi un migliore controllo sulle caratteristiche del manufatto; l'aumento della differenza di pressione fra ingresso e uscita comporta un minor tempo di iniezione e quindi un aumento della produttività ma necessita una progettazione differente dello stampo che dovrà essere in grado di sopportare una pressione interna maggiore.

Nel RTM assistito da vuoto si ha un minore controllo della velocità di propagazione della resina ma al contempo i sistemi di tenuta e chiusura dello stampo sono meno critici e quindi più economici.

### **2.3 Caratteristiche del processo**

La scelta del materiale (resina e fibra) con cui realizzare il componente in composito è dettata, di solito, dai livelli di sollecitazione previsti a cui sarà sottoposto durante l'utilizzo nonché dall'ambiente di lavoro (umidità, temperatura, pressione, livello di radiazioni). Una volta scelto, ci sono vari parametri da controllare e accorgimenti da seguire per ottenere un manufatto con caratteristiche che si avvicinano il più possibile all'ideale.

Primo fra tutti è la progettazione dello stampo e del sistema d'iniezione/aspirazione. Difatti, se la resina ha una bassa viscosità o il componente da realizzare è molto grande oppure è presente un'alta percentuale di fibre, possono essere necessari più punti di iniezione al fine di assicurarsi che la resina riempi correttamente tutto il volume; per questo, in alcuni casi, la simulazione numerica della prima fase del processo RTM è necessaria sia per studiare il corretto posizionamento dei punti di iniezione sia per ridefinire la forma dello stampo.



**Figura 2.** Flusso della resina con punti d'iniezione differenti.

Come accennato nel paragrafo precedente, il dimensionamento dello stampo non deve essere indipendente dalla pressione utilizzata. La regolazione di questa grandezza modifica i tempi di produzione che possono essere diminuiti anticipando la reticolazione della resina con un aumento della temperatura già nelle fasi finali dell'iniezione.

## 2.4 Legge di Darcy e permeabilità

A partire dalle equazioni di Navier-Stokes per un flusso laminare a basso numero di Reynolds, si deriva la legge di Darcy che descrive il flusso di un fluido all'interno di un mezzo poroso, come la preforma di fibre [2].

Considerando tutte le tre componenti di velocità, la formulazione di Darcy si esprime tramite una matrice delle permeabilità che lega il vettore variazione di pressione al vettore velocità.

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu\phi} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial P/\partial x \\ \partial P/\partial y \\ \partial P/\partial z \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Per permeabilità s'intende la capacità di un mezzo poroso di lasciarsi impregnare da un fluido. Per determinarla in un generico mezzo si eseguono varie prove sperimentali grazie alle quali si ottiene il valore desiderato lungo le direzioni principali.

Esiste una relazione che lega la permeabilità  $k$  alla densità, quindi indirettamente alla frazione di volume del rinforzo, oltre alla dimensione  $d$  della porosità. Questa relazione (nota come relazione di Carman-Kozeny) è riportata qui sotto:

$$k \propto (1 - \rho_r) \cdot d^2 \quad (2.2)$$

Un secondo modello lega la permeabilità  $k$  e la frazione di volume delle fibre di rinforzo  $\varphi$  attraverso la legge logaritmica:

$$\log(k) = a + b \cdot \log(\varphi) \quad (2.3)$$

In cui la frazione  $\varphi$  di volume delle fibre è calcolata a partire dal valore di grammatura del tessuto  $\gamma$ , il numero  $N$  di lamine della preforma, il loro spessore  $t$  e la densità del materiale  $\rho_f$ , secondo la relazione:

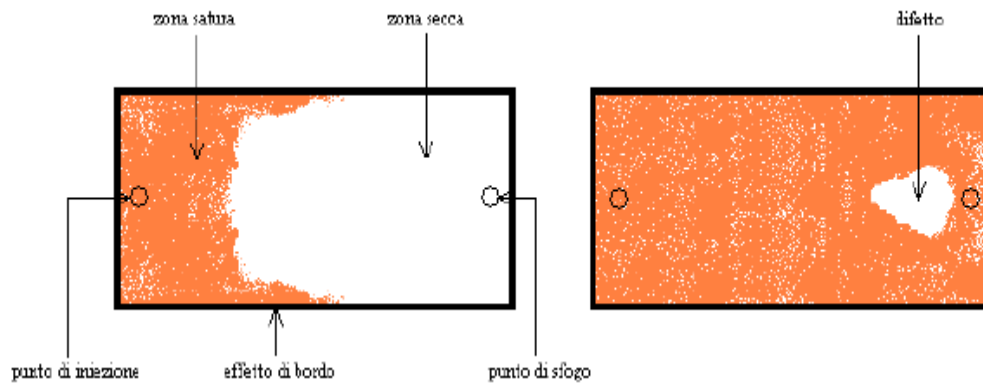
$$\varphi = 1 - \frac{N \cdot \gamma}{t \cdot \rho_f} \quad (2.4)$$

Tramite queste formule si possono effettuare delle simulazioni di infusioni al fine di evidenziare quali siano i punti critici e verificare che la reticolazione non inizi prima che sia bagnato tutto lo stampo.

## 2.5 Difetti di produzione

Qualora non fossero rispettati questi accorgimenti, si può incorrere nella nascita di difetti di produzione.

Il primo da tenere in considerazione è il fenomeno dovuto ai cosiddetti “*effetti di bordo*” [1]: la resina, durante la sua propagazione, può trovare percorsi preferenziali (come il bordo dello stampo) e raggiungere il punto di uscita prima che la preforma all'interno dello stampo si sia bagnata completamente.



**Figura 3.** Possibile causa di presenza di zone non impregnate.

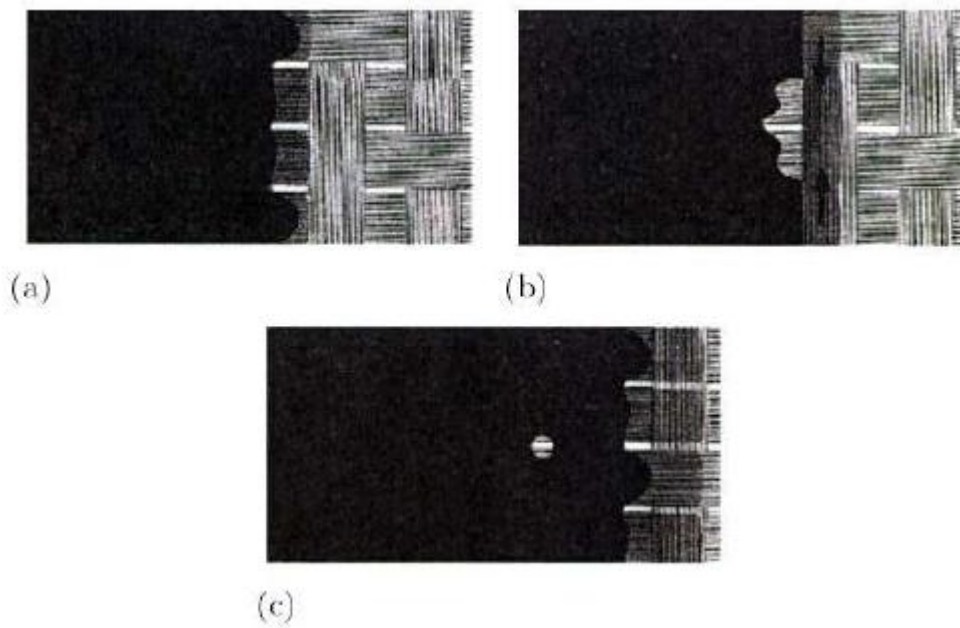
Dato che la tecnologia RTM è a stampo chiuso, non c'è la possibilità di notare queste zone vuote e quindi, se s'interrompe l'iniezione appena la resina esce dallo stampo, si può andare incontro a questo tipo di difetti; per questo motivo è meglio lasciare proseguire il flusso della resina per qualche minuto, anche in seguito al raggiungimento dell'uscita. Un'alternativa può essere quella di inserire a differenti distanze alcune fibre ottiche che, variando l'indice di rifrazione quando la resina raggiunge l'estremità della fibra, segnalano la presenza e il cammino della resina.

Un altro tipo di difetto è la formazione di vuoti; per capire come si creano, si può notare che durante la fase di riempimento esistono due tipi di flusso [2,3]:

- Macroscopico, fra i fasci di fibre
- Microscopico, fra una fibra e l'altra.

Il primo è regolato principalmente da fenomeni di natura viscosa mentre il secondo da fenomeni di capillarità; la velocità d'infusione e la viscosità della resina influenzano il flusso macroscopico mentre per il flusso microscopico rivestono un ruolo notevole anche l'angolo di contatto fibra-resina e la tensione interfacciale. A seconda della differenza di velocità fra questi due flussi si vengono a formare i vuoti.

Quando il flusso macroscopico è più veloce di quello microscopico, ovvero se le forze di tipo viscoso sono di ordini di grandezza superiori a quelle di capillarità, si rischia la formazione di vuoti all'interno dei fasci di fibre (microvuoti). Se, viceversa, le forze di capillarità rendono più veloce il flusso microscopico si riscontra la presenza di bolle d'aria fra i fasci di fibre (macrovuoti).



**Figura 4.** Formazione di una bolla.

La resina che fluisce longitudinalmente all'interno dei fasci di fibre più velocemente del flusso viscoso (Figura 4.a) raggiunge prima il fascio di fibre posto trasversalmente alla direzione del moto (Figura 4.b) e se successivamente il flusso macroscopico non riesce a spingere verso l'uscita l'aria intrappolata si ha formazione di una bolla (Figura 4.c).



## 3. Fibre ottiche e sensori FBG

### 3.1 Generalità

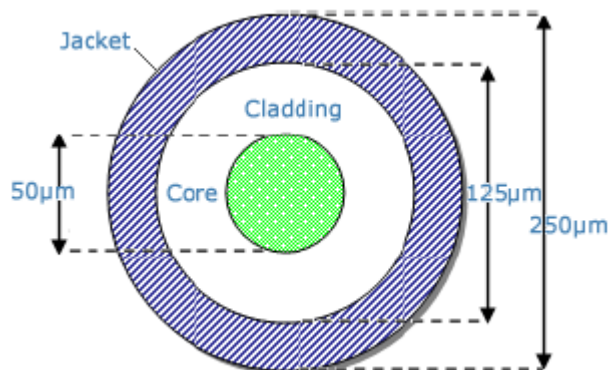
Le fibre ottiche hanno la caratteristica di trasmettere un segnale luminoso in modo quasi ideale, essendo caratterizzate da un basso livello di disturbo del segnale, elevata soglia di danneggiamento prima della perdita del segnale, capacità di *multiplexing* (o di multiplazione) delle informazioni sulla stessa linea e bassa non linearità del segnale ottico trasmesso (la perdita d'informazioni lungo una linea è di circa  $0.2 \text{ dB/Km}$ ).

Il prodotto finito si presenta come un filamento molto sottile di diametro  $125\mu\text{m}$  e il peso per unità di lunghezza è di  $60\text{g/Km}$ .

### 3.2 Struttura

Il filamento di fibra ottica, se sezionato, mostra vari strati ognuno dei quali svolge una diversa funzione [12](Figura 5):

- *Core*. È lo strato più interno, con diametro variabile da  $8\mu\text{m}$  a  $50\mu\text{m}$ , crescendo a seconda del tipo di fibra (monomodale o multimodale). È lo strato in cui avviene la trasmissione del segnale ottico.
- *Cladding*. È lo strato centrale, esterno al *core* e avendo un indice di rifrazione minore (circa 1.475) rispetto al *core* (circa 1.5), ha la funzione di garantire la corretta riflessione delle onde elettromagnetiche.
- *Coating*. È lo strato più esterno ed ha una funzione puramente di protezione degli strati interni evitando stress e corrosione; può essere realizzato in poli-imide o poli-acrilato



**Figura 5.** Struttura di una fibra ottica.

### 3.3 Principio di funzionamento

La fibra ottica trasmette le onde elettromagnetiche a lunga distanza sfruttando il fenomeno della “*riflessione totale*”[12]. A partire dalla seconda legge di Snell che lega gli angoli d’incidenza dei raggi incidente  $\vartheta_I$  e trasmesso  $\vartheta_T$  (o rifratto) con i rispettivi indici di rifrazione  $n_1$  e  $n_2$ .

$$n_1 \cdot \sin(\vartheta_I) = n_2 \cdot \sin(\vartheta_T) \quad (3.1)$$

Questa equazione permette di determinare sia la direzione della radiazione luminosa quando attraversa due mezzi differenti, sia la velocità con cui si propaga; infatti, l’indice di rifrazione viene definito come il rapporto fra la velocità della radiazione elettromagnetica nel vuoto e quella nel mezzo.

$$n_1 = c/v_1 \quad (3.2)$$

Quando un’onda elettromagnetica attraversa due mezzi differenti viene in parte riflessa nel primo materiale e in parte trasmessa nel mezzo successivo. Se il raggio luminoso passa da un mezzo con maggiore densità a uno con minore (da un indice più elevato a uno più basso), può accadere che per angoli d’incidenza  $\vartheta_I$  maggiori di un determinato *angolo critico*  $\vartheta_C$  la radiazione venga completamente riflessa e non vi sia trasmissione nel secondo mezzo; questo particolare caso di riflessione, detta appunto *totale* permette al segnale che viaggia all’interno della fibra ottica di rimanere confinato in essa e quindi di limitare la perdita di energia. In particolare, come mostrato in Figura 6, ciò avviene quando l’angolo trasmesso  $\vartheta_T$  è pari a  $90^\circ$ .



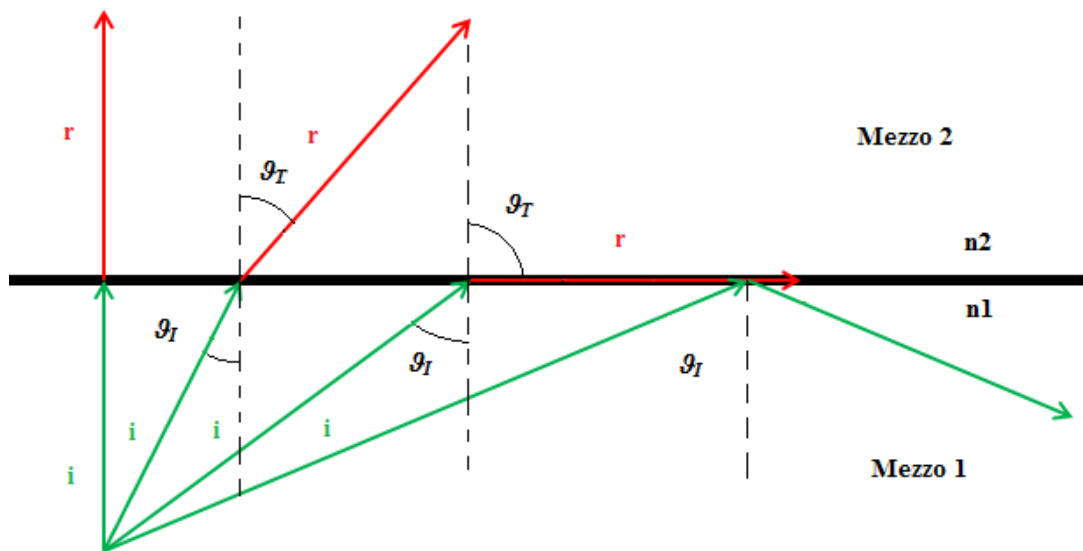


Figura 6. Riflessione totale

Perciò, per il corretto funzionamento della fibra si deve utilizzare per il *core* un indice di rifrazione più elevato rispetto a quello utilizzato per il *cladding* e tanto maggiore è il rapporto tra i due indici, tanto minore sarà l'angolo critico per raggiungere la riflessione totale. Per lo stesso motivo, la fibra ottica non può essere sistemata con forti curvature altrimenti si rischierebbe di non garantire la corretta trasmissione/riflessione.

### 3.4 Sensori FBG

Il sensore FBG (*Fiber Bragg Gratings*) è una particolare fibra ottica all'interno della quale sono stati incisi uno o più reticoli (detti appunto *reticoli di Bragg*) attraverso un fascio di luce laser che permette di variare l'indice di rifrazione del *core*, generando così un'alternanza di diversi indici di rifrazione in successione[12].

Un reticolo è costituito da una serie di bande (specchi semiriflettenti) disposti in maniera equidistante e perpendicolare all'asse del core; la distanza  $\Lambda$  fra una banda e la successiva (detta passo) è un parametro caratteristico del reticolo poiché determina la lunghezza d'onda  $\lambda_B$  del segnale riflesso nella condizione di reticolo indeformato.

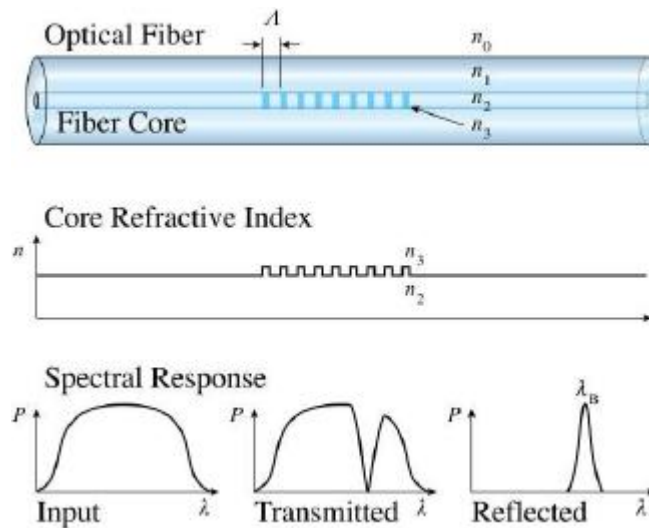


Figura 7. Principio di funzionamento del sensore FBG.

Come si osserva nei grafici di Figura 7, quando una radiazione luminosa raggiunge un reticolo, parte del segnale è riflesso ad una precisa lunghezza d'onda  $\lambda_B$  la quale dipende dall'indice di rifrazione medio modificato  $n_{EFF}$  ottenuto dalla fotoincisione del reticolo.

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{EFF} \cdot \Lambda \quad (3.3)$$

Ogni coppia di frange del reticolo riflette una piccola percentuale della luce alla lunghezza  $\lambda_B$ . Lo spettro del segnale riflesso è la somma dei segnali riflessi da ogni singola frangia, che nel caso siano tutte equispaziate allo stesso passo, presenterà un picco centrato in  $\lambda_B$ .

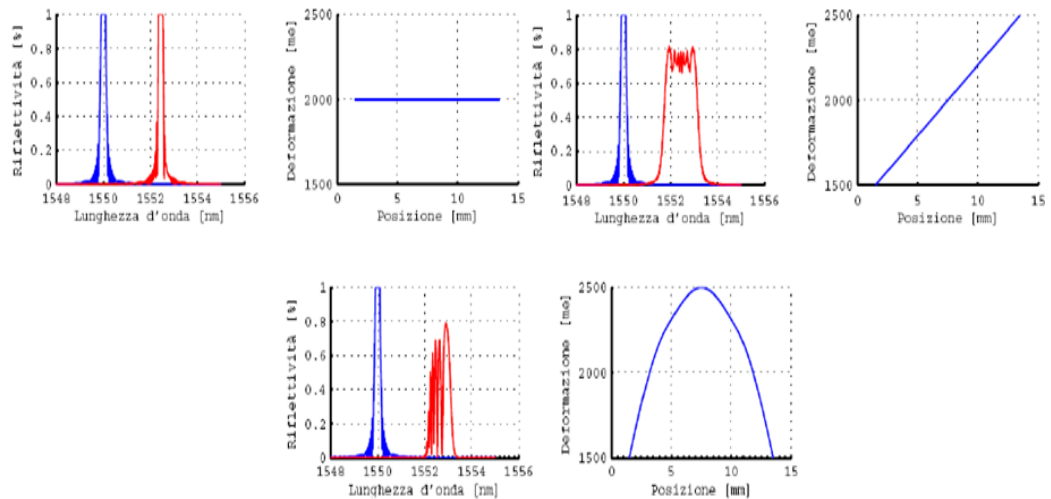
In seguito ad una variazione di lunghezza del reticolo, e quindi del suo passo, a causa di una variazione di temperatura o di una deformazione meccanica, nel segnale riflesso si noterà uno spostamento della lunghezza d'onda del picco; grazie a questo fenomeno, una fibra ottica con sensori FBG inglobata all'interno di un componente, sarà in grado di determinare variazioni di temperatura o di deformazione.

Nel caso di sollecitazioni uniformi sarà perciò rilevata una traslazione del picco lungo l'asse delle lunghezze d'onda:

- Verso sinistra nel caso di compressione o restrizione termica.
- Verso destra nel caso di trazione o dilatazione termica.

Nel caso in cui la sollecitazione non sia uniforme si registrerà una diminuzione dell'altezza di picco e un suo allargamento in quanto il passo  $\Lambda$  non è costante ma varia; di conseguenza il segnale riflesso non è più dato dalla somma di

radiazioni aventi la medesima lunghezza d'onda ma lunghezze d'onda nell'intorno di  $\lambda_B$ .



**Figura 8.** Variazione del segnale alla modalità di deformazione.

Uno dei vantaggi nell'utilizzo di questo tipo di sensori è la possibilità di *multiplexing* del segnale [12]. Su di una stessa fibra possono essere posti più sensori per poter leggere più segnali in posizioni differenti e quindi monitorare con un singolo strumento diversi punti critici del componente.

Esistono due tecniche di multiplexing:

- *WDM (Wavelength Division Multiplexing)*. Sulla fibra vengono fotoincisi più reticoli, ognuno dei quali possiede un diverso passo e quindi una diversa lunghezza d'onda  $\lambda_B$ . Il vantaggio di questo schema sta nell'acquisizione continua e contemporanea dei segnali dei reticoli indipendentemente dalla distanza fra questi ultimi.
- *TDM (Time Division Multiplexing)*. La sorgente laser emette impulsi di durata inferiore alla distanza fra i reticoli e i segnali riflessi sono separati nel tempo. Il vantaggio è di poter inserire tanti reticoli con lo stesso periodo ma ha lo svantaggio di doverli necessariamente separare spazialmente per dare il tempo all'interrogatore di leggere i diversi segnali riflessi.

In questo lavoro non sono necessarie queste tecniche di multiplexing del segnale in quanto per ogni fibra ottica utilizzata è presente un solo sensore FBG; l'unico accorgimento da tenere in considerazione è che quando vengono acquisiti più segnali contemporaneamente, le lunghezze d'onda caratteristiche  $\lambda_B$  devono

essere necessariamente differenti per poter consentire al riflettometro di riconoscerle in maniera univoca e senza confusione.

### 3.5 Sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione del segnale proveniente da un sensore FBG è schematizzato in Figura 9.

- Il pc, prima dell'inizio della prova definisce con quale intensità la sorgente deve emettere la luce e con quali valori l'interrogatore deve acquisire (**verde**).
- La sorgente invia impulsi ottici al sensore FBG (**verde**) che riflette un'onda luminosa con una precisa lunghezza d'onda di Bragg (**rosso**).
- L'interrogatore ottico riceve il segnale riflesso (**rosso**), rileva la sua lunghezza d'onda e lo elabora per poterlo salvare nel pc (**rosso**).

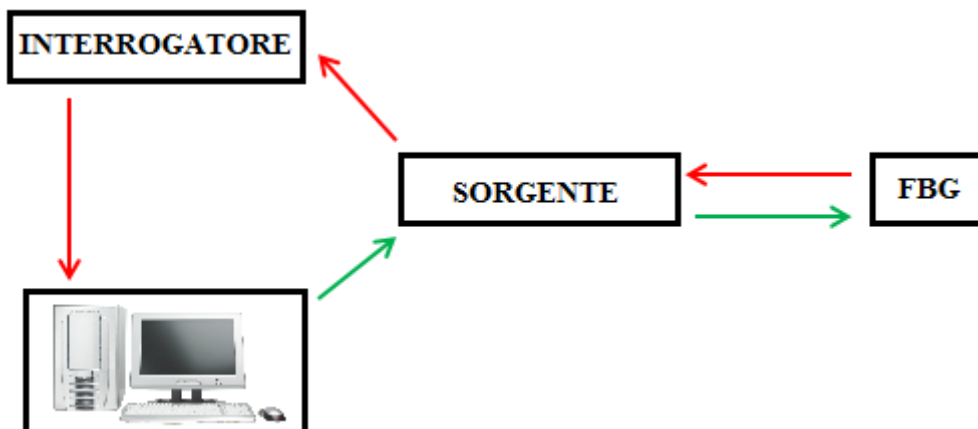


Figura 9. Schema del sistema di acquisizione.

Nel sistema di misura utilizzato la sorgente e l'interrogatore ottico sono integrati nello strumento *OttoLight*® della *CELM*® (Figura 10).



Figura 10. Sorgente-interrogatore *OTTOLIGHT*

Nel corso di una generica acquisizione di un segnale ottico proveniente da un sensore FBG possono essere regolati vari parametri attraverso un programma realizzato in *LabView*® che ha lo scopo di mettere in comunicazione il PC con la sorgente/interrogatore. I parametri che possono essere definiti dall'utente sono l'intensità della luce in *mW* per la sorgente luminosa (regolata tramite una densità spettrale di potenza), il guadagno di amplificazione, la frequenza di acquisizione, il numero di medie nell'intervallo di misura e il valore di soglia per l'interrogatore ottico.

Come un qualsiasi segnale di misura, anche quello ottico è affetto da rumore; il livello raggiunto da quest'ultimo deve essere tale da non confondere il segnale di interesse. Per questo è sempre un buon accorgimento aumentare l'intensità luminosa in modo da fare emergere maggiormente il segnale riflesso dal rumore di fondo.

Bisogna però stare attenti a non eccedere con l'aumento della luminosità altrimenti il segnale riflesso presenta un picco talmente elevato da mandare in saturazione lo strumento e non permettere all'interrogatore ottico l'individuazione corretta del picco di lunghezza d'onda  $\lambda_B$ .

La frequenza di acquisizione  $f_C$  deve essere adattata al tipo di fenomeno che si vuole acquisire. Nel caso in cui si voglia registrare un processo lento (come la reticolazione di una resina) la frequenza di acquisizione può essere mantenuta bassa, mentre per fenomeni istantanei (come nel caso della foratura) è necessaria un'elevata frequenza di acquisizione per evitare fenomeni di aliasing.

Bisogna però ricordare che l'inverso della frequenza impostata è il tempo nel quale i foto-diodi rimangono in "ascolto" ( $\Delta t_C = 1/f_C$ ); maggiore è il loro tempo di apertura maggiore è l'intensità del segnale registrato, con il rischio però di non percepire delle oscillazioni che avvengono in tempi minori di  $\Delta t_C$ .

Un ulteriore parametro di regolazione è il numero  $N$  di medie effettuate. Il riflettometro *OttoXLight*® acquisisce con frequenza  $f_C$ ; il suo programma di salvataggio dopo avere acquisito  $N$  campioni di segnale ne fa la media. In pratica è come se il segnale venisse acquisito con una frequenza pari a  $f_C/N$ . Questo però non è sintomo obbligatoriamente di una perdita di informazioni ma di un minore onere computazionale nella successiva elaborazione dei dati.

Un piccolo accorgimento che deve essere preso nell'utilizzare questo programma per evitare fraintendimenti deleteri è di non impostare un guadagno  $G$  eccessivo.

Infatti, il riflettometro permette, senza l'utilizzo di tecniche di multiplexing, di acquisire i segnali di quattro sensori FBG aventi però lunghezze d'onda differenti di almeno  $20nm$ ; lo strumento è in grado di rilevare nel segnale i quattro picchi di intensità a diverse lunghezze d'onda. Tuttavia, nel caso si

acquisisca un solo sensore FBG di lunghezza d'onda  $\lambda_B$  aumentando il guadagno  $G$  del circuito di amplificazione le code della campana di Gauss che caratterizza il segnale si alzano, inducendo il riflettometro ad interpretarle come due sensori di lunghezza d'onda  $\lambda_B \mp \varepsilon$ . Occorre perciò definire il guadagno prima dell'acquisizione del segnale in modo tale da far scendere le code della campana di Gauss al livello del rumore.

## 4. Produzione in RTM

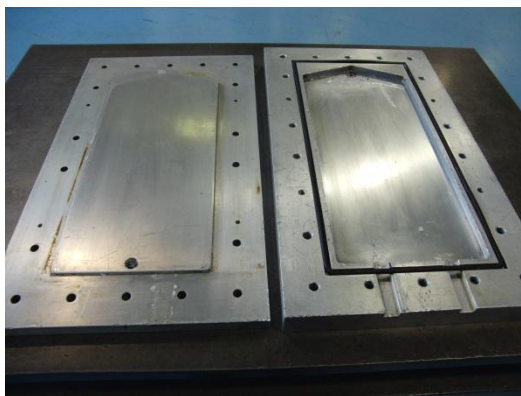
### 4.1 Stampo e sistema d'infusione

Questa parte del lavoro di tesi è volta alla realizzazione di compositi in carbonio tramite infusione in stampo chiuso. Per prendere familiarità con i parametri di regolazione del processo (temperatura, pressione e vuoto) sono state effettuate due prove senza inglobamento di fibre ottiche.

La resina che viene utilizzata in tutte le infusioni è la *Araldite LY564* unita al suo indurente *Aradur 22962* della *Huntsmann®*.

Per le infusioni vengono utilizzati stampo e controstampo di alluminio con incavo di dimensioni  $330\text{mm} \times 16.5\text{mm}$  con spessore  $7\text{mm}$  (Figura 11); inoltre questo stampo prevede la presenza di un alloggiamento per una guarnizione all'esterno dell'incavo in modo da garantire la tenuta e vuoto e due scanalature per l'ingresso delle fibre ottiche (Figura 12).

Per garantire la tenuta di questi due canali, i filamenti vengono prima protetti facendoli passare in un tubo in *Hytrel* e poi inglobati in due guarnizioni in gomma siliconica (Figura 12) che una volta riscaldate si dilateranno evitando così la penetrazione dell'aria all'interno dello stampo e la fuoriuscita di resina.



**Figura 11.** Stampo e controstampo in alluminio



**Figura 12.** Particolare interno ed esterno dell'ingresso delle fibre ottiche nello stampo.

L'impianto utilizzato per la realizzazione di prodotti tramite tecnologia RTM si compone di:

- macchina per l'infusione in RTM che consente di regolare sia la pressione che la temperatura della resina in ingresso.
- sistema di riscaldamento dello stampo tramite resistenze elettriche e di misura della temperatura tramite termocoppia.
- sistema di aspirazione collegato alla pompa a vuoto e all'uscita dello stampo.

Una volta preparati resina e indurente secondo le proporzioni riportate sulla scheda tecnica (*Araldite LY564 4:1 Aradur 22962*), la miscela viene aspirata all'interno del serbatoio della macchina di infusione e lasciata degassare, in modo da eliminare la presenza di bolle d'aria all'interno del fluido prima che vengano iniettate nello stampo.

Durante questo processo la resina può essere scaldata all'interno del serbatoio per iniettarla in temperatura; in questo caso non è stato necessario raggiungere temperature elevate in quanto la resina utilizzata si presenta già poco viscosa e ha una temperatura di reticolazione piuttosto bassa.

Una volta creato il vuoto nello stampo tramite la pompa, si apre il serbatoio dando pressione; la resina entra dal canale inferiore d'ingresso ed inizia ad impregnare i tessuti. L'infusione non viene arrestata appena la resina inizia a fluire nel serbatoio di uscita in quanto potrebbe aver trovato percorsi preferenziali e quindi non avere ancora bagnato correttamente tutto lo stampo. Di conseguenza è buona norma lasciare fluire la resina nel canale di uscita per qualche minuto in modo da assicurarsi che tutto l'incavo venga bagnato.

Durante l'ingresso della resina è di fondamentale importanza il sistema di aspirazione che consente di eliminare le bolle d'aria che inevitabilmente possono rimanere in piccole quantità fra i tessuti e all'interno della stessa resina.



## 4.2 Prova di viscosità resina LY564

Lo scopo di questa prova è determinare il tempo di reticolazione della resina LY564 (e indurente 22962) utilizzata nelle infusioni RTM tramite la misura della viscosità della stessa con il reometro mantenendo una temperatura di  $50^{\circ}\text{C}$  (con una variazione di  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ).

Una volta noto, questo valore può essere utilizzato per correlare l'andamento del segnale ottico, proveniente dal sensore FBG posto all'interno del manufatto, durante la fase di reticolazione del prodotto.

La resina è distesa sul disco fisso; al di sopra di questo sarà posizionato, in modo tale da garantire lo spessore di un film, un secondo disco con capacità di ruotare attorno alla sua normale.

Al disco mobile viene assegnata una velocità di rotazione costante e viene misurata la coppia necessaria a mantenere la velocità prefissata.

Al crescere del grado di reticolazione  $\alpha$  della resina la viscosità aumenta e conseguentemente anche la coppia necessaria per mantenere il disco alla stessa velocità; dalla misura del momento si risale alla viscosità che, avvicinandosi alla reticolazione, tenderà ad aumentare fino a raggiungere l'asintoto verticale.

La prova non viene però portata fino a completa reticolazione per evitare l'adesione permanente ai dischi.

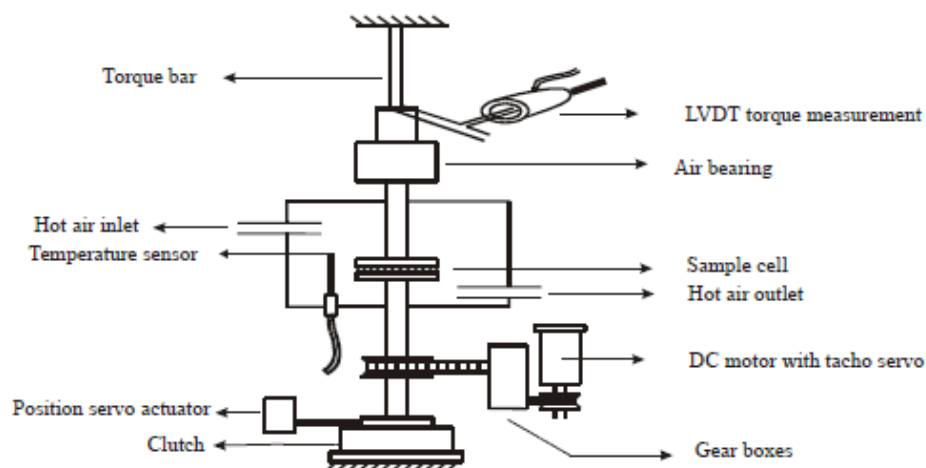


Figura 13. Schema di funzionamento del reometro

La misura del tempo di reticolazione fatta in questo modo non corrisponde a quella al vero, in quanto la resina all'interno dello stampo è ferma, mentre per fare questa misura il reometro necessita una velocità.

