

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Specialistica in
Ingegneria Aeronautica



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

Relatore: Prof. Luca DI LANDRO

Co-relatore: Ing. Paolo BETTINI

Tesi di Laurea Specialistica di:

Niccolò Giannelli

Matr. 721673

Anno Accademico 2009 - 2010

alla mia famiglia

*“Una volta conosciuto il volo,
camminerete sulla terra guardando il cielo,
perché la siete stati e la vorrete tornare”
L.Da Vinci*

INDICE

1 - Introduzione	11
1.1 La tecnologia RTM	11
1.2 Fasi del processo RTM.....	12
1.3 Ottimizzazione del processo RTM	13
1.3.1 Effetti di bordo	14
1.3.2 Flusso macroscopico e flusso microscopico	15
1.4 Modelli matematici basati sui parametri di processo	16
1.4.1 Legge di Darcy	16
1.4.2 Permeabilità.....	17
1.4.3 Contenuto di vuoti.....	18
2 - Uso delle fibre ottiche e dei sensori FBG	21
2.1 L'importanza del monitoraggio durante la fase produttiva	21
2.1.2 Tipi di sensori utilizzati.....	22
2.2 Fibre ottiche	23
2.2.1 Struttura.....	23
2.2.2 Funzionamento.....	24
2.2.4 Fiber Bragg Gratings.....	26
2.3 Monitoraggio del processo produttivo attraverso sensori FBG e fibre ottiche	27
2.3.1 Avanzamento del flusso di resina durante l'infusione	28
2.3.2 Fase di reticolazione della resina	29
2.4 Vantaggi derivanti dall'uso delle fibre ottiche	29
3 - Stato dell'arte	31
3.1 Sperimentazione precedente.....	31
3.1.2 Impianto di infusione	31
3.2 Problematiche e possibili soluzioni.....	34
3.2.1 Riduzione della presenza di difetti.....	34
3.2.2 Posizione dei punti di misura	35
3.2.3 Ricostruzione del profilo di avanzamento del flusso	36
3.2.4 Utilizzo dei sensori FBG.....	36
4 - Parte sperimentale	39
4.1 Sistema di acquisizione	39
4.1.2 Campionamento	41

4.2	Infusioni.....	43
4.2.1	Prima infusione.....	44
4.2.2	Seconda infusione.....	46
4.2.3	Terza infusione.....	47
4.2.4	Quarta infusione.....	49
4.2.5	Quinta infusione.....	53
4.3	Prove per stabilire la posizione del sensore.....	56
4.3.1	Indagine al microscopio ottico.....	56
4.3.2	Indagine ai raggi X	58
4.3.3	Indagine attraverso prove termiche	61
4.4	Prove meccaniche	65
4.4.1	Definizione delle prove.....	65
4.4.2	Sistema di misura.....	66
4.4.3	Prima prova a flessione.....	67
4.4.4	Seconda e terza prova a flessione	70
5	- Analisi dei risultati	79
5.1	Infusioni.....	79
5.1.1	Contenuto di vuoti	79
5.1.2	Flusso della resina all'interno dello stampo	80
5.1.3	Acquisizione del sensore FBG.....	83
5.3	Posizione del sensore FBG	85
5.4	Prove meccaniche	89
5.4.1	Prima prova di flessione	89
5.4.2	Seconda e terza prova di flessione.....	91
6	- Conclusioni.....	99

Sommario

L'attività di tesi presentata in queste pagine si proponeva come obiettivo quello di portare alla luce alcuni possibili vantaggi di una tecnologia produttiva ancora poco usata nell'industria aeronautica come la "Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding". Sfruttando le caratteristiche stesse di questo processo si è messa a punto una tecnica di monitoraggio della produzione e dello stato di deformazione dei componenti ottenuti: si è approntato in questo modo un sistema di misura poco invasivo e molto sensibile utilizzabile per queste sue caratteristiche anche durante l'esercizio in ambito aeronautico.

Per arrivare al risultato finale si è passati dapprima attraverso un perfezionamento del processo produttivo che consentisse di ottenere componenti con le caratteristiche richieste dall'industria aeronautica. Proseguendo nell'attività è stato necessario pensare a come stabilire la posizione dei sensori utilizzati prima di allora indeterminabile: un nuovo metodo di indagine costituito da tre distinte fasi ha permesso di ottenere un risultato certo. Forti delle conoscenze acquisite è stato poi possibile dimostrare l'affidabilità del sistema di misura attraverso confronti con le tecniche classiche di estensimetria basandosi sui risultati delle prove meccaniche eseguite.

Abstract

This paperwork contains the thesis' activity which had the objective to show some of the "Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding" technology's advantages. Using VaRTM's own characteristics, an innovative technique was developed for the monitoring of production and strain during product's life: the system created in this way was low invasive and very sensitive meeting the necessary characteristics for being used in aeronautic manufacturing.

The final result was reached through a first optimization of the manufacturing process due to obtain products good enough as aeronautic applications require. Subsequently, it was necessary the determination of the position of used sensors: a new system has been pointed out to do that through three different phases and led us to achieve a certain result. Basing on that knowledge it was possible to demonstrate measuring system's affordability, through confrontation with classic strain gauge technique, starting from the results coming from mechanical bending tests on products.

Elenco delle figure

- Figura 1.1 Esempi di prodotti dell'industria aeronautica attraverso l'uso della tecnologia RTM
- Figura 1.2 Formazione di vuoti a causa di difetti di bordo
- Figura 1.3 Meccanismi di formazione di vuoti
- Figura 1.4 Formazione dei vuoti a causa di un flusso capillare più veloce
- Figura 1.5 Andamento della percentuale in volume dei macro/micro-vuoti
- Figura 2.1 Sezione tipica di una fibra ottica multi-modale
- Figura 2.2 Indice di rifrazione di core e cladding in una fibra ottica
- Figura 2.3 Rifrazione/riflessione totale della radiazione luminosa
- Figura 2.4 Incisione di un FBG
- Figura 2.5 Andamento dello spettro riflesso e trasmesso di un FBG
- Figura 3.1 Indicatori di pressione con valori tipici durante un'infusione
- Figura 3.2 Beuta graduata, rubinetto e tubo di collegamento riscaldato tramite resistenze
- Figura 3.3 Anello in gomma per la tenuta e preforma
- Figura 3.4 Vista interna ed esterna del sistema di ingresso delle fibre ottiche
- Figura 3.5 Variac e serbatoio di condensazione
- Figura 3.6 Simulazione numerica [11] di riempimento della preforma
- Figura 3.7 Posizione delle fibre nello stampo come suggerito da [13] basandosi sulla legge di Darcy
- Figura 4.1 Riflettometro
- Figura 4.2 Schema di funzionamento del sistema di acquisizione combinato fibre ottiche - FBG
- Figura 4.3 Combinazione di sorgente, riflettometro e interrogatore
- Figura 4.4 Immagine del sistema di acquisizione completo
- Figura 4.5 Diagramma di flusso che rappresenta il procedimento di memorizzazione dei dati acquisiti
- Figura 4.6 Sequenza di laminazione per la prima infusione
- Figura 4.7 Particolare delle zone non impregnate del laminato
- Figura 4.8 Sequenza di laminazione per la terza infusione
- Figura 4.9 Volume di resina iniettato nello stampo nella III infusione
- Figura 4.10 Volume di resina iniettato nello stampo durante la IV infusione
- Figura 4.11 Valore del segnale riflesso dalle fibre ottiche in funzione del tempo
- Figura 4.12 Andamento dell'ampiezza del segnale riflesso dopo l'elaborazione dei dati
- Figura 4.13 Andamento dei singoli segnali registrati dalle fibre ottiche nella V infusione
- Figura 4.14 Registrazioni del sensore FBG durante tutto il quinto processo produttivo

Figura 4.15 Pannello prodotto nella V infusione
 Figura 4.16 Provino tagliato per individuare il punto di uscita del sensore FBG
 Figura 4.17 Immagine dell'estremità della fibra ottica con sensore FBG
 Figura 4.18 Misura del diametro della fibra ottica
 Figura 4.19 Disposizione delle lastre per l'indagine radiografica
 Figura 4.20 Radiografia della semilamina sinistra
 Figura 4.21 Radiografia della semilamina destra
 Figura 4.22 Radiografia della zona di ingresso delle fibre ottiche
 Figura 4.23 Unione delle radiografie e percorso delle fibre ottiche
 Figura 4.24 Segnale acquisito durante la I prova termica
 Figura 4.25 Segnale acquisito durante la II prova termica
 Figura 4.26 Segnale acquisito durante la III prova termica
 Figura 4.27 Posizione dei punti di prova nelle tre configurazioni approntate
 Figura 4.28 Schema delle prove a flessione
 Figura 4.29 Posizione degli estensimetri sul provino
 Figura 4.30 Provino estensimetrato sottoposto a prova di flessione a 4 punti
 Figura 4.31 Andamento di carico e spostamento in funzione del tempo
 Figura 4.32 Curva forza-spostamento della I prova di flessione
 Figura 4.33 Grafico delle misure provenienti dagli estensimetri
 Figura 4.34 Andamento della lunghezza d'onda del sensore FBG
 Figura 4.35 Provino di spessore 20 mm sottoposto a flessione a 4 punti
 Figura 4.36 Curva carico-spostamento per la II prova di flessione
 Figura 4.37 Curva forza-spostamento della II prova di flessione
 Figura 4.38 Misure provenienti dagli estensimetri nella II prova di flessione
 Figura 4.39 Lunghezza d'onda del sensore FBG nella II prova di flessione
 Figura 4.40 Provino di spessore 20 mm girato e sottoposto a flessione a 4 punti
 Figura 4.41 Curva carico-spostamento per la III prova di flessione
 Figura 4.42 Curva forza-spostamento della III prova di flessione
 Figura 4.43 Dati provenienti dagli estensimetri nella III prova di flessione
 Figura 4.44 Lunghezza d'onda del sensore FBG nella III prova di flessione
 Figura 5.1 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali per la IV infusione
 Figura 5.2 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali per la V infusione
 Figura 5.3 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali nella parte sinistra
 Figura 5.4 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali nella parte destra
 Figura 5.5 Misura del sensore FBG durante la fase di chiusura dello stampo
 Figura 5.6 Misura del sensore FBG durante la fase di infusione
 Figura 5.7 Misura del sensore FBG durante la fase di raffreddamento
 Figura 5.8 Traiettoria delle fibre ottiche diversa da quella rettilinea
 Figura 5.9 Effetti di bordo all'inizio (a) e alla fine (b) della piastra

- Figura 5.10 Risultato della prima prova termica
- Figura 5.11 Risultato della seconda prova termica
- Figura 5.12 Risultato della terza prova termica
- Figura 5.13 Determinazione della posizione del sensore FBG
- Figura 5.14 Segnale estensimetrico della prima prova di flessione
- Figura 5.15 Segnali degli estensimetri rappresentati a coppie
- Figura 5.16 Segnali degli estensimetri per la seconda prova di flessione
- Figura 5.17 Segnale campionato dal sensore FBG nella II prova di flessione
- Figura 5.18 Segnali degli estensimetri per la terza prova di flessione
- Figura 5.19 Segnale campionato dal sensore FBG nella III prova di flessione
- Figura 5.19 Confronto fra valore atteso e reale della misura del sensore FBG – II prova
- Figura 5.20 Confronto fra valore atteso e reale della misura del sensore FBG – III prova

Elenco delle tabelle

- Tabella 4.1 Dati relativi alla resina RTM6
- Tabella 4.2 Dati relativi ai tessuti di fibre di vetro utilizzati
- Tabella 4.3 Dati relativi ai tessuti di fibre di carbonio utilizzati
- Tabella 4.4 Caratteristiche dimensionali del primo laminato prodotto
- Tabella 4.5 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la I infusione
- Tabella 4.6 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la II infusione
- Tabella 4.7 Misura del volume di resina iniettata
- Tabella 4.8 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la IV infusione
- Tabella 4.9 Misura del volume di resina iniettata
- Tabella 4.10 Posizione delle fibre ottiche e tempo di arrivo della resina
- Tabella 4.11 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la V infusione
- Tabella 4.12 Misura del volume di resina iniettata
- Tabella 4.13 Posizione delle fibre ottiche e tempo di arrivo della resina nella V infusione
- Tabella 4.14 Parametri ottimali per l'indagine radiografica
- Tabella 4.15 Dati riassuntivi delle modalità di esecuzione delle prove termiche
- Tabella 4.16 Specifiche operative della prima prova di flessione
- Tabella 4.17 Lunghezze d'onda del segnale riflesso negli istanti significativi della prima prova
- Tabella 4.18 Specifiche operative della prima prova di flessione
- Tabella 4.19 λ_{FBG} negli istanti significativi della seconda prova
- Tabella 4.20 Specifiche operative della seconda prova di flessione
- Tabella 4.21 λ_{FBG} negli istanti significativi della seconda prova
- Tabella 5.1 Stima del contenuto di vuoti dei prodotti delle infusioni effettuate
- Tabella 5.2 Parametri variati durante le cinque infusioni
- Tabella 5.3 Picchi dei valori misurati dagli estensimetri
- Tabella 5.4 Valori massimi delle misure estensimetriche nella seconda prova di flessione
- Tabella 5.5 Valori massimi delle misure estensimetriche nella terza prova di flessione
- Tabella 5.6 Valori ottenuti e il valore atteso per il rapporto $\lambda_{\text{FBG}}/\lambda_{\text{EST}}$

Capitolo 1

Introduzione

1.1 La tecnologia RTM

L'acronimo inglese RTM (Resin Transfer Moulding) indica una delle tecnologie di produzione dei componenti in materiale composito. Nata negli anni Trenta come tecnica di produzione di elementi non strutturali a basso contenuto di fibre, negli anni Sessanta viene impiegata principalmente nell'industria navale per la costruzione di scafi in fibra di vetro. Più recentemente la tecnologia RTM ha destato l'interesse di altri settori industriali. Ad esempio, nell'industria aerospaziale, questa tecnologia si sta imponendo sempre più come alternativa alla tecnica di produzione in autoclave di componenti ad alta qualità in materiale composito rinforzato con fibre. Sarebbe possibile portare una grande quantità di esempi presi dalle più svariate applicazioni dell'uso dei compositi, non ultima l'industria automobilistica, che si stanno muovendo verso l'adozione della produzione attraverso la "Resin Transfer Moulding".

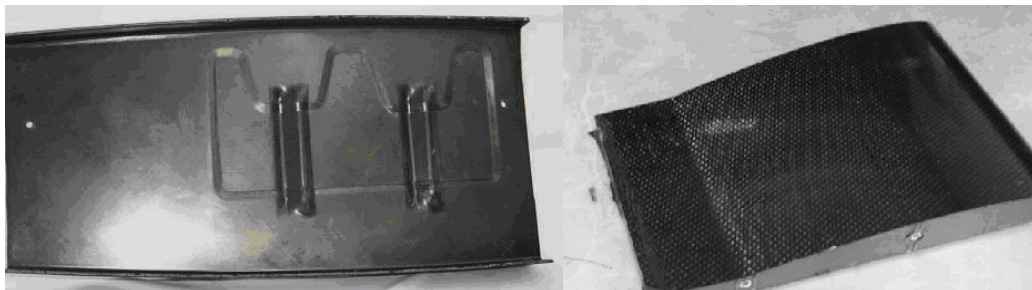


Figura 1.1 Esempi di prodotti dell'industria aeronautica attraverso l'uso della tecnologia RTM

I motivi che stanno alla base di questo rinnovato interesse per la tecnologia RTM vanno ricercati nei suoi innumerevoli punti di forza rispetto agli altri processi produttivi: il basso costo dei macchinari, l'eccellente controllo sulle proprietà meccaniche e sulla finitura superficiale del pezzo realizzato, la possibilità di produrre facilmente componenti di grandi dimensioni e di forma complessa con la presenza di eventuali inserti metallici e una minore esposizione a sostanze volatili potenzialmente nocive a cui sono soggetti gli operatori.[1].