Per cercare di riprodurre la condizione al vero s'impone la più bassa velocità di rotazione possibile; tuttavia, facendo in questo modo la misura di viscosità non è stabile e continua a subire oscillazioni che non portano a una misura corretta. Sono state effettuate tre prove con velocità crescente al fine di individuare la velocità di rotazione minima tale da garantire la stabilità della misura; è stata individuata come velocità di  $1 \text{ rad/s}$  l'ottimo di questo processo.

Come accennato precedentemente non è possibile portare la prova fino a completa reticolazione e quindi le misure di viscosità non raggiungono l'asintoto verticale; si può comunque interpolare la serie di dati al fine di individuare quale sia il tempo critico di raggiungimento della reticolazione.

Per scegliere correttamente la curva che interpola correttamente i risultati si utilizza la teoria seguendo il modello di *Arrhenius*.

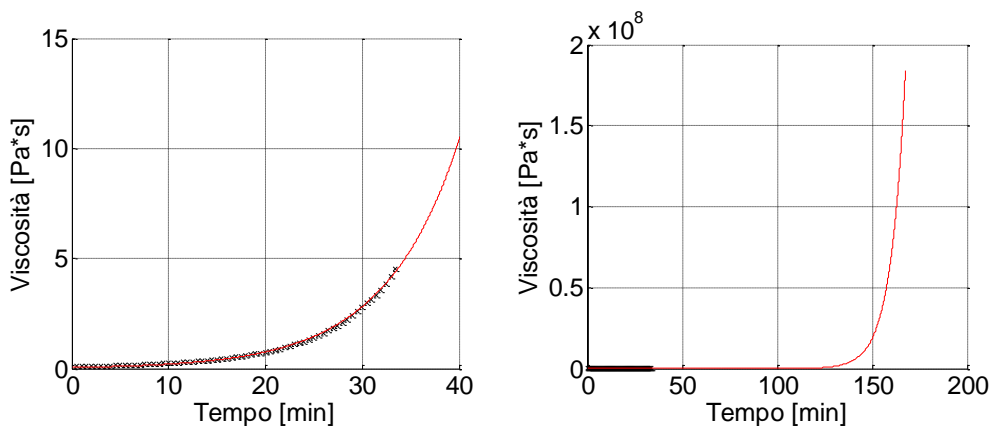
Durante il processo di cura, la viscosità del provino è funzione della temperatura e del grado di reticolazione; la variazione di viscosità è il risultato della combinazione di processi chimici e fisici che possono essere espressi tramite la formula (*Ampudia*):

$$\eta = \psi(T)\zeta(\alpha) \quad (4.1)$$

dove  $\psi$  è funzione della temperatura  $T$  mentre  $\zeta$  è funzione del grado di reticolazione  $\alpha$ .

In condizioni di cura isoterme, la viscosità segue un andamento temporale di tipo esponenziale:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{k \cdot t} \quad (4.2)$$



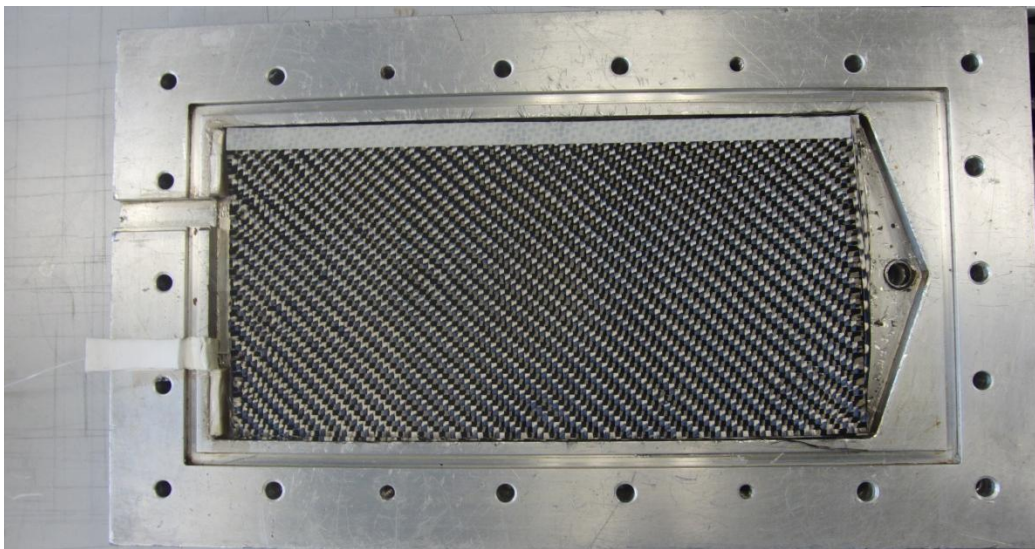
**Figura 14.** Interpolazione dei valori di viscosità e individuazione del tempo di reticolazione

Dal grafico di Figura 14 si osserva che il tempo di reticolazione è di circa 160 minuti, in linea con i tempi del segnale FBG registrati nelle fasi di reticolazione delle infusioni.

### 4.3 Prima infusione

La prima infusione realizzata in questo lavoro utilizza un tessuto di rinforzo in Carbonio CC420 con disposizione  $0^\circ/90^\circ$ .

Utilizzando la formula riportata nel capitolo introduttivo (Equazione 2.4) per garantire una percentuale di fibre attorno al 55% vengono utilizzate 16 lamine di tessuto di grammatura  $\gamma$  pari a  $0.42 \text{ Kg/m}^2$  (ciascuna di spessore  $0.38 \text{ mm}$ ) per riempire la cavità di spessore  $s$   $7 \text{ mm}$  dello stampo (viene considerata una densità delle fibre  $\rho_f$  pari a  $1750 \text{ Kg/m}^3$ ).



**Figura 15.** Disposizione tessuto di Carbonio nello stampo.

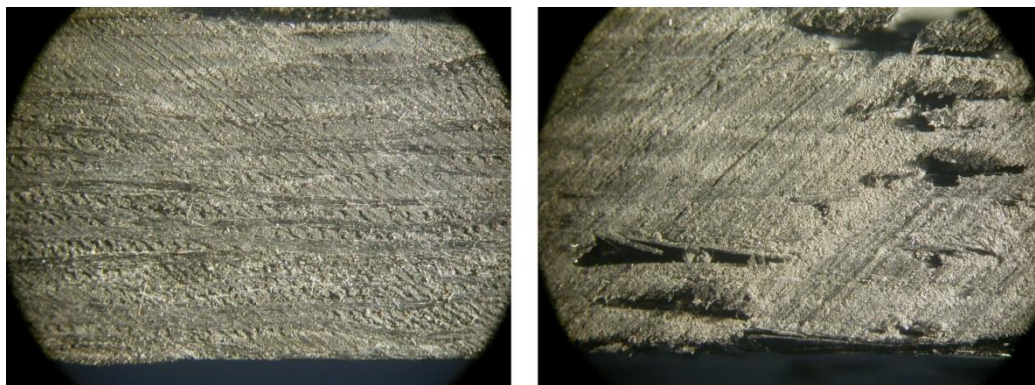
Dato che l'iniezione avviene a temperatura ambiente, gli unici parametri su cui si può agire sono la pressione d'ingresso e il vuoto di uscita; per questo test di scelgono  $+0.5 \text{ bar}$  e  $-0.5 \text{ bar}$ .

Una volta iniziata la prova e aperto l'impianto, si notano alcune bolle nel canale d'ingresso. Dopo circa cinque minuti dall'inizio dell'infusione, la resina comincia a fluire nel serbatoio di uscita ma la prova viene comunque protratta per altri cinque minuti per assicurarsi una corretta impregnazione; la velocità della resina è dovuta non solo alla sua bassa viscosità ma anche alla grammatura dei tessuti che consente maggiore libertà di movimento al fluido.

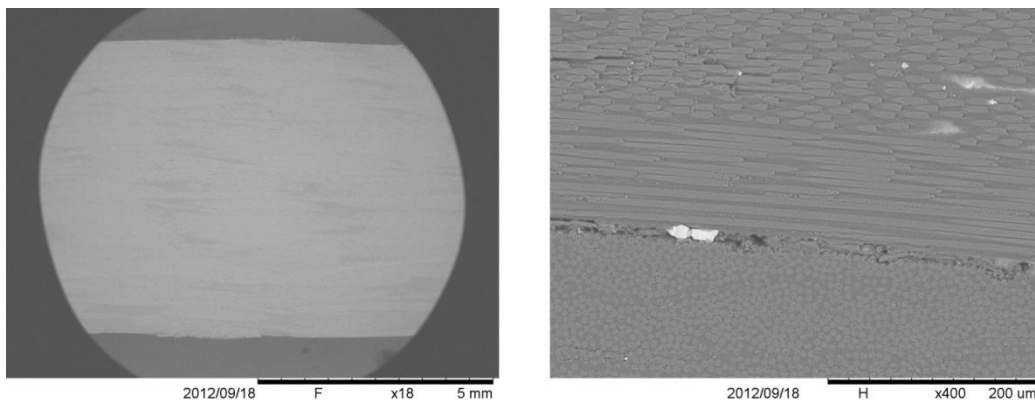
Una volta chiuso l'impianto si procede con il ciclo di reticolazione di un'ora a  $80^{\circ}\text{C}$  seguito da due ore a  $150^{\circ}\text{C}$  in stampo chiuso tramite riscaldamento delle resistenze elettriche applicate sullo stampo.

Una volta estratto il pezzo dall'incavo dello stampo, si nota che i bordi sono mal rifiniti e presentano macro bolle e zone non bagnate mentre la superficie presenta una buona finitura; sono quindi stati ricavati dei campioni dal provino per osservare tramite il microscopio ottico ed il SEM (*Scanning Electron Microscope*) l'interno e il bordo del pezzo.

L'interno del pezzo presenta un buon grado di compattazione e quasi assenza di bolle/vuoti; come si nota dalle figure 16 e 17 la bolla/vuoto più grande trovata è dell'ordine di  $30\mu\text{m}$  e bisogna ricordare che, anche l'operazione di taglio del provino comporta strappamento delle fibre e quindi una creazione di vuoti nella sezione tagliata.



**Figura 16.** Analisi al microscopio ottico dell'interno e del bordo.



**Figura 17.** Analisi al SEM dell'interno e ingrandimento di una zona con una microbolla.

L'analisi effettuata porta alla conclusione che il processo RTM è in grado di garantire una bassa percentuale di vuoti o bolle; la cattiva qualità del bordo del pezzo è da imputare principalmente al taglio e alla grammatura dei tessuti. Infatti in questa prova, il taglio dei tessuti secchi di Carbonio *CC420* è avvenuto senza prendere le giuste precauzioni per evitare sfilacciamenti delle fibre.

#### **4.4 Seconda infusione**

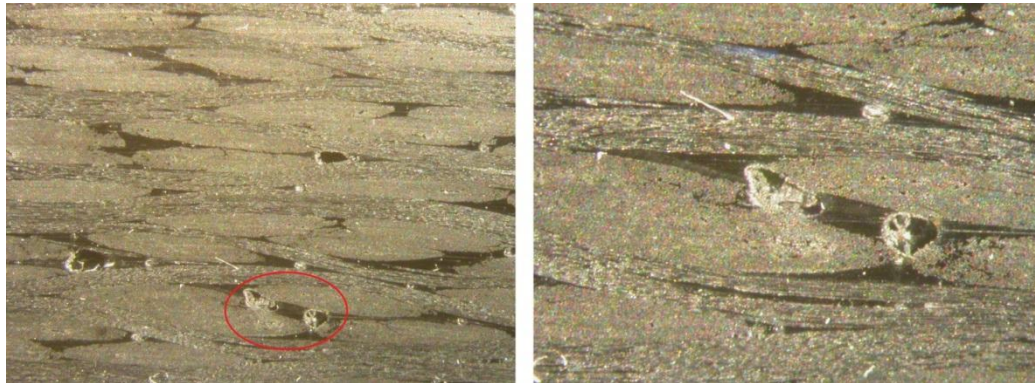
Per questa seconda infusione e per le successive si utilizza una grammatura più alta del tessuto *CC600* anziché *CC420*. Il taglio dei tessuti secchi avviene in modo da non indurre sfilacciamenti delle fibre dall'ordito, mediante l'apposizione di nastro adesivo lungo la linea di taglio.

Dato che lo spessore delle lamine, cambiando grammatura, passa da *0.38mm* a *0.6mm*, il numero di lamine necessarie a riempire la cavità di *7mm* dello stampo si riduce a *12*. Viene comunque mantenuta una percentuale di fibre intorno al *58%*. Oltre a questa modifica sulle proprietà del composito finale, rispetto alla prima prova si utilizza una pressione di *+0.1bar* e *-0.5bar* di vuoto.

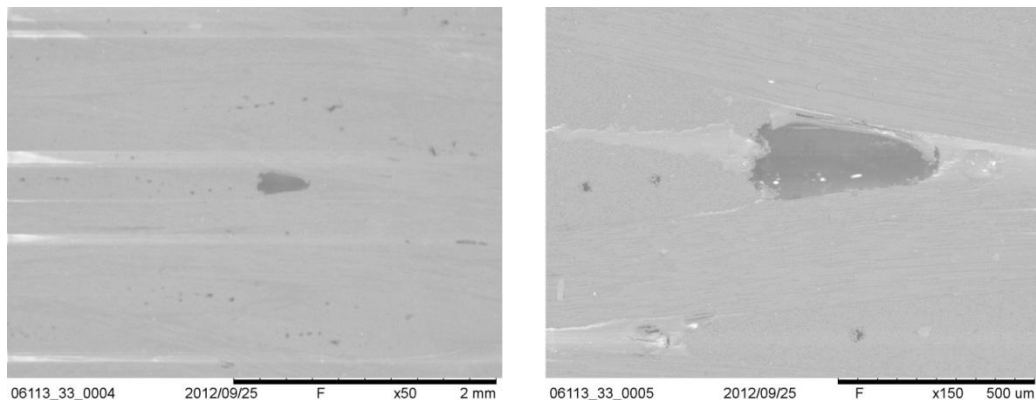
Una volta fatta degassare la resina all'interno del serbatoio si procede con l'infusione; anche in questo caso il fluido raggiunge già nelle fasi iniziali l'uscita ma l'ingresso della resina viene arrestato dopo *10* minuti, in modo da essere sicuri che tutto il pezzo sia stato bagnato.

A differenza del precedente, il ciclo di cura è costituito da una fase di reticolazione di *24* ore circa a *50°C*, seguito da un ciclo di post cura in forno di due ore a *150°C*; questo ciclo non è presente sul manuale della resina ma è stato comunque suggerito dall'azienda fornitrice della resina.

All'estrazione il pezzo presenta minore irregolarità ai bordi dello stampo (comunque ininfluenti per il risultato finale) ma presenta anche delle piccole bolle sulla superficie a causa di graffi sull'interno dello stampo; l'analisi al microscopio (Figura 18 e 19) porta a osservare un leggero peggioramento dell'interno del composito in fibra di carbonio che non risulta impregnato correttamente in piccole porzioni.



**Figura 18.** Analisi al microscopio ottico di due difetti.



**Figura 19.** Analisi al SEM dell'interno e ingrandimento di un difetto.

La presenza di bolle di maggiori dimensioni rispetto alla prova precedente è causata dalla diminuzione di pressione in ingresso. Infatti calando la pressione, le dimensioni delle bolle intrappolate fra i tessuti aumentano in quanto percepiscono una minore pressione idrostatica.

Da queste prove è emerso che:

- La resina presenta una bassa viscosità già a temperatura ambiente e non necessita quindi di un'elevata pressione d'iniezione;
- La pressione deve essere aumentata verso la fine dell'infusione quando i tessuti sono impregnati; in questo modo le dimensioni delle bolle intrappolate vengono ridotte.
- Il taglio dei tessuti deve essere realizzato in modo da evitare sfilacciamenti della trama.
- Il vuoto può essere aumentato consentendo una migliore espulsione di bolle e l'assenza di vuoti.

#### 4.5 Prima infusione con inglobamento di sensori FBG

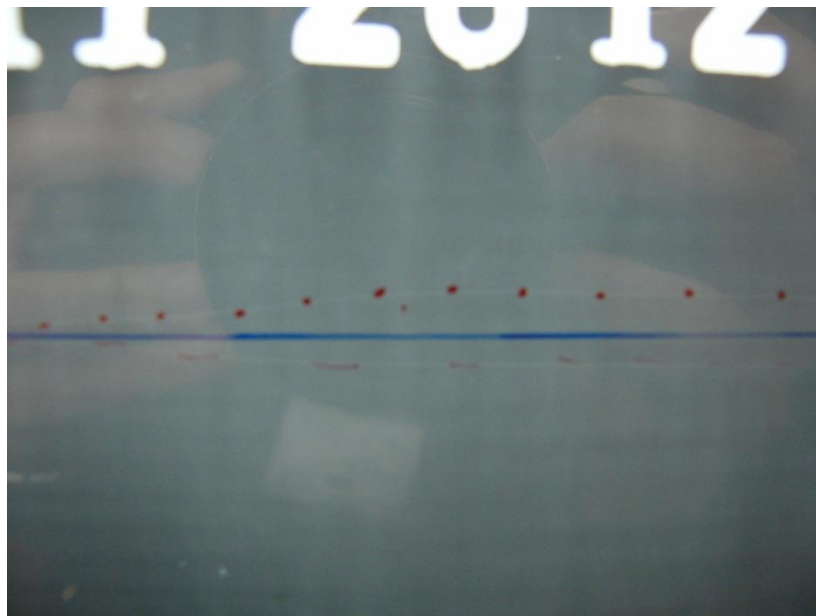
La terza infusione con tecnologia RTM è caratterizzata dalla presenza di due sensori FBG che consentiranno di monitorare sia il processo d'infusione sia la fase di reticolazione e infine la successiva fase di lavorazione del pezzo.

Come nella precedente prova, sono inserite nello spessore di *7mm* dello stampo, *12* lamine di tessuto in modo tale da avere una percentuale di fibre intorno al *55%*.

Entrambi i sensori a reticolo di Bragg sono stati inseriti fra la sesta e la settima lamina, in modo tale da trovarsi nel piano medio del provino. Inoltre, i sensori non si trovano alla stessa distanza dall'ingresso della resina ma sono stati disposti in modo tale da essere investiti dal flusso di fluido in tempi diversi; si trovano rispettivamente a *200mm* e *100mm* dal bordo d'uscita del pezzo.

Una volta che le fibre ottiche sono inglobate all'interno, non è più possibile individuarle ad occhio nudo; l'ingresso della resina e la presenza di pressione\vuoto infatti possono spostare la fibra dalla posizione rettilinea. Questo è un problema durante la foratura, quando si deve conoscere l'esatta posizione del sensore FBG per evitare di forarlo o rovinarlo.

Per questo si è deciso di marcare gli estremi del sensore FBG con due pezzi di nastro metallico in modo da delimitare gli estremi del sensore; sottoponendo il pezzo a esposizione radiografica, si nota sia la disposizione della fibra sia la posizione del sensore (Figura 20).



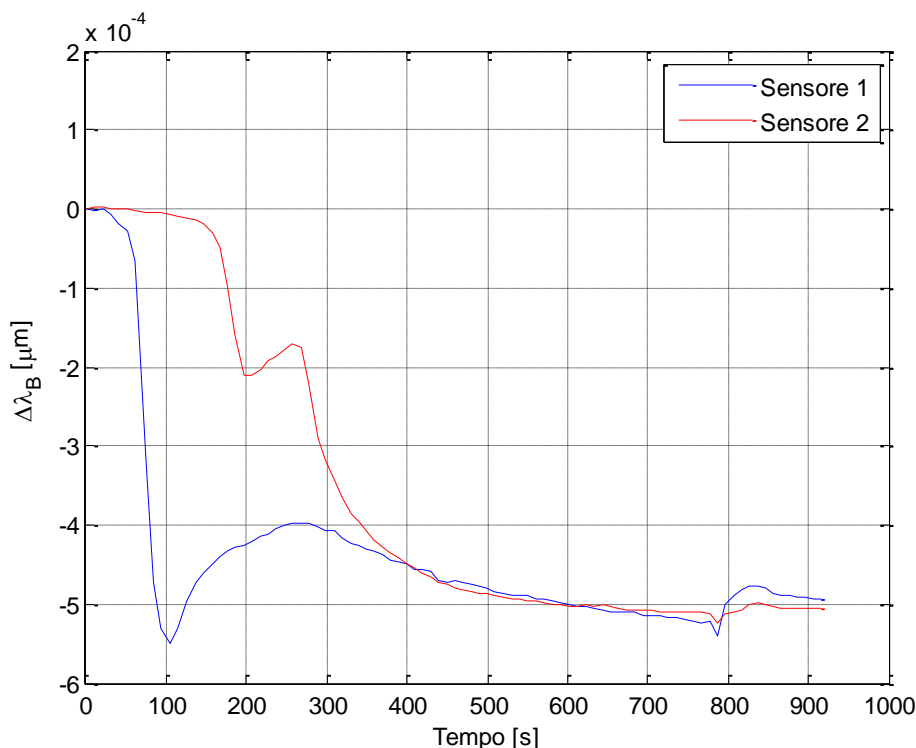
**Figura 20.** Immagine radiografica del provino.

Una volta presi questi accorgimenti, disteso il distaccante all'interno dello stampo e chiuso lo stesso, si può procedere all'infusione; per questa prova si è preferito allungare i tempi di degassaggio in modo tale da consentire un maggiore eliminazione di bolle dalla resina all'interno del serbatoio della macchina, passando da 10min a 15 min.

Durante l'infusione viene mantenuto un vuoto di  $-0.86bar$  e una pressione di  $+0.3bar$ ; per evitare le bolle presenti sulla superficie del pezzo e diminuire la dimensione di quelle eventualmente intrappolate. Si è pensato di fornire pressione nella fase finale del processo non solo in ingresso ma anche in uscita in modo da compattare la resina. Quest'ultimo accorgimento si è dimostrato non più realizzabile, in quanto la guarnizione non è stata in grado di garantire la tenuta, consentendo perciò alla resina di fuoriuscire dallo stampo. Il processo è stato quindi terminato e si è iniziata la successiva fase di reticolazione.

#### 4.4.1 Analisi del segnale ottico

Di seguito si riporta l'andamento della variazione della lunghezza d'onda letta dai due sensori durante la fase d'infusione (Figura 21).



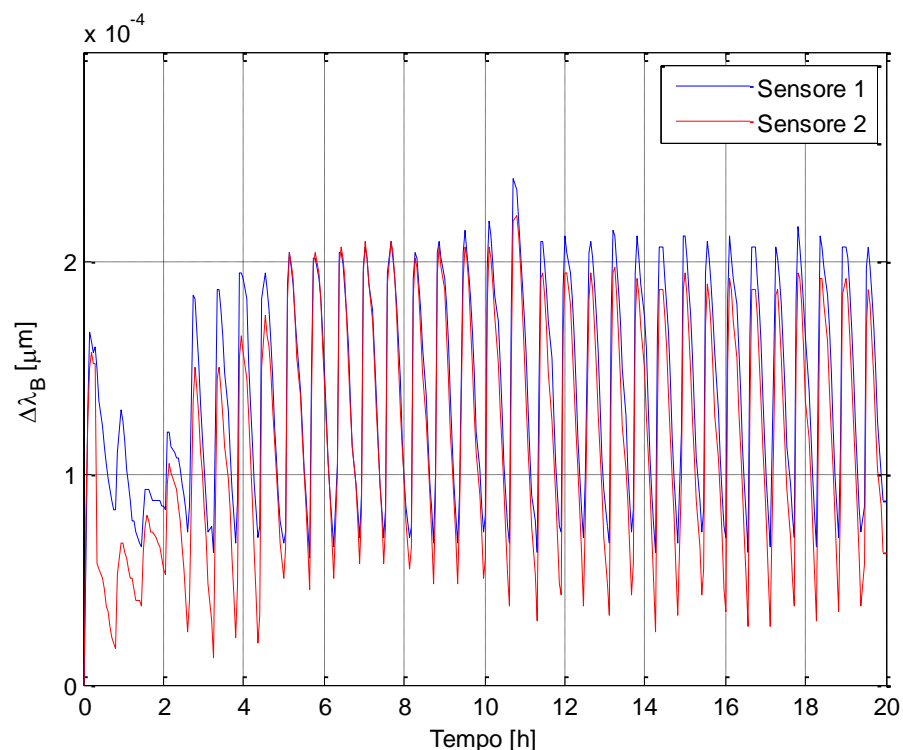
**Figura 21.** Segnale ottico dei due sensori registrato nella fase d'infusione.



Si parte da una condizione di stampo riscaldato a  $30^{\circ}\text{C}$ ; si nota infatti per il secondo sensore una variazione positiva conseguente alla dilatazione dell'FBG nei primi  $30\text{s}$ . Il primo sensore invece, più vicino all'ingresso, viene raggiunto dalla resina già quasi all'inizio ed essendo questa più fredda dello stampo si nota un decremento della lunghezza d'onda, corrispondente ad una contrazione del reticolo di Bragg. La resina fluisce all'interno dello stampo e si scalda durante il suo percorso; per questo si nota una minore contrazione del sensore 2 che, più lontano dall'ingresso, viene investito da un fluido più caldo di quello in entrata.

Intorno a  $750\text{s}$  viene arrestata l'infusione e viene imposta la pressione in entrambi i fori: il picco di pressione si nota nello stesso istante prima degli  $800\text{s}$ . Dato che la resina comincia a scaldarsi in modo uniforme i segnali dei due sensori si portano nella stessa condizione nella parte finale della registrazione.

Successivamente a questa fase, inizia il processo di reticolazione che avviene mantenendo lo stampo a  $50^{\circ}\text{C}$  per  $24\text{h}$  circa tramite resistenze elettriche. Nel grafico di Figura 22 è presente il monitoraggio di questa fase.



**Figura 22.** Segnale ottico dei due sensori registrato nella fase di reticolazione.

Si notano delle fluttuazioni della lunghezza d'onda del segnale; questo è dovuto al sistema di riscaldamento dello stampo che, durante la reticolazione, regola la temperatura accendendo e spegnendo le resistenze elettriche.

Le oscillazioni subite dalla temperatura nello stampo sono circa di  $2^{\circ}\text{C}$  e sono coerenti con le variazioni di lunghezza d'onda subite dal FBG, utilizzando una costante termica  $K_T=1.12e-5 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ .

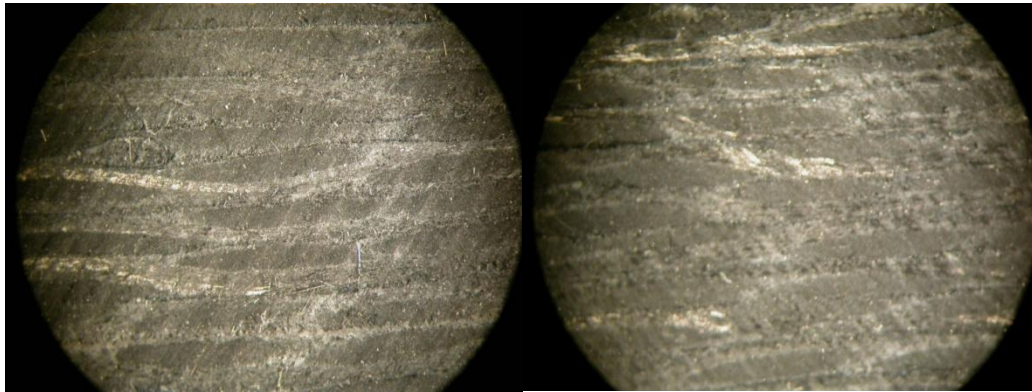
Considerando un valore medio di queste oscillazioni si osserva che passate le sei ore, la reticolazione è già avvenuta in modo completo in quanto l'andamento medio delle fluttuazioni rimane ad un valore costante.

Nella prima fase di tre ore si ha invece una dilatazione del sensore dovuta all'inizio della reticolazione; i tempi di reticolazione sono correlati con la prova di viscosità effettuata sulla resina e presentata nel paragrafo 4.2.

#### 4.4.2 Valutazione qualità prodotto finito

All'estrazione il pezzo presenta un buon grado di compattamento e un'ottima finitura superficiale. Tramite una lama diamantata vengono ricavati due provini di larghezza  $70\text{mm}$  necessari all'operazione successiva di foratura.

I bordi del pezzo vengono analizzati al microscopio ottico dopo essere stati sottoposti all'operazione di lappatura per la lucidatura della superficie da osservare.



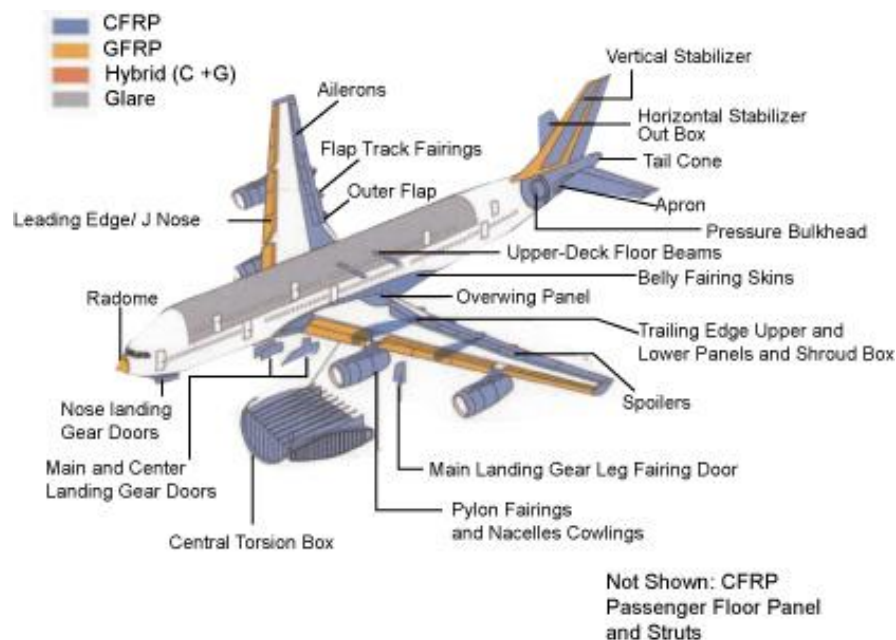
**Figura 23.** Immagini al microscopio ottico dell'interno del pezzo.

Come nelle immagini delle prove precedenti si nota dal microscopio ottico l'effetto del taglio della lama diamantata (Figura 23) che recidendo fibre e resina graffia la superficie del composito lasciando graffi obliqui e che non sono dovuti all'infusione.

## 5. Materiali ibridi

### 5.1 Generalità

La combinazione di materiali compositi (fibra di vetro o fibra di carbonio) con titanio e lega di alluminio (*Fiber Metal Laminates*) per la realizzazione di componenti ibridi ha guadagnato notevole importanza negli ultimi anni specialmente per applicazioni di strutture aerospaziali (Figura 24) soggette a elevati carichi di servizio. Infatti, a partire dalle elevate prestazioni, in termini di efficienza strutturale ( $E/\rho$ ) dei materiali compositi si è pensato di affiancare a questi ultimi materiali metallici, quali appunto Titanio e Alluminio[12].



**Figura 24.** Utilizzo del *GLARE* nella fusoliera dell'*Airbus A380*.

La sovrapposizione di questi strati (Figura 26) permette i seguenti benefici:

- Caratteristiche meccaniche intermedie fra i costituenti (Figura 25).

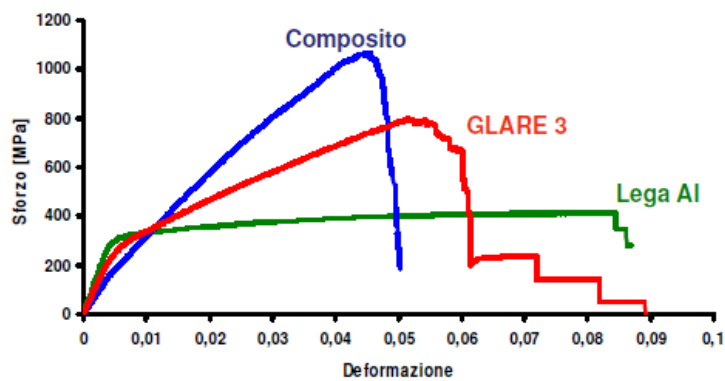


Figura 25. Confronto comportamento statico dei componenti.

- Comportamento a fatica, tolleranza al danno e bassa velocità di propagazione della cricca, grazie all'effetto ponte fibre tra i fogli di lega e l'azione di "crack stopper" delle fibre.
- Resistenza a corrosione e condizionamento ambientale (umidità e radiazioni).
- Peso specifico ridotto del 10% rispetto alla lega di Alluminio.
- Resistenza all'impatto ad alta velocità e visibilità dei danni.

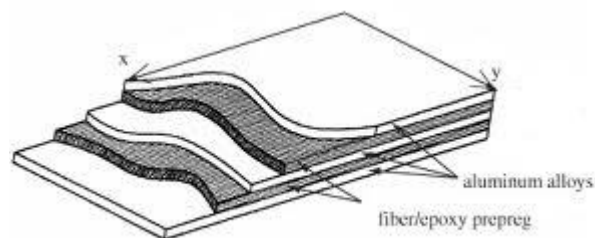


Figura 26. Struttura di un FML.

Più in generale, l'impiego di componenti ibridi costituiti da lamine o elementi non sottili in materiali diversi quali laminati compositi e metalli (principalmente leghe di alluminio e titanio), accoppiati già in fase di produzione oppure sottoposti ad incollaggio, trova sempre più estese applicazioni. Anche in questi casi, quindi è evidente l'interesse al monitoraggio del componente durante tutta la sua vita, inclusa la produzione e la successiva lavorazione.