Per completezza vanno citati anche alcuni degli svantaggi che la tecnologia RTM porta con sé: l'esigenza di realizzare uno stampo il cui costo cresce considerevolmente all'aumentare delle complessità del pezzo da produrre. Essendo una tecnologia a stampo chiuso l'RTM è comunque meno economica rispetto a quelle che utilizzano uno stampo aperto. La produzione di pezzi complicati necessita inoltre uno studio accurato del flusso di resina, con i costi naturalmente associati, per evitare possibili difetti di impregnazione.

1.2 Fasi del processo RTM

Il processo produttivo RTM si può suddividere in due distinte famiglie: RTM classico, in pressione, e VaRTM (“*Vacuum assisted Resin Transfer Moulding*”) ovvero con pressioni prossime al vuoto. Da un punto di vista puramente teorico i due modi di procedere sono identici: differiscono infatti solamente per la differenza di pressione che si viene a creare fra il punto d'iniezione e il punto di efflusso della resina. In ambito tecnologico invece le differenze e i risultati che si ottengono optando per uno o per l'altro modo di procedere sono sostanziali.

Il processo classico RTM prevede l'imposizione di una pressione d'iniezione anche molto maggiore rispetto a quella atmosferica ed un efflusso a pressione ambiente. In questo modo si riesce a mantenere un controllo diretto sulla velocità del fronte del flusso, oltre che sulla portata, regolabili in funzione dell'avanzamento del fronte stesso all'interno della preforma. E' in questo modo che si possono ottenere le caratteristiche di qualità meccaniche desiderate per il pezzo finito, ovvero una durata del processo produttivo legata alle esigenze sul numero di pezzi da produrre nel tempo a disposizione. In questo ultimo caso aumentando la pressione di iniezione si avranno infusioni di durata inferiore a patto di provvedere al necessario irrigidimento dello stampo e del sistema di chiusura per fronteggiare l'incremento delle sollecitazioni a cui vengono sottoposti.

Alternativamente si può optare per la produzione dei lavorati in composito tramite VaRTM: in questo caso la pressione d'efflusso è prossima al vuoto, mentre il punto di iniezione è caratterizzato da una pressione comunque inferiore rispetto a quella atmosferica. Risulta evidente la possibilità di controllare la velocità del flusso soltanto entro certi limiti, dovuti alla massima differenza di pressione raggiungibile fra ingresso e uscita della resina. Alla luce di quanto detto per il processo classico il VaRTM non richiede particolare attenzione nella progettazione dello stampo per quanto riguarda il sistema di chiusura e la rigidità, in quanto sarà la stessa pressione esterna a mantenere le parti in posizione. La mancanza d'aria all'interno della preforma dovuta al valore di pressione imposto favorirà un minor contenuto di imperfezioni nel prodotto finito a vantaggio della sua qualità.

La produzione RTM/VaRTM si può suddividere in quattro fasi distinte:

- la prima fase è costituita dall'operazione di taglio del tessuto secco nella forma desiderata: le pelli ottenute andranno disposte nella cavità dello stampo per dare origine alla preforma. Prima di deporre le lamine è necessario applicare uno strato di distaccante sulle pareti dello stampo che andranno a contatto con la resina onde evitare problemi nella fase di estrazione del prodotto finito.
- La seconda è la fase di iniezione della resina: prima di entrare nello stampo si deve sottoporre la resina a trattamento di degasazione per eliminare le bolle d'aria al suo interno, e quindi al processo termico di riscaldamento necessario per ottenere le caratteristiche di viscosità che portino a una corretta impregnazione del tessuto. Solitamente l'iniezione avviene a caldo e quindi resina e stampo vengono riscaldati fino alle rispettive temperature di progetto. L'iniezione è particolarmente delicata, infatti le proprietà del pezzo finito dipendono dalla corretta impregnazione della preforma, e quindi dall'assenza di difetti quali bolle d'aria e vuoti. Questa fase termina quando lo stampo è completamente riempito dalla resina.
- La reticolazione della matrice si protrae per tutta la terza fase del processo. L'energia è trasmessa alla resina sotto forma di calore mantenendo la temperatura necessaria fino al raggiungimento del grado di reticolazione desiderato. Questa fase si conclude con lo spegnimento del sistema di riscaldamento.
- A questo punto lo stampo e il prodotto al suo interno iniziano la quarta ed ultima fase, di raffreddamento. Una volta raggiunta la temperatura ambiente si estrae il pezzo finito, eventualmente da rifinire con operazioni successive.

1.3 Ottimizzazione del processo RTM

Per ottimizzazione del processo si intende un'opportuna scelta dei parametri di progetto, al fine di ottenere il miglior compromesso tra costi, tempistiche di produzione e qualità del manufatto, riferendosi con il termine qualità non solo alle proprietà meccaniche che si vogliono ottenere, ma anche ad una serie di indici che possono dipendere dall'applicazione dell'oggetto della produzione. In certi casi ad esempio l'aspetto estetico può essere considerato anche più importante della resistenza meccanica, rendendo più importante la finitura della parte superficiale.

Nel mondo della produzione si cerca una riduzione dei tempi di ciclo, quindi può risultare vantaggioso fare iniziare la reazione di reticolazione già durante la fase di riempimento dello stampo; in questo modo si riduce la durata complessiva del ciclo unendo di fatto due delle sue fasi. Così facendo l'incremento della viscosità della resina conseguente all'inizio della reticolazione ostacola la corretta impregnazione della preforma. Ne consegue che non sia sempre praticabile una consistente diminuzione del tempo di ciclo a causa del decadimento della proprietà meccaniche del pezzo finito che ne deriva.

Nel caso di un componente strutturale, l'indice di riferimento per la qualità del prodotto sono sicuramente le caratteristiche meccaniche; in quest'ottica i parametri di processo devono essere scelti in modo da privilegiare questo aspetto anche a scapito di un incremento di costi, come avviene nel campo aerospaziale. Nelle varie fasi del processo RTM i parametri da tenere in considerazione come possibili cause di difetti e decadimenti delle proprietà meccaniche nel componente finito sono numerosi.

1.3.1 Effetti di bordo

Il primo problema da tenere in considerazione sono i cosiddetti "effetti di bordo" che si presentano come zone preferenziali per il flusso della resina in prossimità delle pareti dello stampo [4]. Il fenomeno non rappresenterebbe un danno se non si verificasse quel che si vede in figura 1.2

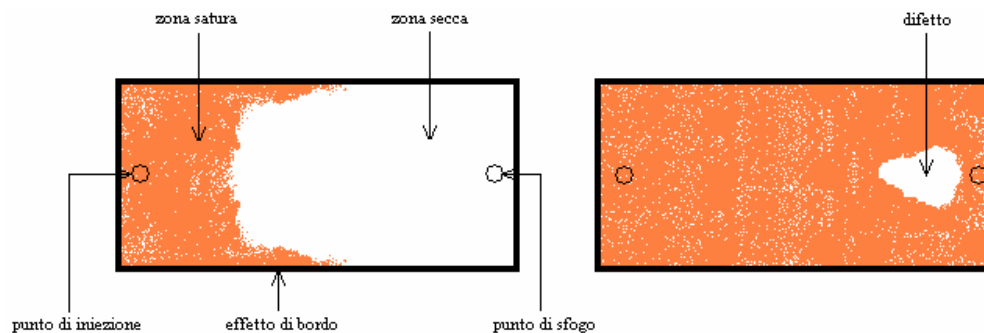


Figura 1.2 Formazione di vuoti a causa di difetti di bordo

Il flusso di resina percorrendo più velocemente le pareti giunge allo sfogo dello stampo senza avere ancora impregnato tutte le parti della preforma. Non essendoci un riscontro visivo data la natura a stampo chiuso della tecnologia si potrebbe verificare l'ipotesi che l'operatore blocchi il flusso di resina non appena questa esce dallo stampo: in questo modo si darebbe inizio alla fase di reticolazione in presenza di zone non impregnate nella preforma che rimarranno

tali anche a pezzo finito. Una possibile soluzione del problema potrebbe essere l'utilizzo di fibre ottiche che rivelino l'arrivo della resina in quelle zone in cui è previsto che si possano formare dei vuoti proprio a causa degli effetti di bordo, lasciando quindi proseguire l'ingresso della resina fintanto che tutte le zone sensibili non saranno impregnate. Un metodo comunque utilizzato per ridurre la probabilità di formazione dei difetti è quello di lasciar proseguire il flusso della resina anche in seguito al raggiungimento dell'uscita, consentendo di fatto una migliore impregnazione della preforma.

1.3.2 Flusso macroscopico e flusso microscopico

Analizzando la fase di riempimento dello stampo e di impregnazione dei tessuti [3] si nota che, durante l'iniezione, all'interno della preforma si sviluppano due diversi tipi di flusso, ognuno caratterizzato dalla propria scala spaziale:

- flusso macroscopico, che si instaura tra i diversi fasci di fibre
- flusso microscopico, che ha luogo all'interno dei fasci fra una fibra e l'altra

La differenza fra i due tipi di flusso che si instaurano è dovuta al fatto che uno (quello macroscopico) è regolato da forze di natura viscosa mentre l'altro (microscopico) è determinato da forze di capillarità. Conseguentemente vengono influenzati da parametri diversi, quali ad esempio la velocità di infusione e la viscosità della resina per il flusso macroscopico mentre per il flusso microscopico rivestono un ruolo notevole anche l'angolo di contatto fibra-resina e la tensione interfacciale. L'influenza di parametri diversi rende non sempre omogenei i due tipi di flusso portando così alla formazione di vuoti le cui caratteristiche cambiano a seconda della combinazione delle caratteristiche dei due flussi.

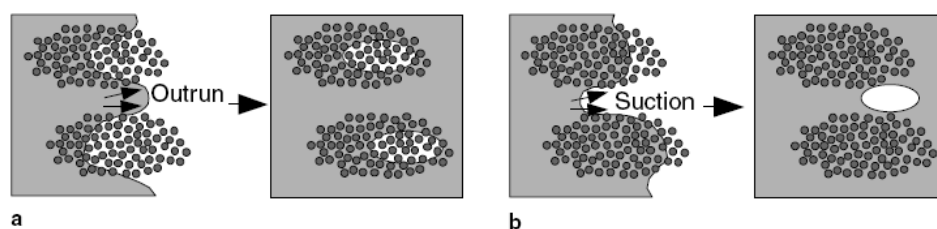


Figura 1.3 Meccanismi di formazione di vuoti a causa della differenza fra i tipi di flusso all'interno della preforma: caso in cui è più veloce il flusso viscoso (a) o il flusso capillare (b)

Nella figura 1.3 sono raffigurati in sezione i due meccanismi di formazione dei vuoti: il primo 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 stessi. 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. Nella figura 1.4 si vedono in particolare le fasi della formazione di questo tipo di vuoti.

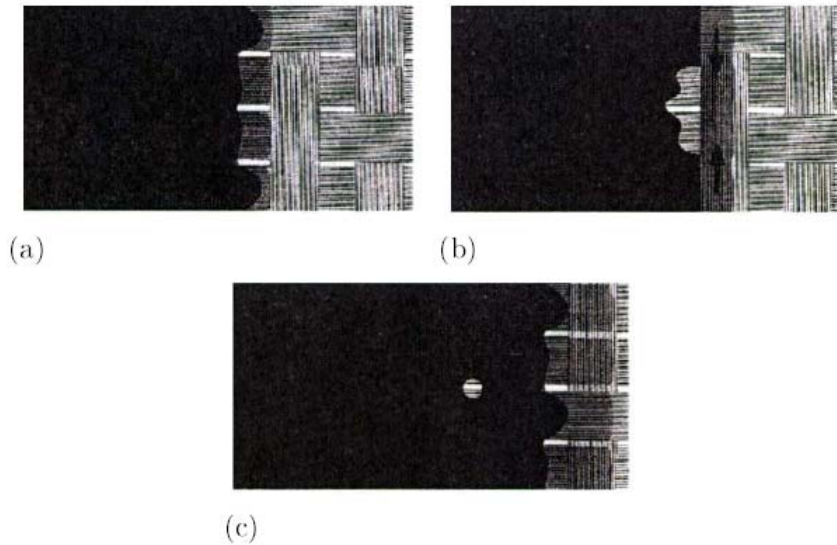


Figura 1.4 Formazione dei vuoti a causa di un flusso capillare più veloce

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

1.4 Modelli matematici basati sui parametri di processo

La produzione VaRTM risulta influenzata da svariati parametri attraverso leggi matematiche che ne spiegano il comportamento.

1.4.1 Legge di Darcy

Il flusso di resina che si sviluppa all'interno della preforma matematicamente viene descritto dal modello di Darcy (1.1), che si riferisce direttamente al flusso di un fluido all'interno di un mezzo poroso, quale si può considerare la preforma:

$$v_x = -\frac{k}{\mu\phi} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}$$

(1.1)

Essa è derivata direttamente dalle equazioni di Navier-Stokes riferite ad un flusso laminare a basso numero di Reynolds, in cui si trascurano le forze d'inerzia; la resina è invece trattata come un fluido newtoniano. Nella legge di Darcy (1.1) compaiono e quindi influenzano il moto la permeabilità k , la variazione di pressione $\partial P/\partial x$, la viscosità della resina μ (quindi anche la temperatura) ed infine la porosità del mezzo ϕ . In generale (1.2) avremo tre componenti di velocità, con un tensore di permeabilità in cui tutte le componenti sono diverse da zero.

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu\phi} \cdot \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial P/\partial x \\ \partial P/\partial y \\ \partial P/\partial y \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

Per un mezzo ortotropo si individuano tre direzioni principali per cui il tensore risulta diagonale: gli elementi diversi da zero prendono il nome di permeabilità principali. Accoppiando l'eq. (1.1) e l'equazione di continuità per un fluido incomprimibile (1.3) si ottiene l'equazione differenziale alle derivate parziali (1.4) che descrive il moto del fluido all'interno del mezzo poroso.

$$\nabla V = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \left(\frac{k}{\mu\phi} \cdot \nabla P \right) = 0 \quad (1.4)$$

Nel caso di VaRTM si impongono i valori di pressione a monte e a valle dello stampo, che costituisce il campo di moto, ottenendo un problema con condizioni al contorno di Dirichlet (1.5):

$$P_{BC} = f(x, y, z) \quad (1.5)$$

1.4.2 Permeabilità

La permeabilità si può definire come la capacità del mezzo poroso di lasciarsi impregnare dal fluido in cui è immerso. Per determinare la permeabilità di un mezzo si eseguono numerose prove sperimentali grazie alle quali si riesce a ottenere il valore desiderato lungo le direzioni principali. In letteratura [1] si trova una relazione (1.6) che afferma la proporzionalità fra la permeabilità k di

un mezzo poroso e la sua densità ρ_r , quindi indirettamente la frazione di volume del rinforzo, oltre alla dimensione d delle porosità. Questa relazione prende il nome di Carman-Kozeny, da coloro che l'hanno studiata.

$$K \propto (1 - \rho_r) \cdot d^2 \quad (1.6)$$

Un altro modello (1.7) che viene dalla letteratura [2] non tiene conto della geometria del rinforzo, e lega la permeabilità k e la frazione di volume delle fibre di rinforzo ϕ attraverso una legge logaritmica:

$$\log(k) = a + b \cdot \log(\phi) \quad (1.7)$$

In questo modello la frazione di volume delle fibre ϕ va calcolata attraverso l'equazione 1.8 conoscendo il valore della grammatura del tessuto ξ , il numero n di lamine della preforma, il loro spessore t_m , ed infine la densità ρ_f di materiale.

$$\phi = 1 - \frac{n \cdot \xi}{t_m \cdot \rho_f} \quad (1.8)$$

1.4.3 Contenuto di vuoti

I meccanismi di formazione dei vuoti spiegati precedentemente sono stati ampiamente studiati attraverso l'analisi dei risultati ottenuti da prove sperimentali [3]. Durante la fase di impregnazione alcune parti della preforma potrebbero rimanere asciutte, andando così a peggiorare le caratteristiche meccaniche del pezzo finito oltre alla sua finitura superficiale. Nell'industria aerospaziale l'obiettivo è quello di ottenere componenti ad elevate prestazioni, quindi il contenuto di vuoti deve essere necessariamente prossimo a zero.