## 5.2 Prima infusione ibridi con inglobamento di sensori FBG

In questa prova si vuole realizzare un manufatto ibrido (Carbonio *CC600*-Lega *Al Ergal*) non con una tecnica classica d'incollaggio tramite resina epossidica ma tramite infusione RTM.

Lo scopo di questa infusione è produrre un provino ibrido in modalità "sandwich" (Figura 27) in cui sono presenti due fogli di lega di alluminio agli estremi (di spessore *1mm*) e all'interno materiale composito (Carbonio *CC600* con resina epossidica *LY564*).



Figura 27. Posizione FBG nell'ibrido a "sandwich"

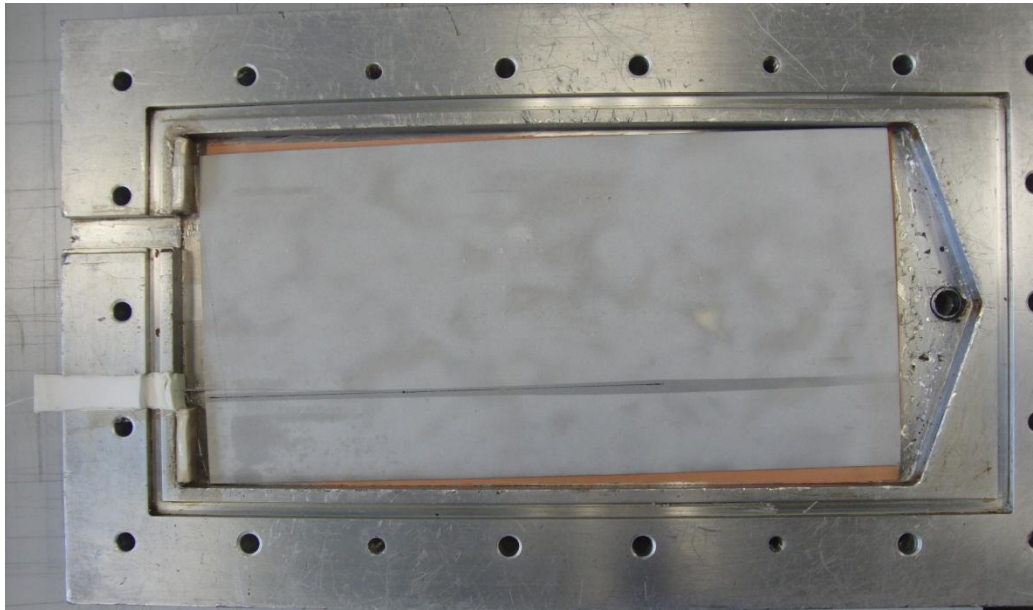
Per quanto riguarda i parametri d'infusione si è deciso di mantenere gli stessi valori dell'ultima infusione realizzata solo per materiale composito. Il ciclo di reticolazione è ancora di *24h* a *50°C* con riscaldamento in stampo chiuso in forno e non più tramite resistenze elettriche. In questo caso il forno garantisce una temperatura sempre costante e non affetta da continue fluttuazioni e si potrà osservare meglio l'avanzamento della reticolazione.

Al fine di mantenere una percentuale di fibre, nella porzione di composito, pari alle prove precedenti (*55%*) si dovranno inserire *8* lamine di tessuto all'interno dello spessore rimanente di *5mm*.

Come nel caso precedente verrà monitorato il processo d'infusione con due sensori FBG posti all'interno del pezzo; in particolare verranno posizionati a contatto con l'alluminio come mostrato in Figura 28.

Una volta che il prodotto viene estratto, non è più possibile effettuare una radiografia per evidenziare la posizione del sensore in quanto non risulterebbe visibile a causa dei due strati esterni di metallo.

Si dovrà perciò assicurare che la fibra non subisca sbandamenti durante il passaggio della resina; è stata perciò disposta una colla spray sulla superficie della lega di alluminio in modo tale da assicurare la fibra in una posizione rettilinea.



**Figura 28.** Disposizione fibra sulla lamina in lega di alluminio precedentemente sabbiata.

Come per la precedente prova, le fibre ottiche sono state distese in modo tale che i due sensori si trovassero a distanze diverse; in particolare il sensore "A" ( $\lambda_B=1565nm$ ) si trova a una distanza di  $200\text{ mm}$  dall'uscita mentre il sensore "B" ( $\lambda_B=1583nm$ ) si trova a  $100mm$ . Considerando che l'interno dello stampo è lungo  $300mm$  la resina, durante l'infusione investirà prima il sensore A e poi quello B.

Dopo aver riscaldato lo stampo a una temperatura di  $40 \pm 3^\circ C$ , aver impostato il vuoto a  $-0.9bar$ , pressione a  $+0.3bar$  e aver lasciato degassare la resina all'interno del serbatoio per  $15min$ , viene iniettata la resina.

Fin dai primi minuti si nota che la resina arriva velocemente all'uscita non in modo continuo, come avviene nel canale d'ingresso, ma a spruzzi; questa condizione si protrarrà per tutta la durata dell'infusione di circa  $10\text{ min}$ .

Negli ultimi istanti del processo la pressione è stata portata gradualmente fino a  $1bar$ .

La spiegazione di questa uscita veloce della resina è da associare alla creazione di percorsi preferenziali ai bordi del pezzo (Figura 29). Infatti, per facilitare l'estrazione del manufatto dallo stampo, le lamine in alluminio sono state tagliate di larghezza inferiore a quella dell'incavo ( $160\text{ mm}$  contro  $165\text{ mm}$ ); la resina, oltre ad impregnare l'interno dello stampo ha trovato due percorsi liberi dalle fibre ai lati dello stesso.



Figura 29. Sezione del "sandwich" ibrido e presenza di percorsi preferenziali.

### 5.2.1 Analisi del segnale ottico

Per quanto riguarda il sistema di acquisizione del segnale ottico è stata scelta una frequenza di acquisizione di uno spettro ogni 5s per la fase d'infusione e di uno ogni 60s per la fase di reticolazione.

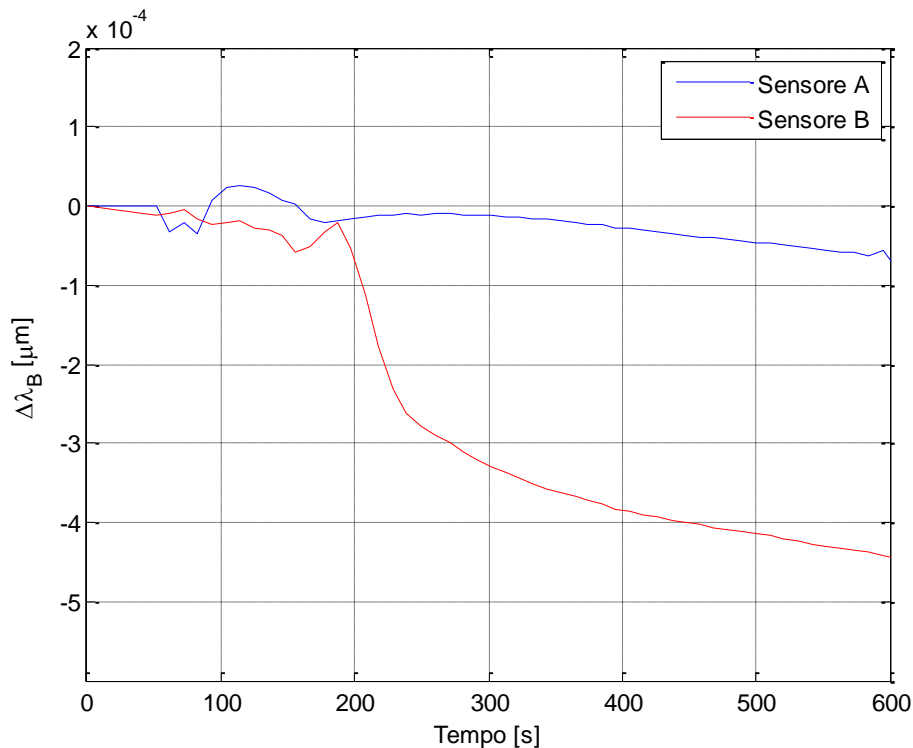
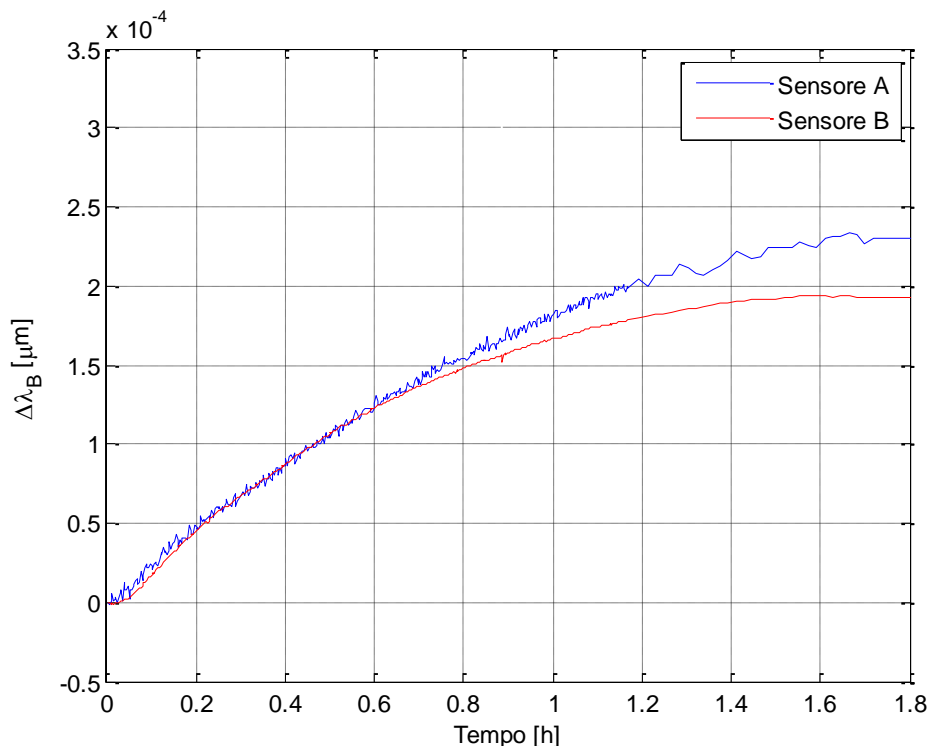


Figura 30. Segnale ottico dei due sensori durante l'infusione.

Si è notato un calo dell'intensità del segnale del sensore A con lunghezza d'onda di Bragg pari a  $1565 \text{ nm}$  durante l'infusione. In generale l'attenuazione del segnale ottico è da imputarsi alla distorsione della fibra che, subendo una curvatura troppo accentuata, non permette alla luce di eseguire correttamente il fenomeno di riflessione totale.

Non è stato possibile acquisire l'intera storia temporale del segnale durante la reticolazione in quanto la sorgente ottica si è accidentalmente spenta dopo poche ore di registrazione (Figura 31).

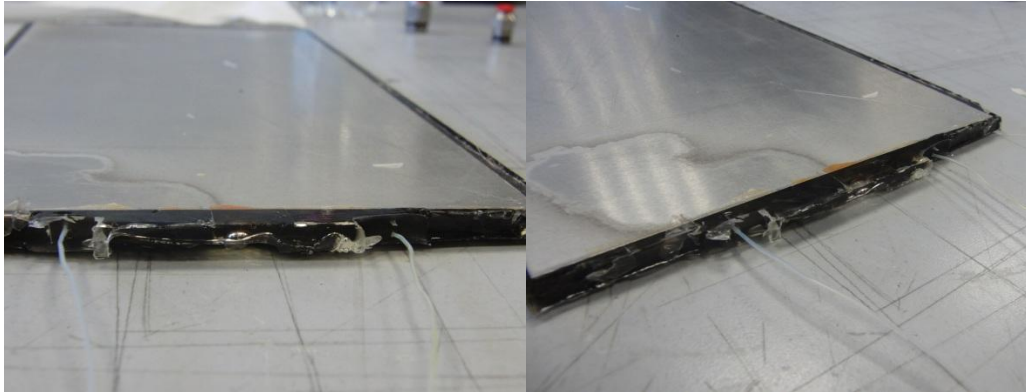


**Figura 31.** Segnale ottico dei due sensori durante la reticolazione

Considerando che lo stampo è posto all'interno del forno che mantiene una temperatura costante di  $50^{\circ}\text{C}$  si può osservare la fase di reticolazione della resina che aumenta la temperatura dilatando il sensore a reticolo di Bragg.

Il sensore A presenta un maggiore livello di rumore; questo è una conseguenza della perdita d'intensità del segnale che porta ad un rapporto segnale/rumore più basso, inducendo ad una cattiva definizione del picco di lunghezza d'onda caratteristico del reticolo  $\lambda_B$ .





**Figura 32.** Provino ibrido realizzato in RTM.

Per effettuare la successiva fase di foratura è necessario tagliare il prodotto finito in due provini di larghezza 70mm per la tavola porta pezzo appositamente progettata per la seconda campagna di foratura.

In questo caso però, dato che si tratta di un prodotto ibrido (composito in Carbonio e matrice epossidica con lamine di alluminio) l'utilizzo della lama diamantata per la realizzazione del taglio comporterebbe un'usura eccessiva dei taglienti e un surriscaldamento della lama.

Si è preferito perciò sottoporre il provino a taglio *WATER-JET*. L'esito del taglio non è stato positivo poiché il getto d'acqua in pressione ha scollato lo strato inferiore di alluminio. Entrambi i provini presentano comunque i sensori FBG perfettamente funzionanti.

Lo scollamento delle lamine metalliche è da imputarsi non solo al metodo di taglio non convenzionale e non adatto a questo tipo di materiale ma anche al grado d'incollaggio fra i tessuti e la lamina di alluminio.

Prima di poter iniziare la lavorazione di ciascun provino è opportuno accertarsi che la fibra ottica non sia stata deviata dalla posizione rettilinea durante l'infusione e nel caso fosse avvenuta identificare la posizione del sensore FBG.

Dato che in questo caso non è più possibile effettuare la scansione radiografica a causa della presenza delle lamine di alluminio che impediscono di impressionare le lastre è necessario ricorrere ad un altro metodo già sperimentato per l'individuazione della posizione esatta del sensore.

Il metodo consiste nell'appoggiare la punta di un saldatore per scansionare la superficie del pezzo e osservare l'andamento della lunghezza d'onda del sensore FBG. Quando la punta si avvicina al sensore l'aumento di temperatura è più intenso e istantaneo.

### 5.3 Seconda infusione ibridi con inglobamento di sensori FBG

In questa prova si vuole realizzare un manufatto ibrido (Carbonio *CC600*-Lega *Al Ergal*) di nuovo tramite infusione RTM.

È mantenuta la configurazione “*sandwich*” (Figura 24) in cui sono presenti due fogli di lega di alluminio agli estremi (di spessore *1mm*) e all’interno *5mm* di materiale composito (Carbonio *CC600* con resina epossidica *LY564*).

A differenza della prova precedente si presta attenzione a garantire una maggiore adesione degli strati di alluminio con i tessuti di carbonio quando entrambi vengono bagnati dalla resina; inoltre si esegue un’operazione di sabbiatura sulle superfici delle lamine metalliche a contatto con i tessuti al fine di ottenere una maggiore superficie d’incollaggio.

Sono utilizzate 8 lamine di tessuto *CC600* (di spessore ciascuna *0.6mm*) per occupare uno spessore di *5mm* e garantire così una percentuale di fibre intorno al 55%; allo stesso modo, fra lo stampo e le lamine in lega di alluminio si dispone un foglio di *peel-ply* in modo da favorire la successiva estrazione dallo stampo.

Le posizioni delle fibre ottiche sono le medesime della prova precedente (sia in spessore che in lunghezza) e vengono distese tramite un sottile strato di colla spray applicato sulla lamina di alluminio al fine di assicurare il mantenimento della posizione rettilinea durante l’infusione.

Il sensore “A” ( $\lambda_B=1529nm$ ) si trova a una distanza di *200 mm* dall’uscita mentre il sensore “B” ( $\lambda_B=1547nm$ ) si trova a *100mm*. La resina, durante l’infusione investirà prima il sensore A e poi quello B.

La resina dopo essere stata miscelata nelle proporzioni in termini di peso riportate sul manuale viene aspirata all’interno della macchina d’infusione e lasciata rilassare per *15 minuti* in modo da consentire un corretto degassaggio.

All’interno del serbatoio è mantenuta a temperatura di  $32^{\circ}C$  e viene riscaldato anche il tubo per l’iniezione; per mantenere una temperatura costante e uniforme lungo tutta la linea d’infusione, anche lo stampo viene mantenuto alla temperatura di  $35^{\circ}C$  tramite i riscaldatori elettrici.

Per quanto riguarda il processo d’infusione, sono diminuiti i parametri di pressione e vuoto sapendo che, a causa delle lastre in alluminio, la resina può trovare percorsi preferenziali ai bordi come osservato nella prova precedente; il processo di reticolazione avverrà di nuovo in forno a stampo chiuso per *24h* a  $50^{\circ}C$ .

Durante l’intero processo d’iniezione sono mantenuti una pressione d’ingresso di *0.3bar* e un vuoto pari a *-0.8bar*.

Una volta aperto l'impianto dopo pochi minuti la resina fluisce dal canale di uscita; tuttavia, a differenza della prova precedente, tende pian piano a fluire in modo continuo fino a eliminare la presenza di bolle anche in uscita.

Una volta lasciata fluire la resina per un tempo necessario alla completa impregnazione dei tessuti, vien tolta la pressione e viene posizionato in forno a  $50^{\circ}\text{C}$ . In questo caso però lo stampo viene mantenuto in pressione anche durante la reticolazione fornendo delle pressioni a step crescenti in modo da compattare la resina e diminuire le dimensioni di eventuali bolle o vuoti.

### 5.3.1 Analisi del segnale ottico

In questo caso l'acquisizione del segnale durante l'infusione avviene ogni  $50\text{ms}$  mentre per la successiva fase di reticolazione si acquisisce il segnale ogni  $1\text{s}$  per le prime  $3$  ore e ogni  $60\text{s}$  per le restanti  $21$ .

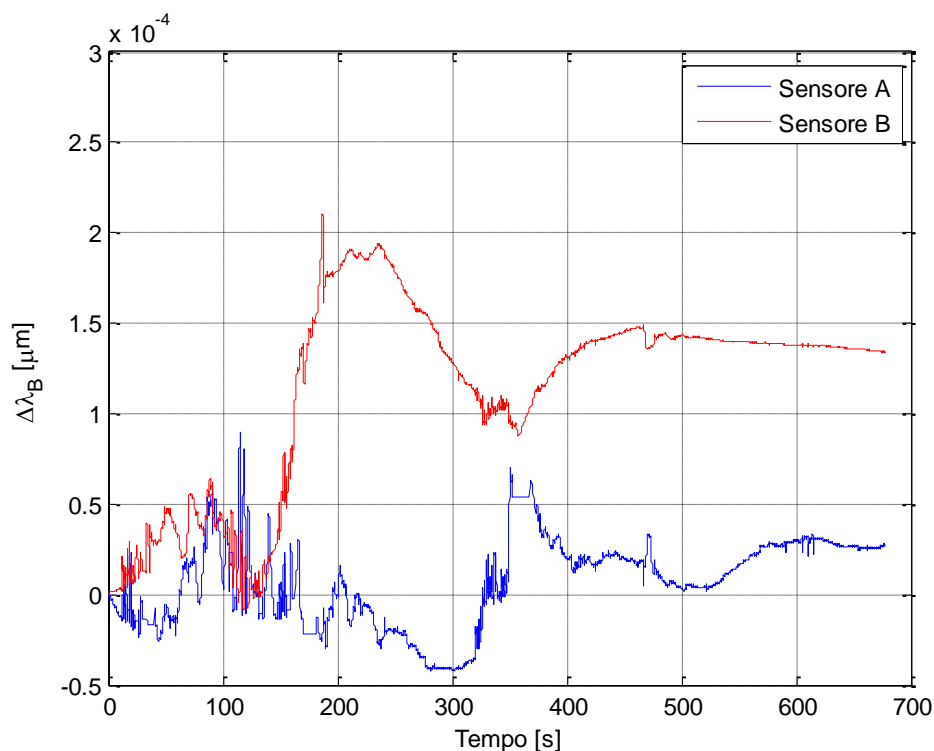
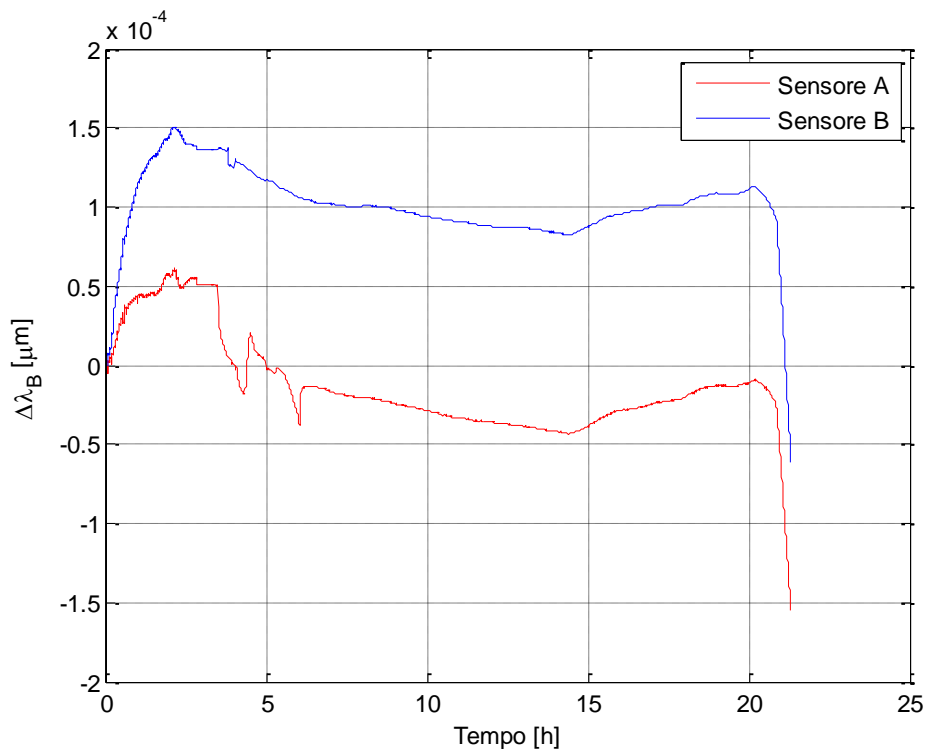


Figura 33. Segnale ottico dei due sensori durante l'infusione.

A differenza delle prove precedenti, la Figura 33 non mostra un calo della lunghezza d'onda dei due sensori in quanto, in questo caso, resina e stampo si trovano circa alla medesima temperatura.



**Figura 34.** Segnale ottico dei due sensori durante la reticolazione.

Si osserva (Figura 34) nelle prime ore l'aumento della temperatura, registrato tramite una dilatazione dei sensori FBG, dovuto alla reticolazione della resina. Una volta conclusa la reticolazione, la temperatura diminuisce assestandosi al valore di  $50^{\circ}\text{C}$  impostato dal forno.

Nella fase finale si osserva la fase di estrazione dal forno e raffreddamento fino a temperatura ambiente. Il valore che raggiunge è negativo in quanto l'origine degli assi parte da una condizione di stampo riscaldato.

Tra le 2 e le 3 ore si assiste ai dei piccoli picchi dovuti all'aumento della pressione imposta dall'esterno per garantire un maggior compattamento del composito.

## 5.4 Primo incollaggio ibridi

Con il provino in carbonio derivante dal taglio del manufatto realizzato nella prima infusione RTM (Capitolo 4.2) si vuole realizzare un manufatto ibrido in modo da poter analizzare cosa succede all'interno del materiale nel passaggio della punta dell'utensile da foratura fra i due materiali.

Il provino sarà realizzato tramite l'incollaggio fra una lamina di  $7mm$  di spessore di materiale composito con fibra di rinforzo in carbonio e matrice epossidica, con una lamiera di spessore  $1.2mm$  in lega di Alluminio 2024, prettamente d'uso aeronautico.

Questo provino presenterà un sensore FBG all'interno del composito (inglobato tramite infusione RTM) e un secondo sensore posto nell'interfaccia fra i due materiali; la disposizione di quest'ultimo permetterà anche di monitorare la fase di incollaggio dei due materiali.

Per realizzare l'unione fra i due strati si utilizza una colla epossidica resistente ad alte temperature e per incollaggi strutturali (*SCOTCH-WELD™ DP760*).

Come fatto per l'ultima infusione RTM, occorre preparare le due superfici in modo tale da aumentare la rugosità e consentire una migliore adesione; a tal fine si esegue l'operazione di sabbiatura.

Sorge tuttavia il problema dello schiacciamento del sensore FBG posto fra i due materiali; a seguito di questa operazione, possono nascere due tipi di problemi:

- rottura del sensore a compressione trasversale che comporta quindi la perdita e l'inutilizzabilità dello stesso.
- distorsione del reticolo di Bragg e quindi la non definizione di un picco di lunghezza d'onda definito ma diffuso.

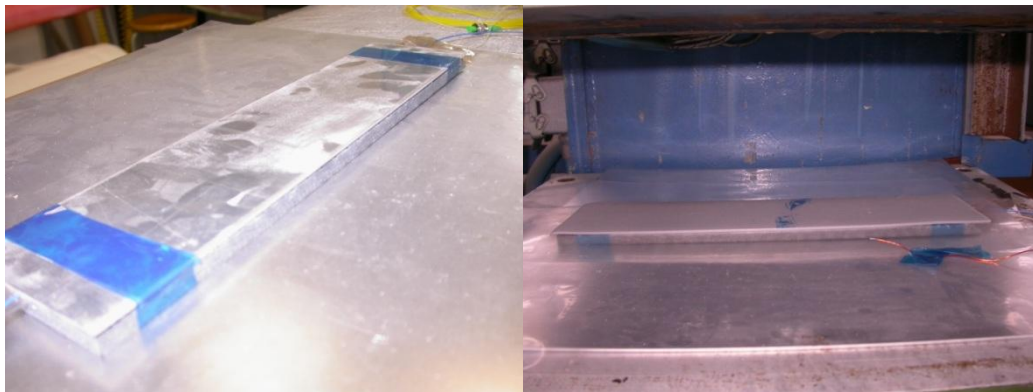
Per evitare questi problemi si preferisce miscelare all'interno della colla delle sferette di vetro di diametro ( $0.2\mu m$ ) più grande di quello della fibra ottica ( $0.15\mu m$ ); in questo modo si assicura che vengano schiacciate prima le sferette mentre la fibra rimanga protetta all'interno della colla senza subire alcuna compressione. La percentuale di sferette di vetro utilizzate è pari al  $10\%$  del peso della colla.

Una volta distesa la colla sulle superfici il sensore viene disposto in posizione centrale (sia in lunghezza che larghezza) e bloccato agli estremi (Figura 35).



**Figura 35.** Realizzazione ibrido tramite incollaggio.

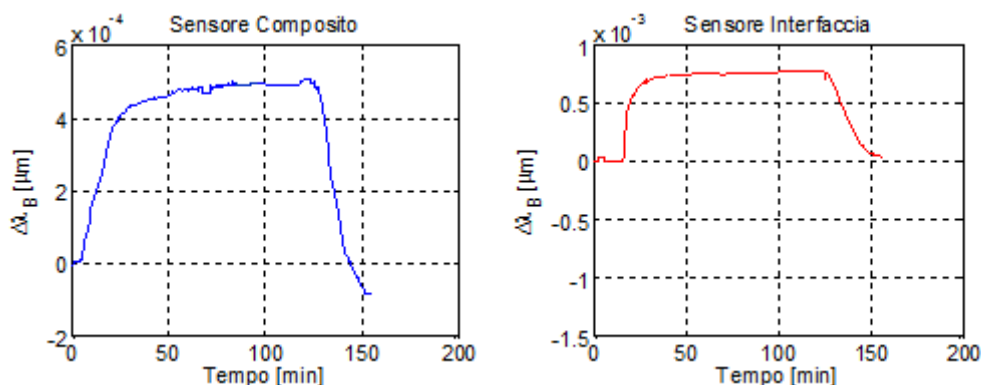
Una volta chiuso il provino ibrido viene utilizzato uno nastro adesivo in modo da bloccare lo scivolamento dei due materiali durante la compressione in pressa (Figura 36). A questo punto il pezzo è inserito fra i piani riscaldati, con pressione  $2bar$  per due ore a  $65^{\circ}C$  prendendo l'accortezza di posizionare uno strato di gomma in modo da uniformare lo schiacciamento.



**Figura 36.** Disposizione all'interno della pressa a piani riscaldati.

#### **5.4.1 Monitoraggio dell'incollaggio**

Durante la produzione si è registrato il segnale proveniente dai due sensori; tuttavia nella fase centrale della prova la sorgente luminosa ha presentato alcuni problemi di alimentazione. È stato comunque possibile ricostruire il segnale in quanto lo spegnimento della sorgente è avvenuto nella fase a regime del processo.



**Figura 37.** Segnale ottico proveniente dai due sensori.

Si osserva che il contributo della compressione nel segnale ottico è piccolo rispetto al contributo termico. Bisogna però ricordare che eccedendo di poco rispetto al valore prescritto di pressione il segnale del sensore FBG presente nello strato d'interfaccia perdeva d'intensità a causa della distorsione del reticolo di Bragg dovuta a compressione.

## 5.5 Secondo incollaggio ibridi

In questo secondo incollaggio si vuole realizzare un provino ibrido di dimensioni  $70 \times 300 \times 7 \text{ mm}$  in configurazione "sandwich" con  $5 \text{ mm}$  di materiale composito con rinforzo in fibra di carbonio e matrice epossidica realizzato tramite RTM e due lamine in lega di alluminio dello spessore di  $1 \text{ mm}$  ciascuna.

Come nel precedente caso, si utilizza una colla *SCOTCH-WELD™ DP760* e le superfici da porre in contatto vengono precedentemente sabbiate per garantire un maggiore incollaggio. A differenza del caso precedente però, non s'interpone un sensore FBG nella zona d'interfaccia fra i due materiali; è presente un sensore all'interno del composito in superficie, ma inglobato all'interno della resina. Questo fatto evita la necessità di mescolare insieme alla colla le sferette in vetro necessarie a mantenere uno spessore minimo per evitare la compressione della fibra.

Anche in questo caso il ciclo di polimerizzazione della colla consiste in un riscaldamento a  $65^\circ\text{C}$  in una pressa a piani caldi, sotto l'effetto della pressione di  $2 \text{ bar}$ .





## 6. Foratura Carbonio

### 6.1 Foratura di composito con rinforzo in fibra di carbonio

Poiché i materiali compositi sono prodotti dall'unione tramite resina, dei vari strati di lamine (laminazione classica e reticolazione in autoclave) oppure tramite infusione (RTM o VaRTM), l'incollaggio è la tecnica di giunzione maggiormente utilizzata poiché garantisce una "continuità" negli elementi giuntati con un basso livello d'intrusività.

Talvolta però le tecniche di giunzione discontinua sono inevitabili ed è necessario perciò ricorrere a tecnologie sottrattive, ad esempio forature o tagli dei laminati per preparare le parti ai collegamenti successivi [12].

Data la natura sensibile a temperatura, umidità e liquidi di lavorazione della resina e la caratteristica di abrasività di alcune fibre, l'impiego di tecniche di questo tipo può danneggiare la struttura dei compositi; esistono varie tecnologie di lavorazione, a partire da quelle convenzionali di tipo *contact* a quelle non convenzionali come *water-jet*, *laser* e *electron beam*.

In questo lavoro si vuole studiare l'effetto della foratura su un composito realizzato con resina epossidica *Araldite LY564* unita al suo indurente *Aradur 22962* e fibra di carbonio *CC600* attraverso la tecnica RTM.

#### 6.1.1 Caratteristiche di lavorazione

Al fine di comprendere le difficoltà insite nella lavorazione del *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e dei compositi in generale, si può fare un confronto con le caratteristiche di lavorazione tipiche dei metalli:

- *Metallo*. Una volta definito il materiale da lavorare e il grado di finitura superficiale, si scelgono i parametri di lavorazione ottimali per mantenere le caratteristiche richieste di tolleranza e di proprietà meccaniche del foro.
- *Composito*. I parametri di lavoro, nonché geometria e materiale dell'utensile, vengono scelti non solo in base ai componenti del pezzo (fibra e resina), ma anche in base all'orientazione delle lamine, alla percentuale di fibre, alla profondità dei fori, alla presenza o meno di uno

strato di metallo (titanio o alluminio) e all'equipaggiamento di lavoro (piastra di *back up*).

Inoltre, gli indicatori di qualità osservati solitamente nella foratura dei metalli non sono direttamente applicabili alla foratura dei compositi perché la finitura superficiale convenzionale può non essere rilevante. Al contrario, la qualità dei fori nei materiali compositi è normalmente basata sul grado di separazione che si verifica negli strati esterni del materiale (delaminazione), così come su qualsiasi sfilacciamento (frammentazione) di fibre residue nel foro.

Si nota quindi una notevole differenza che comporta non solo un maggiore rigore negli accorgimenti da seguire ma anche una verifica a posteriori del lavoro effettuato; pertanto, i compositi sono particolarmente 'inclinati' a mostrare le loro debolezze nel processo di lavorazione, più dei metalli.

Per quanto riguarda i *CFRP*, ci sono delle difficoltà principali da tenere in considerazione durante la foratura:

- La fibra di carbonio è dura e quindi l'usura degli utensili è accelerata dall'elevato calore generato.
- I trucioli di fibra sono molto abrasivi e devono essere evacuati velocemente per evitare una rapida usura dell'utensile e un danneggiamento della superficie interna del foro.
- La resina è soffice e crea un'alternanza fra strati soffici e duri che contribuiscono alla delaminazione.