Si distingue fra macro-vuoti e micro-vuoti: si presentano entrambi come delle cavità all'interno del composito, i primi fra i fasci di fibre mentre i secondi fra i singoli filamenti di tessuto che costituiscono la matrice.

Le prove sperimentali dimostrano che la nascita dei difetti è dovuta alle differenti velocità di impregnazione nelle due scale dimensionali del fenomeno, e di conseguenza alle forze di natura capillare e viscosa. In particolare con l'equazione 1.9 si definisce il parametro adimensionale di capillarità:

$$Ca = \frac{\mu \cdot u}{\gamma \cdot \cos \theta} \quad (1.9)$$

dove compaiono la viscosità μ , la velocità del fluido u , γ e θ , rispettivamente la tensione superficiale del fluido e l'angolo di contatto fra fibra e fronte di resina.

Questo parametro si può correlare direttamente con il contenuto di macro e micro vuoti del pezzo finito attraverso dei coefficienti stimati sperimentalmente e dipendenti dalle caratteristiche dei materiali utilizzati. La relazione (1.10) è logaritmica:

$$V_M = A - B \cdot \log(Ca) \quad (1.10)$$

ed esprime il contenuto in percentuale di volume dei macro-vuoti all'interno del composito. Un'altra relazione (1.11) esprime invece il contenuto di micro-vuoti:

$$V_m = A + B \cdot \log(Ca) \quad (1.11)$$

Mettendo nel grafico raffigurato in figura 1.5 le due curve definite dalle relazioni sopra indicate si vede come esista un valore della velocità del flusso (e quindi del numero di capillarità una volta fissati gli altri parametri) che corrisponde ad un punto di minimo, non necessariamente nullo, del contenuto di vuoti.

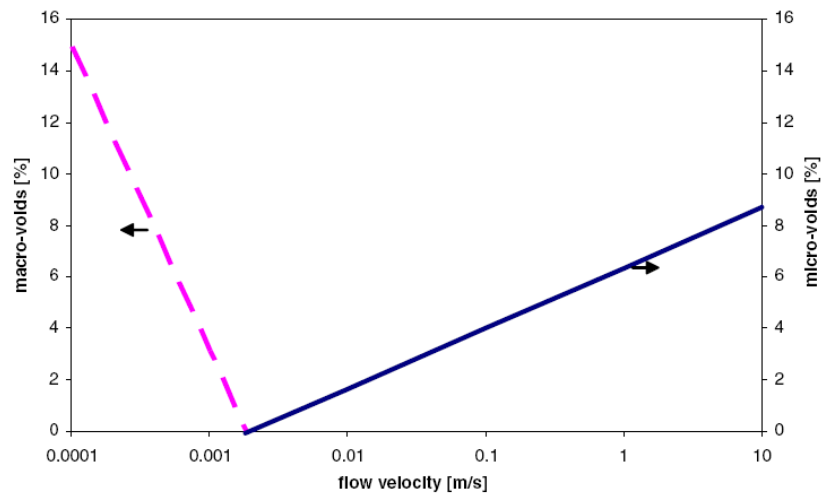


Figura 1.5 Andamento della percentuale in volume dei macro/micro-vuoti in funzione della velocità del flusso di resina

Notiamo quindi che, coerentemente con la descrizione qualitativa del fenomeno di formazione dei vuoti fatta in precedenza, un aumento della velocità del flusso porta ad una maggiore quantità di micro-vuoti (il flusso dominato dalle forze di capillarità risulterà essere il più lento) e viceversa diminuendo la velocità si ha un maggiore contenuto di macro-vuoti. Si può quindi pensare di calibrare i parametri di processo al fine di operare proprio con quel numero di capillarità che corrisponde al minimo della curva in figura 1.5.

Capitolo 2

Uso delle fibre ottiche e dei sensori FBG

2.1 L'importanza del monitoraggio durante la fase produttiva

La tecnologia RTM risulta di largo impiego nella produzione di componenti ad elevate prestazioni, come quelli impiegati nel campo aerospaziale, in conseguenza dell'elevato rapporto fra qualità del pezzo finito e tempo del ciclo di produzione.

Al fine di garantire un'elevata ripetibilità della produzione serve un sistema di monitoraggio di tutte le fasi del processo, dalla fase di riempimento dello stampo a quella di reticolazione: grazie alle informazioni provenienti dal sistema di misura infatti si possono modificare i parametri del processo al fine di ottenere una riduzione del contenuto di difetti nel pezzo finito. In questo modo si agisce direttamente sulla qualità del prodotto, aumentandola.

Utilizzando diversi tipi di sensori (es. pressione, capacitivi...) è possibile visualizzare l'avanzamento del flusso all'interno di stampi non trasparenti, all'interno dei quali non è possibile procedere ad una verifica di tipo ottico. In questo modo sono consentite le misure di permeabilità e la conoscenza dell'avvenuta impregnazione da parte della resina in diverse posizioni delle cavità dello stampo [5].

Incrociando i dati provenienti dai sensori annegati fra gli strati di tessuto si potrebbero ottenere informazioni sulla differenza di permeabilità fra le zone della preforma, in spessore come lungo tutto lo sviluppo longitudinale e trasversale.

L'indagine della fase di cura della resina permetterebbe di agire in modo da ottenere prodotti finiti omogenei al proprio interno e fra di loro: nel volume della preforma si trovano infatti delle zone per cui la reticolazione impiegherà un lasso di tempo maggiore per essere completa (es. vicino all'ingresso) ed altre per cui si richiederà meno tempo, i cosiddetti "*hot spots*". Posizionando in modo opportuno i sensori si possono individuare queste zone ed agire di conseguenza per ottenere un processo termico che conduca a un livellamento dei tempi di cura per tutte le parti del composito. Una volta che il sistema di monitoraggio evidenzia il raggiungimento del grado di reticolazione voluto si procede con l'apertura dello stampo e l'estrazione del manufatto.

2.1.2 Tipi di sensori utilizzati

I sensori impiegati nell'indagine del processo RTM sono molteplici ed ognuno di essi porta con se alcuni limiti e svantaggi specifici [6].

Un sistema SMART-weave è costituito da griglie di filamenti conduttori disposti in maniera ortogonale fra gli strati di tessuto: il flusso di resina chiude un circuito elettrico ed il risultato è una variazione nella lettura del voltaggio. Questo sistema consente di monitorare tutta la fase di riempimento dello stampo, ma rimarrà all'interno del pezzo una volta che questo verrà estratto costituendone un difetto strutturale. L'intrusività di questo sistema di misura si manifesta anche attraverso il suo ostacolare il flusso di resina.

I trasduttori di pressione inviano un segnale elettrico originato da un estensimetro al variare della pressione conseguente al passaggio della resina. Lo svantaggio di questo sistema di misura è l'elevato costo a fronte di una tecnica collaudata.

Le termocoppie producono una differenza di potenziale legata alla differenza di temperatura fra i due capi (2.1): se la resina e la termocoppia durante l'infusione sono a temperature sufficientemente diverse si può trovare nell'arrivo della resina la causa della variazione del segnale elettrico, ricostruendo quindi la posizione del fronte del flusso.

$$V = \alpha \cdot (T_{MIS} - T_{RIF}) \quad (2.1)$$

Dove α è il coefficiente di Seebeck. Le termocoppie vengono anche utilizzare per ricostruire la storia della temperatura e quindi il grado di reticolazione (ricordando che è una reazione esotermica) all'interno dello stampo.

Anche gli ultrasuoni vengono utilizzati per il monitoraggio dell'infusione e della cura della resina. Una sorgente ad impulsi emette un segnale acustico che un sensore ad ultrasuoni riceve dalla parte opposta: dall'acquisizione del segnale si ricavano due informazioni, la velocità di propagazione delle onde di pressione (suono) all'interno del mezzo e l'attenuazione del segnale. L'arrivo della resina determina una variazione delle misure, e durante la fase di cura si ha una progressiva variazione della velocità del suono, raggiungendo il valore massimo alla fine della cura.

Le tecniche ATR invece sfruttano il fenomeno dell'onda evanescente all'interno del sistema di spettroscopia ad infrarossi. Sono basati sulla misura dell'assorbimento che si ha all'interfaccia fra il core di una fibra ottica e la resina che sta avanzando/reticolando. Questo sistema presenta dei costi molto

elevati e la necessità di un lungo tratto di misura, almeno 20 cm, a fronte di una notevole precisione.

2.2 Fibre ottiche

Le fibre ottiche sono in grado di trasmettere un segnale elettromagnetico con una frequenza abbastanza elevata in maniera quasi ideale: esse infatti sono caratterizzate da una bassa perdita del segnale trasmesso, elevata soglia di danneggiamento prima della perdita del segnale e bassa non-linearità del segnale ottico trasmesso. Ad oggi la perdita di segnale ha raggiunto valori nell'ordine di 0.2 dB km^{-1} [7].

I materiali con cui sono fabbricate possono essere vetrosi e polimerici, e il prodotto finito si presenta sotto forma di cavi. Le dimensioni di un singolo filamento sono molto piccole, all'incirca $125 \mu\text{m}$, ed anche il loro peso per unità di lunghezza è basso: 60 g km^{-1} .

2.2.1 Struttura

In figura 2.1 si vede una rappresentazione in sezione della struttura tipica di una fibra ottica. In essa possiamo identificare tre strati concentrici di materiale, che prendono il nome di:

- core, lo strato più interno, dal diametro variabile fra 5 e $50 \mu\text{m}$ crescendo a seconda del tipo di fibra, sia essa monomodale o multimodale
- cladding, è lo strato posto esternamente al core dal diametro di circa $125 \mu\text{m}$
- coating, è lo strato più esterno: esso funziona come una guaina protettiva dagli agenti esterni per core e cladding, evitando stress e corrosione

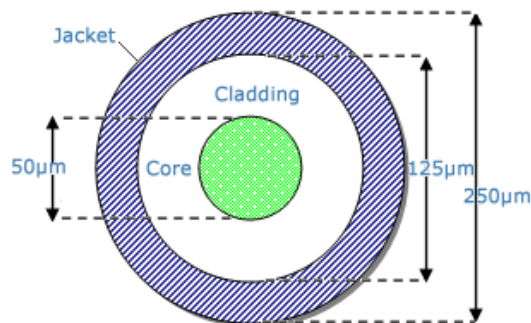


Figura 2.1 Sezione tipica di una fibra ottica multi-modale

Per consentire alla fibra ottica di funzionare si devono usare materiali di diverso indice di rifrazione¹ per gli strati interni, e più specificatamente l'indice di rifrazione del core deve essere maggiore rispetto a quello del cladding: se ne vede l'andamento in figura 2.2.

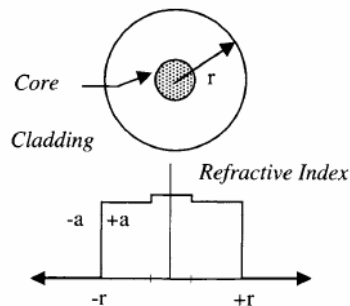


Figura 2.2 Indice di rifrazione di core e cladding in una fibra ottica

In questo modo il segnale riesce a propagarsi lungo il core all'interno della fibra ottica attraverso successive rifrazioni.

Core e cladding si possono realizzare con materiali vetrosi, silice, o con materiali plastici. Se realizzati in silice è necessario partire da silice ultrapura che si ottiene dalla reazione fra tetracloruro di silicio e ossigeno. Si distinguono poi diversi tipi di fibre a seconda dei materiali usati per il drogaggio, ovvero per l'ottenimento del comportamento desiderato: ad esempio si usa fosforo per diminuire la temperatura di fusione e consentire una più facile lavorazione, germanio nel core per aumentarne l'indice di rifrazione e ancora fluoro e boro nel cladding per ridurre l'indice di rifrazione.

Realizzando fibre ottiche in silice si riescono ad ottenere le proprietà desiderate attraverso l'uso dei materiali sopra esemplificati, a fronte di un prodotto che si presenta molto fragile alla fine della lavorazione.

2.2.2 Funzionamento

Le fibre ottiche hanno la funzione di mezzo di trasporto per la radiazione elettromagnetica. Il loro funzionamento matematicamente è basato sulla legge di Snell (2.2), che permette di determinare la direzione della radiazione luminosa quando passa attraverso mezzi con differente indice di rifrazione.

$$\frac{\sin(\vartheta_1)}{\sin(\vartheta_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

¹ L'indice di rifrazione è definito come il rapporto fra la velocità della radiazione luminosa nel vuoto e nel mezzo in esame. Più alto è, minore sarà la velocità. Nel caso delle fibre ottiche i valori sono intorno a 1.5

La radiazione che si propaga nel secondo mezzo è dunque deviata, e il rapporto fra i seni degli angoli uguaglia il rapporto fra gli indici di rifrazione n e di conseguenza il rapporto fra le velocità di propagazione della radiazione luminosa nei mezzi v . È importante sottolineare che gli angoli di cui si parla sono quelli misurati fra il vettore incidente del fascio luminoso e la normale alla superficie del mezzo, come visibile in figura 2.3.

Talvolta, quando la luce passa da un mezzo con un indice di rifrazione più alto ad un altro con indice di rifrazione più basso, sembra che la legge di Snell (2.2) richieda un seno maggiore di uno: naturalmente questo è impossibile, e si verifica il fenomeno di “*riflessione totale*” per cui la luce viene completamente riflessa all’interno del mezzo. L’angolo massimo per cui si ha la presenza di rifrazione è detto *angolo critico* ed è espresso dalla relazione (2.3):

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3)$$

Nella figura 2.3 si vede un esempio del fenomeno di rifrazione dell’onda fino all’angolo critico, oltre il quale si ha la riflessione totale.

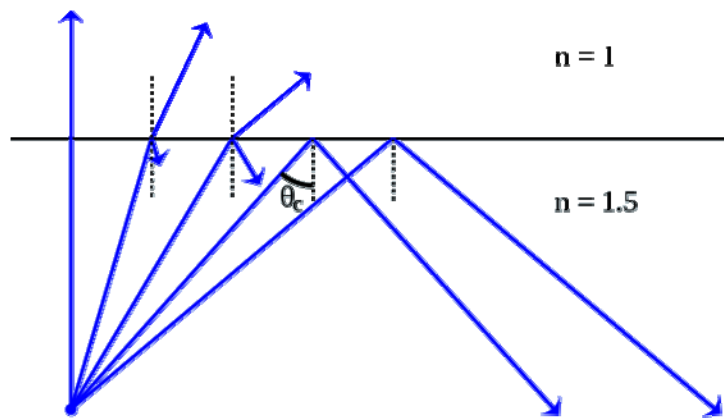


Figura 2.3 Rifrazione/riflessione totale della radiazione luminosa

Le fibre ottiche prendono il nome di monomodali o multimodali: si distinguono per il modo in cui la luce si può propagare al loro interno. Il parametro che influenza la modalità di propagazione è il diametro del core: quando questo è grande (fibre multi-modali) si può analizzare geometricamente la trasmissione dell’onda elettromagnetica, alternativamente (fibre mono-modali) si devono risolvere le equazioni delle onde elettromagnetiche derivate dalle eq. di Maxwell.

Le fibre monomodali sono in grado di supportare un solo modo di trasmissione della luce ed hanno dimensioni del core di 8-10 μm ; quelle multimodali invece consentono la propagazione di più modi, con un diametro superiore a 10 μm .

2.2.4 Fiber Bragg Gratings

Questo tipo di sensore è costituito da una fibra ottica su cui è inciso un reticolo di Bragg. Il sistema sfrutta lo spostamento della lunghezza d'onda riflessa in conseguenza della deformazione del reticolo. Il segnale riflesso richiede perciò di essere interpretato attraverso un analizzatore di spettro.

I sensori FBG sono dotati di elevata sensibilità (3-5 $\mu\epsilon$) indipendente da qualsiasi relazione geometrica, su di loro gli effetti del rumore ottico sono quasi ininfluenti ed infine il costo di un sensore FBG si è notevolmente ridotto all'aumentare della diffusione.

La versatilità dei sensori FBG si ritrova anche nella possibilità di impiegarli attraverso multiplexing: incidendo più reticoli lungo la fibra ottica si possono effettuare più misure sulla stessa linea riducendo contemporaneamente ingombro e costo del sistema di misura. Nessun sistema fra quelli elencati in precedenza può sfruttare la tecnica di multiplexing.

La possibilità di utilizzare una sola fibra ottica con più reticoli di Bragg è molto allettante, in quanto quella di inglobamento delle fibre nella preforma è una fase lunga e complicata.

Nello specifico il reticolo di Bragg è costituito da una serie di bande (specchi semiriflettenti) disposti in maniera equidistante e perpendicolarmente all'asse del core. La distanza Λ fra le bande (passo) è un parametro caratteristico del reticolo poiché va a determinare direttamente la lunghezza d'onda della luce riflessa λ_B nella condizione indeformata.

Come vediamo nella figura 2.5 le bande non sono altro che dischi del core con indice di rifrazione modificato attraverso fotoincisione. Quest'ultima si ottiene attraverso l'interferenza di due fasci di laser ultravioletti, come si vede in figura 2.4.

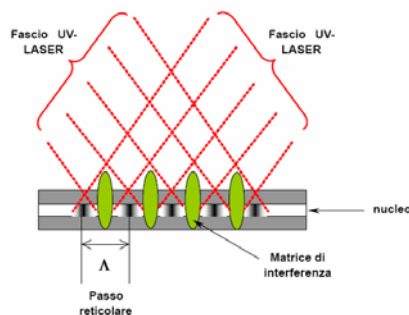


Figura 2.4 Incisione di un FBG

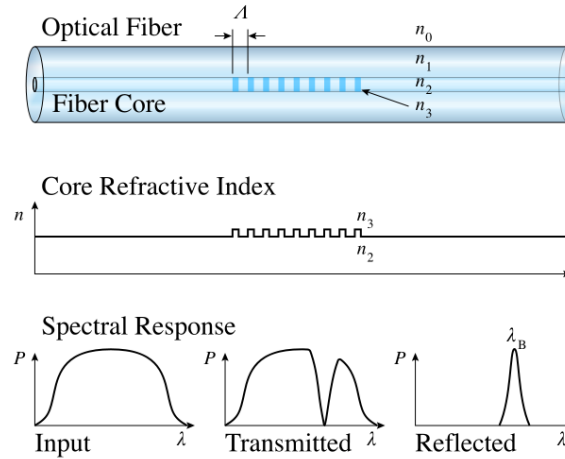


Figura 2.5 Andamento dell'indice di rifrazione e dello spettro riflesso e trasmesso di un FBG

A partire dal valore di indice di rifrazione medio modificato n_{eff} ottenuto tramite opportuna fotoincisione e dalla distanza Λ fra due bande successive del reticolo si ottiene (2.4) la lunghezza d'onda riflessa caratteristica del reticolo di Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (2.4)$$

La relazione (2.4) prende il nome di *Legge di Bragg*.

Il fascio di luce che percorre la fibra subisce una serie di rifrazioni a causa della continua variazione dell'indice di rifrazione e solamente le componenti che rispettano l'equazione di Bragg subiscono una riflessione con fase concordante, andando a sommarsi per dare come risultato lo spettro riflesso. Lo spettro riflesso presenterà un picco in prossimità della λ_B : tutte le altre componenti della radiazione luminosa invece passeranno il reticolo dirigendosi verso l'estremo opposto della fibra.

2.3 Monitoraggio del processo produttivo attraverso sensori FBG e fibre ottiche

Sulla base di quanto spiegato a riguardo dei principi di funzionamento delle fibre ottiche e dei sensori FBG si può procedere vedendo come essi vengono impiegati per monitorare le fasi della produzione dei compositi tramite tecnologia VaRTM. Per l'impiego dei sensori FBG nelle attività propedeutiche

all'health monitoring si veda più avanti nella sezione dedicata alle prove meccaniche.

2.3.1 Avanzamento del flusso di resina durante l'infusione

Durante l'infusione si impiegano sia fibre ottiche “*semplici*” sia sensori FBG. Le fibre ottiche “*semplici*” vengono utilizzate a seguito di una specifica lavorazione, in cui dapprima si procede ad eliminare lo strato protettivo, il coating, attraverso uno *stripper*.

A questo punto si deve pulire la superficie esterna del cladding con dell'alcool isopropilico per poter procedere successivamente alla terza fase: il taglio della punta della fibra ottica. Quest'ultima è la fase più delicata, in quanto sulla base dei principi di riflessione prima esposti, bisogna tagliare la fibra ottica in modo esattamente perpendicolare all'asse.

Il sistema di misura infatti, come sarà meglio spiegato più avanti, si basa sull'intensità del segnale che torna ad un interrogatore: questa intensità sarà tanto maggiore quanto più il taglio sarà perfettamente perpendicolare.

L'arrivo della resina nel punto in cui è posizionata l'estremità della fibra ottica porterà la punta della fibra ad essere successivamente immersa in due materiali con diverso indice di rifrazione: in questo modo cambierà l'intensità del segnale di ritorno opportunamente misurata tramite un interrogatore. Il fenomeno della variazione dell'intensità del segnale è spiegato dalla relazione di Fresnel (2.5):

$$R = f(n_{fo}, n_{ext}, \vartheta) = \left| \frac{n_{fo} \cos(\vartheta) - \sqrt{(n_{ext}^2 - n_{ext}^2 \sin^2(\vartheta))}}{n_{fo} \cos(\vartheta) + \sqrt{(n_{ext}^2 - n_{ext}^2 \sin^2(\vartheta))}} \right|^2 \quad (2.5)$$

La potenza del segnale riflesso dipende dall'indice di rifrazione del core n_{fo} e quello della sostanza in cui si imbatte il segnale luminoso una volta che arriva alla punta della fibra ottica n_{ext} . Nel caso sia valida l'ipotesi di avere un solo angolo per la riflessione della radiazione luminosa e che questa sia fondamentale allineata all'asse della fibra si ottiene una relazione semplificata (2.6):

$$R = f(n_{fo}, n_{ext}) = \left| \frac{n_{fo} - n_{ext}}{n_{fo} + n_{ext}} \right|^2 \quad (2.6)$$

che esprime la riflettività R in funzione dei soli due indici di rifrazione in gioco. Sarebbe anche possibile a partire dalla relazione (2.6) determinare l'indice n_{ext} a partire dalla variazione della potenza del segnale misurata. Nel caso in esame

questo non è un dato degno di interesse e quindi ci si limita a rilevare la variazione della potenza del segnale.

A partire dalla conoscenza della posizione della punta della fibra ottica sarà anche possibile a posteriori costruire la storia temporale delle posizioni del fronte del flusso della resina.

L'uso dell'FBG come sensore per l'individuazione della posizione del fronte del flusso di resina invece è resa possibile dalla natura stessa dell'infusione a freddo. La resina infatti viene iniettata a temperatura relativamente bassa, sufficiente a garantire il grado di viscosità desiderato, mentre il sensore si trova all'interno dello stampo mantenuto a temperatura sensibilmente maggiore. La contrazione che deriverà dal ΔT a cui viene sottoposto il sensore sarà letta come una normale deformazione dall'interrogatore del segnale, con la corrispondente variazione della lunghezza d'onda riflessa: si è quindi in grado di stabilire in quale istante la resina raggiunge il sensore FBG.

2.3.2 Fase di reticolazione della resina

La reticolazione della resina è una fase in cui si susseguono continuamente delle reazioni esotermiche che hanno come risultato la generazione di picchi di temperatura di massimo e di minimo relativo. Il sensore FBG è in grado di evidenziare queste variazioni grazie alla propria deformazione termica: si potrà dire che la fase di reticolazione è terminata quando si esaurirà la serie di variazioni della lunghezza d'onda riflessa diretta conseguenza delle reazioni esotermiche di reticolazione.

2.4 Vantaggi derivanti dall'uso delle fibre ottiche

Un sistema di monitoraggio basato sull'uso di fibre ottiche consente dunque di osservare quanto succede all'interno di uno stampo altrimenti non raggiungibile. Questo risultato si può raggiungere anche con gli altri sistemi di misura presentati all'inizio del capitolo, ma bisogna rinunciare a ciò che offrono le fibre ottiche.

Esse infatti hanno innanzitutto il pregio di essere affidabili e poco costose: non bisogna dimenticare inoltre che l'intrusività di un sensore è anche legata alle sue dimensioni. Il diametro ridotto di una fibra ottica, confrontabile con quello dei filamenti di tessuto, fa sì che non si vengano a creare concentrazioni di sforzo in conseguenza della presenza della fibra. Gli altri sistemi di misura avrebbero invece costituito un difetto del prodotto finito.

Le fibre ottiche inoltre non creano cammini preferenziali per la delaminazione, ovvero non vanno a interferire con il meccanismo di trasferimento degli sforzi dalla resina alle fibre di tessuto. Durante la fase di infusione inoltre non vanno a

determinare alcuna modifica a quello che sarebbe il moto della resina in loro assenza.

Capitolo 3

Stato dell'arte

3.1 Sperimentazione precedente

Il lavoro di tesi qui esposto prende spunto dai risultati ottenuti precedentemente al Politecnico di Milano attraverso prove sperimentali collegate al processo di produzione usando la tecnologia RTM.

In particolare nelle esperienze precedenti si era pervenuti a stabilire in maniera pressoché definitiva quali dovessero essere le fasi della produzione e come andassero eseguite le corrispondenti operazioni [8]. Un altro lavoro di tesi [9] invece aveva già sperimentato l'uso delle fibre ottiche e degli FBG come sensori costituendo una base di partenza per l'impiego più ampio che hanno avuto nell'attività in esame. Anche alcuni dati necessari al calcolo dei parametri dell'infusione, quali ad esempio quelli relativi alla permeabilità dei tessuti, sono stati ricavati da lavori di tesi [10] precedenti.

3.1.2 Impianto di infusione

L'impianto usato per la realizzazione di prodotti tramite tecnologia VaRTM è stato inizialmente quello derivante dalle esperienze precedenti. Per la natura stessa del processo, ricordando che si opera con pressioni più basse rispetto a quella atmosferica sia a monte sia a valle dello stampo, sono necessarie due pompe di aspirazione settate alle pressioni di progetto rispettivamente per l'ingresso e l'uscita della resina.

Per regolare la pressione all'ingresso dello stampo viene utilizzata la pompa dell'autoclave del laboratorio "Materiali Compositi" del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, mentre per la pressione a valle è a disposizione una pompa portatile. I valori della pressione a monte e a valle dello stampo vengono misurati attraverso i manometri dell'autoclave (visibili in figura 3.1) per tutta la durata delle operazioni.



Figura 3.1 Indicatori di pressione con valori tipici durante un'infusione

Per lo stivaggio della resina da infondere inizialmente si usava un serbatoio in acciaio a sezione cilindrica per cui il livello della resina era rivelato da un potenziometro collegato a un galleggiante posto all'interno del serbatoio. Questo sistema di raccolta della resina si è dimostrato presto inaffidabile e quindi si è optato per un nuovo tipo di serbatoio, una beuta da vuoto trasparente, che consentisse di visualizzare qualitativamente e, con gli errori del caso, anche quantitativamente il flusso della resina inviata all'ingresso allo stampo. La resina nella beuta è mantenuta per tutto il processo di degasazione e infusione alla temperatura di 80°C attraverso un fornello elettrico.

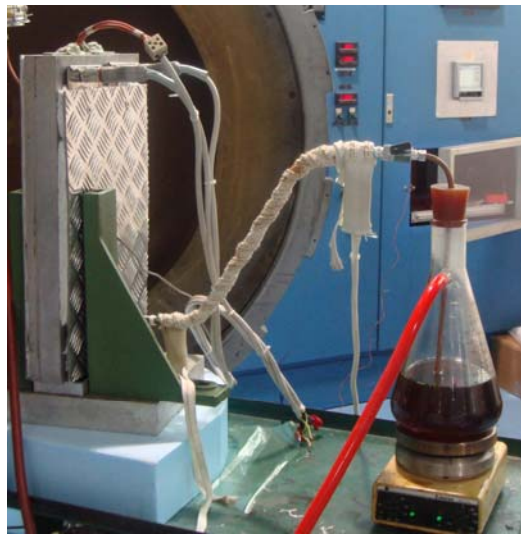


Figura 3.2 Beuta graduata, rubinetto e tubo di collegamento riscaldato tramite resistenze

Il flusso della resina è regolato da un rubinetto a sfera alla cui uscita è posto il collegamento con lo stampo, realizzato tramite tubi di rame del diametro interno di 6 mm. Queste tubazioni vengono mantenute alla temperatura di 80°C tramite una serie di resistenze elettriche poste all'interno di una calza riscaldante: si impedisce in questo modo un innalzamento della viscosità che potrebbe rappresentare un ostacolo per la resina in ingresso nello stampo. Si può vedere quanto descritto in figura 3.2.

Dopo aver compiuto il percorso descritto la resina entra nello stampo dove è alloggiata la preforma, la cui temperatura è mantenuta ancora tramite resistenze elettriche a 120°C. Il sistema di riscaldamento è controllato da un termoregolatore che legge la temperatura dello stampo attraverso una termocoppia annegata nel controstampo. La tenuta ermetica dello stampo è garantita da un anello in gomma posizionato come si vede in figura 3.3.



Figura 3.3 Anello in gomma per la tenuta e preforma

Lo stampo è costituito da due parti in alluminio, stampo e controstampo, che hanno un peso complessivo superiore a 20 kg. Nello stampo sono stati ricavati due canali in cui vengono alloggiati le fibre ottiche e i sensori FBG che si vogliono eventualmente inglobare nel pezzo da fabbricare. Per garantire la tenuta di questo sistema di introduzione delle fibre i filamenti vengono prima protetti facendoli passare in un tubo in Hytrel e poi inglobati in delle guarnizioni fatte di gomma siliconica (come si vede in figura 3.4), che una volta riscaldate si dilateranno evitando così la penetrazione dell'aria all'interno dello stampo e la fuoriuscita di resina.



Figura 3.4 Vista interna ed esterna del sistema di ingresso delle fibre ottiche

Lo stampo, come si può vedere in figura 3.2, viene mantenuto in posizione verticale in modo che l'accelerazione di gravità mantenga la resina ancora fluida nella posizione desiderata, dopo che è stato disattivato il sistema di aspirazione. La resina riempie la cavità percorrendola dal basso verso l'alto.

Una volta riempito lo stampo la resina si dirige verso un serbatoio di raccolta percorrendo un tubo in rame con diametro interno di 4 mm. Nello stesso serbatoio di raccolta della resina in efflusso è innestato il tubo di aspirazione dell'aria usato per ottenere la pressione desiderata a valle dello stampo: il pescaggio dell'aria quindi deve essere al di sopra del pelo libero della resina, per evitare che la stessa si diriga verso la pompa.