La necessità di realizzare fori rotondi e precisi è una questione di elevata sicurezza nel settore aerospaziale, perché questi sono parte dei giunti di fissaggio che influenzano i valori di fatica riguardante la struttura.

Tenendo in considerazione queste richieste, le soluzioni disponibili includono utensili di metallo duro con riporto di diamante e con rivestimento di diamante depositato. Il diamante policristallino (*PCD*) è un materiale da taglio molto duro, ideale per lavorare i compositi così come i materiali agglomerati.

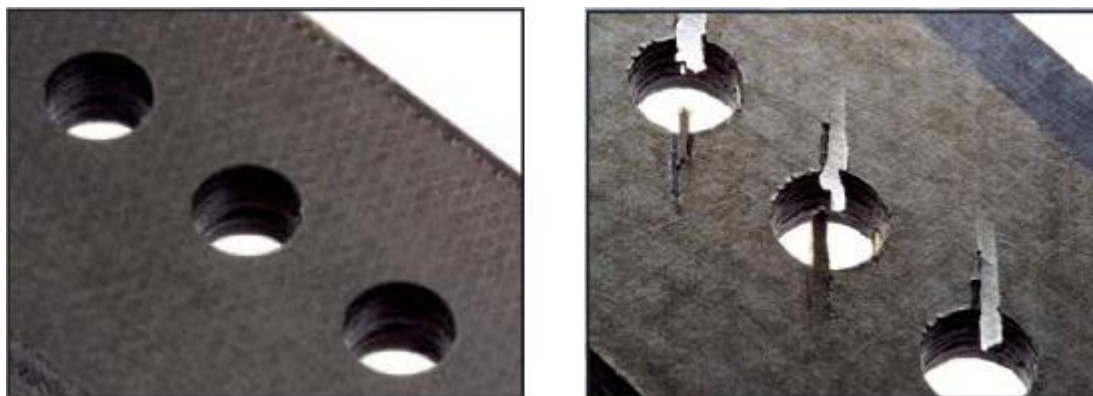
Una punta in metallo duro, con taglienti in *PCD*, è oggi considerata la migliore scelta per la foratura dei compositi.

### **6.1.2 Delaminazione**

Essendo il composito un materiale dotato di scarsa conducibilità termica, tutto il calore generato durante la lavorazione diventa un problema a causa del possibile rischio per quanto riguarda la parte costituita dalla resina.

Inoltre, dato che le fibre sono legate con resine (meccanicamente più deboli), vi è la tendenza a strappare ed estrarre le fibre dalla loro sede per via dei

disallineamenti elastici che occorrono e anche della frattura che avviene tra gli strati del materiale composito. Ciò rende il punto d'ingresso e di uscita dal foro, congiuntamente alle pareti laterali, soggetti a danneggiamenti che portano a scartare i componenti a causa della loro qualità scadente.

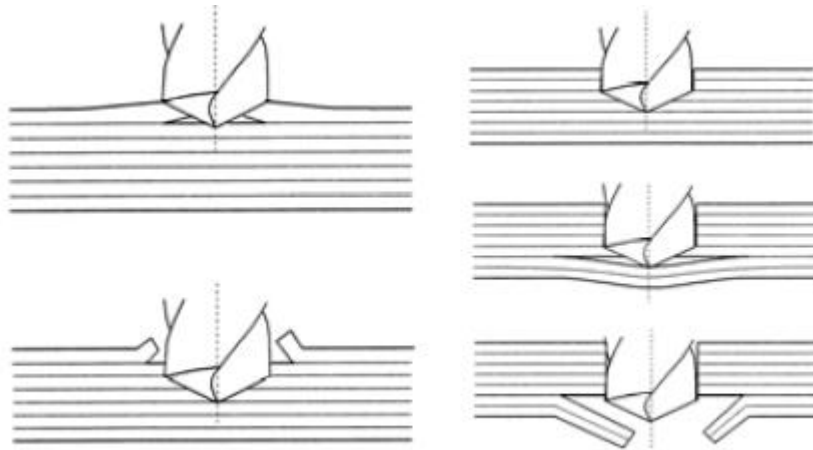


**Figura 38.** Differenza fra buona qualità del foro e presenza di delaminazioni.

Per poter limitare la presenza di questi difetti è necessario predirne l'occorrenza, usando dei modelli di meccanica della frattura lineare elastica (*Linear Elastic Fracture Mechanic*) al fine di determinare quali sono i parametri e i relativi valori critici che li creano.

Innanzitutto, bisogna notare che esistono due modi di delaminazione (Figura 39):

- *Peel-up*. La lamina a contatto con l'utensile di foratura risale la spirale della punta di lavoro, creando una forza verso l'alto che tende a separare la lamina superiore dalla parte sottostante non tagliata, che invece è tenuta in posizione dalla spinta dell'utensile.
- *Push-out*. È un modo di rottura interlaminare e quindi dipende sia dalle proprietà della fibra che da quelle della resina; lo spessore non tagliato decresce all'aumento della penetrazione della punta, fino a che il valore di spinta supera il valore di "*interlaminar bond strength*" e si ha delaminazione.



**Figura 39.** Delaminazione *peel-up* (a sinistra) e delaminazione *push-out* (a destra).

Per studiare il *push-out*, si utilizza il modello di *Hocheng-Dharan* [4] che considera il materiale isotropo all'interno della zona circolare di delaminazione; secondo questo modello il valore di forza critica viene definito come segue:

$$F_{CRIT} = \pi \left[ \frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{0.5} \quad (6.1)$$

dove  $E_l$  è il modulo elastico di un laminato unidirezionale,  $\nu_{l2}$  è il coefficiente di Poisson,  $G_{Ic}$  è il fattore di rottura interlaminare di modo I e  $h$  è lo spessore non tagliato del laminato.

### 6.1.3 Schematizzazione del fenomeno

Osservando la lamina che è stata delaminata (Figura 40), se la foratura continua dopo la delaminazione, la lamina sfaldata viene flessa a causa della forza di spinta [9]. Quando la lamina viene tagliata è quindi in una condizione deformata e, assumendo l'ipotesi di comportamento lineare elastico, è possibile legare la spinta alla deformazione.

Una volta che la foratura finisce, la forza di spinta generata dall'utensile viene rimossa e le fibre ritornano in condizione indeformata. Tuttavia la fibra è stata recisa in condizione deformata ed è quindi allungata; ritornando alla condizione di partenza presenterà dei difetti.

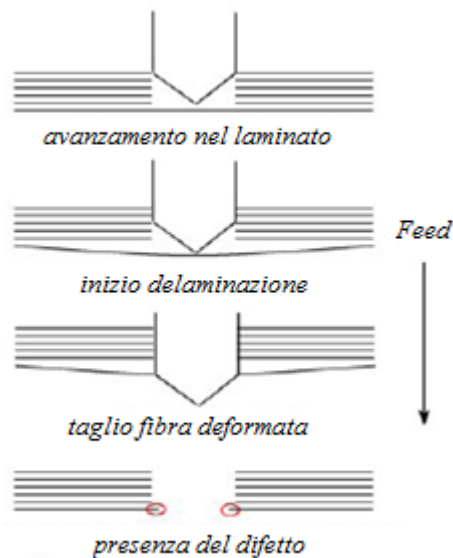


Figura 40. Schematizzazione del *push-out*

#### 6.1.4 Parametri di controllo

Si possono definire i seguenti parametri di controllo con i quali si può verificare il livello di delaminazione raggiunto:

- *Forza assiale di spinta*  $F_A$ . Attraverso un dinamometro presente sull'utensile viene misurata la forza di pressione generata dalla penetrazione della punta; quest'ultima può essere confrontata con il valore critico della formula di Hocheng-Dharan.
- *Fattore di delaminazione*  $F_D$ . Viene definito come il rapporto fra il diametro massimo delaminato  $D_{MAX}$  e quello nominale di foratura  $D$ .

$$F_D = D_{MAX}/D \quad (6.2)$$

Si può valutare come variano queste due grandezze al variare dei parametri di lavorazione quali velocità di penetrazione, velocità di rotazione, raggio di foratura e geometria del strumento (Figure 38, 39 e 40).

Per quanto riguarda la *velocità di avanzamento (feed)* si nota che una diminuzione di quest'ultima porta a una minore presenza di difetti; infatti è stata definita una formula empirica che lega la forza di spinta  $F_A$  a più parametri di lavoro [10]:

$$F_A = K_1 \cdot (f \cdot d)^{(1-\alpha)} + K_2 \cdot d \quad (6.3)$$

dove  $f$  è la velocità di alimentazione in  $mm/s$ ,  $d$  è il diametro di foratura mentre  $K_1=31.31$ ,  $K_2=-0.0571$  e  $\alpha=0.4011$  sono costanti ottenute sperimentalmente forando compositi *CFRP* di alto modulo con punta *Carbide*.

Dai risultati dei lavori precedenti, si nota che per garantire l'ottimo di lavorazione (in termine di delaminazione) si deve lavorare con i valori più bassi di  $f$  [10].

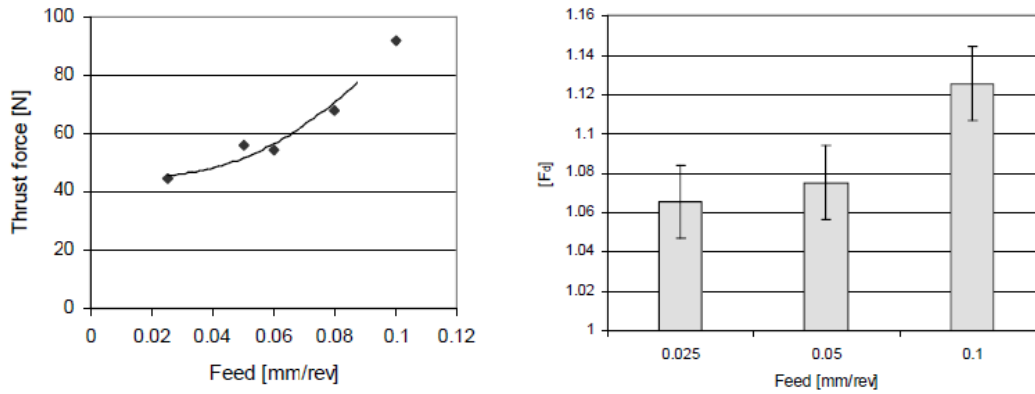


Figura 41. Effetto della velocità di avanzamento.

Bisogna però ricordare che mantenere velocità di avanzamento basse comporta un surriscaldamento nella zona di lavoro e quindi un maggiore degrado delle proprietà della resina.

Per quanto concerne la *velocità di rotazione (cutting speed)* non si nota questo andamento crescente, perciò la scelta ottimale dipende dal tipo di materiale che si sta lavorando [10].

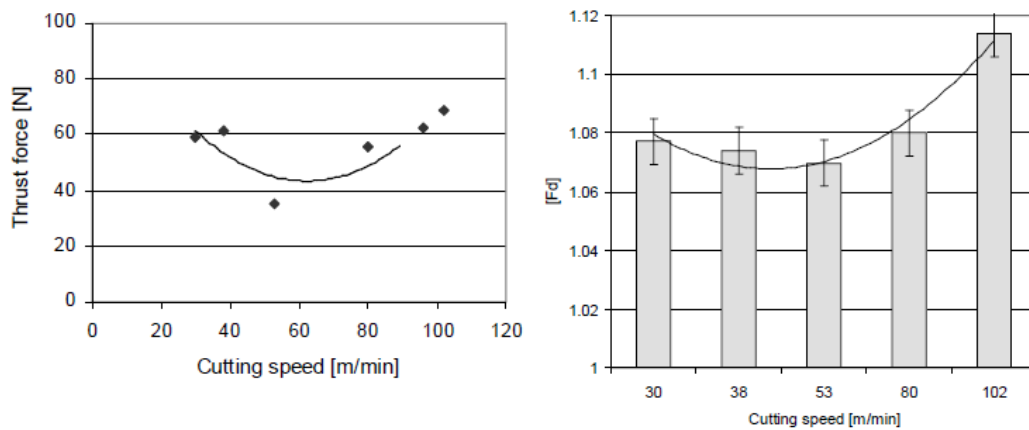


Figura 42. Effetto della velocità di taglio.

Un'altra grandezza da tenere in considerazione è il *raggio nominale di foratura*. Si può valutare innanzitutto l'effetto sul parametro di controllo della forza di

spinta. Una volta raggiunto il valore critico di “*interlaminar debonding*”, a pari aumento della spinta assiale, la zona delaminata cresce maggiormente per raggi maggiori (Figura 43). Invece, osservando l’effetto della velocità di avanzamento, si nota che il minimo valore per garantire l’assenza di delaminazione si abbassa con l’aumentare del raggio (Figura 44).

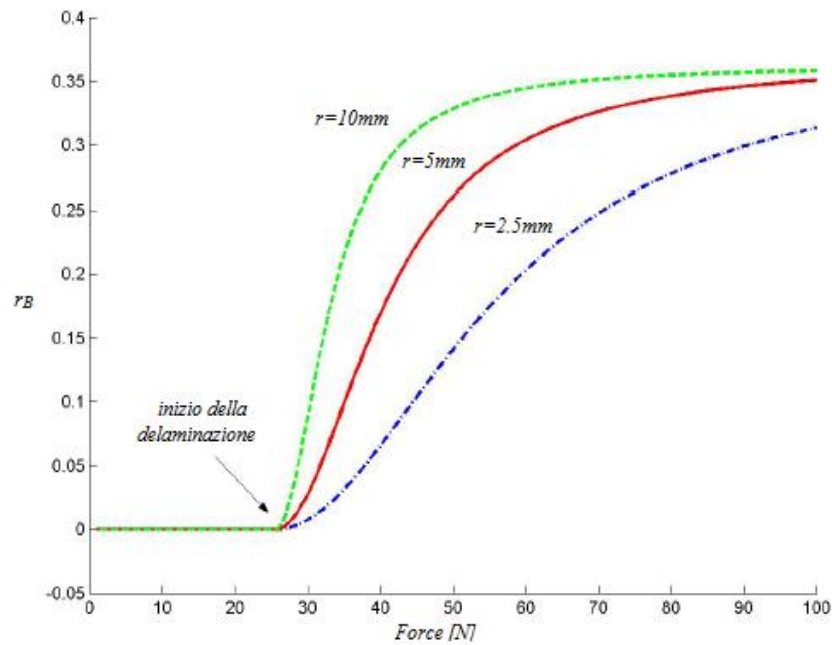
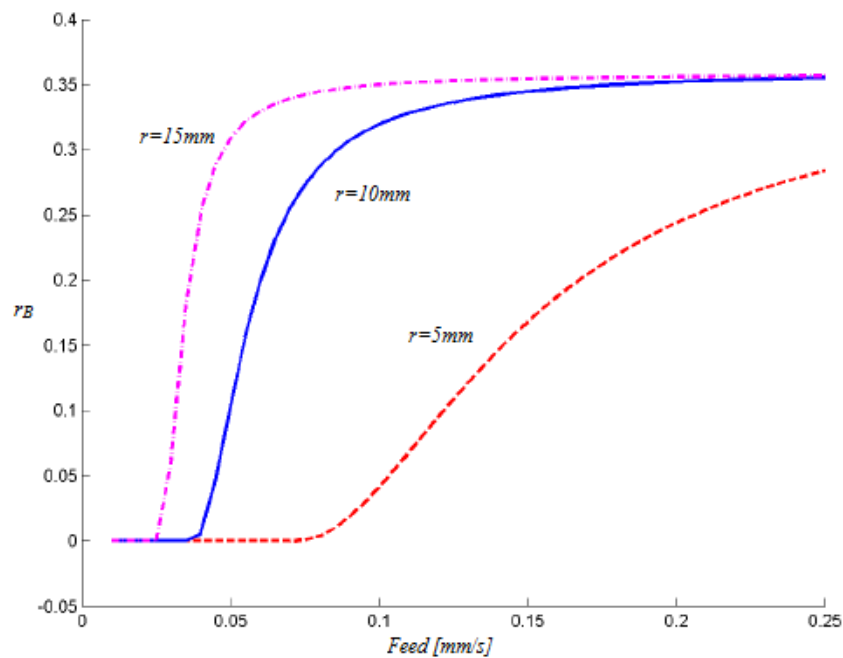


Figura 43. Effetto del raggio di curvatura sul raggio di delaminazione.



**Figura 44.** Effetto del raggio di foratura sull'inizio della delaminazione.

In conclusione, si può affermare che, dato che lo scopo è quello di correlare i segnali provenienti dall'FBG con i valori teorici di previsione di delaminazione, si potrà provare prima ad effettuare dei fori con bassi valori di *feed* e alti di raggio di foratura e poi con valori opposti.

Dai risultati si dovrà notare un qualche cambio di segnale perché nel primo caso si hanno valori “ottimi” di foratura, mentre nel secondo, completamente sbagliati.

## 6.2 Prima foratura CFRP

Per poter familiarizzare con le caratteristiche della prova di foratura, si è deciso di praticare dei fori su provini in carbonio già esistenti e dotati di sensori FBG. Lo scopo di questa sessione, realizzata tramite i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, è quello di prendere dimestichezza con la strumentazione e capire quali accorgimenti sono necessari per le forature con i manufatti realizzati con tecnica RTM. In particolare si vuole verificare come varia il segnale del sensore FBG, avvicinandosi e allontanandosi dallo stesso durante la foratura e come cambia al variare dei parametri di lavorazione.

### 6.2.1 Dati provini

Per questa prova si hanno a disposizione tre provini in carbonio CC400 con laminazione  $0^\circ/90^\circ$  in tessuto. I provini sono stati formati attraverso il processo di laminazione in autoclave con l'aggiunta nella parte centrale di un sensore a reticolo di Bragg (FBG); la posizione della fibra ottica (e quindi del reticolo) varia leggermente all'interno dello spessore in ogni provino (Tabella 2).

### 6.2.2 Strumenti di lavoro

Il sistema di acquisizione dell'intera prova è composto da:

- Strumentazione per FBG; lo strumento per il monitoraggio del sensore della fibra ottica è composto dalla sorgente di luce, da un analizzatore di spettro e dal programma di elaborazione e salvataggio dei dati acquisiti.
- Centro di lavorazione a 5 assi *CNC Kern EVO* con controllo numerico avente risoluzione  $0.1\mu\text{m}$  velocità di avanzamento da  $0.01$  a  $16000\text{mm/min}$ . Essendo la *Kern EVO* una macchina specifica per le microlavorazioni l'area utile di lavoro è notevolmente ridotta rispetto ad una classica macchina utensile, questo ha complicato la sperimentazione



ed il set-up delle prove. Il range di spostamento degli assi X ed Y è stato ulteriormente ridotto dall'utilizzo della teca in plexiglass (utilizzata per limitare la dispersione dei trucioli di lavoro) e da una distanza minima tra la cella di carico ed il mandrino del 5° asse. Questa distanza minima è necessaria alla rotazione del quinto asse durante il pre-setting laser. In definitiva non si è riusciti a lavorare sfruttando la completa area della cella di carico bensì una frazione pari all'incirca a  $100 \times 100 \text{ mm}$  collocata nella parte sinistra della cella.



**Figura 45.** Cella di carico e centro di lavorazione *CNC Kern EVO*.

- Cella di carico *KISTLER 9257BA* collegata al piano di lavoro della *Kern EVO*, che registra attraverso un sensore piezoelettrico le tre componenti ortogonali di forza.
- Termocamera *ThermaCAM SC 3000* con frequenza di acquisizione di  $1 \text{ Hz}$  posizionata al di sopra della zona di lavoro con range di temperatura che va da  $-2$  a  $2000^\circ\text{C}$  con sensibilità di  $0.1^\circ\text{C}$ . Le immagini possono essere analizzate tramite il relativo software *ThermaCAM Explorer 99*.

### 6.2.3 Caratteristiche di lavorazione

Per la foratura, avvenuta sul centro di lavorazione a 5 assi *CNC Kern EVO*, è stata utilizzata una punta di foratura *Sandvik® 856* di diametro  $6 \text{ mm}$ , indicata dalla casa produttrice come specifica per materiali compositi quali fibra di carbonio e vetro, noti per il loro forte potere abrasivo.

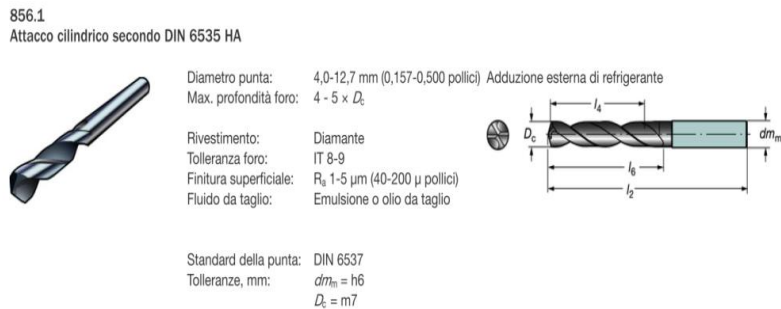


Figura 46. Punta utilizzata.

Il provino è vincolato agli estremi per evitare che si sposti durante le operazioni di foratura; tuttavia, questa operazione di serraggio porta ad una variazione del segnale originario del sensore FBG a seconda della coppia esercitata. Inoltre, sotto all'area di lavoro, è presente un incavo in modo tale che quando l'intera punta fora lo spessore non vada a toccare il fondo della tavola porta pezzo; facendo in questo modo sarà presente una flessione dovuta alla spinta della punta dell'utensile.

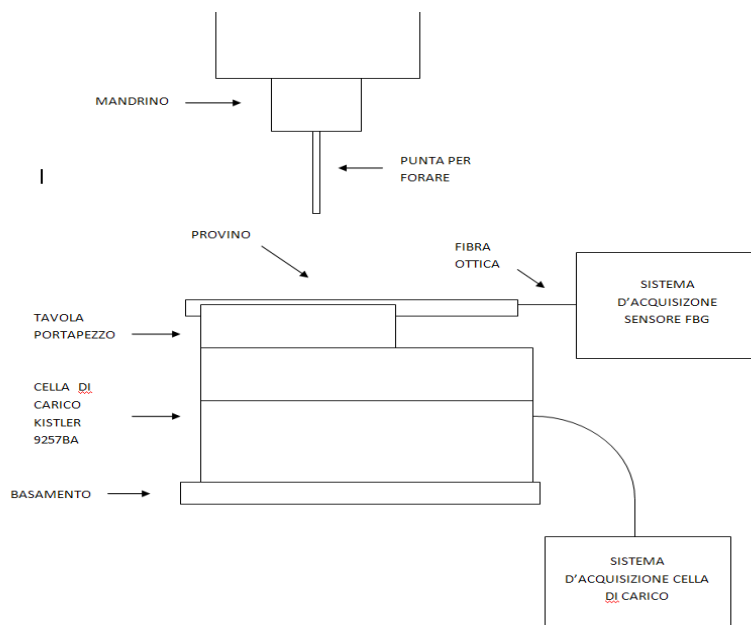
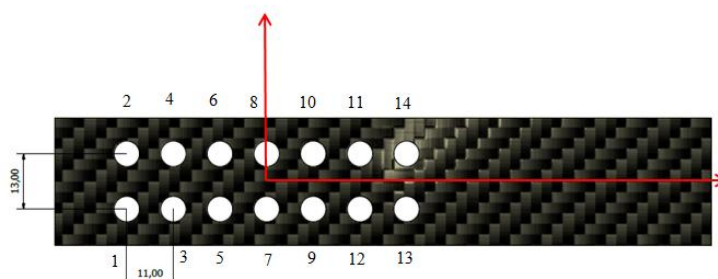


Figura 47. Schema del sistema di lavorazione e acquisizione.

Per quanto riguarda la sequenza di lavorazione ci si è attenuti all'immagine sottostante per i primi due provini, mentre per l'ultimo è stato possibile forare soltanto lungo un lato poiché la fibra ottica non era centrata nella larghezza e, forando da entrambe le parti, si correva il rischio di rovinarla.

Si è scelto come interasse orizzontale tra due fori  $11\text{ mm}$  ed un interasse verticale di  $13\text{ mm}$ . Il periodo temporale minimo intercorso tra un foro e quello successivo è di  $120\text{ s}$ , tempo necessario alla termocamera per apprezzare il raffreddamento del provino dopo la fase di foratura e per impostare le coordinate del foro successivo.



**Figura 48.** Numerazione dei fori e sistema di riferimento.

Sono riportate in Tabella 2 le caratteristiche di ogni prova.

**Tabella 2.** Dati dei provini e di lavorazione.

Provino	Spessore [mm]	Posizione FBG	Lunghezza d'onda FBG [nm]	Parametri SANDVIK	Parametri CUSTOM
1	3.8	Superficie	1549	Tutti	-
2	7.8	Centro	1533	1,4,5,8,9,12,13	2,3,6,7,10,11,14
3	8.4	Centro	1557	3,7,11	1,5,9,13

Come si nota dalla tabella, per i provini 2 e 3 vengono utilizzati diversi parametri di lavorazione. Si considerano come parametri ottimali quelli consigliati dalla casa produttrice della punta (*Sandvik*):  $130\text{m/min}$  (equivalente a  $6897\text{ giri/min}$ ) per la velocità di taglio e  $346\text{ mm/min}$  per la velocità di avanzamento. Dato che il fattore principale per la nascita di delaminazione è la velocità di discesa della punta si utilizza anche un set di parametri tali da promuovere queste cricche: stessa velocità di taglio e velocità di avanzamento pari a  $1035\text{ mm/min}$ .

#### 6.2.4 Primo provino

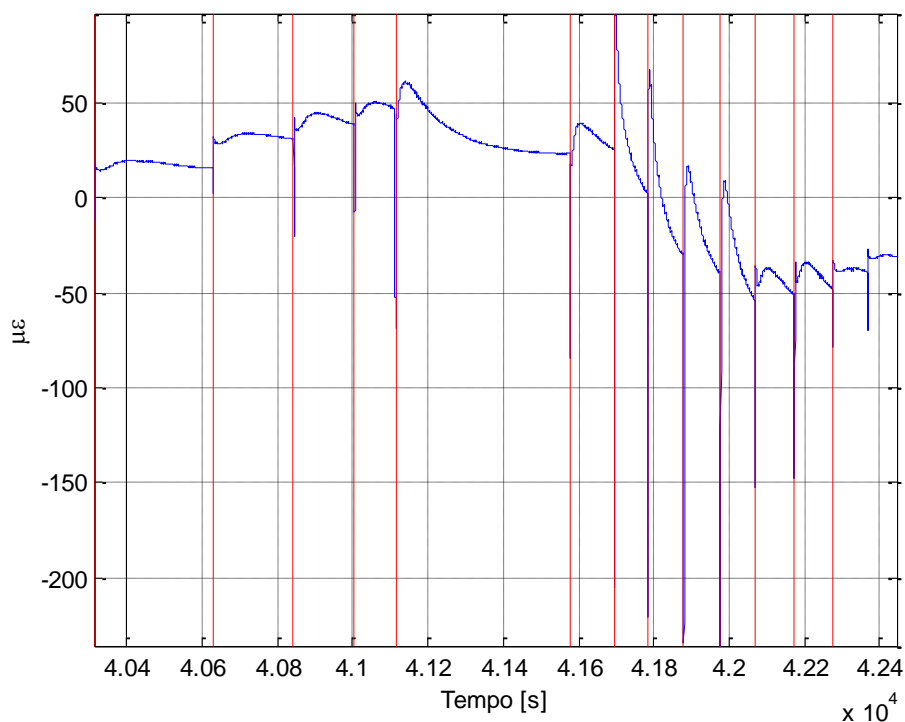
Il primo provino in composito con rinforzo in fibra di carbonio e matrice epossidica ha le dimensioni  $149 \times 25 \times 3.9\text{ mm}$ , è quello con il minor spessore tra quelli a disposizione; la fibra ottica si presenta inglobata al centro della larghezza del provino ma quasi in superficie. Dato che la tavola porta-pezzo è stata realizzata in modo tale da lasciare uno spazio libero per la punta al di sotto

del provino e lo spessore è basso, la flessione in questa prova sarà molto più accentuata rispetto alle altre due; inoltre, essendo il sensore FBG posizionato al di sopra del piano medio della sezione, si osserva sempre un contributo meccanico di compressione sul segnale della fibra ottica.

I parametri di lavorazione scelti per tutti i 14 fori sono quelli consigliati dalla casa produttrice delle punte:

- $V_{AVANZAMENTO}=346 \text{ mm/min}$ ;
- $V_{TAGLIO}=6897 \text{ rpm}$ .

In questa prova non si vuole valutare la differenza del segnale ottico alla variazione dei parametri ma alla variazione della posizione del foro, in avvicinamento e allontanamento dal sensore FBG.

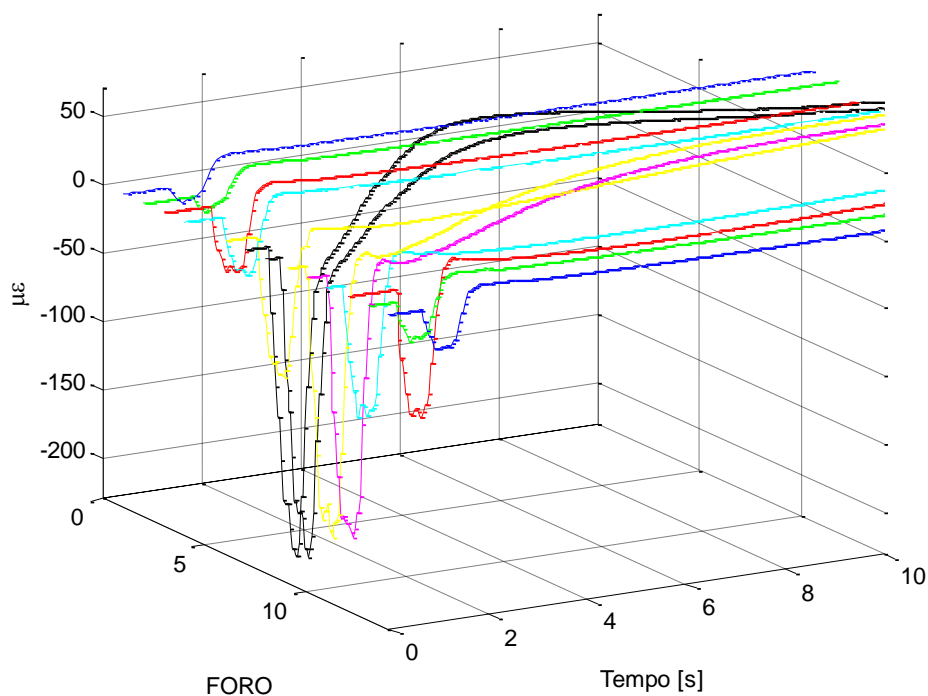


**Figura 49:** Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del primo provino.

La Figura 49 rappresenta l'intera storia del segnale di uscita del sensore FBG in cui sono state utilizzate le linee verticali soltanto per distinguere un foro dal successivo.

Per poter confrontare i singoli fori si elabora questo segnale continuo in modo tale da suddividere la storia dei dati in tante finestre di osservazione quanti sono i fori; nella figura 50 si riporta il disegno tridimensionale dei fori per i primi 10s

di registrazione, facendo partire il segnale di ogni finestra dallo stesso valore di lunghezza d'onda, in modo da poter confrontare il solo effetto meccanico e non il riscaldamento progressivo dell'intero provino.



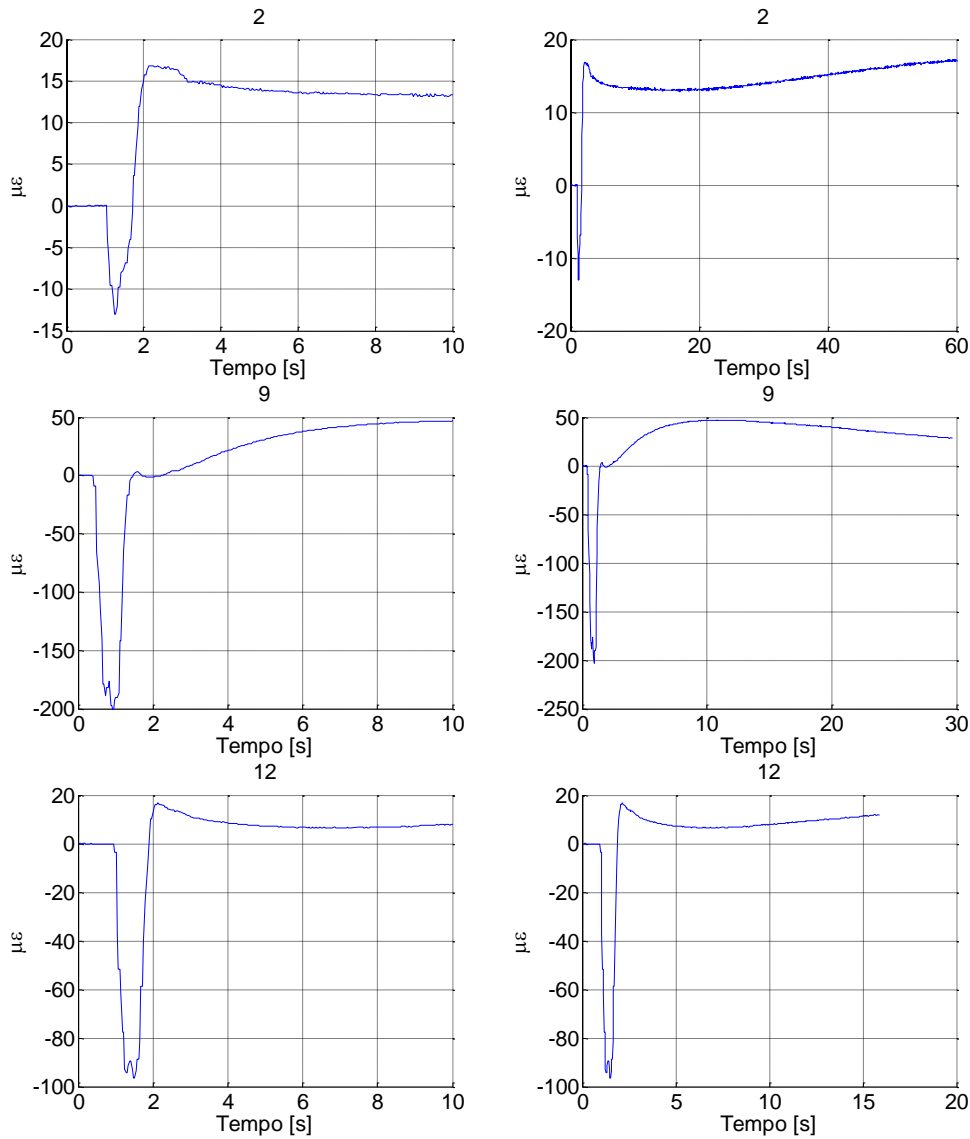
**Figura 50.** Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.