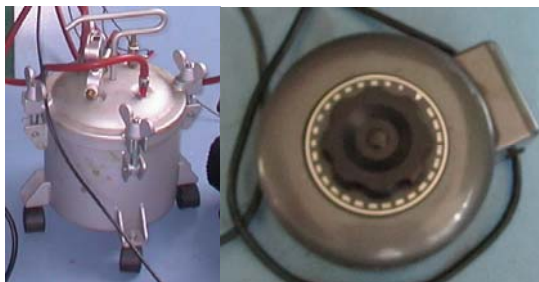


Figura 3.5 Variac e serbatoio di condensazione

Completano l'impianto di infusione un Variac, che viene usato per diminuire il voltaggio in ingresso al termoregolatore una volta raggiunta la temperatura di reticolazione di 180°C, e un ulteriore serbatoio posto sulla linea di aspirazione dell'aria in uscita per consentire la condensazione di eventuali vapori di resina che potrebbero danneggiare la pompa di aspirazione, entrambi visibili in figura 3.5.

3.2 Problematiche e possibili soluzioni

Dall'ampia trattazione riservata alla formazione dei vuoti si può dedurre l'importanza che essi hanno nel determinare la buona riuscita della fabbricazione di un pezzo. Riuscire a ridurre la presenza è anche il primo obiettivo di questa tesi, per poter poi proseguire con la sperimentazione. Molti autori [3,11,12] alla luce dei fenomeni che portano alla formazione dei vuoti hanno proposto e sperimentato alcune soluzioni per ottenere un manufatto privo di imperfezioni.

3.2.1 Riduzione della presenza di difetti

Una prima analisi numerica [11] è volta a correlare il contenuto di vuoti con i parametri di ingresso della resina: in questa si afferma che le imperfezioni sono più numerose quando si mantiene lo stesso gradiente di pressione durante tutta l'infusione. La spiegazione è data dal valore assunto in questo modo di procedere dal già citato numero di capillarità, che si discosterebbe da quello ottimale: il risultato migliore si ottiene regolando la pressione in modo continuo al fine di mantenere il numero di capillarità ottimale. Non potendo procedere ad una tecnica del genere si potrà invece ottenere il risultato che si è dimostrato

essere quello intermedio fra i due precedenti: un aumento del gradiente di pressione durante l'infusione che cerchi di mantenere costante la portata in ingresso. La riduzione della presenza di difetti è comunque notevole, come possiamo osservare in figura 3.6, confrontabile con quella ottenibile grazie all'ottimizzazione del numero di capillarità.

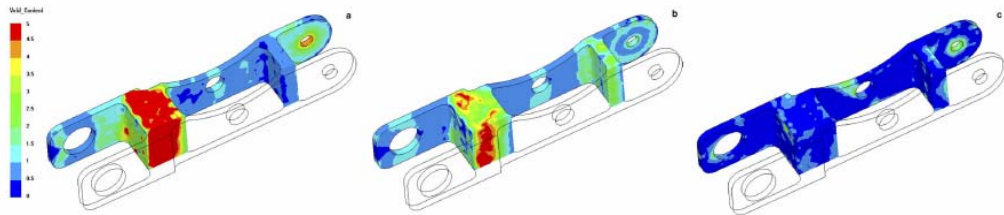


Figura 3.6 Simulazione numerica [11] di riempimento della preforma nel caso di pressione costante (a), portata costante (b) e portata regolata per ottimizzare il numero Ca (c)

3.2.2 Posizione dei punti di misura

La teoria fornisce indicazioni sulle possibilità di formazione dei vuoti: gli studiosi [13] si sono posti il problema di riuscire a ridurre il contenuto di vuoti attraverso dei sistemi di controllo, basati sui parametri che hanno maggiore influenza sulla nascita dei difetti. La strada maggiormente percorsa è quella di regolare la pressione di ingresso in funzione della differenza fra fronte del flusso ideale (predetto) e fronte del flusso misurato, come in [11,13].

Per ricostruire correttamente il profilo del fronte di avanzamento della resina a partire dai dati provenienti dal sistema di misura bisogna ricorrere ad un opportuno posizionamento dei sensori a disposizione. In questa tesi si vuole utilizzare un sistema di misura basato su fibre ottiche e quindi bisogna adattare i discorsi fatti dagli autori citati al caso in esame. La ricostruzione del profilo di avanzamento avviene misurando la posizione del fronte a diversi istanti temporali, quindi i sensori andranno posizionati in modo tale da essere raggiunti a intervalli di tempo costanti.

Dalla legge di Darcy otterremo quindi una prima stima del tempo necessario al completo riempimento della preforma (3.1), in funzione della ΔP imposta, permeabilità della preforma k , porosità ϕ , viscosità della resina η e lunghezza della preforma L :

$$t_R = \frac{\eta\phi}{2\Delta P \cdot k} L^2 \quad (3.1)$$

In funzione di questo dato e sulla base del numero di sensori a disposizione si ottiene l'intervallo di tempo che dovrà intercorrere fra il raggiungimento di due sensori successivi. Usando ancora la legge di Darcy avremo la distanza

dall'ingresso della resina a cui dovranno essere posizionati i punti di misura. In questo modo si ottengono le lunghezze dei tratti di fibra immersi nella preforma. Nella figura 3.7 è mostrato il posizionamento delle fibre ottiche nel caso in cui si abbiano 6 punti di misura a disposizione, come nelle prove effettuate.

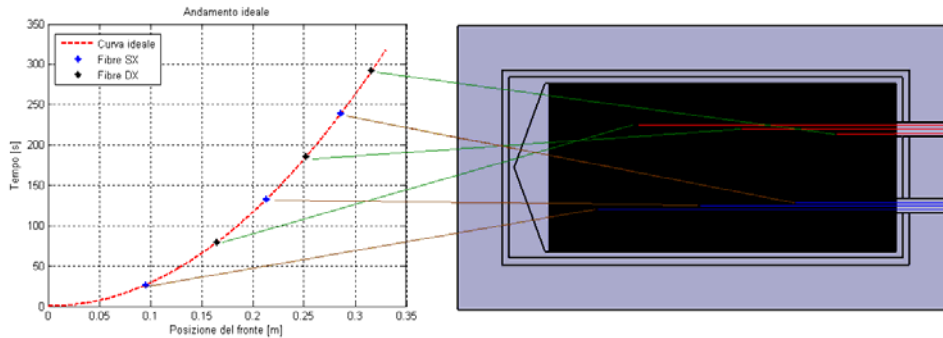


Figura 3.7 Posizione delle fibre nello stampo come suggerito da [13] basandosi sulla legge di Darcy

3.2.3 Ricostruzione del profilo di avanzamento del flusso

In una situazione ideale di permeabilità omogenea le misure corrisponderebbero a quanto previsto dalla teoria: non essendo così la situazione reale va prevista una certa differenza fra i dati provenienti dalla sperimentazione e le previsioni. A partire dai dati raccolti si può ottenere un'approssimazione della forma del fronte di avanzamento del flusso tanto più raffinata quanti più saranno i punti di misura, procedendo a un'interpolazione parabolica data la natura quadratica della legge tempo-spostamento. In particolare per la configurazione adottata si possono individuare due flussi relativi uno alla parte destra e l'altro alla parte sinistra dello stampo, più un'approssimazione globale basata su tutte le misure. Confrontando questi risultati con quanto previsto dalla teoria si evidenziano le differenze di permeabilità fra le diverse zone della preforma, corrispondenti a ritardi/anticipi temporali della misura rispetto alle previsioni.

3.2.4 Utilizzo dei sensori FBG

I sensori FBG a disposizione vengono usati durante l'infusione come se fossero normali fibre ottiche, quindi per rivelare l'arrivo della resina in un punto dello stampo stabilito, e successivamente come sensori per la deformazione del pannello, termica e meccanica, per effettuare quello che viene chiamato *health monitoring*. Le modalità di prova dei sensori FBG sono state trattate in [14], dove si espone la relazione fra lo stato di sforzo e la misura proveniente dal sensore annegato nel provino.

La lunghezza d'onda del segnale riflesso dipende (2.4) dalla distanza fra le successive bande del reticolo: la deformazione meccanica va a modificare questa lunghezza, modificando λ_B . Una deformazione termica invece cambia

anche l'indice di rifrazione del materiale, l'altro parametro di cui λ_B è funzione. Tenendo conto di tutti gli effetti, si ottiene [15] la relazione (3.2), che esprime la variazione della lunghezza d'onda $\Delta\lambda_B$:

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \cdot \Delta l + 2 \cdot \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

in cui si mostra che ciascun parametro (Λ , n_{eff}) dipende sia dalla temperatura ΔT sia dalla variazione di lunghezza Δl . Nel nostro caso avremmo un sistema indeterminato poiché i dati a disposizione sono T , λ_B e $\Delta\lambda_B$, mentre non sono note le dipendenze di indice di rifrazione e la spaziatura del reticolo di Bragg. Con alcuni accorgimenti si rendono superflue le informazioni altrimenti necessarie: la deformazione dovuta al processo di reticolazione viene determinata misurando λ_B ad una stessa temperatura prima e dopo l'infusione. Le prove meccaniche invece saranno ragionevolmente effettuate a temperatura costante, escludendo in questo modo possibili variazioni dell'indice di rifrazione. Nel caso di applicazione di una variazione di temperatura la sensibilità sarà molto maggiore per l'indice di rifrazione e trascurando quindi la deformazione termica sarà uno solo parametro che influenzerà la λ_B .

Capitolo 4

Parte sperimentale

4.1 Sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione deve, come già anticipato nel capitolo 2, registrare contemporaneamente il segnale proveniente da due diversi tipi di sensori: fibre ottiche e FBG.

Per l'acquisizione del segnale delle fibre ottiche si usa una configurazione sorgente – riflettometro: la sorgente è deputata all'emissione del segnale ottico che deve essere inviato alle fibre ottiche. Questa operazione viene eseguita tramite un riflettometro: il segnale in ingresso viene diviso attraverso degli *splitter* in 32 parti per poi uscire dagli 8 canali in cui vengono innestati i connettori delle fibre ottiche. Il riflettometro, mostrato in figura 4.1, è quindi in grado di misurare l'intensità del segnale riflesso da ciascuna fibra ottica ed inviare i dati all'elaboratore.

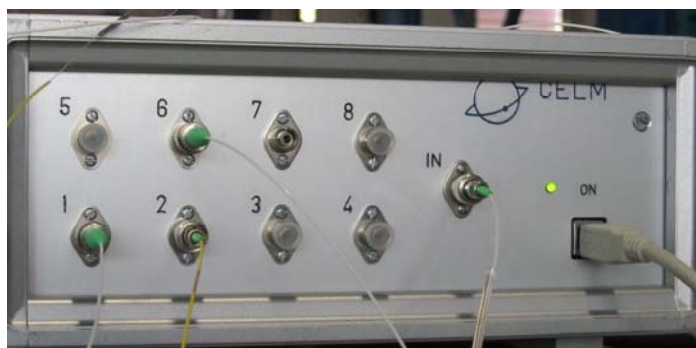


Figura 4.1 Riflettometro

Quando invece si procede all'acquisizione del segnale proveniente dal sensore FBG oltre alla sorgente si usa un interrogatore ottico per sensori a modulazione di frequenza a reticolo di Bragg. Questo strumento è in grado di analizzare il segnale riflesso dal sensore FBG e di rivelarne la lunghezza d'onda.

Durante le infusioni si campionano ed acquisiscono entrambi i segnali: in questo caso vanno utilizzati tutti e tre i moduli elencati in precedenza. Il funzionamento viene schematizzato nella figura 4.2.

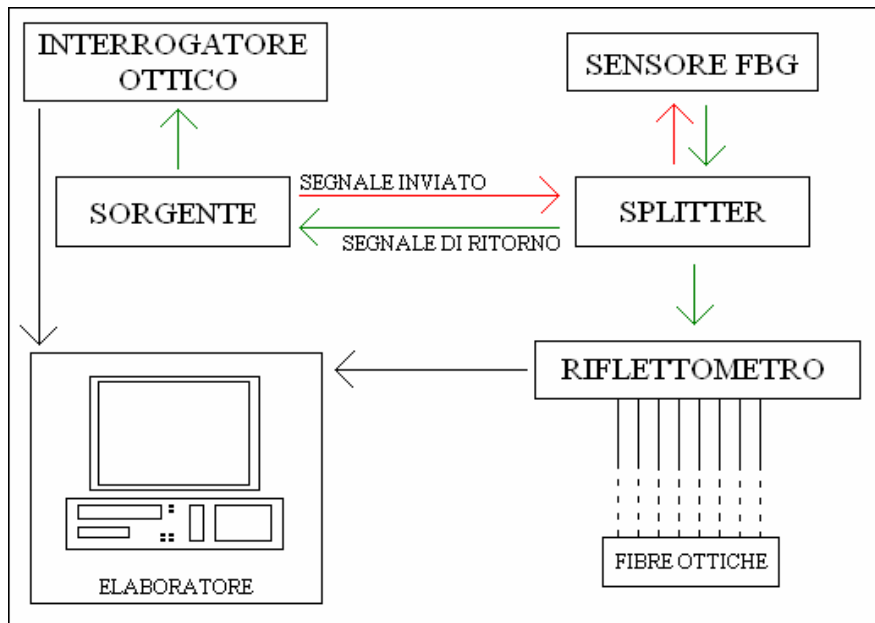


Figura 4.2 Schema di funzionamento del sistema di acquisizione combinato fibre ottiche - FBG

Si può descrivere il funzionamento nel modo seguente:

- la sorgente emette il segnale ottico (indicato con una freccia rossa)
- il sensore FBG riceve il segnale e in base al suo stato di deformazione riflette un segnale ad una determinata lunghezza d'onda (indicato da una freccia verde)
- il segnale di ritorno dall'FBG viene diviso in due dallo splitter: una parte torna verso la sorgente per poi essere trasmessa all'interrogatore e l'altra parte va al riflettometro
- il riflettometro invia il segnale alle fibre ottiche con le modalità specificate
- i segnali in uscita dall'interrogatore e dal riflettometro vengono inviati all'elaboratore che li acquisisce

Le possibilità di collegamento sono molteplici, ma questo schema è l'unico che permette di avere un segnale di potenza sufficiente per essere interrogato al ritorno dall'FBG e per alimentare il riflettometro. Nella figura 4.3 si vede la

combinazione sorgente - interrogatore – riflettometro, mentre in figura 4.4 si vede il sistema di acquisizione completo.

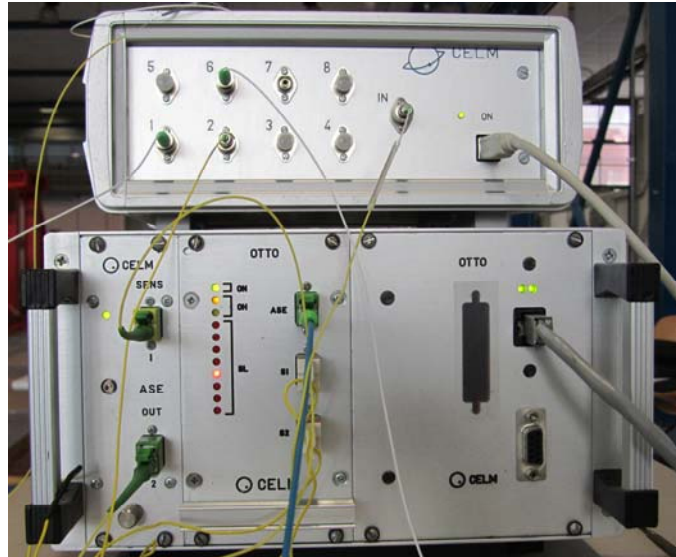


Figura 4.3 Combinazione di sorgente, riflettometro e interrogatore

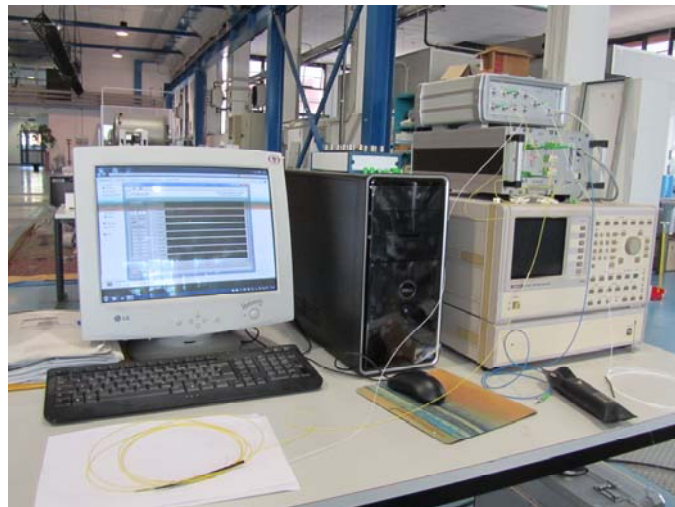


Figura 4.4 Immagine del sistema di acquisizione completo

4.1.2 Campionamento

Il segnale proveniente dai punti di misura viene campionato alla frequenza stabilita: per quanto riguarda le fibre ottiche la durata dell'acquisizione corrisponde a quella dell'infusione e l'intervallo di campionamento deve garantire l'individuazione del segnale di arrivo della resina con sufficiente

accuratezza. Nelle varie prove effettuate la frequenza di campionamento è stata di 200 Hz per le fibre ottiche.

L'acquisizione del segnale FBG si divide invece in più fasi, ciascuna delle quali con un proprio tempo caratteristico:

- chiusura dello stampo: interessano il valore iniziale e finale della lunghezza d'onda riflessa, quindi la frequenza di campionamento potrà essere anche molto bassa, tenendo conto del fatto che l'operazione dura all'incirca 10 minuti
- infusione: come nel caso delle fibre ottiche bisogna riconoscere il momento dell'arrivo della resina nel punto in cui è posizionato il sensore, quindi anche per questa fase dell'acquisizione la frequenza di campionamento è di 200 Hz
- reticolazione: come si vedrà dai risultati questa fase della produzione è caratterizzata dal susseguirsi di picchi di massimo-minimo relativo della lunghezza d'onda riflessa: dovendo descrivere adeguatamente l'andamento della curva t [s] - λ_B [nm] si mantiene una frequenza di campionamento di 200 Hz
- raffreddamento: in questa fase la pendenza della curva tempo - lunghezza d'onda è molto bassa, per cui basterà raccogliere dati a distanza anche ragguardevole per ottenere una risoluzione sufficiente. Si campiona a 0.03 Hz

Le dimensioni dei *files* contenenti le informazioni raccolte potrebbero in questo modo raggiungere dimensioni notevoli anche laddove a fronte dell'andamento dei dati non ci sarebbe la necessità di memorizzarli tutti. Per questo motivo fra i dati in ingresso al programma di campionamento vengono stabiliti una soglia ed una dimensione per gli *stack files*. In questo modo i dati verranno organizzati in gruppi e verrà tenuta in memoria solo la media del campione dalle dimensioni stabilite a meno che i valori estremi al suo interno presentino una differenza superiore al *threshold value*. In questo caso è previsto il salvataggio di tutti i dati del campione in un *file* separato.

Il risultato del campionamento saranno dunque più files, uno contenente le medie dei segnali, ed eventualmente altri che conservino le tracce dei segnali di uno stesso *stack file*. Il diagramma di flusso della figura 4.5 illustra sinteticamente i passaggi di memorizzazione dei file sopra descritti.

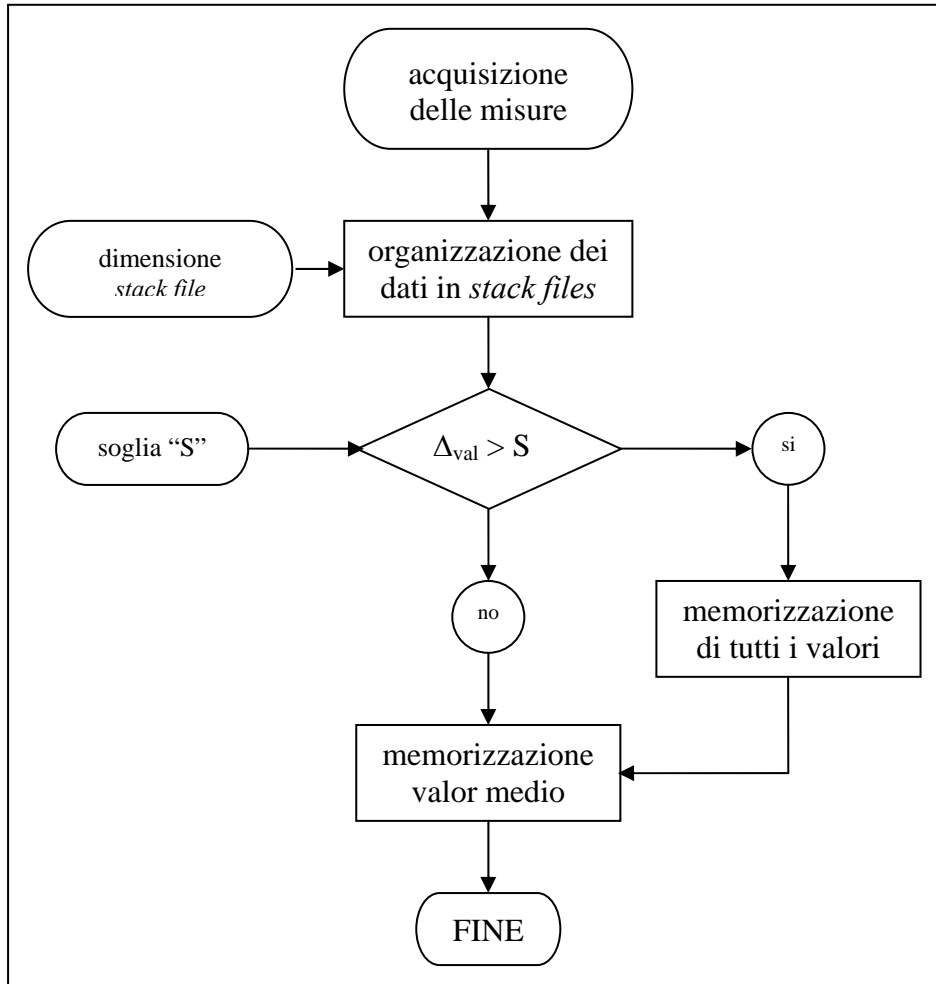


Figura 4.5 Diagramma di flusso che rappresenta il procedimento di memorizzazione dei dati acquisiti

4.2 Infusioni

Di seguito vengono passate in rassegna le cinque infusioni effettuate nel corso dell'attività di tesi riportando per ciascuna di esse i dati relativi ai materiali utilizzati, le caratteristiche del pezzo finito e, per le infusioni che li prevedono, i dati acquisiti riassunti in opportuni grafici.

Come prima cosa si riporta un elenco dei materiali utilizzati e delle loro principali caratteristiche:

Resina HEXCEL RTM6	
Densità iniziale	1100 Kg/m ³
Densità dopo la reticolazione	1140 Kg/m ³
Temperatura di reticolazione	180°C
Tempo di cura a 180°C	120 min

Tabella 4.1 Dati relativi alla resina RTM6

Fibre di vetro				
Tessuto	Fibra		Costruzione – fili/cm	
	Trama	Ordito	Trama	Ordito
EE300	Vetro E – 680 dtex	Vetro E – 680 dtex	21.4 ± 0.3	22.2 ± 0.3
EE390	Vetro E – 2720 dtex	Vetro E – 680 dtex	6.7 ± 0.3	6.0 ± 0.3
Densità	2700 kg/m ³			

Tabella 4.2 Dati relativi ai tessuti di fibre di vetro utilizzati

Fibre di carbonio				
Tessuto	Fibra		Costruzione – fili/cm	
	Trama	Ordito	Trama	Ordito
CC420	HS12K	HS12K	2.6 ± 0.1	2.5 ± 0.1
CC600	HS12K	HS12K	3.8 ± 0.1	3.8 ± 0.1
Densità	1760 kg/m ³			

Tabella 4.3 Dati relativi ai tessuti di fibre di carbonio utilizzati

Per completezza si riportano nell'appendice A i datasheet dei materiali utilizzati, con i dati non elencati nelle tabelle precedenti.

4.2.1 Prima infusione

La prima infusione è stata realizzata il 30/04/2010 ed aveva l'obiettivo di verificare il funzionamento dell'attrezzatura ed acquisire dimestichezza con la tecnologia di produzione scelta. Per questi motivi si è scelto di usare la fibra di vetro, un materiale meno costoso del carbonio utilizzato successivamente. Una delle specifiche principali di un laminato in composito è la frazione di volume delle fibre. I materiali compositi che ambiscono a caratteristiche meccaniche elevate devono necessariamente contenere una elevata quantità di fibre, l'elemento resistente del manufatto. Tuttavia lo spessore dei tessuti utilizzati non ha permesso di inserire una quantità di lamine tale da superare la frazione di

volume di 0.32. Sono state utilizzate 18 lamine di tessuto, suddivise fra EE300 ed EE390 (in cui i numeri dopo le lettere identificative stanno ad indicare la grammatura, in gm^{-2}) rispettivamente in 10 ed 8 lamine, tutte con orientazione [0/90] delle fibre. Nella figura 4.6 si riporta la sequenza di laminazione ed in tabella 4.4 le caratteristiche dimensionali del pezzo estratto.

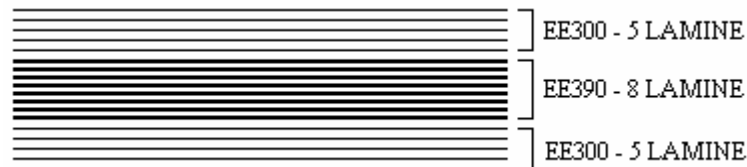


Figura 4.6 Sequenza di laminazione per la prima infusione

Spessore [mm]	7
Lunghezza [mm]	317
Larghezza [mm]	150
Superficie [mm^2]	$4.67 \cdot 10^{-2}$
Volume [mm^3]	$3.33 \cdot 10^{-4}$

Tabella 4.4 Caratteristiche dimensionali del primo laminato prodotto

Attraverso il valore della superficie della lamina si determina il peso della fibra di vetro contenuta e una volta pesata la lamina ed ottenuta la sua densità si può valutare il contenuto di vuoti.

Peso complessivo [kg]	0.527
Peso dei tessuti [kg]	0.291
Frazione di volume delle fibre	0.32
Peso binder [kg]	0.041
Frazione di volume del binder	0.12
Peso resina [kg]	0.195
Frazione di volume della resina	0.5
Frazione di volume dei vuoti	0.06

Tabella 4.5 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la I infusione

L'elenco delle quantità menzionate è contenuto in tabella 4.5 dove compare anche il binder usato solamente in questa infusione, per facilitare l'operazione di taglio e deposizione dei tessuti all'interno dello stampo.

L'operazione di bagnatura delle fibre con il binder avviene per mezzo di uno spruzzatore ad aria compressa: l'erogazione risulta oltremodo abbondante e non omogenea, l'asciugatura è durata tutta la notte. Dopo l'estrazione del pezzo si

sono riscontrate ampie zone di tessuto non impregnante, anche a causa dell'eccessiva presenza di binder, come documentato in figura 4.7. Per tutti questi motivi si è deciso di non utilizzare più in futuro questa sostanza.



Figura 4.7 Particolare delle zone non impregnate del laminato

Il volume della resina in entrata allo stampo è un dato importante: er determinarlo era stato messo a punto nei lavori precedenti [8] un sistema dotato di un potenziometro in grado di misurare l'abbassamento del livello della resina nel serbatoio.

Questo sistema è stato utilizzato durante la prima infusione, ma non ha funzionato correttamente e non si è stati in grado di dire se la resina fosse entrata o meno nello stampo finché non è iniziato l'efflusso dal tubo di uscita. Riaprendo il serbatoio si è visto che il galleggiante era affondato nella resina, di qui la misura di resina iniettata è stata nulla per tutta l'infusione. A fronte dei risultati ottenuti si sono operate le modifiche già descritte nel capitolo 3.

4.2.2 Seconda infusione

Per verificare il funzionamento del nuovo impianto si effettua una seconda infusione dalle caratteristiche molto simili alla prima. L'unica differenza è data dall'uso di un solo tipo di tessuto, in particolare EE390 che ha la grammatura maggiore fra quelli disponibili, che permette di raggiungere una frazione di volume di fibra superiore mantenendo costante il numero di lamine della preforma (18): così si raggiunge con 361 g di fibre di vetro il valore di 0.37 Seguendo lo stesso procedimento descritto per la prima infusione si determinano le frazioni di volume del pezzo estratto e si riporta il tutto in tabella 4.6.

Peso complessivo [kg]	0.621
Peso dei tessuti [kg]	0.361
Frazione di volume delle fibre	0.39
Peso resina [kg]	0.260
Frazione di volume della resina	0.57
Frazione di volume dei vuoti	0.04

Tabella 4.6 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la II infusione

Il prodotto ottenuto è caratterizzato da una minor presenza di vuoti rispetto a quanto misurato per l'infusione 1, dato confermato anche visivamente dall'assenza di vuoti superficiali delle dimensioni visibili in figura 4.7.

La fase di preparazione dell'infusione che comprende taglio e deposizione delle lamine della preforma è stata più breve rispetto alla prima infusione, dato che è stato eliminato l'uso del binder. L'operazione di taglio dei tessuti è stata più difficoltosa, portando ad avere delle lamine che si sfaldavano facilmente perdendo i fasci di estremità. Tutto questo è sicuramente causa di imperfezioni del laminato soprattutto nelle zone di estremità, ma la migliore impregnazione che deriva dall'assenza di binder rende comunque vantaggiosa la procedura seguita.

Come anticipato in precedenza a partire da questa seconda infusione si è utilizzato il nuovo serbatoio della resina, trasparente e che permette di visualizzare e misurare grossolanamente le variazioni di livello del fluido. La misura della resina in ingresso non deve essere nota a meno di piccole incertezze, infatti è sufficiente un'informazione qualitativa che confermi o meno il continuo afflusso della resina verso lo stampo. Nelle infusioni successive invece si punterà ad ottenere misure più precise da questo sistema di misura, per poter completare il quadro di informazioni necessarie a caratterizzare in maniera completa il processo di produzione.

4.2.3 Terza infusione

Verificata la funzionalità dell'impianto in seguito alle modifiche apportate e la buona qualità dell'ultimo prodotto si procede con una terza infusione iniziando a usare tessuti in fibra di carbonio. La preforma è costituita da 12 lamine, equamente ripartite fra CC420 e CC600 e disposte come mostrato in figura 4.8.



Figura 4.8 Sequenza di laminazione per la terza infusione

Questa preforma pesa 305,8 g di cui 127,6 g sono di tessuto CC420 e i restanti 178,2 g di CC600. Le frazioni di volume sono 0,206 per il tessuto CC420 e 0,295 per il CC600. Grazie al nuovo sistema di stivaggio della resina è stato possibile stilare un andamento della massa infusa in funzione del tempo.

Tempo [s]	Resina infusa [cc]
0	0
50	75
84	125
140	175
825	250
1200	325

Tabella 4.7 Misura del volume di resina iniettata

Il volume di resina infusa in funzione del tempo dovrebbe seguire un andamento logaritmico: poiché la pressione a monte dello stampo è stata alzata da -0.45 atm a -0.2 atm durante l'infusione è possibile individuare due curve di diverso andamento, ciascuna relativa al corrispondente valore di pressione. Il risultato è visibile in figura 4.9.