Osservando il grafico si possono fare le seguenti osservazioni:

- Il contributo della flessione è minore nei fori vicino agli estremi rispetto a quelli in centro; perciò la deformazione è maggiore per i fori centrali.
- L'onda di calore dovuta all'attrito della punta arriva con un certo ritardo all'aumentare della distanza dal sensore FBG; avvicinandosi, l'onda diventa quasi istantanea e di maggiore intensità.
- Man mano che si procede con la sessione di fori, l'intero provino si scalda ed essendo vincolato agli estremi non riesce a dilatarsi e comprime gradualmente il centro; si nota perciò una tendenza alla compressione.

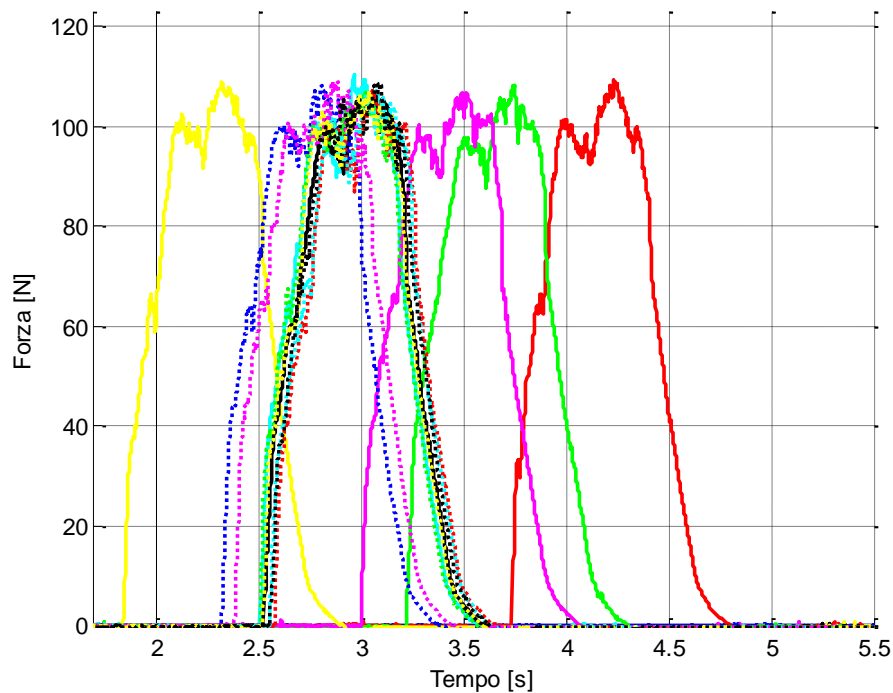
A titolo di esempio si riportano in figura 51 i segnali dei fori 2 ( $x=-33mm$ ,  $y=+6.5mm$ ), 9 ( $x=11mm$ ,  $y=22mm$ ) e 12 ( $x=22mm$ ,  $y=-6.5mm$ ) per i primi 10s e per la durata di registrazione di ogni singolo foro. Si nota la compressione iniziale del sensore dovuta alla flessione del provino sotto l'effetto della spinta della punta; successivamente (dopo un intervallo pari al tempo di foratura dello

spessore) vi è il ritorno elastico. Con ritardo arriva poi il contributo di dilatazione dovuto all'onda di calore.



**Figura 51.** Segnale ottico dei fori 2, 9 e 12.

Guardando l'andamento della forza, riportato in figura 52, risentita dalla cella di carico, si nota la stessa forma e gli stessi valori di carico raggiunti, conseguentemente al fatto di aver mantenuto invariati i parametri di lavorazione. Inoltre si osserva che l'andamento della forza presenta oscillazioni a regime riconducibili all'alternanza di strati più morbidi (resina) e strati più rigidi (tessuto di fibre) che compongono il provino in composito in questione.



**Figura 52.** Segnale della cella di carico.

Una volta estratto il provino dalla tavola porta pezzo si nota che i fori presentano delaminazioni in uscita anche se sono stati utilizzati i parametri e la punta consigliati dalla ditta fornitrice. Questo fatto è imputabile alla bassa compattezza del provino, che si presentava ondulato al tatto.

### 6.2.5 Secondo provino

Il secondo provino di dimensioni 158x29x6.9mm ha spessore intermedio ma la fibra ottica in questo caso si presenta al centro dello spessore; in questa prova non è detto che il contributo della flessione sarà quindi solo a compressione o solo a trazione.

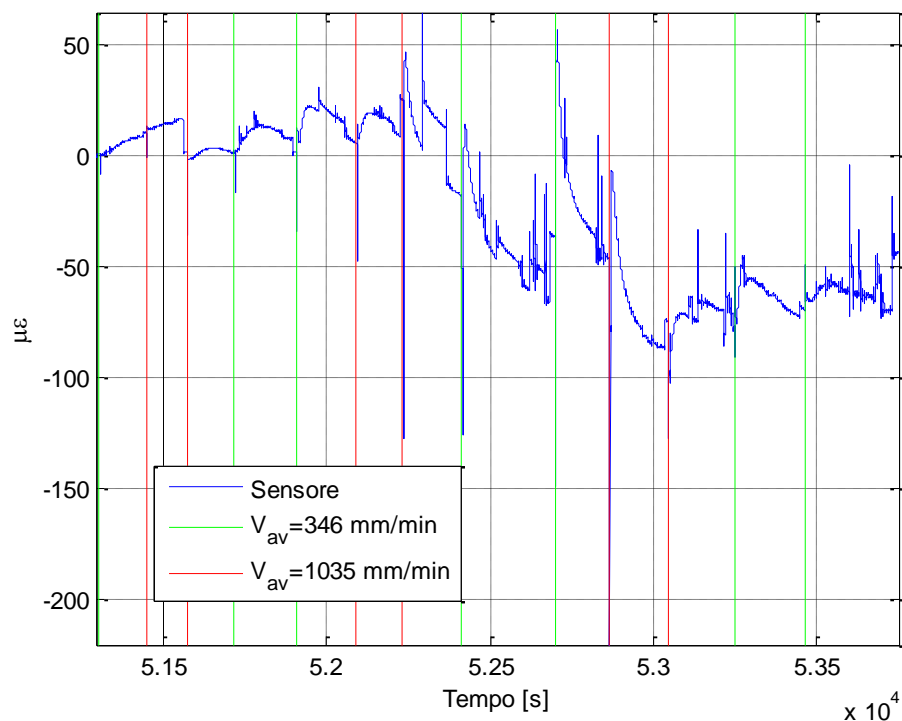
In questa prova si vuole valutare la variazione di segnale anche a seguito di un cambio di parametri di lavorazione.

Parametri SANDVIK:

- $V_{AVANZAMENTO}=346 \text{ mm/min}$ ;
- $V_{TAGLIO}=6897 \text{ rpm}$ .

Parametri CUSTOM:

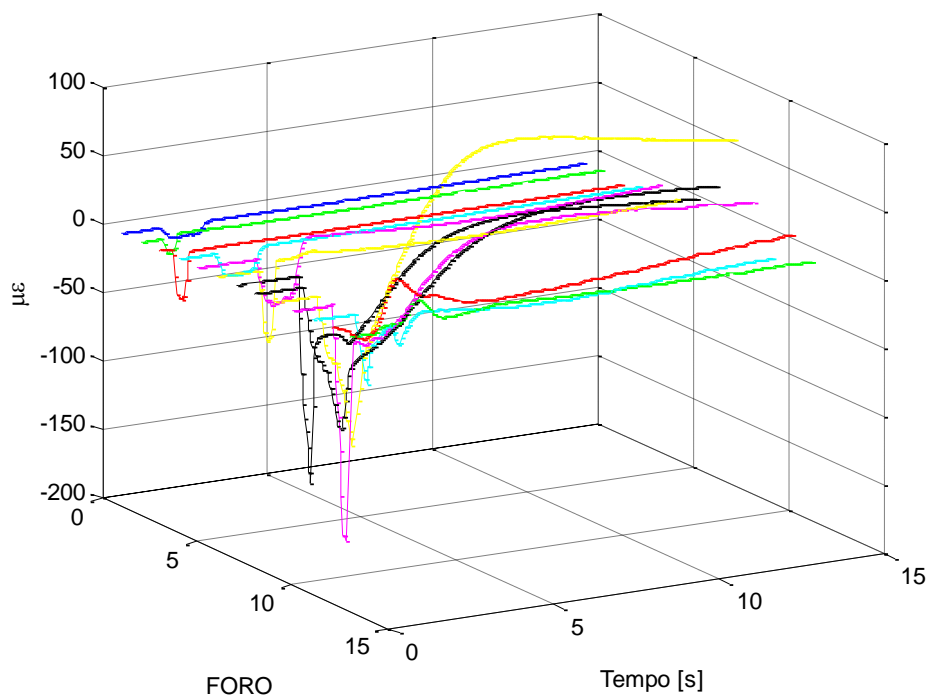
- $V_{AVANZAMENTO}=1035 \text{ mm/min}$ ;
- $V_{TAGLIO}=6897 \text{ rpm}$ .



**Figura 53.** Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del secondo provino.

Come è stato fatto per la precedente prova, nella figura 54 si è elaborato il segnale in modo tale da suddividerlo in finestre di osservazione per ogni foro per un confronto migliore.





**Figura 54.** Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori

Osservando il grafico della seconda prova si possono fare le seguenti osservazioni:

- La deformazione, dovuta alla flessione, è maggiore per i fori centrali.
- L'onda di calore è istantanea quando foriamo vicino al sensore, invece ha un ritardo quando siamo lontani.
- Si nota ancora una tendenza alla compressione.
- Il segnale è più sporco, forse a causa di un maggiore serraggio del provino che lo porta a sensibilizzarsi agli spostamenti e alle vibrazioni della macchina.
- Gli ultimi fori presentano un'inversione della deformazione meccanica a flessione forse dovuta a una conseguente variazione del piano medio.

Nella figura 55 sono di nuovo messi a confronto un foro lontano dal sensore ( $x=-33mm$ ,  $y=-6.5mm$ ) e uno adiacente a esso ( $x=0mm$ ,  $y=6.5mm$ ) entrambi eseguiti con velocità di penetrazione lenta; si osservano ancora sia la maggiore variazione di lunghezza d'onda per il foro centrale che la diversa velocità di propagazione dell'onda di calore.

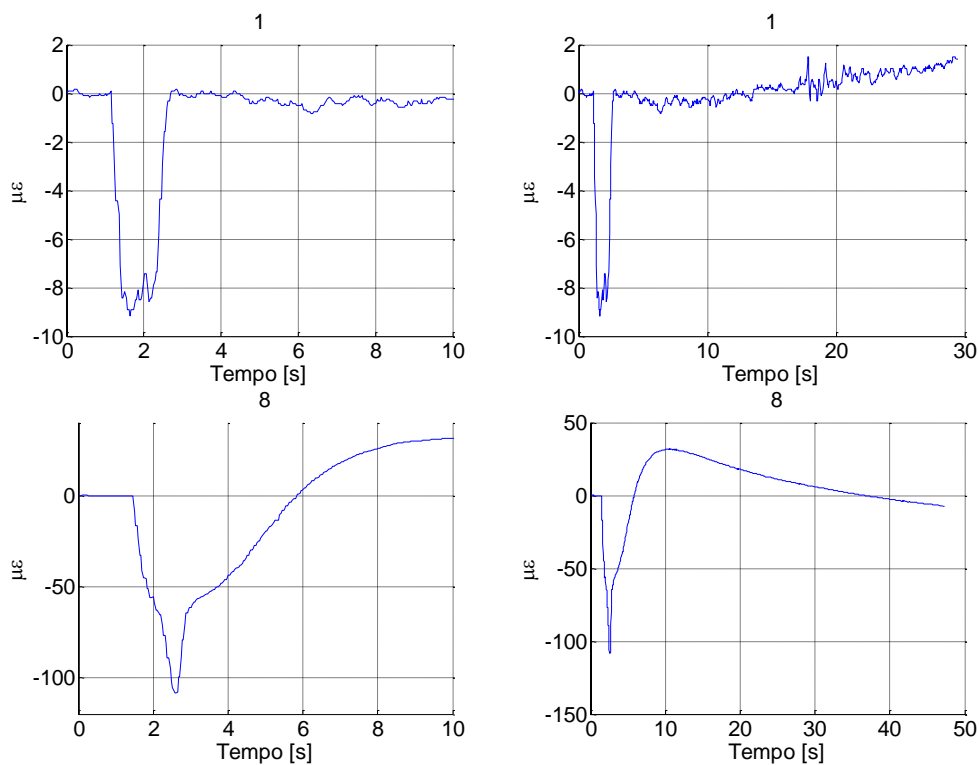
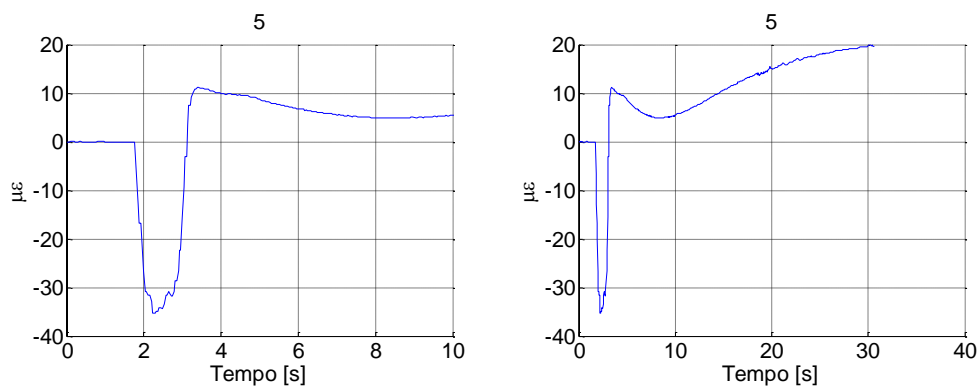
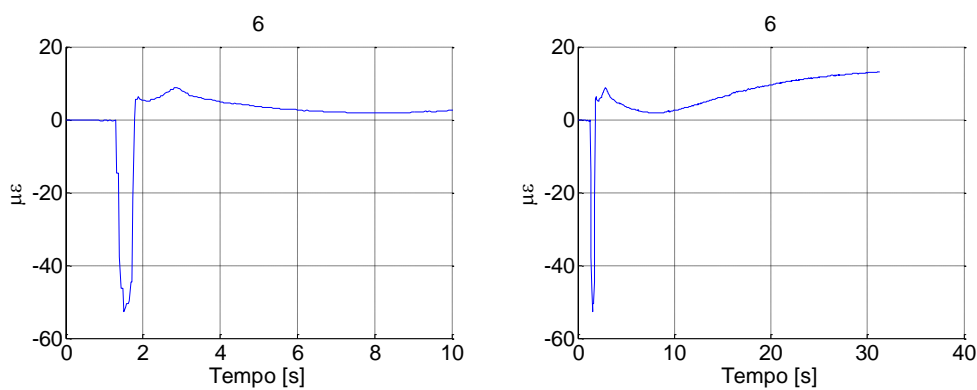


Figura 55. Segnale ottico dei fori 1 e 8.

Dato che in questa prova sono stati utilizzati due differenti parametri di lavorazione, si riportano in figura 56 per confronto i segnali dei fori 5 e 6 ( $x=-11mm$ ,  $y=\pm 6.5mm$ ) realizzati rispettivamente con penetrazione lenta e con penetrazione veloce; entrambi i fori si trovano alla stessa distanza dal sensore, perciò la differenza di segnale è da imputare solo all'operazione meccanica di spinta della punta.

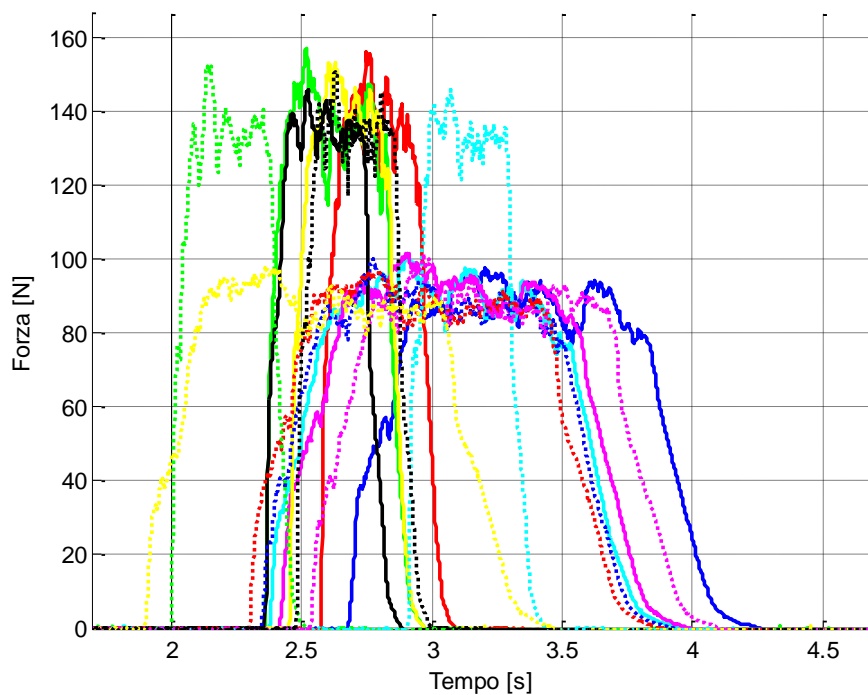




**Figura 56.** Segnale ottico dei fori 5 e 6.

Come ci si poteva aspettare, si nota un aumento di variazione di lunghezza d'onda per il foro fatto con alta velocità di penetrazione e un minor tempo di foratura (il picco negativo è molto più stretto per il foro 6); si osserva comunque che i due fori generano lo stesso andamento dell'onda di calore.

Per quanto riguarda l'analisi dei dati della cella di carico si osserva un aumento della spinta che, rispetto alla velocità di avanzamento non ha un legame lineare (Figura 57).

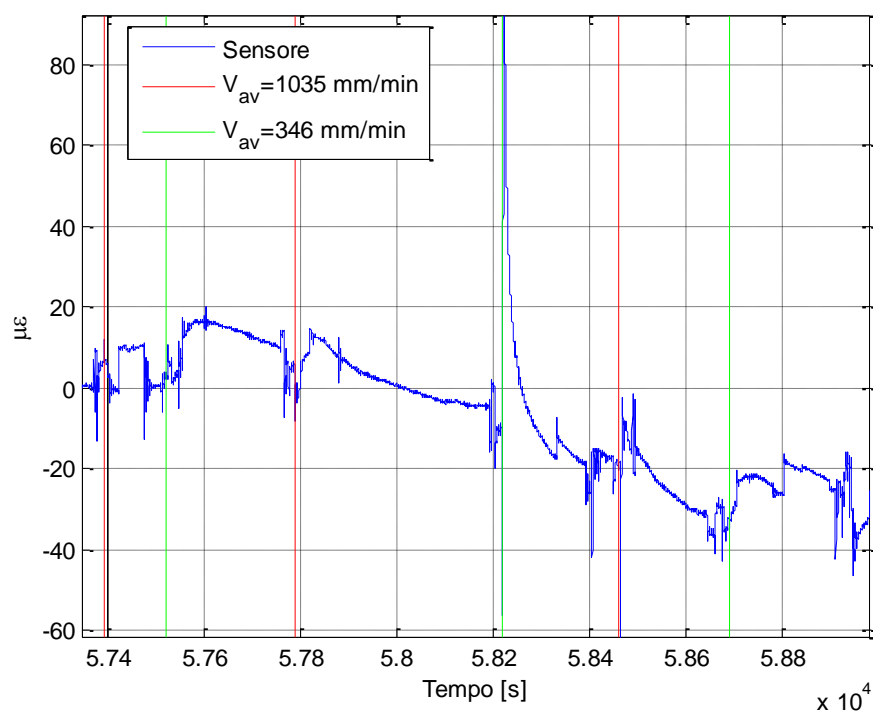


**Figura 57.** Segnale della cella di carico.

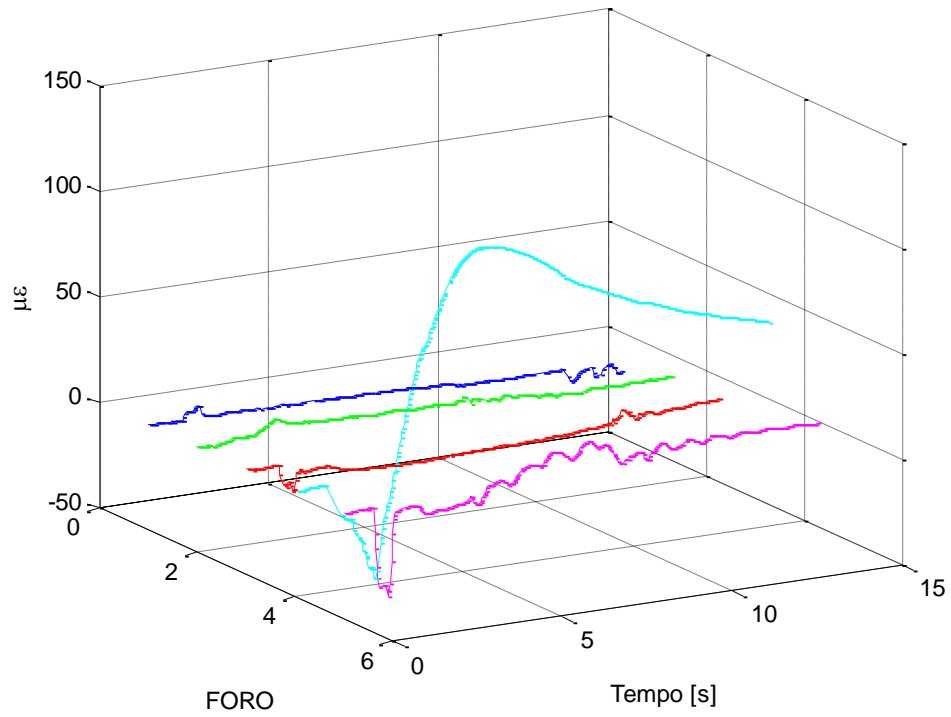
### 6.2.6 Terzo provino

In quest'ultima prova viene utilizzato il provino con spessore maggiore in cui però è possibile realizzare soltanto una fila di fori in quanto la fibra ottica non è disposta nel centro della larghezza.

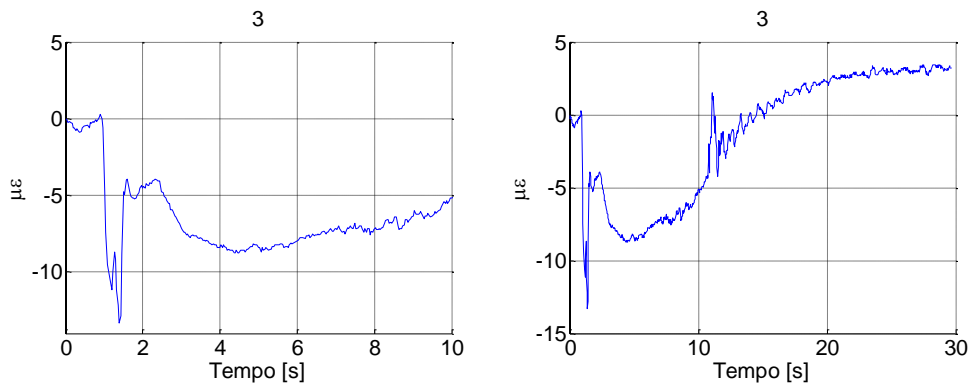
Come per la precedente si vuole valutare la variazione di segnale a seguito di un cambio di parametri di lavorazione; per i fori 3,7 e 11 vengono utilizzati i parametri SANDVIK mentre per i restanti si usano i parametri CUSTOM.

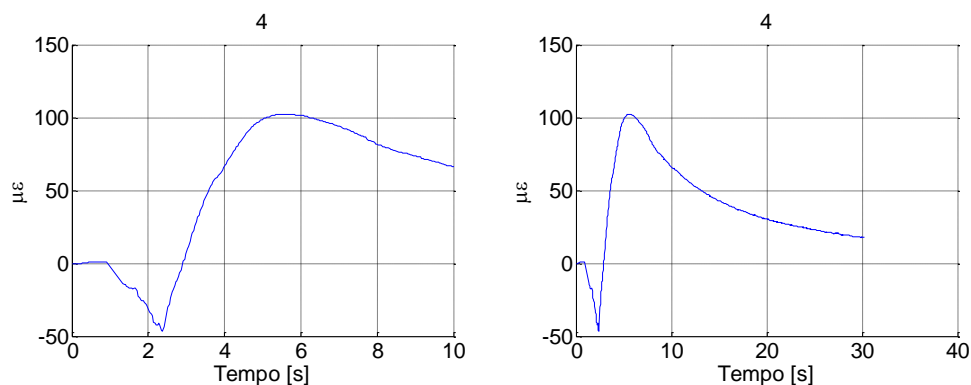


**Figura 58.** Segnale ottico dell'intera sequenza di fori del terzo provino.



**Figura 59.** Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.

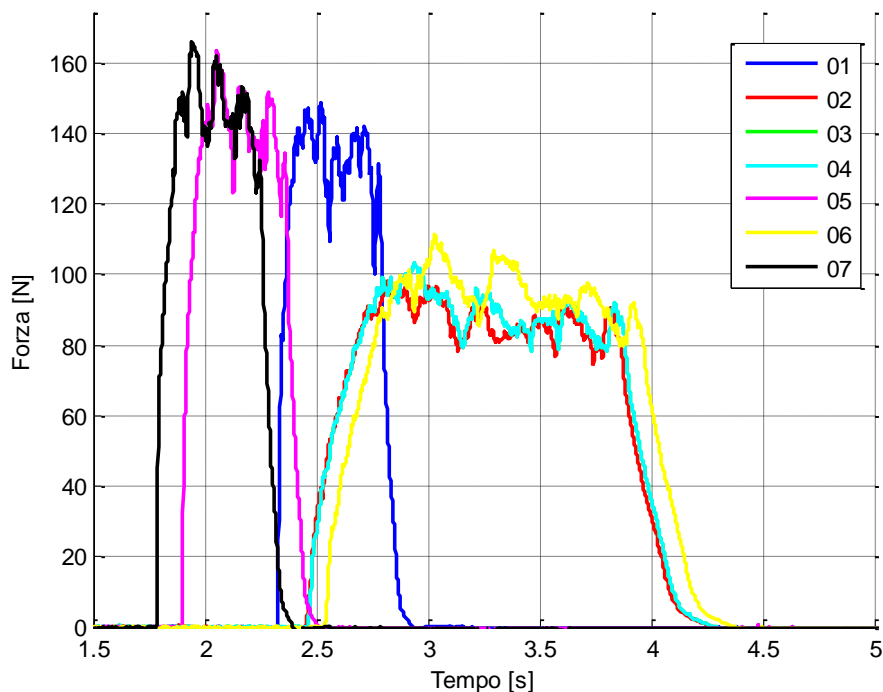




**Figura 60.** Segnale ottico dei fori 3 e 4.

Questa prova ha un segnale FBG maggiormente affetto da rumore; i fori sono difficilmente distinguibili.

Si osserva comunque che il foro effettuato in corrispondenza del sensore presenta un picco più elevato e un effetto termico maggiormente visibile che negli altri fori.



**Figura 61.** Segnale della cella di carico.

## 6.3 Seconda foratura CFRP

### 6.3.1 Dati provini

Per questa prova si ha a disposizione un provino in carbonio *CC600* con laminazione  $0^{\circ}/90^{\circ}$  in tessuto.

Il provino è stato realizzato tramite tecnica RTM e presenta un sensore FBG all'interno del piano medio.

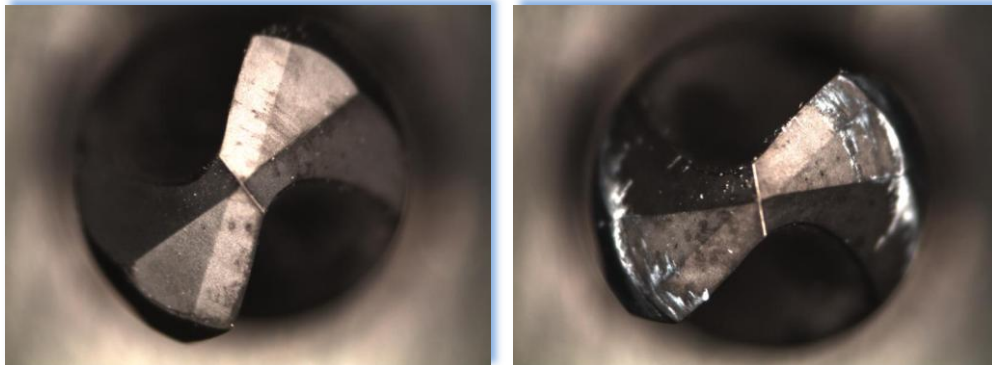
### 6.3.2 Strumenti di lavoro

Il sistema di acquisizione dell'intera prova è di nuovo composta da:

- Strumentazione per registrazione del segnale ottico proveniente dal sensore FBG.
- Centro di lavorazione a 5 assi *CNC Kern EVO*.
- Cella di carico *KISTER 9257BA* collegata al piano di lavoro della *Kern EVO*.
- Termocamera *ThermaCAM SC 3000* con frequenza di acquisizione di 1 Hz posizionata al di sopra della zona di lavoro.

### 6.3.3 Caratteristiche di lavorazione

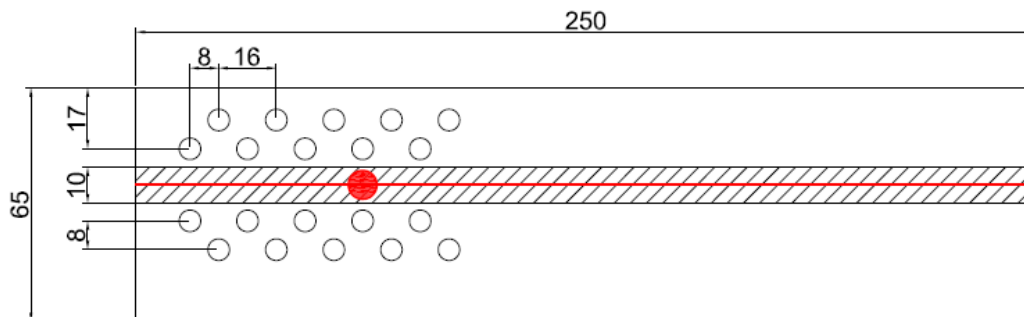
Per la foratura vengono utilizzate due punte *Sandvik® 856* di diametro *6mm* che differiscono nel grado di usura; viene alternato l'utilizzo di una punta nuova (NEW) ed una punta precedentemente usurata tramite polvere di boro (US) con l'intento di verificare se vi sia o meno differenza nei segnali ottici e in quelli forza.



**Figura 62:** Analisi al microscopio di una punta nuova e una usurata.

In questo caso viene scelto un unico set di parametri di lavorazione che consiste in una velocità di avanzamento (*Feed Rate*) pari a  $1038\text{mm}/\text{min}$  ed una velocità di taglio (*Spindle Speed*) di  $6897\text{rpm}$ .

Vengono realizzati 20 fori in un'area di lavoro di  $65 \times 80\text{mm}^2$  con disposizione rappresentata in Figura 63.



**Figura 63.** Disposizione fori.

#### 6.2.4 Analisi dei risultati

In questa prova è interessante analizzare non solo il segnale ottico ma anche il segnale proveniente dalla cella di carico.

##### CELLA DI CARICO

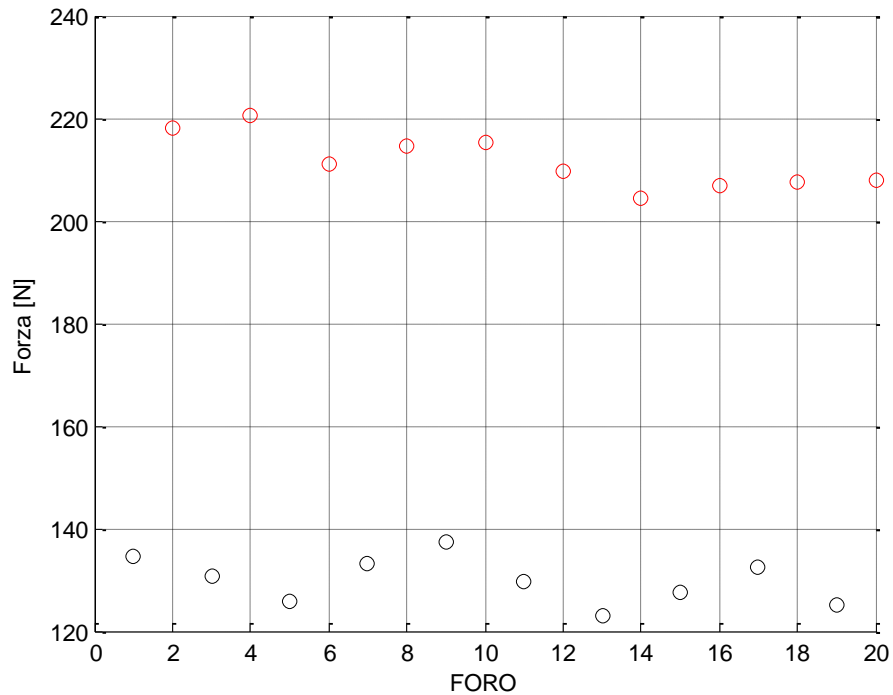
Dato che in questo caso, l'intera campagna di foratura è stata realizzata con la medesima velocità di avanzamento per ogni foro, la variazione di spinta sul pezzo da lavorare è da imputare soltanto all'utilizzo di una diversa punta.