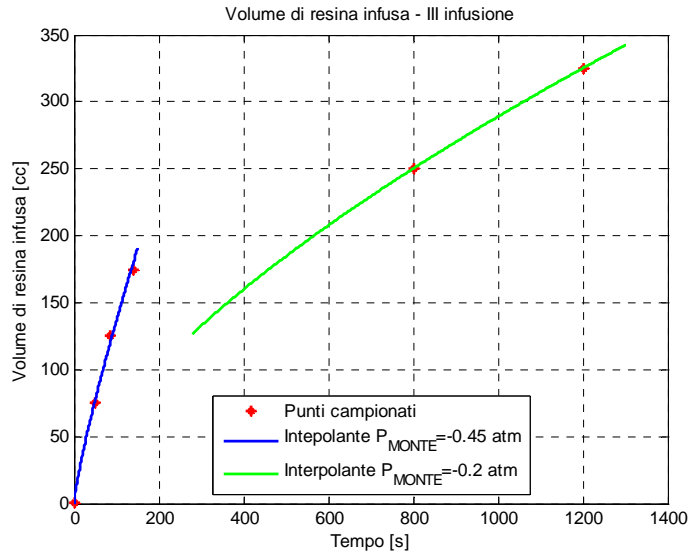


Figura 4.9 Volume di resina iniettata nello stampo nella III infusione

Il risultato di questa infusione è stata una lamina con un minore contenuto di vuoti rispetto ai prodotti antecedenti. Da questa terza infusione si sono poi ricavati dei provini per testare un sistema di osservazione delle sezioni del

laminato al microscopio, che come si vedrà più avanti è stato poi ampiamente utilizzato. L'osservazione al microscopio ha confermato il basso contenuto di vuoti visibile già ad occhio nudo e confermato anche dalle misure effettuate al fine di ottenere una frazione di volume di vuoti come nelle precedenti occasioni.

4.2.4 Quarta infusione

Con questa prova tecnologica ha inizio la sperimentazione con le fibre ottiche. Il loro principio di funzionamento è stato spiegato nel capitolo 2: in questa occasione vengono impiegate per rivelare l'arrivo della resina in un punto predeterminato. L'infusione prevedeva inizialmente l'uso di cinque fibre ottiche e di una fibra ottica con sensore di Bragg: come si vedrà dai risultati sono state solo tre le fibre ottiche che hanno mantenuto le iniziali caratteristiche di funzionalità e il sensore FBG si è rotto durante le operazioni di inserimento nella preforma. La conseguenza è stata una brusca variazione della lunghezza d'onda del segnale riflesso già in condizione di riposo e una sostanziale inaffidabilità delle misure effettuate attraverso questo sensore.

La prova è comunque servita per familiarizzare con il delicato passaggio di inserimento della strumentazione ottica all'interno della preforma, ottenendo come si vedrà poco più avanti risultati soddisfacenti per quanto concerne la ricostruzione del fronte di flusso della resina.

La preforma è costituita come per la prova precedente da 12 lamine di tessuto di fibra di carbonio, con orientazione $0/90^\circ$ disposte ancora come indicato in figura 4.8. In tabella 4.7 invece vengono elencate le caratteristiche di massa e le frazioni di volume stimate per il pezzo finito ottenuto da questa infusione.

Peso complessivo [kg]		0.508
Peso dei tessuti	CC420 [kg]	0.18
	CC600 [kg]	0.124
	Totale [kg]	0.304
Frazione di volume delle fibre		0.5
Peso resina [kg]		0.204
Frazione di volume della resina		0.5

Tabella 4.8 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la IV infusione

Come per le prove precedenti grazie al sistema di misurazione della massa infusa è possibile stabilire l'andamento del flusso di resina in ingresso allo stampo, riportato in tabella 4.9.

Tempo [s]	Resina infusa [cc]
0	0
120	150
180	210
360	300
720	400
960	500

Tabella 4.9 Misura del volume di resina iniettata

Anche per questa infusione si può rappresentare in un grafico l'andamento della massa di resina infusa in funzione del tempo con le relative curve interpolanti, ognuna valida per il rispettivo valore del gradiente di pressione imposto. La pressione a monte dello stampo infatti è stata aumentata dal valore iniziale di -0.45 atm al valore di -0.35 atm quando si era riscontrato un rallentamento del flusso in ingresso allo stampo. Quanto appena descritto è visibile nella figura 4.10.

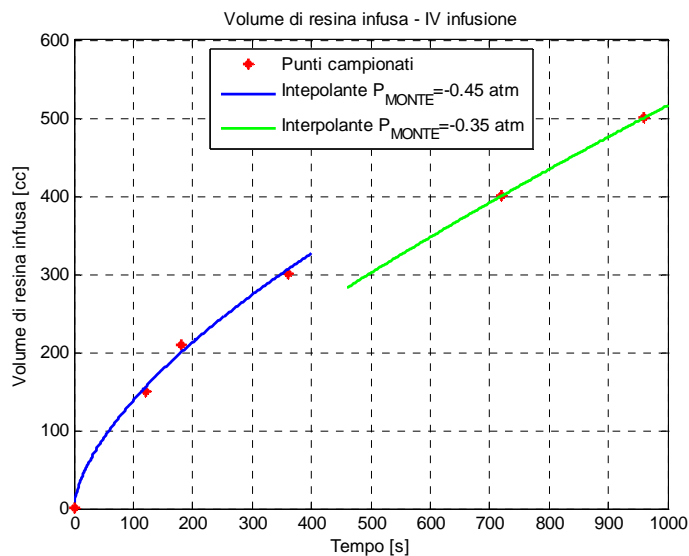


Figura 4.10 Volume di resina iniettata nello stampo durante la IV infusione

Per decidere il posizionamento delle fibre ottiche è necessaria una previsione sull'avanzamento del fronte del flusso di resina basata sulla già citata legge di Darcy. Poiché l'obiettivo è quello di ottenere due misure successive equispaziate in termini di intervallo temporale è necessario che la parte terminale di ciascuna fibra sia disposta all'interno dello stampo ad un'ordinata calcolata attraverso una legge parabolica. Sulla base dei parametri dell'infusione (viscosità μ , frazione di volume di fibra ϕ , permeabilità longitudinale del tessuto K_x , gradiente di

pressione ΔP ed infine lunghezza della preforma da impregnare x_{END}) si stima dunque il tempo necessario al completo riempimento dello stampo attraverso l'equazione (4.1):

$$t_R = \frac{\mu\varphi}{2K_x \cdot \Delta P} \cdot x_{END}^2 \quad (4.1)$$

Per ottenere l'intervallo temporale che intercorre fra due segnali successivi di raggiungimento delle fibre ottiche il valore calcolato attraverso l'equazione (4.1) deve essere di volta in volta diviso (4.2) per il numero di stazioni in cui si vuole suddividere la preforma, corrispondente al numero di fibre ottiche in grado di misurare l'arrivo della resina più uno. Avremo infatti a disposizione anche il dato relativo all'inizio dell'infusione ovvero l'origine degli ipotetici assi cartesiani su cui verranno posizionate le informazioni relative alle misure effettuate.

$$\Delta t = \frac{t_R}{n_{FO}} \quad (4.2)$$

L'ultima operazione necessaria a stabilire la distanza dall'ingresso della resina x_i a cui va posta l'estremità della i -esima fibra ottica è descritta dall'equazione (4.3).

$$x_i = \sqrt{\frac{2K_x \cdot \Delta P}{\mu\varphi} \cdot \left(\frac{\Delta t}{2} + (i-1) \cdot \Delta t \right)} \quad (4.3)$$

I simboli utilizzati nell'eq. (4.3) si riferiscono alle stesse quantità descritte dettagliatamente per l'eq. (4.1). In questa quarta infusione le fibre utilizzabili durante la prova sperimentale si sono ridotte a tre a causa di eventi quali la perdita di segnale e la rottura dei connettori. Nella tabella 4.10 si indicano la posizione all'interno della preforma determinata nel modo appena spiegato e l'istante in cui vengono raggiunte dalla resina.

Fibra	Distanza dall'ingresso [mm]	Tempo di arrivo della resina [s]
1	116,7	72,50
2	202,1	118,50
3	260,9	181,6

Tabella 4.10 Posizione delle fibre ottiche e tempo di arrivo della resina

Il dato relativo all'istante di arrivo della resina alla punta della fibra è stato ricavato dalla registrazione del sistema di acquisizione: come spiegato nel

capitolo 2 si interpreta come momento di arrivo quello in cui il valore del segnale riflesso decresce repentinamente.

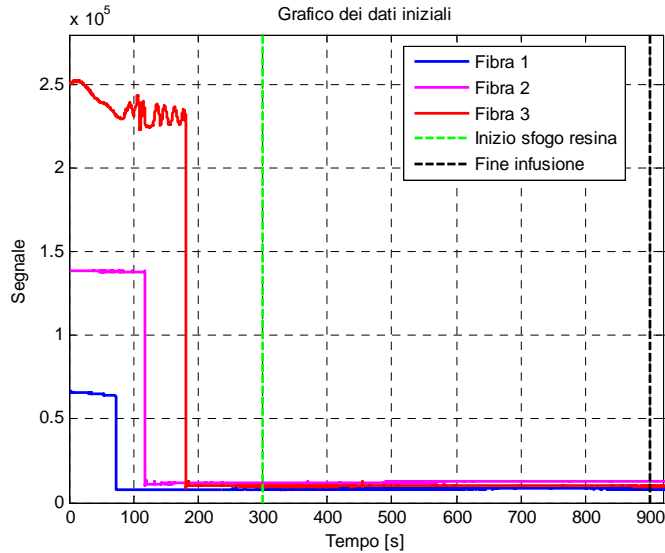


Figura 4.11 Valore del segnale riflesso dalle fibre ottiche in funzione del tempo

Nella figura 4.11 si vede la rappresentazione del segnale delle fibre ottiche in funzione del tempo. Come si nota l'ampiezza del segnale iniziale e finale è diversa per ciascuna fibra ottica: questo è dovuto a differenze anche minime nelle caratteristiche della testa della fibra connesse all'operazione di taglio. Per omogeneizzare i dati si sono dunque usati dei coefficienti moltiplicativi dati dal rapporto fra l'ampiezza massima di tutti i segnali e quella del segnale di volta in volta riflesso (4.4):

$$G_i = \frac{\text{valore massimo su tutti i canali}}{\text{valore massimo del canale } i\text{-esimo}} \quad (4.4)$$

Inoltre si è attribuito a tutti i segnali campionati dopo l'arrivo della resina lo stesso valore, ottenendo quanto si vede in figura 4.12, ovvero valori uguali corrispondenti a ciascun segnale prima e dopo il raggiungimento delle fibre ottiche da parte della resina.

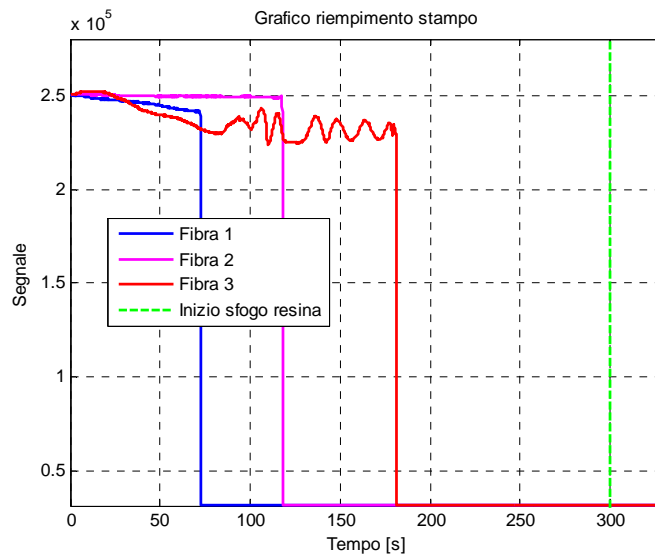


Figura 4.12 Andamento dell'ampiezza del segnale riflesso dopo l'elaborazione dei dati

4.2.5 Quinta infusione

Messa a punto una procedura di inserimento dei sensori per il monitoraggio dell'infusione si è proseguiti con un'ulteriore infusione, la quinta, che sarebbe stata l'ultima in caso di esito positivo. Per questa infusione si sono mantenute sostanzialmente invariate le caratteristiche principali rispetto alla quarta: la preforma è quindi costituita da 12 lamine di tessuto in fibra di carbonio, con disposizione 0/90°, con la stessa grammatura e sequenza di laminazione visibile più sopra in figura 4.8. In tabella 4.11 vengono riportati i dati relativi alle caratteristiche di massa e alle stime delle frazioni di volume dei vari componenti del prodotto finito.

Peso complessivo [kg]		0.513
Peso dei tessuti	CC420 [kg]	0.123
	CC600 [kg]	0.178
	Totale [kg]	0.301
Frazione di volume delle fibre		0.49
Peso resina [kg]		0.212
Frazione di volume della resina		0.51

Tabella 4.11 Caratteristiche di massa e frazioni di volume del pezzo finito per la V infusione

Come si può notare le differenze rispetto ai valori relativi alla quarta infusione sono minime. Anche per questo ultimo pezzo prodotto si è registrato il volume

di resina iniettata in vari istanti del processo produttivo, e si trovano riassunti in tabella 4.12.

Tempo [s]	Resina infusa [cc]
0	0
120	100
180	150
480	250
720	350

Tabella 4.12 Misura del volume di resina iniettata

Per quanto riguarda il posizionamento dei sensori in fibra ottica valgono le stesse ipotesi fatte per la precedente infusione: per questo motivo si riporta in tabella 4.13 soltanto l'ordinata alla quale viene inglobata la punta di ciascuna fibra ottica, oltre al numero incrementale identificativo del sensore e al momento in cui il sensore viene bagnato dalla resina. A questo ultimo dato si può risalire a partire dall'interpretazione dei dati registrati dal sistema di acquisizione, visibili in figura 4.13.

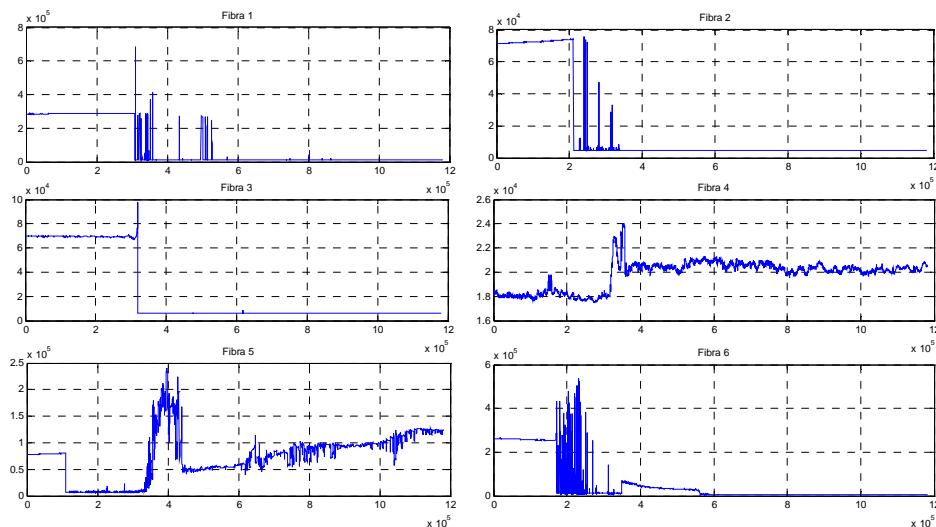


Figura 4.13 Andamento dei singoli segnali registrati dalle fibre ottiche nella V infusione

Come si vede non tutte le registrazioni hanno l'andamento ideale che sarebbe preferibile: è comunque possibile per ognuna individuare l'istante in cui il segnale varia bruscamente dal valore iniziale, cui si associa l'arrivo della resina. Successivamente a questa variazione il segnale è in alcuni casi molto "sporco": questo fatto è dovuto molto probabilmente alle impurità (trasportate verso l'uscita dal flusso di resina) che vanno man mano esaurendosi influenzando

sempre meno la stabilità del segnale. Questo ultimo fenomeno è visibile sui singoli grafici man mano che si avanza sugli assi dei tempi.