In generale si osserva che, la punta usurata provoca una maggiore compressione sul composito in quanto l'usura dei taglienti rende difficoltosa la penetrazione



all'interno del materiale. La macchina di lavorazione dovendo mantenere inalterato il *Feed Rate*, aumenterà la forza in risposta ad una difficoltà di avanzamento.

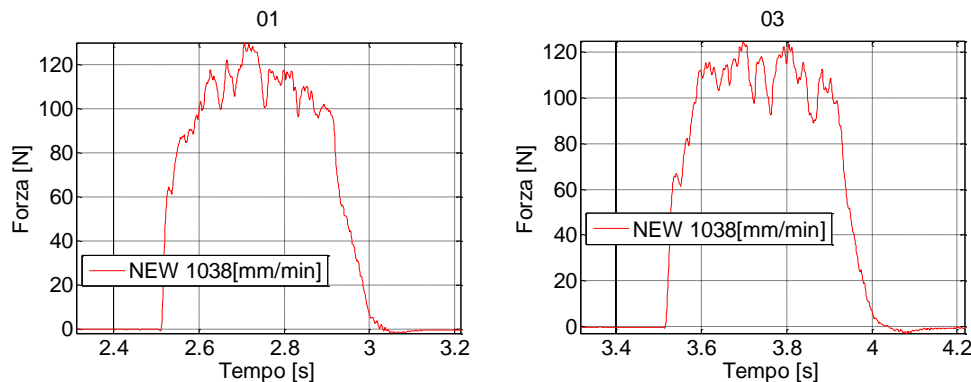
Il grafico riportato nella Figura 64 riporta i massimi di forza registrati per ogni foro e spiega questo effetto.



**Figura 64.** Massimi di forza per ogni foro per una punta nuova (nero) e una usurata (rosso)

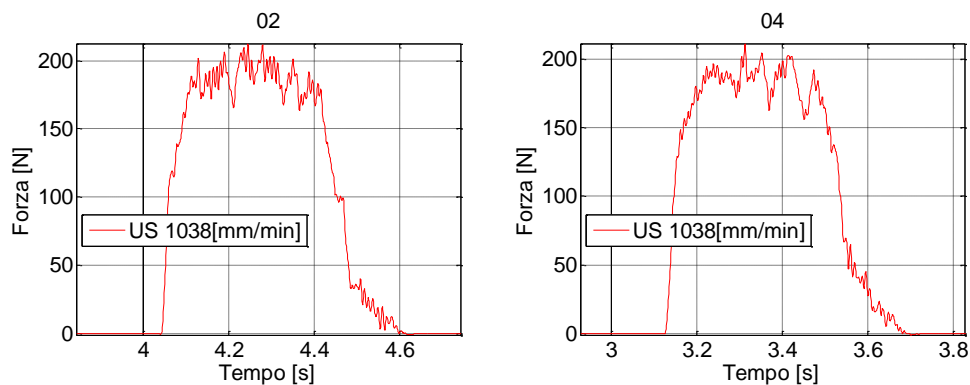
Oltre a questa considerazione di carattere generale si osserva che il segnale di forza, registrato durante la foratura con punta nuova riesce a distinguere l'alternanza di strati morbido (resina) e rigidi (fibre) che caratterizzano lo spessore del composito in fibra di carbonio.

Inoltre la crescita della forza, fino al valore di "regime" avviene in modo graduale.



**Figura 65.** Segnale di forza con l'utilizzo di una punta nuova (NEW).

Al contrario quando si utilizza una punta usurata (US) il segnale è molto sporco e si distinguono con maggiori difficoltà gli strati morbidi da quelli rigidi; anche il raggiungimento della condizione di regime avviene in modo più brusco.



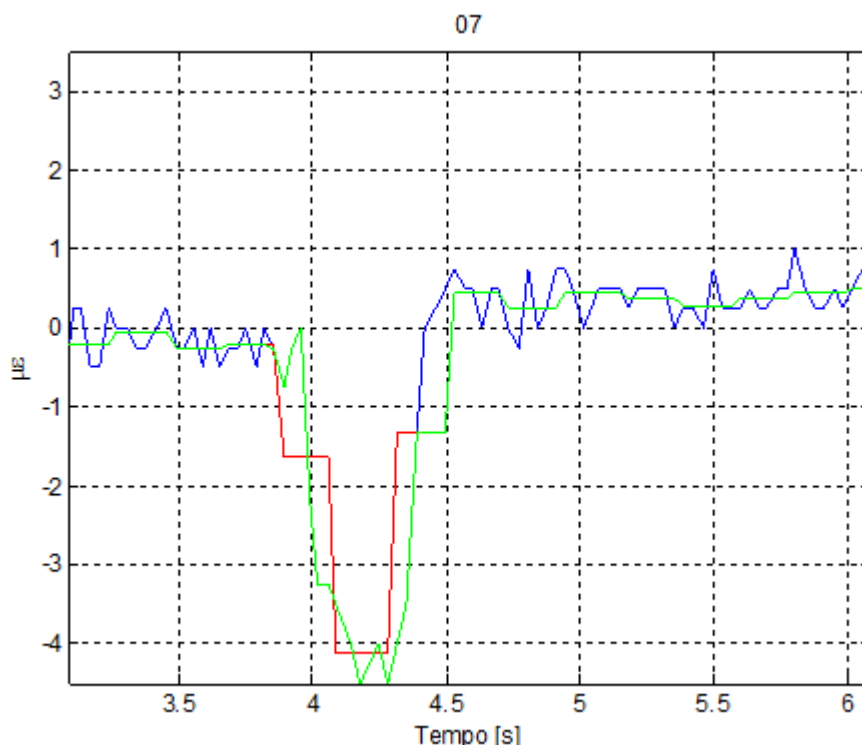
**Figura 66.** Segnale di forza con l'utilizzo di una punta usurata (US).

A differenza del caso precedente si osserva che, la foratura continua anche nel momento di fine foratura.

### SEGNALE FBG

La frequenza di acquisizione del segnale ottico in questa prova è di  $25\text{Hz}$ ; dato che il segnale si presenta affetto da rumore si è preferito effettuare un filtraggio con media mobile a 5 punti. Tuttavia, utilizzando questo tipo di elaborazione del segnale, la finestra temporale riguardante la foratura del provino potrebbe subire variazioni di segnale deleterie dal punto di vista informativo. Si è perciò deciso di effettuare la media mobile a 5 punti al di fuori di questa finestra temporale mentre all'interno il segnale ottico non viene modificato da alcun tipo di filtraggio.

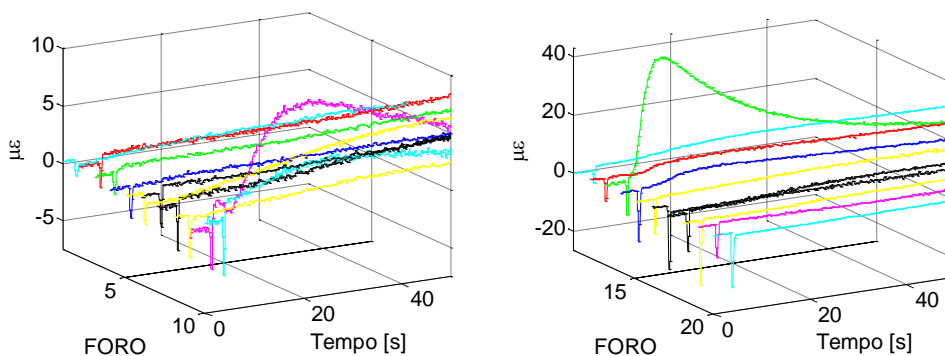
Nella Figura 67 si nota che sono presenti tre curve: la curva originale (blu), il segnale filtrato con media mobile (rosso) e la curva presa in considerazione (verde); quest'ultima, ricalca il segnale filtrato (rosso) al di fuori della finestra temporale di foratura e il segnale originale (blu) all'interno di essa.



**Figura 67.** Filtraggio utilizzato

In questo segnale di esempio si osserva come la media mobile elimini le oscillazioni dovute al rumore al di fuori della “finestra” di foratura, mantenendo comunque il loro valore medio inalterato; all'interno della finestra il segnale elaborato ricalchi l'originale, evitando perdite d'informazioni.

Si riportano in Figura 68 i grafici tridimensionali del segnale ottico registrato per ogni foro e sottoposto all'operazione di filtraggio descritta precedentemente. Si osserva che i primi fori, vicino ai supporti presentano una flessione moderata mentre per altri fori (10 e 13) si osserva la presenza istantanea dell'onda di calore che investe il sensore generando una sua dilatazione. Questo andamento rispecchia la disposizione dei fori rispetto a quella del sensore FBG rappresentata in Figura 63.

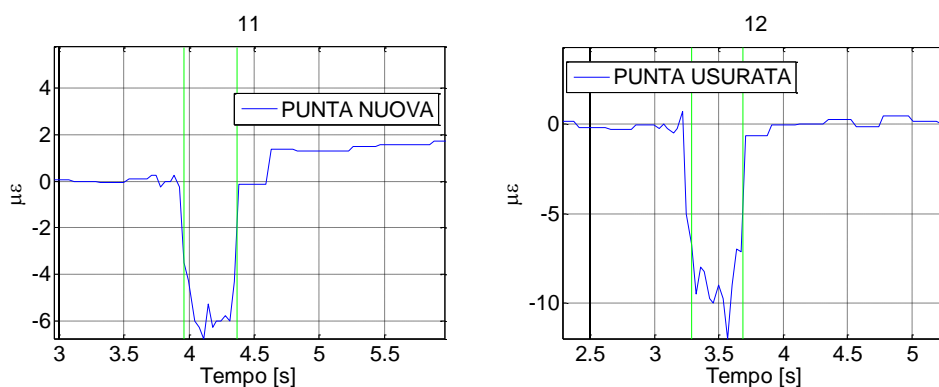


**Figura 68.** Confronto tridimensionale dei segnali ottici dei singoli fori.

In figura 69 sono messi a confronto i fori 11 e 12 distanti  $55\text{mm}$  dal supporto e disposti simmetricamente rispetto alla linea media del sensore. Come introdotto dall'analisi della forza registrata dalla cella di carico, l'utilizzo di una punta usurata a pari velocità di avanzamento comporta una maggiore spinta e quindi una maggiore flessione.

In questi due grafici sono riportati anche gli istanti temporali d'inizio e fine foratura ottenuti a partire dalla conoscenza dello spessore e della velocità di avanzamento. Si osserva che all'interno di questo lasso temporale (fra le due linee verdi) il segnale presenta fluttuazioni simili a quelle registrate dalla cella di carico e perciò riconducibili alla penetrazione della punta attraverso gli strati che compongono il composito.

Si osserva inoltre che a pari distanza dai supporti (fori 11 e 12, 13 e 14) il segnale presenta una maggiore intensità quando è utilizzata la punta usurata, coerentemente con quanto letto dalla cella di carico.



**Figura 69.** Segnale ottico dei fori 11 e 12.

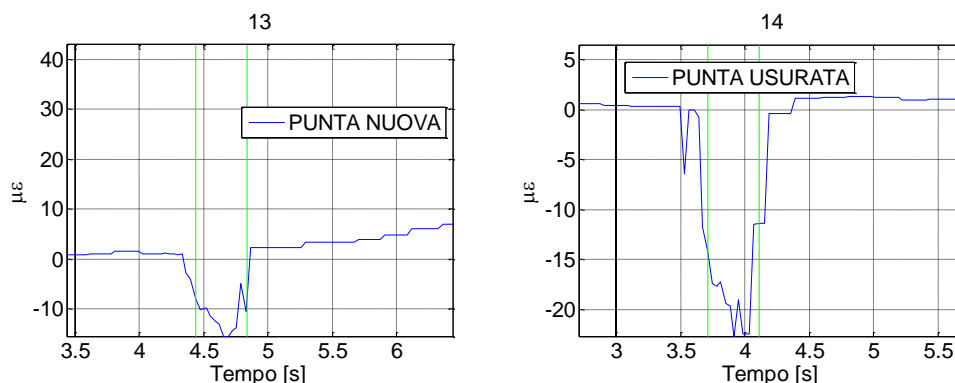


Figura 70. Segnale ottico dei fori 13 e 14.

## 6.4 Depurazione del segnale dal contributo termico

### 6.4.1 Prova in camera ambientale

Questa prova ha lo scopo di determinare il valore della costante termica  $K_T$  del manufatto in cui sono presenti sensori FBG; dall'equazione riportata sotto, si nota che la variazione della lunghezza d'onda di Bragg è data da un contributo meccanico e da uno termico.

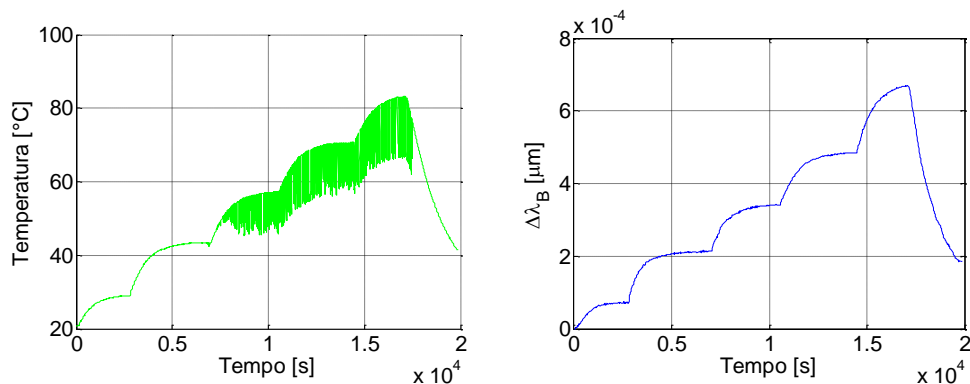
$$\Delta\lambda_b = K_\varepsilon \cdot \varepsilon + K_T \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

Riuscendo a calcolare la temperatura del pezzo (in corrispondenza dell'FBG) durante una qualsiasi lavorazione e avendo la costante termica, si riesce a determinare quale sia lo stato di deformazione meccanica effettivo.

La prova in camera ambientale consiste nel sottoporre il provino a "step" di temperature sequenziali e registrare l'andamento della dilatazione dell'FBG ogni volta che viene raggiunta la temperatura fissata; i livelli di temperatura imposti sono arbitrari ma devono avere come limite il massimo valore di temperatura raggiunta dal provino nelle condizioni di utilizzo. Il test è stato protratto fino a  $90^\circ\text{C}$  per poter effettuare una migliore regressione lineare avendo a disposizione più punti.

All'interno della camera ambientale il provino è sottoposto soltanto al contributo termico. Conoscendo la variazione di lunghezza d'onda e la variazione di temperatura, misurata tramite una termocoppia posta sul pezzo, si riesce a determinare la pendenza che è proprio  $Kt$ .

È stata realizzata sia una prova con i provini preesistenti utilizzati per la prima campagna di fori (Capitolo 6.2), sia con il manufatto realizzato in RTM (Capitolo 4.5); in Figura 71 sono riportati soltanto i risultati di quest'ultima.



**Figura 71.** Temperatura e segnale ottico durante la prova in camera ambientale.

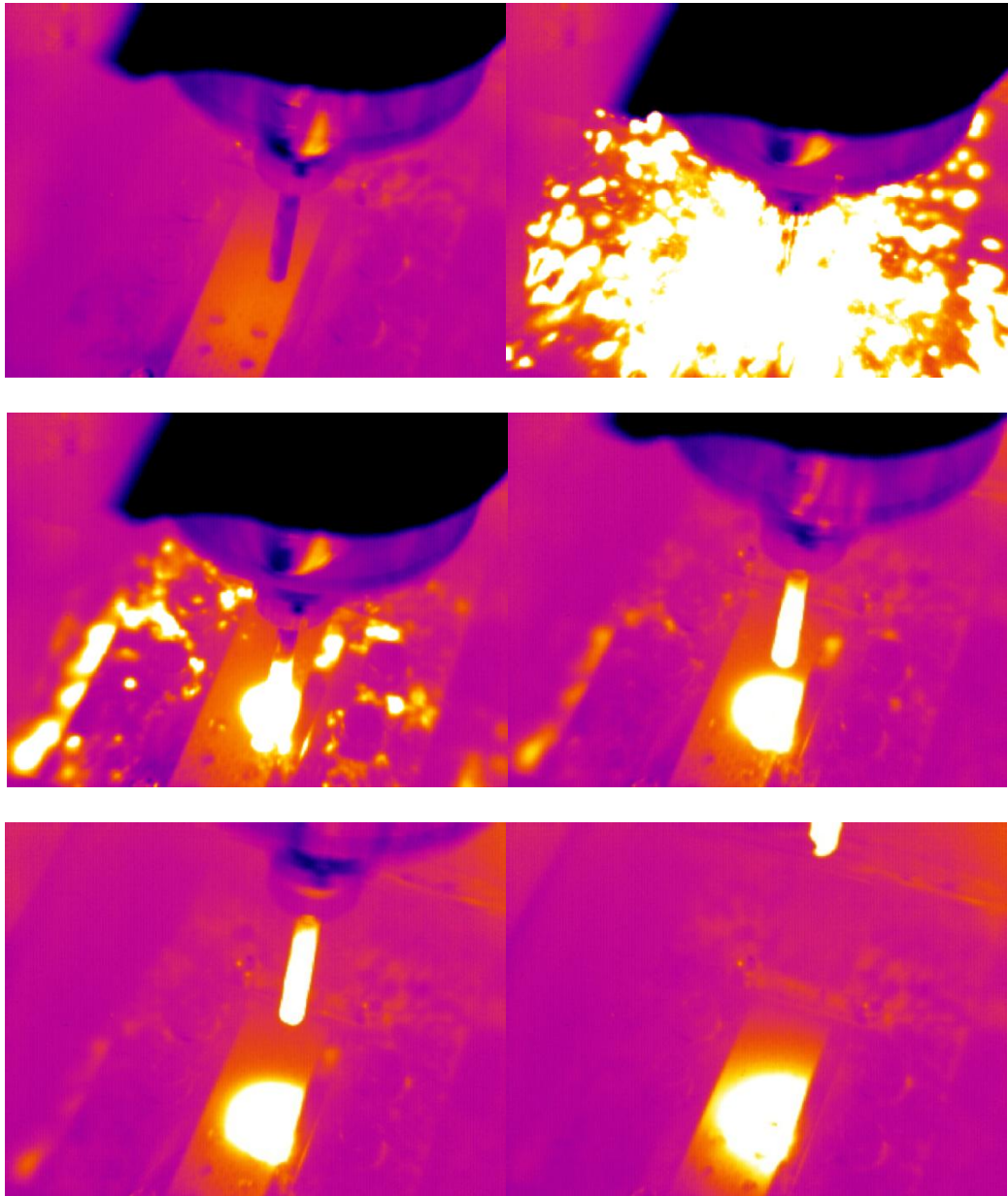
Si nota nella misura della termocoppia un andamento molto sporco al di sopra dei  $50^{\circ}\text{C}$ ; ai fini del calcolo della costante termica è influente in quanto si considera il valore massimo della curva per effettuare la regressione lineare.

I valori ottenuti sono di  $1.12e-5 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$  e  $1.22e-5 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$  rispettivamente per i provini e per il manufatto in RTM correlabili con i valori presenti in letteratura [13].

#### 6.4.2 Elaborazione del segnale

Lo scopo di questa parte del lavoro è di depurare il segnale ottico di ogni foro dalla componente dovuta all'effetto termico. L'operazione di depurazione del segnale ottico dal contributo termico prevede le seguenti fasi di elaborazione:

- Estrazione dei valori di temperatura dalle immagini termiche. Queste registrazioni visualizzano una sequenza d'immagini con frequenza  $1\text{Hz}$ ; il puntatore per la lettura della temperatura deve essere posizionato in corrispondenza delle coordinate del sensore FBG sul provino. Tuttavia, come si osserva nella sequenza d'immagini riportata sotto, non è possibile registrare la temperatura nell'istante esatto del foro sia perché la frequenza di acquisizione massima impostata non è sufficiente ad individuare il momento di contatto sia perché all'inizio della lavorazione viene registrato il bagliore termico che falserebbe la misura.



**Figura 72.** Sequenza di immagini della termocamera durante un foro.

- Una volta ottenute i dati dalla termocamera in corrispondenza del sensore con frequenza  $1Hz$  è necessario estrapolare questi segnali in modo tale da avere una registrazione termica con frequenza di acquisizione pari a quella della registrazione ottica.
- A questo punto si può depurare il segnale originale dal contributo termico dato dalla differenza di temperatura fra l'istante  $i$ -esimo e

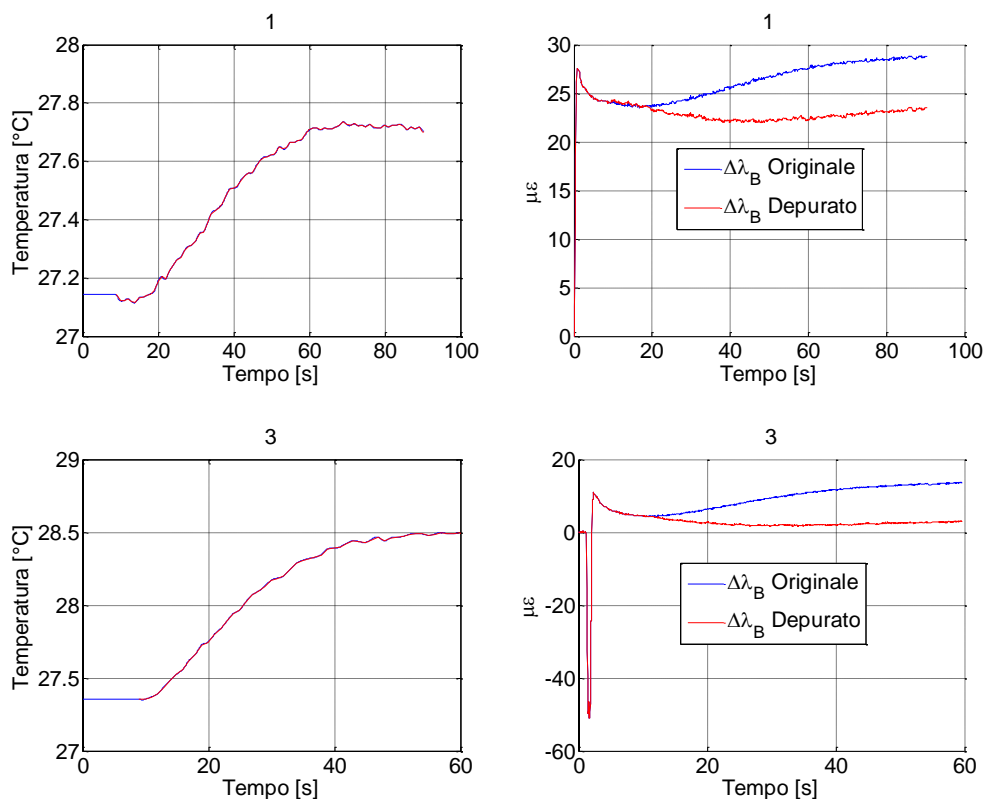
l'iniziale di ogni foro, moltiplicata per la costante termica  $K_T$  ricavata dalla camera ambientale.

Si nota che, pur sottraendo una parte del segnale, in alcuni casi si nota comunque la presenza dell'onda termica; questo è da imputarsi al fatto che la misura è di tipo puntuale. L'onda termica, invece, si propaga all'interno dell'intero provino dilatandolo non solo in corrispondenza del sensore FBG.

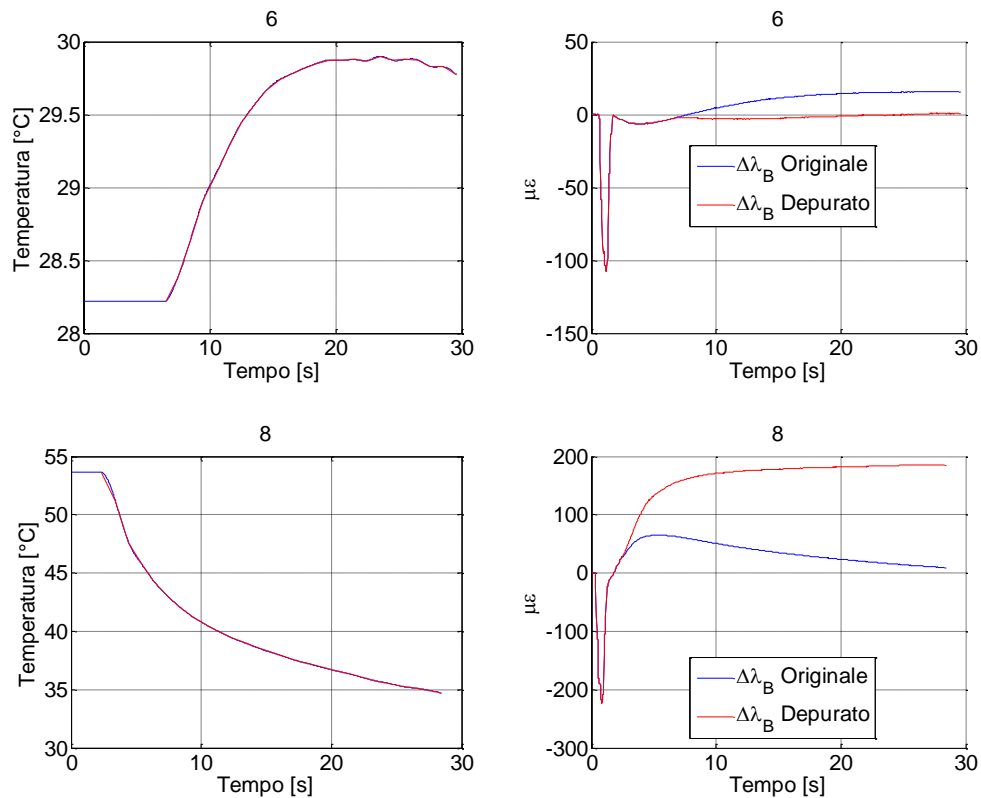
Si esegue l'operazione per i fori descritti nel capitolo 6.2.

### PRIMO PROVINO

Si riportano, per alcuni fori, sia l'andamento della temperatura dopo il foro che il segnale ottico originale e depurato dall'effetto termico.







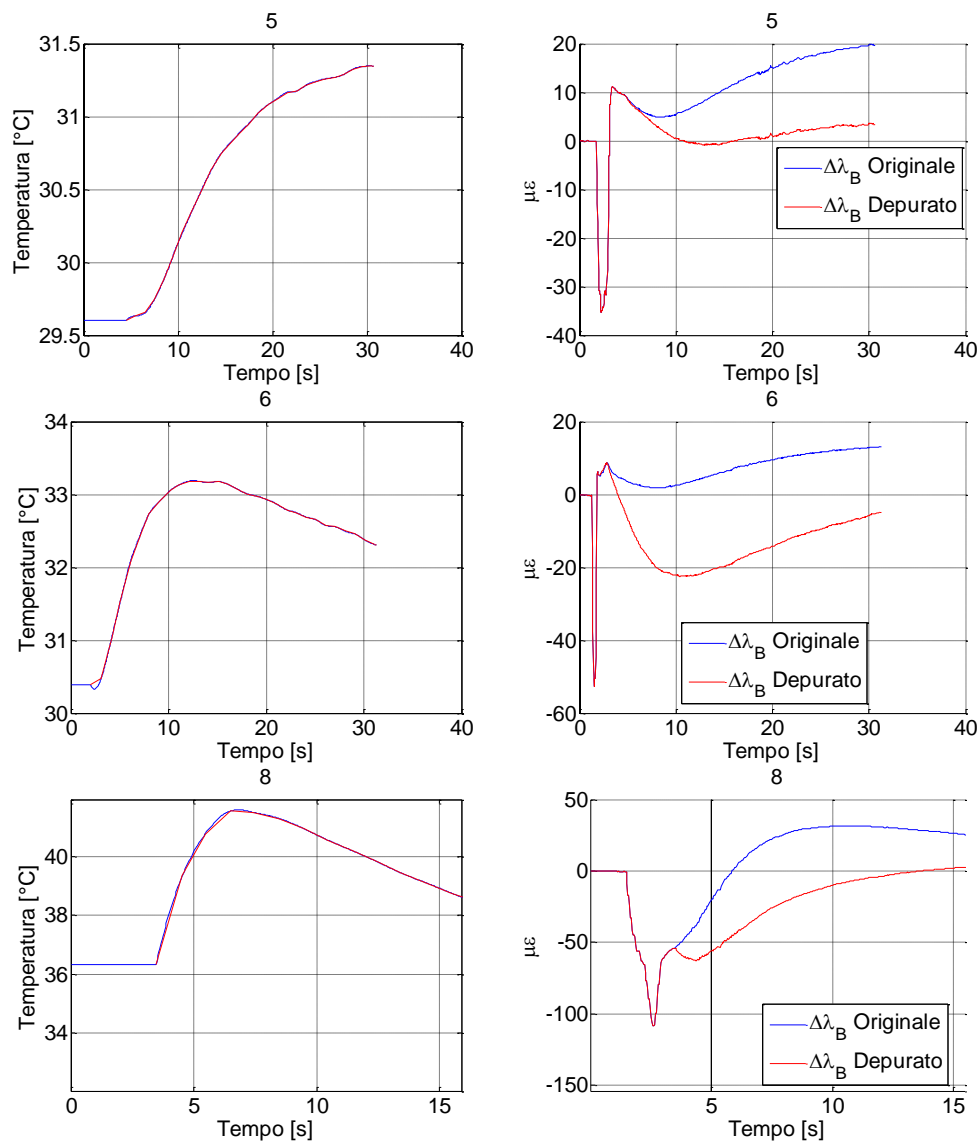
**Figura 73.** Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 1, 3, 6 e 8

Come già osservato nei precedenti grafici, l'andamento del segnale di temperatura conferma che l'onda di calore diventa rapida e con intensità maggiore più ci avviciniamo al sensore; è possibile fare un confronto qualitativo del segnale di temperatura.

L'andamento della temperatura per il foro 8 è decrescente; questo non significa che si stia raffreddando ma che l'effetto termico è già avvenuto ma non è stato possibile registrarlo a causa del bagliore termico.

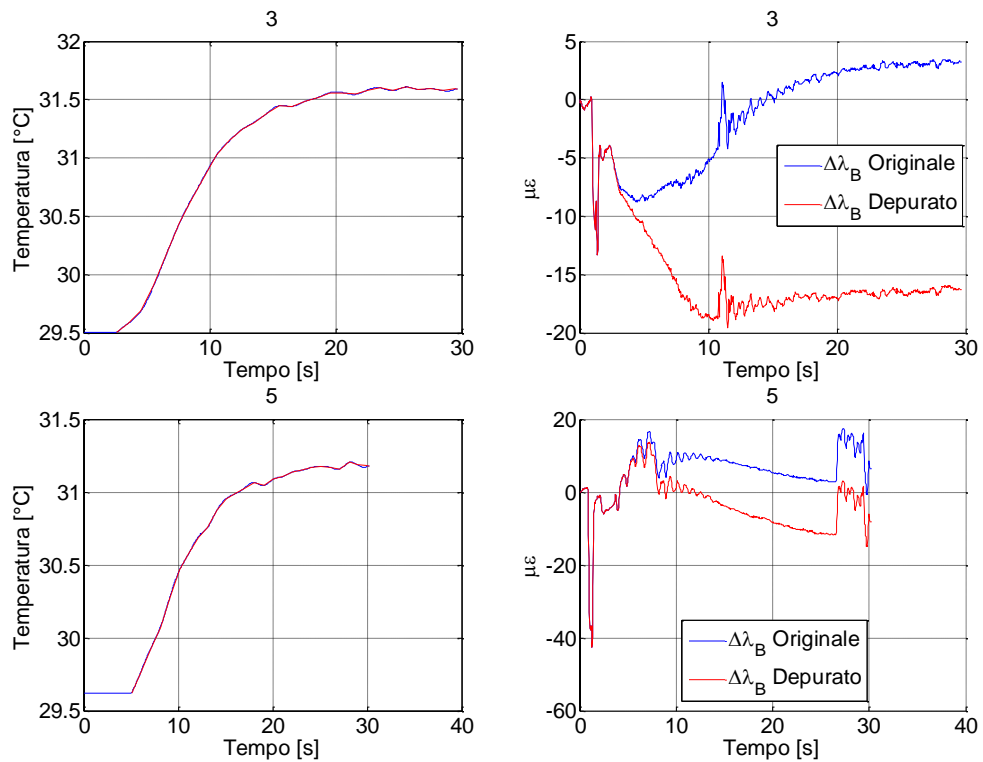
SECONDO PROVINO

Si riportano, per alcuni fori, i grafici di temperatura e segnale ottico, originale e depurato.



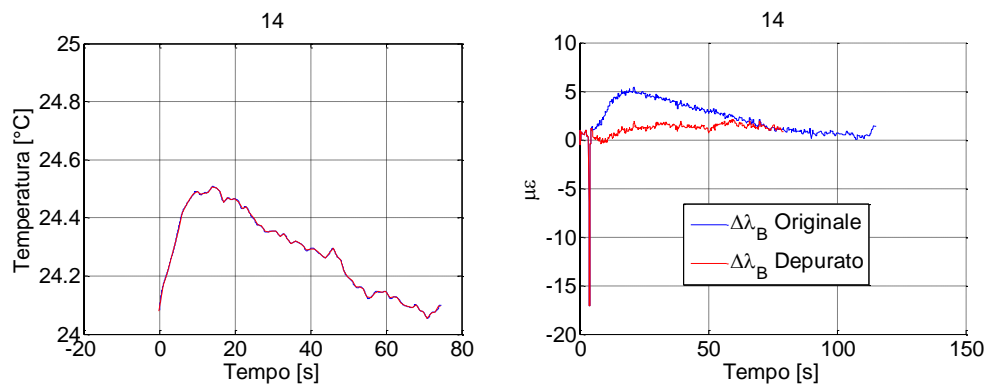
**Figura 74.** Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 5, 6 e 8.

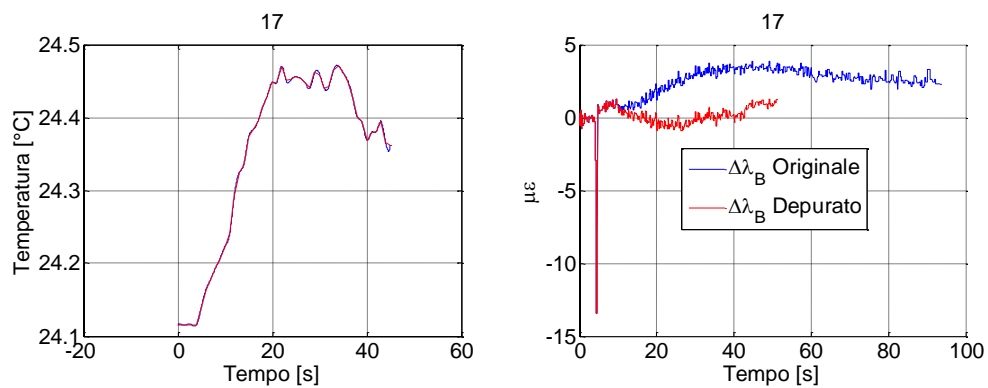
## TERZO PROVINO



**Figura 75.** Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 3 e 5

Si esegue l'operazione per i fori descritti nel capitolo 6.3 seguendo lo stesso procedimento descritto all'inizio di questo capitolo. Si riportano le elaborazioni eseguite per alcuni fori.





**Figura 76.** Andamento della temperatura e depurazione del segnale ottico per i fori 14 e 17

## 7. Foratura FML

### 7.1 Teoria

L'analisi e l'ottimizzazione del processo di foratura di questi assemblaggi dal punto di vista della qualità del foro rappresenta una sfida per mantenere le proprietà meccaniche dei materiali di partenza. Infatti perforando questi materiali ibridi si generano differenti deformazioni e quindi differenti tolleranze lungo l'intero foro, a causa delle diverse proprietà meccaniche (modulo elastico) e termiche (coefficiente di conduzione e dilatazione termica) fra i vari strati [7]. In aggiunta l'espulsione dei trucioli lungo il foro può danneggiarne l'interno a causa della forma e dell'abrasività di questi ultimi; ad esempio quando uno strato in lega di alluminio si trova al di sotto di una lamina di CFRP, il continuo trasporto di trucioli di alluminio ad alta temperatura all'interno del foro in materiale composito deteriora le caratteristiche della resina e possono nascere delaminazioni.

Per questo, gli ibridi necessitano in genere sia di differenti strumenti sia di parametri di lavorazione, alcuni adatti a materiali compositi e altri a materiali metallici (come appunto alluminio e titanio); inoltre la sequenza di lavorazione deve essere scelta considerando oltre allo spessore dei vari strati e alle tipologie di materiali, anche la quantità e al tipo di trucioli che vengono generati.

Al momento, i fori per alcuni componenti dell'ala e del piano di coda di un velivolo sono lavorati tramite una foratura "*multi-step*" che necessita prefiori per ogni materiale, seguita dall'operazione di eliminazione di sbavature. Successivamente i singoli strati del componente vengono assemblati insieme. Questo procedimento garantisce una buona finitura dei fori, grazie all'utilizzo di parametri ottimali per ogni singolo materiale, ma comporta tempi di produzione alti.

In alternativa l'insieme dei tre materiali può essere assemblato precedentemente e poi forato con una singola discesa; questa scelta comporta un risparmio dei tempi di produzione ma una veloce usura dell'utensile che dopo pochi fori necessita una sostituzione (circa 30 fori)[8].

D'altro canto, la presenza delle lamine in lega di alluminio o lega di titanio funge da piastra di supporto per il materiale composito diminuendo la possibilità di nascita di delaminazioni in uscita o entrata dal foro.

In questo lavoro sarà analizzata la foratura di tipo “*one-shot*” (a singola discesa) di materiali ibridi realizzati tramite incollaggio oppure tramite infusione RTM.

In letteratura [8], si osserva che per mantenere un livello di usura degli utensili da taglio limitato si consiglia una bassa velocità di rotazione (1500-2500 rpm) ed un altrettanto bassa velocità di avanzamento (circa 0.05 mm/rev) in modo da limitare anche la spinta sul provino.

## **7.2 Prima foratura ibrido**

### **7.2.1 Dati provini**

Si procede all'operazione di foratura del provino ibrido CFRP/Lega-Al di dimensioni  $68 \times 317 \times 6 \text{ mm}$  derivante dall'infusione RTM descritta nel capitolo (5.2); lo spessore è composto da  $5 \text{ mm}$  di materiale composito con fibre di rinforzo CC600 e matrice epossidica LY564 con percentuale di fibre al 55% e da  $1 \text{ mm}$  di lega di alluminio Ergal 7075.

### **7.2.2 Strumenti di lavoro**

Per la lavorazione viene utilizzata una fresatrice a controllo numerico con banco fisso *DEBER Dynamic 2* con possibilità di movimentazione sui tre assi.

Per il monitoraggio del segnale ottico viene utilizzata la sorgente-interrogatore *OttoLight* impostando una frequenza di acquisizione di  $2000 \text{ Hz}$ , numero di medie pari a 40, guadagno  $G$  pari a 1 e tempo di salvataggio del segnale pari a  $50 \text{ ms}$ .

Mantenendo, infatti, un basso numero di medie (5,10) il segnale ottico dal provino si presenta molto disturbato con variazioni non significative anche in condizioni di quiete; aumentando il numero di medie queste oscillazioni vengono filtrate ed il segnale rimane più stabile in condizioni di riposo.

Viene monitorata anche la temperatura attraverso la termocamera *Nikon LAIRD-S270* comandata tramite il relativo programma di acquisizione dati; viene impostata una frequenza di acquisizione di  $0.5 \text{ s}$  per acquisire 21 fotogrammi in 10 secondi in modo tale da registrare la temperatura nel momento del contatto.

### **7.2.3 Caratteristiche di lavorazione**

A partire dai dati riportati sugli articoli di foratura di materiali ibridi (in particolare *CFRP/Lega Al*) vengono scelti due set di parametri di lavorazione; la decisione di questi valori è basata principalmente sul mantenere limitate condizioni di usura dell'utensile (influenzata dalla velocità di taglio) e spinta sul pezzo da lavorare (influenzata dalla velocità di avanzamento). Come per la

prova precedente (Capitolo 6.2) viene mantenuta inalterata la velocità di taglio della punta mentre a variare è soltanto la velocità di avanzamento:

**Tabella 3:** Parametri di lavorazione

	<b>Feed Rate</b> [mm/rev] ([mm/min])	<b>Cut Speed</b> [rpm]
1x	0.15 (346)	2000
0.3x	0.05 (115)	2000

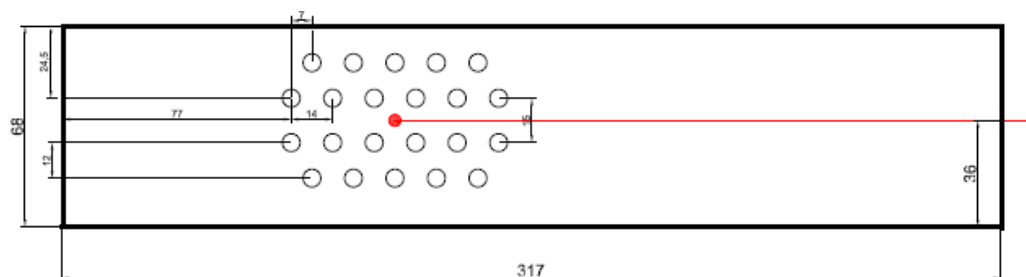
È utilizzata una punta *Dormer HSS TIN* per acciaio e materiali metallici di diametro  $6\text{mm}$ ; questo diametro è stato scelto in base alle specifiche classiche dell'industria aeronautica che variano dai  $4\text{mm}$  agli  $8\text{mm}$ .



**Figura 77.** Punta utilizzata.

Sono stati realizzati 22 fori in un'area di dimensioni  $100 \times 70\text{mm}^2$  (Figura 78) circostante il sensore FBG, posto nell'interfaccia fra i due materiali.

I primi 12 fori vengono realizzati incidendo prima l'alluminio e poi il carbonio; i restanti 10 vengono realizzati nella modalità inversa. La sequenza inizia dal lato sinistro della figura e si procede verso destra effettuando ogni coppia di fori.



**Figura 78.** Disposizione fori

Dato che il sensore si trova nello strato d'interfaccia fra i due materiali, ci si aspetta una condizione di compressione del reticolo di Bragg per i primi 12 fori mentre una condizione di trazione per i restanti 10; infatti, forando per prima la lastra metallica, il sensore FBG si trova al di sopra dell'asse neutro della sezione e, sotto la spinta dell'utensile, registrerà una compressione. Al contrario, forando prima il materiale composito, registrerà una trazione.

Dato che la fresatrice a controllo numerico a disposizione del Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale non dispone di una camera di lavorazione chiusa non è possibile soffiare i trucioli di lavoro dalla superficie del provino per motivi di sicurezza degli operatori. Di conseguenza il materiale lavorato rimane sul pezzo impedendo una lettura veritiera della temperatura nell'intorno del sensore FBG.

#### 7.2.4 Analisi dei risultati

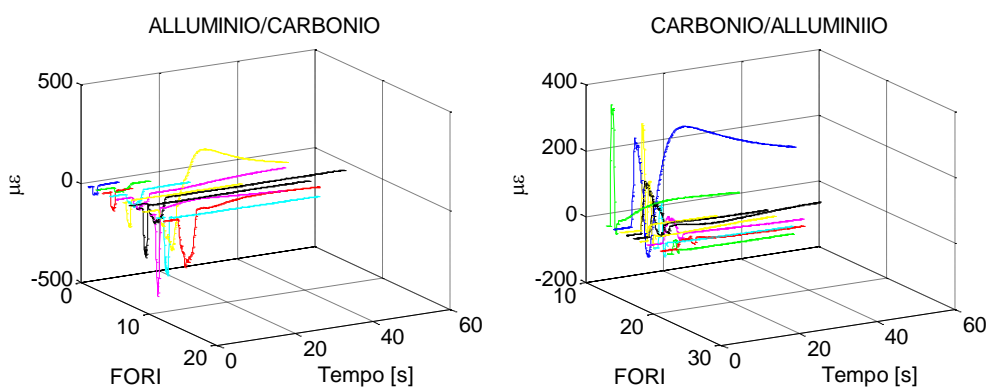
Come ci si aspettava, il segnale ottico registrato dal sistema di acquisizione presenta variazioni negative (compressione) del picco di lunghezza d'onda del reticolo di Bragg quando la foratura inizia dalla lamina metallica e variazioni positive (trazione) quando la foratura incide per prima il materiale composito.

I fori d'uscita dalla parte del materiale composito si presentano molto delaminati a causa dell'utilizzo di una punta non adatta a questo tipo di materiale; al contrario, i fori d'uscita della lamina metallica presentano una buona finitura del foro.

Ci si aspetta che utilizzando una punta per materiali compositi si ottenga il risultato opposto.

Viene riportato in Figura 79 il grafico tridimensionale dei fori realizzati rispettivamente forando prima l'alluminio e poi il carbonio e viceversa. Il picco di variazione (positiva o negativa) aumenta avvicinandosi al centro dell'area di lavoro a causa dell'aumento della flessione.

Si nota inoltre che alcuni fori centrali presentano un picco positivo pur essendo forati in due modi diversi; questa dilatazione del reticolo di Bragg è dovuta all'aumento istantaneo della temperatura in corrispondenza del sensore.



**Figura 79.** Confronto tridimensionale del segnale ottico di ciascun foro

Di seguito è riportata l'analisi dei segnali ottici di alcuni fori. Grazie all'utilizzo della fresatrice a controllo numerico abbiamo la certezza che la macchina

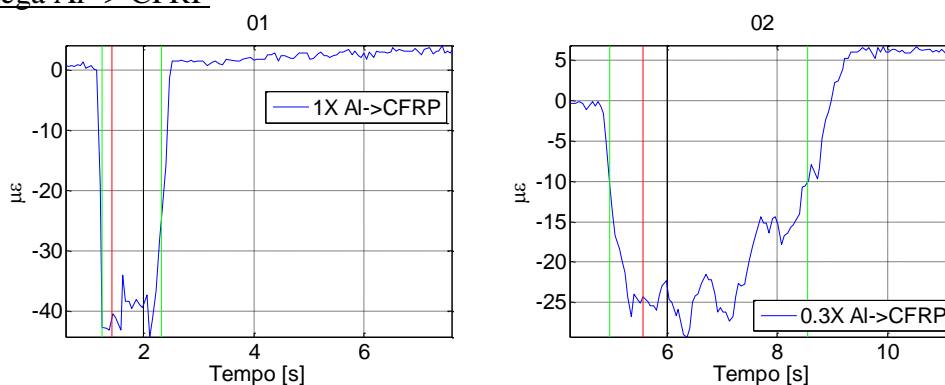


mantenga la velocità di avanzamento della punta costante e pari al valore impostato. A questo punto, conoscendo gli spessori dei due strati si può andare ad associare il segnale FBG in un dato periodo temporale alla foratura di un dato materiale.

**Tabella 4.** Tempi di foratura.

	Tempo <sub>Al(1mm)</sub> [s]	Tempo <sub>CFRP(5mm)</sub> [s]	Tempo <sub>TOT(6mm)</sub> [s]
1X	0.1791	0.8955	1.0746
0.3X	0.6	3	3.6

Lega Al -> CFRP



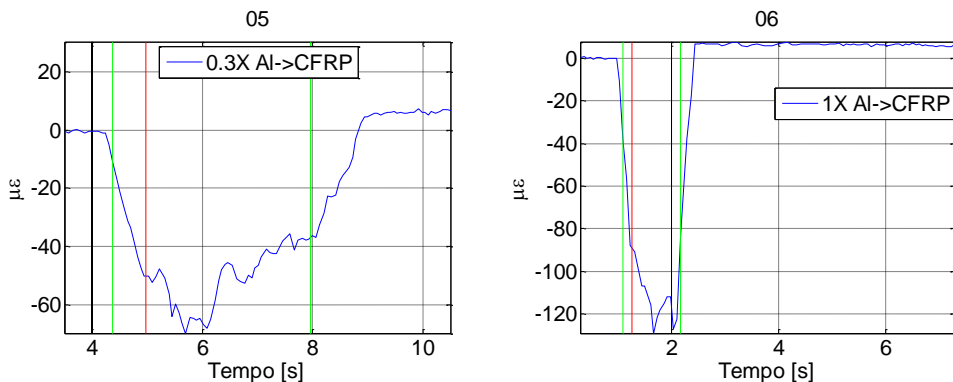
**Figura 80.** Segnale ottico dei fori 1 e 2

In Figura 80 sono riportati i segnali dei fori 1 e 2 distanti dal sensore  $-28\text{mm}$  in  $x$  e  $\pm 7.5\text{mm}$  in  $y$ . La distanza dagli appoggi è la medesima ma l'inflessione è maggiore nel primo caso a causa dell'aumento della forza di spinta data dalla velocità di avanzamento di  $346\text{mm/min}$ , contro i  $115\text{mm/min}$ .

In verde sono evidenziati l'inizio e la fine della foratura (intesa come tempo totale a partire dalla conoscenza di velocità e spessore) mentre in rosso il cambio di materiale.

In questo caso si osserva che la punta taglia la lamina in alluminio senza generare elevato "rumore" mentre quando arriva a contatto con il materiale composito in fibra di carbonio si osservano notevoli e frequenti oscillazioni dovute al passaggio fra le varie lamine di tessuto che lo compongono.

Si osserva inoltre che a fine foro, permane una condizione di deformazione permanente in trazione.

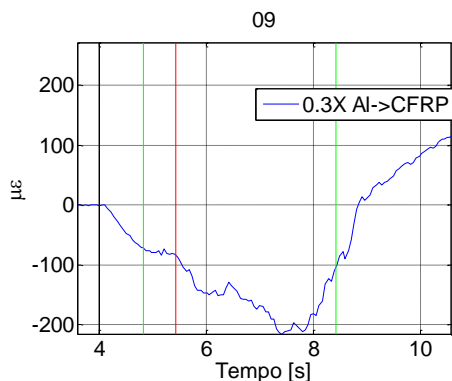


**Figura 81.** Segnale ottico dei fori 5 e 6

In Figura 81 sono invece riportati i segnali ottici dei fori 5 e 6 distanti dal sensore FBG  $-14\text{ mm}$  in  $x$  e  $\pm 7.5\text{ mm}$  in direzione  $y$ .

Confrontandoli con i grafici riportati in Figura 80 si osserva che, a pari velocità di avanzamento, la flessione aumenta comportando una maggiore compressione del reticolo di Bragg all'interno della resina.

Si osserva anche in questo caso la presenza di una deformazione plastica residua dopo la lavorazione.



**Figura 82.** Segnale ottico del foro 9

Per completezza si riporta anche il segnale del foro numero 9 distante  $-7\text{ mm}$  in direzione  $x$  e  $7.5\text{ mm}$  in direzione  $y$ . Si osserva come, avendo forato vicino al sensore, l'onda di calore lo raggiunga istantaneamente causando una rapida dilatazione dello stesso.

## CFRP → Al

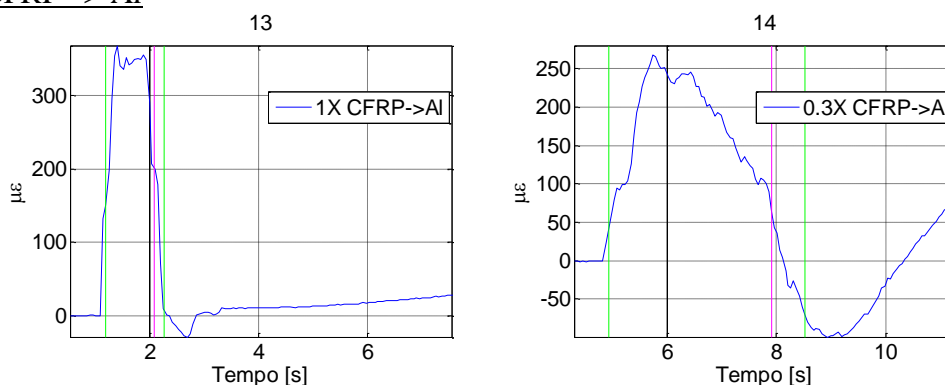


Figura 83. Segnale ottico dei fori 13 e 14

Vengono riportati in Figura 83 i segnali ottici dei fori 13 e 14. Si osserva l'inversione del segnale che da compressione passa a trazione. Inoltre, a causa del basso grado di unione fra i due strati e l'elevata cedevolezza della lamina metallica si assiste allo scollamento di quest'ultima dal materiale composito.

Il segnale ottico infatti registra soltanto la foratura del materiale composito che poi ritorna in posizione non flessa (insieme al sensore FBG) mentre viene, prima spinto, e poi forato il materiale metallico. Di conseguenza i tempi di fine foratura in questo caso non sono veritieri.

Anche in questo caso essendo vicino al sensore ( $7\text{mm}$  in direzione  $x$  e  $\pm 7.5\text{mm}$  in direzione  $y$ ) l'onda di calore viene registrata quasi istantaneamente e maggiormente per il foro 14 in quanto la fibra ottica si trova deviata dalla sua posizione.

## 7.3 Seconda foratura ibrido

### 7.3.1 Dati provini

Si procede all'operazione di foratura del provino ibrido CFRP/Lega-Al di dimensioni  $165 \times 330 \times 7\text{mm}$  derivante dall'infusione RTM descritta nel capitolo (5.3); questa volta il prodotto estratto dallo stampo non è stato tagliato in due provini per non indurre delaminazione e scollamenti degli strati durante la lavorazione.

Si è quindi optato per la foratura del prodotto ibrido intero il cui spessore è composto da  $5\text{mm}$  di materiale composito con fibre di rinforzo *CC600* e matrice epossidica *LY564* con percentuale di fibre al 55% e da  $1\text{mm}$  di lega di alluminio *Ergal 7075*.

Differentemente rispetto al precedente prodotto, le lamine di alluminio sono state sabbiate per garantire una maggiore unione con il composito.

### 7.3.2 Strumenti di lavoro

Per la lavorazione viene di nuovo utilizzata la fresatrice a controllo numerico con banco fisso *DEBER Dynamic 2*.

Per il monitoraggio del segnale ottico viene utilizzata la sorgente-interrogatore *OttoXLight* impostando una frequenza di acquisizione di  $2000\text{Hz}$ , numero di medie pari a 40, guadagno  $G$  pari a 1 e tempo di salvataggio del segnale pari a 50 ms.

In questo caso si ha la possibilità di acquisire per ogni foro il segnale proveniente dai due sensori; questo comporta l'utilizzo di un *coupler* che porta però una riduzione dell'intensità del segnale pari al 75%. Come conseguenza il segnale proveniente dall'FBG si trova a livello del rumore ed è difficile identificazione.

Si è deciso perciò di realizzare una coppia di due file di fori ciascuna alla medesima distanza dal sensore ed eseguire l'acquisizione prima di un sensore e poi dell'altro.

Viene monitorata anche la temperatura attraverso la termocamera *Nikon LAIRD-S270* comandata tramite il relativo programma di acquisizione dati; viene impostata una frequenza di acquisizione di 0.5s per acquisire 21 fotogrammi in 10 secondi in modo tale da registrare la temperatura nel momento del contatto.

In questo caso si prende l'accorgimento di aspirare i trucioli di lavorazione dal pezzo mentre viene lavorato in modo da permettere una corretta lettura della temperatura indotta dal foro.

### 7.3.3 Caratteristiche di lavorazione

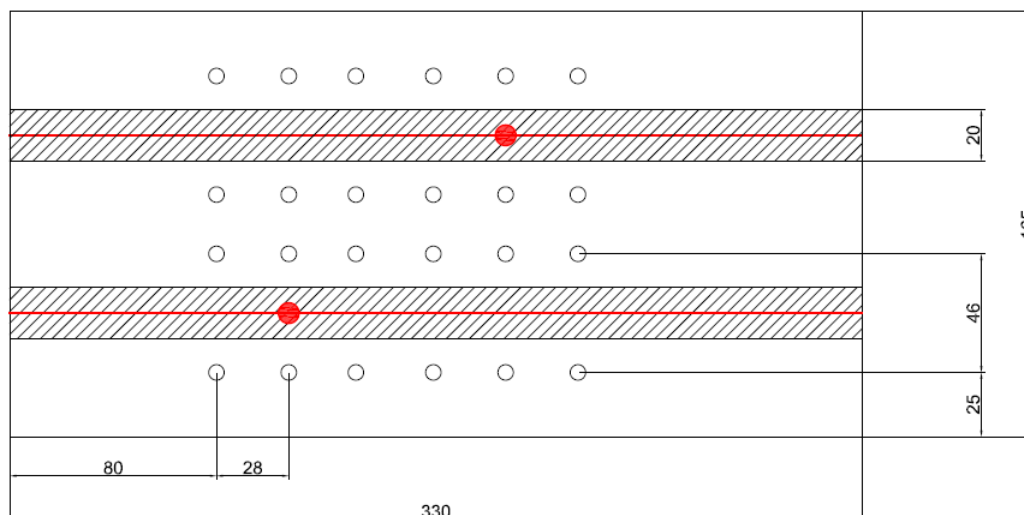
In questo caso si vuole registrare lo scollamento dei due componenti del materiale ibrido; si preferisce quindi aumentare la velocità di avanzamento. Viene conservata la velocità di taglio della punta della prova precedente mentre a variare è soltanto la velocità di avanzamento:

**Tabella 5.** Parametri di lavorazione

	<b>Feed Rate</b> [mm/rev] ([mm/min])	<b>Cut Speed</b> [rpm]
1X	0.15 (346)	2000
3X	0.45 (1038)	2000

A differenza della prova precedente, verrà utilizzata una punta per materiali compositi in fibra di carbonio anziché una punta per materiali metallici.

Sono realizzati 24 fori in un'area di dimensioni  $140 \times 70 \text{mm}^2$  (Figura 84) circostante ciascun sensore FBG.



**Figura 84.** Disposizione fori.

### 7.3.4 Analisi dei risultati

Sono riportate l'analisi dei segnali ottici di alcuni fori. Si utilizza nuovamente una finestra temporale per ogni singolo foro, per andare a evidenziare l'inizio e la fine dello stesso, nonché il passaggio da un materiale all'altro, conoscendo a priori velocità di avanzamento e spessori degli strati

**Tabella 6.** Tabella di foratura.

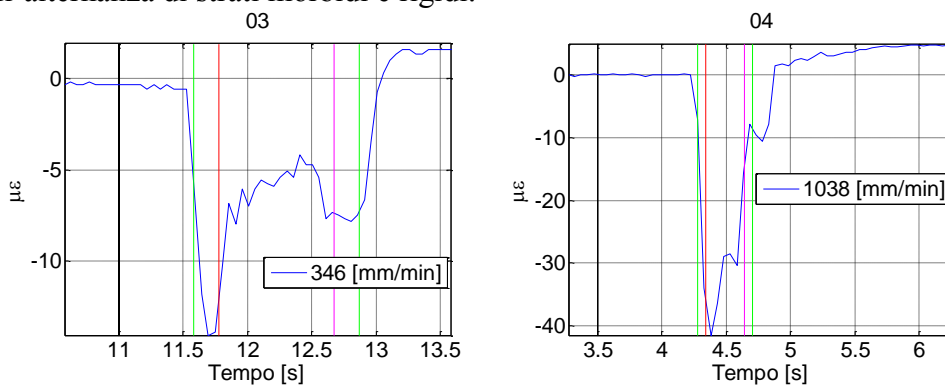
	<b>Tempo<sub>Al(1mm)</sub></b> [s]	<b>Tempo<sub>CFRP(5mm)</sub></b> [s]	<b>Tempo<sub>TOT(7mm)</sub></b> [s]
1X	0.1791	0.8955	1.2896
3X	0.0597	0.2985	0.4299

#### Prima fila

Nelle figure seguenti vengono riportati i segnali ottici registrati durante la foratura della prima fila di fori (da 1 a 12), collegando il sensore FBG posto nello strato d'interfaccia metallo-CFRP superiore; si dovrà assistere ad una componente in compressione del sensore FBG.

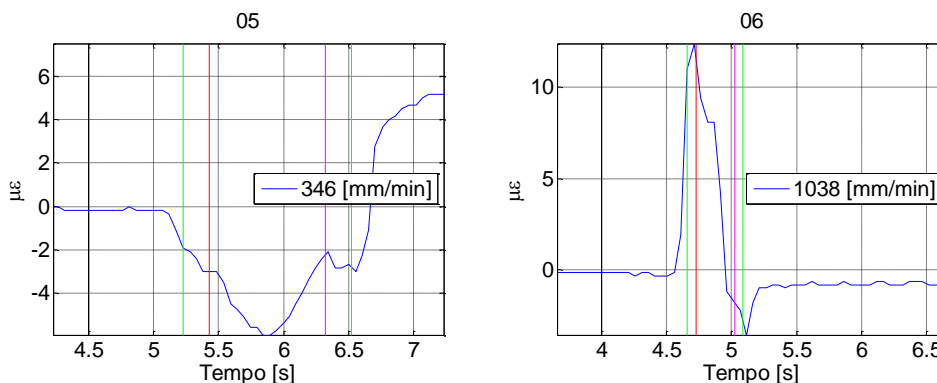
In realtà si osserva che questa condizione di trazione viene mantenuta per i fori vicino agli appoggi ma poi si osserva un'inversione di tendenza andando verso il centro di lavorazione. La spiegazione è dovuta alla modalità di vincolo che permette maggiore mobilità al pezzo e inducendo perciò torsione, che si accentua più ci avviciniamo al centro.

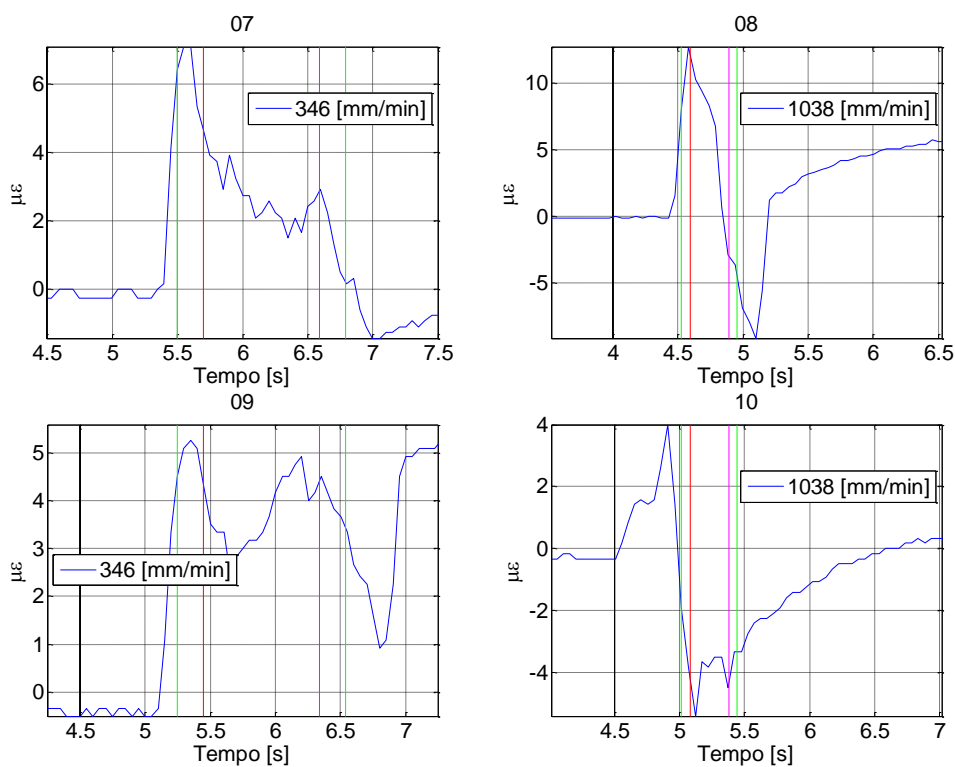
Osservando la Figura 85 si notano, per entrambi i fori, tre fasi distinte di ampiezza del segnale. Grazie al confronto temporale, si osserva che queste tre fasi distinte sono associate alla foratura attraverso i diversi materiali. In particolare per il foro 3, la bassa velocità di avanzamento permette di acquisire un numero di punti tale da poter individuare il primo picco dovuto alla penetrazione nella prima lamina di alluminio, una seconda fase caratterizzata da fluttuazioni tipiche del CFRP e il secondo picco dell'ultima lamina metallica. Nel segnale del foro 4 si distinguono sempre tre fasi ma la foratura del carbonio non ha un numero di punti tali da distinguere le oscillazioni dovute all'alternanza di strati morbidi e rigidi.



**Figura 85:** Segnale ottico dei fori 3 e 4.

Passando dal foro 5 al foro 6 (Figura 86) si osserva l'inversione del picco descritta precedentemente e che continua per tutta la fila.



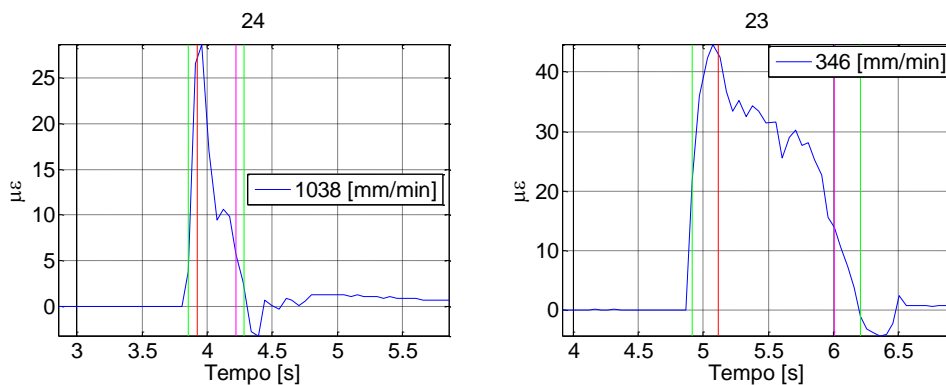


**Figura 86:** Segnale ottico dei fori dal 5 al 10

### Seconda fila

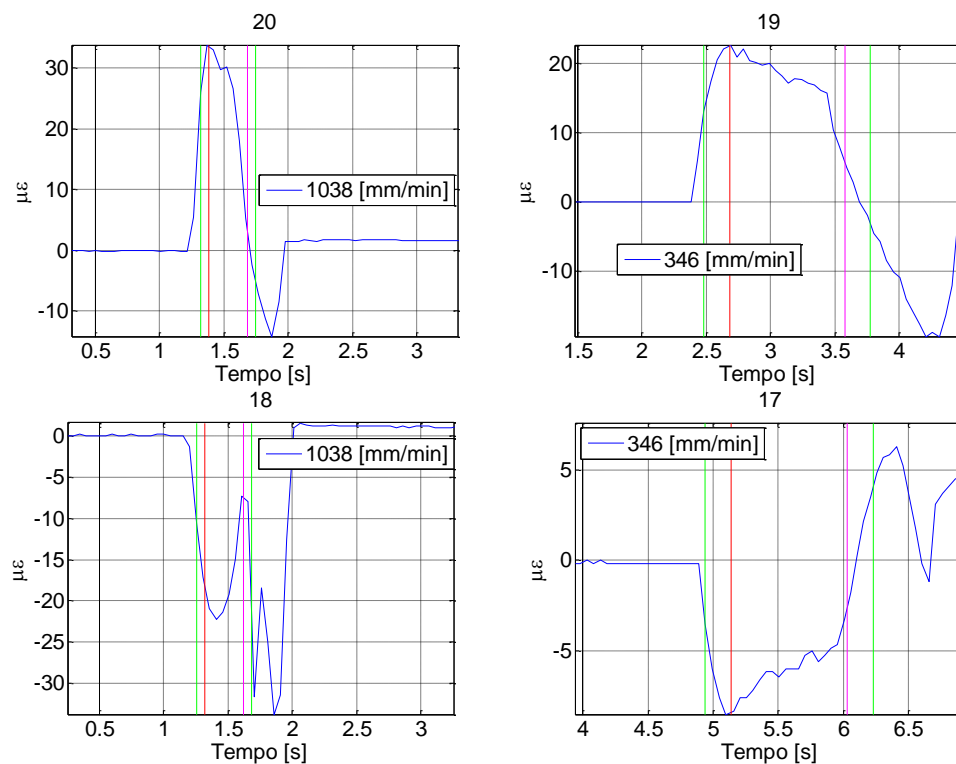
Una volta conclusi i primi 12 fori vengono realizzati gli ultimi dodici, utilizzando il secondo sensore FBG per registrare. A differenza di prima, quest'ultimo si trova nella zona d'interfaccia metallo-CFRP al di sotto dell'asse neutro; ci si aspetta perciò di registrare una trazione.

Nelle figure seguenti vengono riportati i segnali ottici dei fori a partire dal 24, cioè dal foro più vicino al supporto.



**Figura 87:** Segnale ottico dei fori 24 e 23.

Come per i fori 3 e 4 della prima fila si osservano tre fasi distinte nel segnale; inoltre si assiste di nuovo all'inversione di tendenza spostandosi verso il centro di lavorazione.



**Figura 88:** Segnale ottico dei fori 20, 19, 18 e 17



## 7.4 Terza foratura ibrido

### 7.4.1 Dati provini

Si procede all'operazione di foratura del provino ibrido CFRP/Lega Al di dimensioni  $70 \times 250 \times 8.2 \text{ mm}$  realizzato tramite incollaggio di un lamina in composito (Capitolo 5.4), derivante dall'infusione RTM (descritta nel capitolo 5.2), con una lamina in lega di Alluminio 2024.

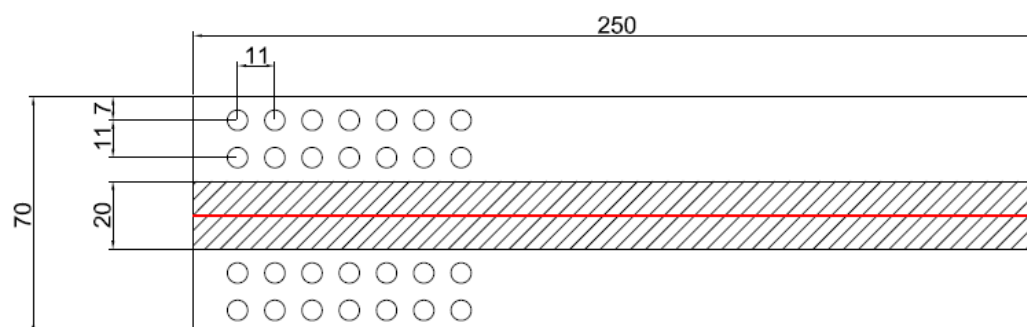
Lo spessore del provino è composto da  $7 \text{ mm}$  di materiale composito, con fibre di rinforzo in carbonio e matrice epossidica, e da  $1.2 \text{ mm}$  di lega di Alluminio.

### 7.4.2 Strumenti di lavoro

Per questa campagna di foratura, realizzata tramite i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, si è utilizzato il centro di lavorazione a 5 assi *CNC Kern EVO* con controllo numerico, una cella di carico *KISTER 9257BA* collegata al piano di lavoro della *Kern EVO* per la misura della forza di spinta esercitata sul provino e una termocamera *ThermaCAM SC 3000* con frequenza di acquisizione di  $1 \text{ Hz}$  posizionata al di sopra della zona di lavoro.

### 7.4.3 Caratteristiche di lavorazione

Anche in questo caso si vuole registrare lo scollamento dei due materiali che compongono il prodotto ibrido; si preferisce quindi aumentare la velocità di avanzamento in modo da favorire questo distacco. Sono realizzati 28 fori, organizzati in una coppia di due file simmetriche di 7 fori attorno alla linea teorica della fibra ottica (Figura 89).



**Figura 89.** Disposizione fori

La strategia in questo caso porta a eseguire prima la lavorazione sui fori delle due file esterne con velocità di avanzamento (*Feed Rate*) pari a  $2076 \text{ mm/min}$  e realizzare poi le file interne a velocità ridotta a  $1038 \text{ mm/min}$ . La velocità di taglio dell'utensile è mantenuta pari a  $6897 \text{ rpm}$  per entrambi i set di lavorazione.

**Tabella 7.** Parametri di lavorazione.

	<b>Feed Rate</b> [mm/rev] ([mm/min])	<b>Cut Speed</b> [rpm]
3x	0.45 (1038)	6897
6x	0.9 (2076)	6897

Per quanto riguarda la punta utilizzata, in questo caso si alterna l'utilizzo di due punte 856 della Sandvik® per materiali compositi in fibra di carbonio che differiscono per il grado di usura. Quest'ultima è stata rovinata tramite della polvere di boro che ha un elevato potere abrasivo.

Con questa possibilità si vuole analizzare l'effetto che può generare una punta usurata rispetto a una punta nuova; i fori vengono perciò realizzati, alternando questi due utensili.

#### **7.4.4 Analisi dei risultati**

##### CELLA DI CARICO

Per questo tipo di provino è interessante analizzare il comportamento registrato dalla cella di carico.

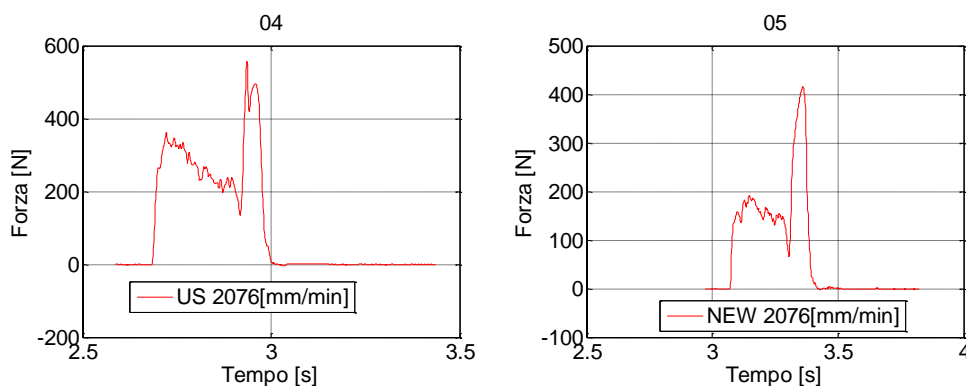
In ogni registrazione, effettuata per ogni foro, si notano due fasi differenti della forza; una relativa alla lavorazione del composito in fibra di carbonio e la seconda relativa della lamina di alluminio. Si osserva, in generale, che la forza registrata durante la foratura della lamina metallica è sempre maggiore di quella registrata durante la lavorazione del composito.

Infatti, per mantenere la stessa velocità di avanzamento nel metallo, la punta ha bisogno di una maggiore spinta in quanto l'alluminio presenta una maggiore durezza rispetto al CFRP. Inoltre bisogna considerare che il comportamento di un materiale composito ha, a differenza di un metallo, caratteristiche di ortotropicità; questa proprietà deriva dalla capacità delle fibre di rinforzo di lavorare soltanto in condizioni di trazione e garantire elevate prestazioni soltanto in queste direzioni di sollecitazione. Nel caso di compositi realizzati con tessuti o con intreccio di fibre a  $0^{\circ}/90^{\circ}$  esistono due direzioni principali di sollecitazione che presentano le medesime caratteristiche; al di fuori del piano della lamina, le proprietà meccaniche sono invece imputabili alla sola resina che presenta un comportamento isotropo, ma con valori di durezza notevolmente inferiori rispetto all'alluminio.

Oltre a queste considerazioni di carattere generale si possono fare le seguenti osservazioni:

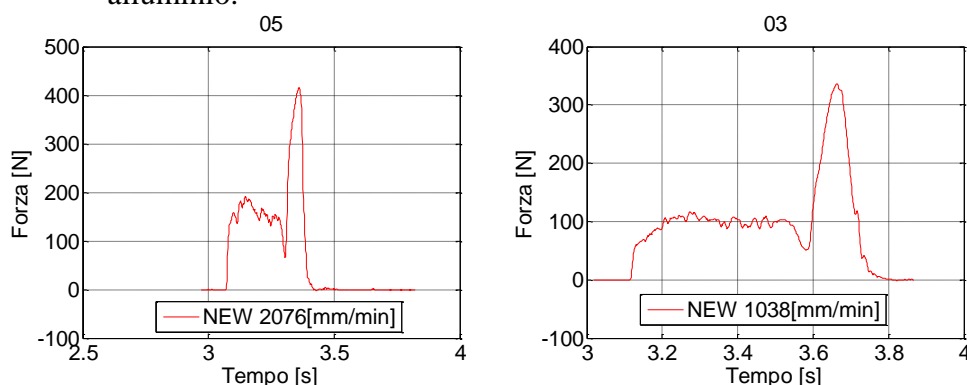
- Considerando pari velocità di avanzamento (*Feed Rate*), utilizzando una punta USURATA si registra un aumento della forza relativa al composito mentre non si notano considerevoli variazioni di quella

inerente il metallo. Si osserva inoltre che, dato che l'usura della punta è tale da sfavorire l'ingresso della stessa nel pezzo, l'andamento della forza presenta un massimo nelle fasi iniziali con una tendenza alla diminuzione.



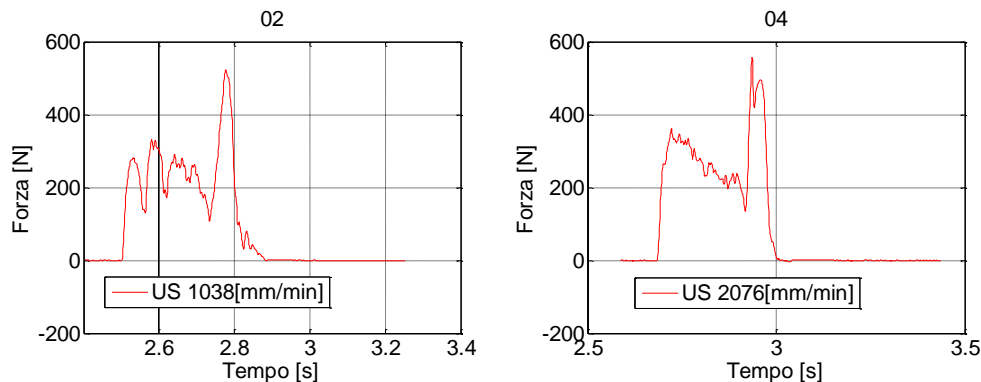
**Figura 90.** Confronto del segnale di forza utilizzando diversa punta

- Raddoppiando la velocità di avanzamento (da  $1038\text{mm/min}$  a  $2076\text{mm/min}$ ) e utilizzando una punta NUOVA, si ottiene un aumento dello stesso fattore per il CFRP ma non di tale intensità per la lega di alluminio.



**Figura 91.** Confronto del segnale di forza raddoppiando la velocità di avanzamento e utilizzando una punta nuova

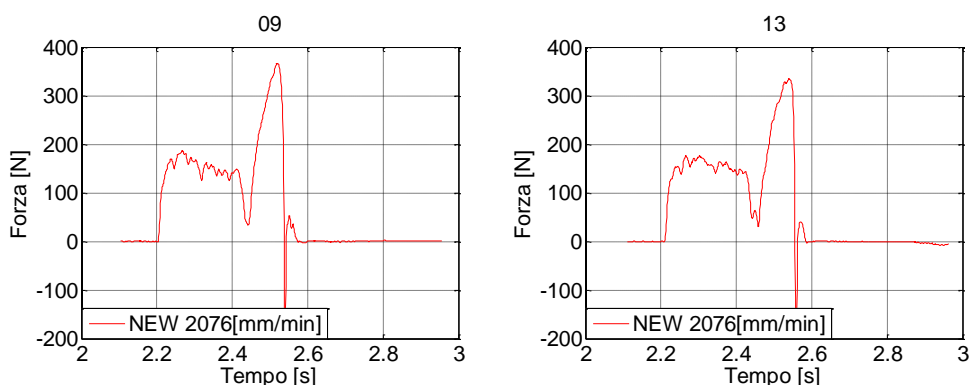
Utilizzando invece una punta USURATA non si riscontrano variazioni della stessa intensità in quanto l'usura della punta è tale che una variazione della velocità di avanzamento non venga risentita dal pezzo.



**Figura 92.** Confronto del segnale di forza raddoppiando la velocità di avanzamento e utilizzando una punta usurata

Si osserva inoltre il segnale della forza registrata con una punta USURATA presenta forti discontinuità, sia per il materiale composito che per il materiale metallico.

- Quando avviene il distacco fra i due materiali componenti l'ibrido, si osservano tre fenomeni. Il primo fra questi è riconoscibile dal picco relativo alla lega di alluminio; se avviene scollamento, la punta prima di forare inizia a spingere e flettere il materiale. Il picco dell'alluminio è traslato nel tempo. Il secondo di questi fattori è la registrazione di un picco negativo dovuto al ritorno elastico della lamina metallica che, dopo essere stata forata in condizioni di flessione, ritorna elasticamente mandando in trazione la cella di carico. L'ultimo dei segnali che riconducono allo scollamento è la presenza di due suoni in sequenza, distanti fra loro.



**Figura 93.** Segnale di forza registrato durante uno scollamento

## SEGNALE FBG

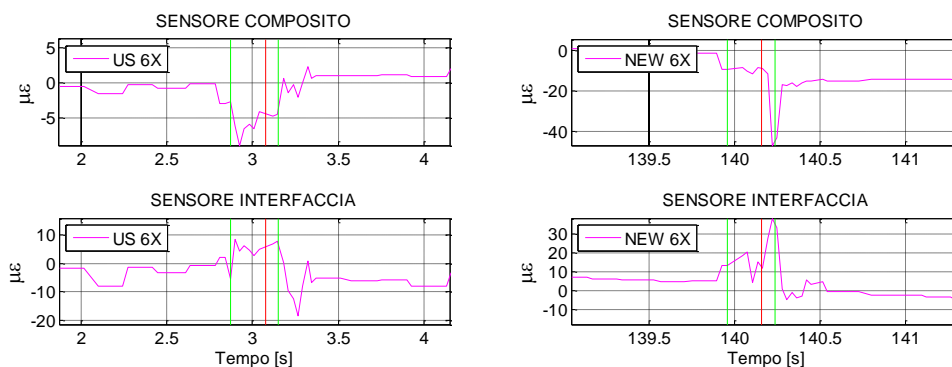
Come descritto nel capitolo 5.4, in questo provino sono presenti due sensori FBG: uno è inglobato all'interno del materiale composito e un secondo all'interno della colla che unisce i due materiali.

Ci si aspetta che, nel caso in cui il provino rimanga integro i due sensori registrino il picco di flessione nello stesso istante, come se fossero uniti in un singolo pezzo; nel caso in cui avvenga scollamento, i due sensori potranno non avere il picco di flessione nello stesso istante in quanto appartengono a due componenti diversi.

Tuttavia, dato che in questo caso la velocità di avanzamento della punta (*Feed Rate*) è portata a valori pari a 6 volte di quelli consigliati dalla casa produttrice il foro sarà così veloce che i due sensori non sono in grado di riconoscere il transito della punta nello strato d'interfaccia. Infatti, dovendo acquisire il segnale ottico da due sensori è necessario utilizzare un *COUPLER* che presenta però il difetto di diminuire l'intensità del segnale del 75%; non è perciò possibile alzare la frequenza di acquisizione al di sopra di  $33\text{Hz}$  altrimenti l'intensità del segnale si porta al livello del rumore, rendendo difficile il suo riconoscimento.

L'intento di questa prova è però quello di verificare se il sensore FBG sia in grado di registrare l'eventuale scollamento e il passaggio della punta da un materiale all'altro.

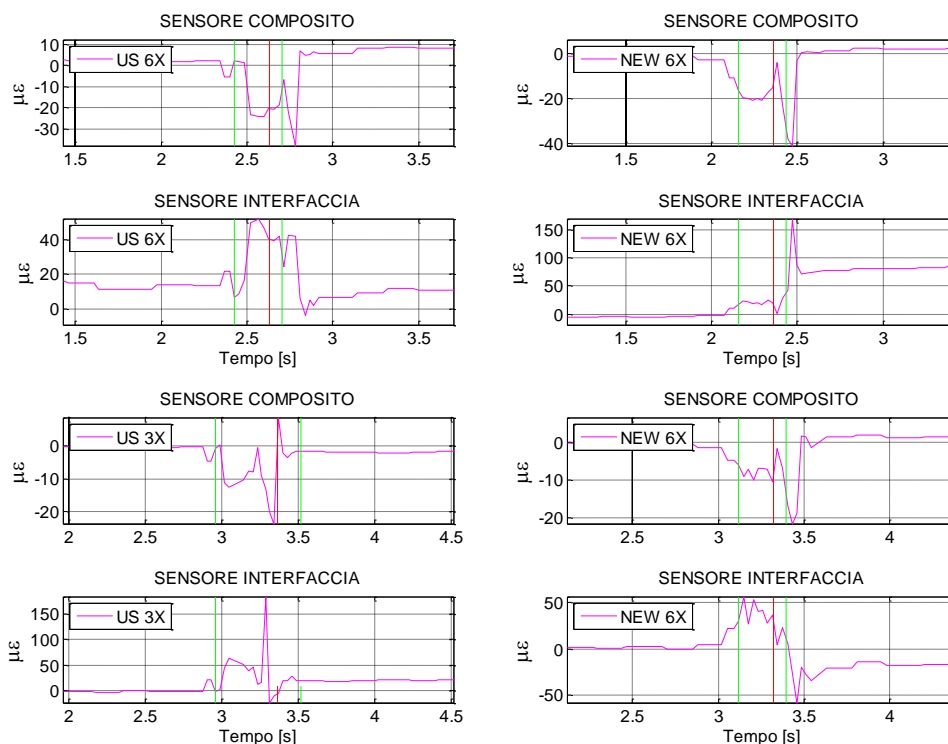
Come accennato precedentemente, quando non si registra scollamento i segnali dei due sensori presentano la medesima durata e il picco alla stesso istante.



**Figura 94.** Segnale ottico registrato dai due sensori per i fori 4 e 5, in cui non avviene scollamento

Al contrario, quando si presenta uno scollamento si ottengono due segnali molto diversi fra loro. Il primo sensore (inglobato all'interno del carbonio) registra andamenti simili ai precedenti ma con intensità maggiori dovuti al solo aumento della flessione. Il secondo sensore (inglobato all'interno della colla) presenta due picchi. Il primo è relativo alla flessione dovuta alla lavorazione del

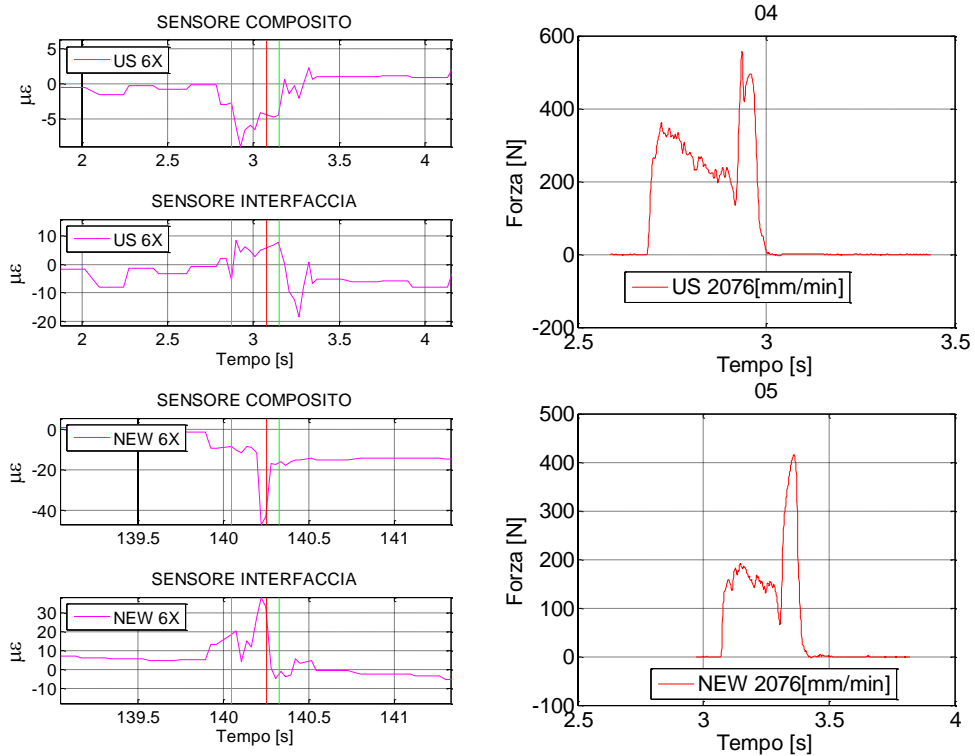
composito; la punta entra nel composito, lo flette e flette della stessa intensità anche la lamina in lega di alluminio. Una volta attraversato il CFRP la punta scolla il metallo e lo spinge, prima di iniziare a forare; dato che il suo spessore è di 1.2mm la sua rigidezza flessionale è inferiore a quella dell'intero ibrido (8.2mm) e quindi la flessione sarà maggiore. Il secondo picco registrato riporta perciò questo fenomeno. Si riportano le immagini dei fori 12 e 13, 16 e 17.



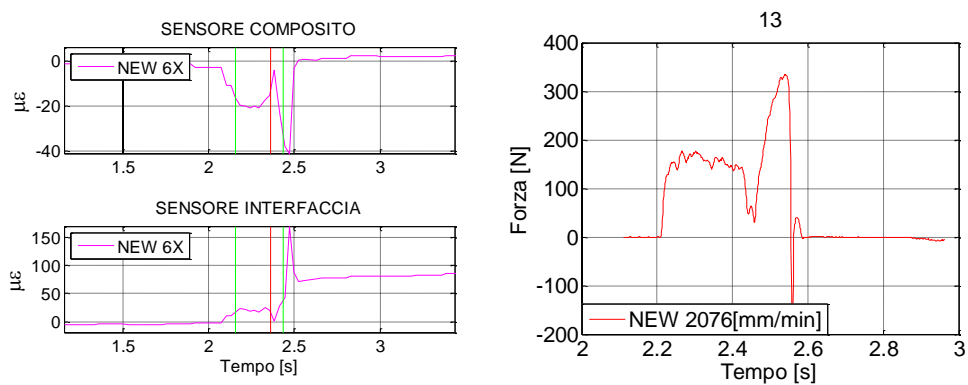
**Figura 95.** Segnale ottico registrato dai due sensori per i fori 12, 13, 16 e 17 quando avviene scollamento

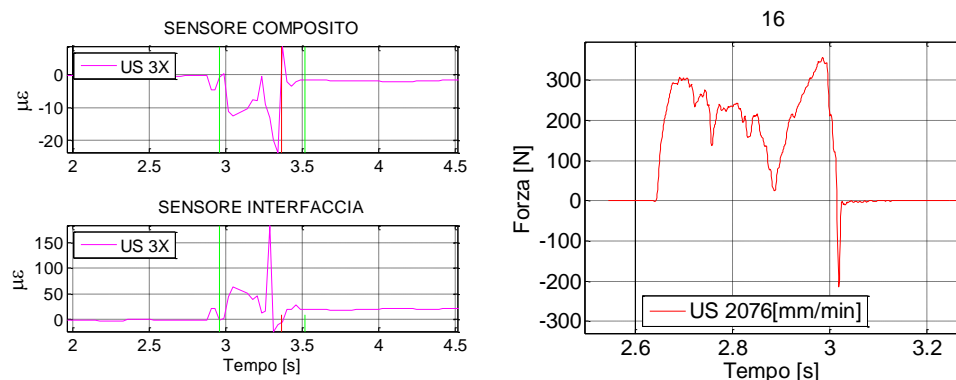
Si può mettere in correlazione il segnale letto dalla cella di carico e quello letto dai due sensori FBG.

Si osserva che, quando il segnale di forza non mostra i fattori di scollamento anche i segnali ottici concordano con esso; allo stesso modo, quando la cella di carico mostra la traslazione del picco dell'alluminio e il picco negativo del ritorno elastico della lamina anche il segnale del secondo sensore FBG mostra il secondo picco di intensità maggiore.



**Figura 96.** Confronto fra i segnali ottici e i segnali di forza per i fori 4 e 5, in cui non avviene scollamento





**Figura 97.** Confronto fra i segnali ottici e i segnali di forza per i fori 13 e 16, in cui avviene scollamento

Bisogna notare che, una volta che avviene il primo scollamento nei successivi fori, anche utilizzando basse velocità di avanzamento e punta nuova si registra quasi sempre uno scollamento.

Infatti l'area di distacco coinvolge un'estensione maggiore della distanza fra i fori e quindi il materiale non è nemmeno più da considerarsi come ibrido. La lavorazione viene comunque protratta fino alla fine.

Si osserva inoltre che il segnale ottico rispecchia l'andamento del segnale della cella di carico in quanto presenta sempre due picchi di intensità diverse, riconducibili alla foratura del carbonio e alla successiva dell'alluminio.



## 8. Conclusioni

Come già descritto nell'introduzione, l'attività di tesi si è svolta in due stadi. Per ognuno di questi si possono trarre conclusioni e sviluppi futuri.

### Produzione dei laminati.

Dal processo iniziale di ottimizzazione dei parametri d'infusione RTM (temperatura, vuoto e pressione) si possono estrarre le seguenti considerazioni:

- La resina presenta una bassa viscosità già a temperatura ambiente e non necessita quindi di un'elevata pressione d'iniezione;
- La pressione deve essere aumentata verso la fine dell'infusione quando i tessuti sono impregnati; in questo modo le dimensioni delle bolle intrappolate vengono ridotte.
- Il taglio dei tessuti deve essere realizzato in modo da evitare sfilacciamenti della trama.
- Il vuoto può essere aumentato consentendo una migliore espulsione di bolle e l'assenza di vuoti.

L'ottenimento di manufatti in composito e ibridi con elevato grado di compattazione e la quasi totale assenza di bolle conferma la capacità della tecnologia RTM di soddisfare i requisiti di produzione in serie e garanzia di prestazioni meccaniche introdotte nel Capitolo 1.

Per quanto riguarda il monitoraggio di questa fase, bisogna osservare che l'utilizzo di fibre ottiche (non sensorizzate) permette un controllo efficace della sola fase d'iniezione; infatti, una volta conclusa l'infusione, cessa il loro utilizzo dato che non presentano il reticolo di Bragg e non riescono quindi a leggere stati di deformazione (meccanica o termica). Sarebbe di conseguenza utile utilizzarle per effettuare una correlazione sperimentale dell'avanzamento della resina all'interno dello stampo con le simulazioni numeriche d'infusione, al fine di calibrare correttamente i parametri di pressione e temperatura, nonché geometria dello stampo e grammatura dei tessuti.

Una volta conclusa questa fase di "calibrazione", potrà essere avviata la produzione tramite inglobamento dei sensori FBG (più costosi delle fibre ottiche semplici) che permette sia il monitoraggio della produzione sia le successive fasi di lavorazione e utilizzo.

Una seconda considerazione riguardante questa fase di produzione riguarda la disposizione delle fibre ottiche (e dei sensori FBG) che deve essere fatta in modo da garantire il mantenimento della posizione desiderata all'interno del manufatto. È di estrema importanza, infatti, conoscere esattamente a quale punto corrisponde la condizione di deformazione registrata dal sensore in un dato istante sia per la fase di lavorazione che quella di utilizzo; se non si è in grado di garantire questa condizione, il segnale ottico registrato avrebbe poca utilità, poiché farebbe riferimento a un'altra zona. Nel lavoro di tesi, questo problema è stato risolto tramite la disposizione di colle spray; l'utilizzo di piccoli "marker" in metallo all'interno di manufatti in carbonio permette l'individuazione della posizione esatta del sensore ma può comportare problemi d'intrusività o nascita di cricche.

Infine è importante la protezione dell'uscita della fibra ottica dal manufatto in modo che non subisca danneggiamenti o ripiegamenti che impediscono la trasmissione del segnale o, peggio, si giunga a rottura della stessa. Anche quando si procede all'incollaggio, con il posizionamento di una fibra ottica nella zona d'interfaccia, ci si deve assicurare di garantire uno spessore minimo di film di adesivo tale da non schiacciare la fibra e comprometterne l'utilizzo.

#### Monitoraggio della lavorazione.

L'utilizzo di sensori a fibra ottica (in particolare FBG) presenta notevoli vantaggi come evidenziato sopra. Prima fra tutte è l'elevata sensibilità che permette di registrare piccole variazioni di deformazione ( $0.1\mu\epsilon$ ).

Tuttavia il monitoraggio di manufatti in composito o ibridi tramite questo tipo di strumentazione è da preferire, piuttosto che in *real time*, in una fase di post-elaborazione, al fine di identificare se, durante la foratura, si sono create delaminazioni (per il composito) oppure scollamenti (per gli ibridi).

Infatti, non essendo nota a priori l'entità di questi danneggiamenti, non è possibile definire un valore di soglia superato il quale vengono istantaneamente regolati i parametri di foratura per diminuire la forza di spinta (maggiore responsabile della nascita di difetti).

Bisogna inoltre osservare che l'eventuale presenza di difetti interni al foro non è sempre visibile dall'esterno a lavorazione conclusa; l'unica possibilità di identificarli è sezionare il provino lungo lo spessore del foro, perdendo però così l'utilizzabilità del manufatto. Con l'analisi tramite FBG si possono evidenziare difetti interni (soprattutto per i materiali ibridi) che non sono riconoscibili se non attraverso il taglio del foro o l'analisi tramite liquidi penetranti.

Stante la sensibilità della resina (e quindi anche delle colle) alla temperatura, per i materiali compositi è di fondamentale importanza che, sia durante la fase di

lavorazione che in quella d'utilizzo, la temperatura non raggiunga livelli tale da indurre un deterioramento delle caratteristiche del collante. Per questo, la registrazione del segnale ottico durante una generica espansione termica permette di risalire alla temperatura raggiunta tramite una semplice costante  $K_T$  e quindi valutare la probabilità di danneggiamento.

In una generica registrazione, la scelta della frequenza d'acquisizione deve essere fatta attentamente. Si è visto, infatti, che, utilizzando alte frequenze si garantisce un numero di punti sufficienti per ricostruire un evento "veloce" ma d'altro canto l'intensità del segnale si riduce portando il sistema di lettura a una più difficile interpretazione. Come per qualsiasi sperimentazione, la scelta deve essere fatta in base al tipo di fenomeno che s'intende misurare. Nel caso in cui si voglia monitorare la fase di lavorazione è necessario acquisire ad intervalli temporali molto piccoli e con un'elevata intensità della sorgente; al contrario quando si registra un evento "lento" (reticolazione, stato di deformazione durante l'utilizzo) si può acquisire ad intervalli di tempo molto più ampi, in modo tale da avere anche in fase di post-elaborazione una minore quantità di dati.

Non richiedendo spazi e attrezzature ingombranti, l'utilizzo di questo sistema d'acquisizione nelle fasi di produzione porta a considerare il monitoraggio tramite fibre ottiche come un buono strumento di controllo. Affiancare quest'ultimo ad altre apparecchiature (celle di carico e macchine a controllo numerico) è da valutare come un meccanismo di confronto con i valori estratti dagli altri sistemi, che porta a una validazione più robusta.

Per quanto riguarda l'effetto dovuto al cambio del parametro di velocità di avanzamento, non si sono osservate evidenti differenze di qualità del foro sia visivamente, sia tramite ispezione con microscopio.



*Un profondo e sentito “grazie” va ai miei genitori che hanno contribuito economicamente e moralmente al sostenimento della mia carriera scolastica e universitaria; senza di loro non avrei raggiunto questo traguardo tanto ambito.*

*Un ringraziamento particolare va a tutte quelle persone che sono state per me una fonte d’ispirazione, come mio fratello Stefano, il Professor Luca di Landro e Luca Castelnovo e a tutte le altre che hanno dimostrato disponibilità e sostegno nei miei confronti, dalla mia ragazza Lavinia fino ai tecnici del laboratorio.*

*Grazie a tutte quelle persone che ho incontrato durante questo lungo cammino in università e con le quali ho affrontato questo percorso di studi.*



## Bibliografia

- [1] Kevin Potter, *Resin transfer moulding*, Chapman & Hall, 1997
- [2] Giannelli Niccolò, *Sviluppo ed implementazione di una tecnica basata su sensori a fibre ottiche per il monitoraggio del ciclo produttivo VaRTM e dello stato di deformazione dei laminati ottenuti*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2010
- [3] Gerosa Renato, *Monitoraggio del processo VaRTM per la produzione di compositi e caratterizzazione dei laminati*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2008
- [4] DeFu Liu, YongJun Tang, W.L. Cong, *A review of mechanical drilling for composite laminates*, 2011
- [5] H. Hocheng, C.C. Tsao, *Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials*, 2005
- [6] Vijayan Krishnaraj, Redouane Zitoune, Francis Collombet, *Study of drilling of multi-material (CFRP/Al) using Taguchi and statistical techniques*, Usak University, 2012
- [7] Redouane Zitoune, Vijayan Krishnaraj, Francis Collombet, *Study of drilling of composite material and aluminium stack*, 2009
- [8] Islam Shyha, Sein Leung Soo, David K. Aspinwall, Sam Bradley, Stuart Dawson, Cornelius J. Pretorius, *Drilling of Titanium/CFRP/Aluminium Stacks*, 2010
- [9] Athulan Vijayaraghavan, *Drilling of Fiber-Reinforced Plastics - Tool Modeling and Defect Prediction*, 2006
- [10] António T. Marques, Luís M. Durão, António G. Magalhães, João Francisco Silva, João Manuel R. S. Tavares, *Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill*, 2009
- [11] Antonio Mattia Grande, *Modellazione numerica e ottimizzazione del processo VaRTM*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2009

[12] Alessandro Airoidi, Paolo Bettini, Luca Di Landro, Giuseppe Sala, *Dispense del corso di Tecnologie e Materiali Aerospaziali*, 2012.

[13] Enrico Tessadori, *Misure di deformazione e temperatura mediante sensori a fibra ottica: tecniche di disaccoppiamento del segnale*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2012