Fibra	Distanza dall'ingresso [mm]	Tempo di arrivo della resina [s]
1	95.3	110.1
2	165.0	169.1
3	213.0	211.2
4	252.0	310.3
5	285.8	318.4
6	316.0	329.2

Tabella 4.13 Posizione delle fibre ottiche e tempo di arrivo della resina nella V infusione

Passati in rassegna i dati registrati dai sensori costituiti dalle punte delle fibre ottiche ci si può concentrare su quanto è stato misurato dal sensore FBG. La registrazione delle misure da esso provenienti si è protratta per tutte le fasi della produzione, dalla chiusura dello stampo al raffreddamento del pezzo passando per le fasi tipicamente oggetto del monitoraggio come l'infusione vera e propria e la reticolazione della resina. A tal proposito si sono raccolti tutti i valori registrati e si sono riportati in figura 4.14.

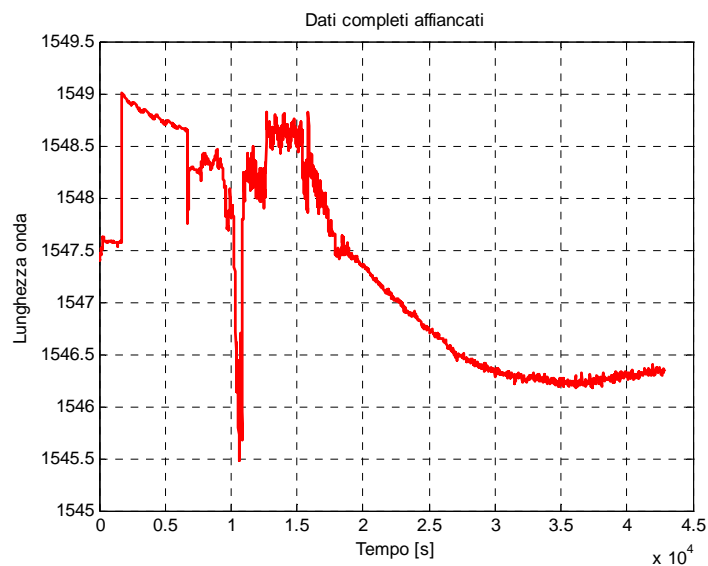


Figura 4.14 RegISTRAZIONI del sensore FBG durante tutto il quinto processo produttivo

Nel capitolo successivo si passerà ad un'analisi più approfondita del significato dell'andamento della registrazione. E' importante fin da subito evidenziare il fatto che l'acquisizione si è protratta per svariate ore con tutti i problemi che ne possono derivare: alcune fluttuazioni delle misure potrebbero essere interpretate

come momenti significativi della fase di produzione anche se invece potrebbero essere causate da instabilità di natura elettrica o qualsiasi altro tipo di rumore. Per poter interpretare correttamente i dati allora si è affiancata la registrazione del sensore allo storico della fase di produzione, ottenendo in questo modo una lettura più efficace.

Le considerazioni sulla qualità del pezzo prodotto possono essere fatte subito dopo la sua estrazione dallo stampo: esso è ben riuscito in termini di impregnazione dei tessuti costituenti la preforma. Risulta ancora una volta evidente la presenza di imperfezioni a livello superficiale dovute al peggioramento della finitura superficiale dello stampo. Per ovviare a questo inconveniente sarebbe sufficiente una rettifica prima di eventuali infusioni successive. Un'immagine del pannello prodotto è riportata in figura 4.15.



Figura 4.15 Pannello prodotto nella V infusione

4.3 Prove per stabilire la posizione del sensore

Il sensore FBG e le fibre ottiche sono stati posizionati come descritto nel paragrafo 4.2.5, ma non si può essere certi che queste componenti si trovino nella posizione stabilita anche dopo l'infusione e la fase di reticolazione della resina. Si è dunque messo a punto un sistema di prove atte a determinare in maniera esatta le traiettorie delle fibre ottiche e la posizione del sensore FBG.

4.3.1 Indagine al microscopio ottico

La fibra ottica con il reticolo di Bragg è stata disposta in maniera da uscire di circa 2 cm dalla preforma e terminare quindi nella parte del pezzo estratto che sarà composta di sola resina reticolata. Una volta eliminata questa frazione di

scarto la fibra arriverà fino alla fine della lamina. Sulla base di queste considerazioni e accorgimenti si è quindi tagliato un provino in direzione perpendicolare a quella delle fibre ottiche, della lunghezza di 0.5 cm, che è mostrato in figura 4.16.



Figura 4.16 Provino tagliato per individuare il punto di uscita del sensore FBG

La superficie del provino così ottenuto è stata poi lucidata tramite una lappatrice, in modo da ottenere una superficie sufficientemente liscia da permettere di vedere la fibra ottica, altrimenti difficilmente distinguibile. Osservando al microscopio si riesce ad individuare il punto di uscita della fibra ottica, come mostrato in figura 4.17.

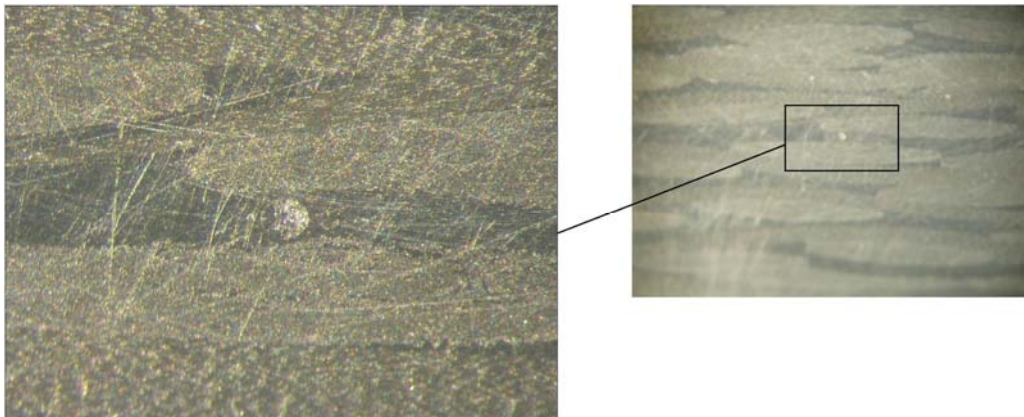


Figura 4.17 Immagine dell'estremità della fibra ottica con sensore FBG uscente dal provino

Nell'immagine si vede a destra una parte più estesa del provino (spessore circa 4 mm) e a sinistra un ingrandimento della zona di inglobamento della fibra ottica. Le parti di colore più chiaro corrispondono ai fasci di fibre di carbonio, disposti longitudinalmente o trasversalmente rispetto alla superficie di taglio, le parti più chiare invece rappresentano la resina che ha permeato la preforma. Come era lecito aspettarsi la fibra ottica è compresa tra due strati di tessuto ed è completamente immersa nella resina.

Utilizzando il "millimetro" si è poi stati in grado di mostrare le dimensioni della fibra ottica una volta inglobata nel provino: il particolare è mostrato in figura 4.18.

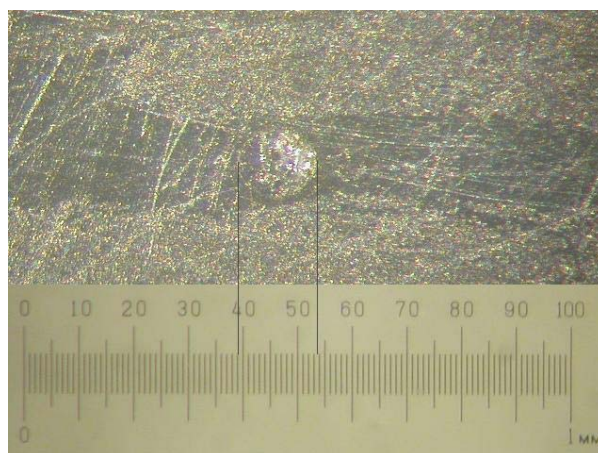


Figura 4.18 Misura del diametro della fibra ottica

In seguito a questa prova si può stabilire con certezza il punto di uscita della fibra ottica e dire con sicurezza che l'inglobamento nella preforma è avvenuto in maniera corretta.

4.3.2 Indagine ai raggi X

Il passo successivo all'indagine al microscopio ottico è stato quello di determinare il percorso delle fibre ottiche all'interno della lamina: al momento della chiusura dello stampo erano note le lunghezze dei tratti di fibra inglobati nella preforma, ma non si poteva stabilire se le loro traiettorie si fossero mantenute rettilinee. Per visualizzare il percorso delle fibre ottiche si sono fatte delle radiografie alla lamina, utilizzando l'emettitore del Laboratorio Radiografie del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale. Dopo numerose prove si sono stabiliti i parametri ottimali al fine di ottenere delle immagini nitide, riassunti nella tabella 4.14.

Voltaggio della sorgente [kV]	35
Intensità di corrente [mA]	5
Tempo di esposizione [s]	40

Tabella 4.14 Parametri ottimali per l'indagine radiografica

Per coprire l'intera superficie della lamina è stato necessario utilizzare più di una lastra, in quanto le dimensioni del negativo erano minori rispetto a quelle del provino. In figura 4.19 si vede la disposizione delle lastre della parte sinistra della lamina, speculare rispetto a quella utilizzata per l'indagine della parte destra.



Figura 4.19 Disposizione delle lastre per l'indagine radiografica

In questo modo si sono ottenute le radiografie delle varie parti della lamina: sono mostrate nelle figure 4.20, 4.21 e 4.22 rispettivamente la parte sinistra della lamina, la parte destra e la parte di ingresso delle fibre ottiche.



Figura 4.20 Radiografia della semilamina sinistra



Figura 4.21 Radiografia della semilamina destra

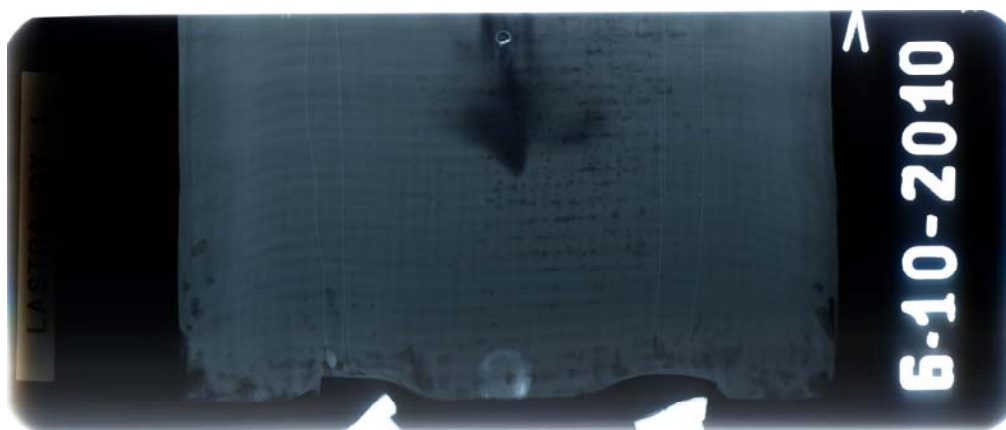


Figura 4.22 Radiografia della zona di ingresso delle fibre ottiche

Da queste immagini è possibile determinare il percorso delle fibre ottiche in maniera esatta. Nell'immagine 4.23 si sono rielaborate le tre immagini precedenti unendole per ottenere una radiografia del provino completo e colorando il tracciato delle fibre ottiche per renderle più evidenti.

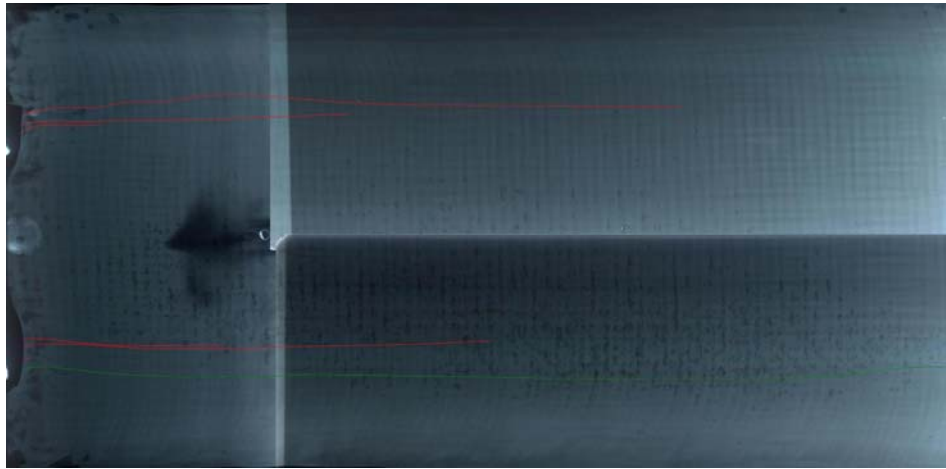


Figura 4.23 Unione delle radiografie e messa in evidenza del percorso delle fibre ottiche

Nelle radiografie della parte destra e sinistra e in modo più marcato nella radiografia della parte di ingresso delle fibre ottiche si osservano delle zone più scure distribuite in maniera non uniforme: sono le ombre lasciate dai difetti superficiali del provino.

Le radiografie permettono anche di osservare la disposizione di trama e ordito dei diversi strati di tessuto in fibra di carbonio: nella parte interna del laminato esse sono disposte in maniera perfettamente perpendicolare, come ci si aspetta. Il risultato non è lo stesso per le zone di bordo dove invece si vedono i risultati dei già citati effetti di bordo, ovvero la curvatura dei tessuti dovuta ad un fronte del flusso della resina non omogeneo.

4.3.3 Indagine attraverso prove termiche

Per ottenere le ultime informazioni necessarie a determinare con esattezza la posizione del sensore all'interno del laminato è necessario procedere ad una prova che permetta di visualizzarne l'ubicazione lungo il tracciato già evidenziato. Oltre a questo infatti è nota la profondità di annegamento della fibra con il reticolo di Bragg, seconda delle tre misure che determinano univocamente dove si trovi la parte di fibra ottica fotoincisa.

Muovendo da quanto è noto in letteratura [7], ovvero una maggiore sensibilità alle variazioni di temperatura rispetto alle piccole deformazioni meccaniche, la prova maggiormente adeguata ad individuare il sensore FBG si basa sulla sua sollecitazione termica. Passando una sorgente calda sulla superficie del pannello e tenendo conto dell'inerzia termica del provino attraverso opportuni cicli di riscaldamento – raffreddamento si osserva una variazione della lunghezza d'onda riflessa misurata dall'interrogatore ottico quando si va a riscaldare la parte in cui è collocato il sensore.

Pertanto si procede come segue:

- una prima previsione basata sui dati dell'infusione fornisce una zona di circa 40 mm in cui deve trovarsi l'oggetto della ricerca. Si suddivide questa zona in quattro segmenti e si scaldano i cinque punti estremi per 10 s con una punta calda (circa 350°C), lasciandoli raffreddare per 20 s. Nel frattempo si registrano i valori medi dei campioni di 20 misure della lunghezza d'onda riflessa campionate alla frequenza di 250 Hz. Nel grafico in figura 4.24 si mostra l'andamento del segnale acquisito: risultano evidenti gli andamenti conseguenti al riscaldamento dei cinque punti.

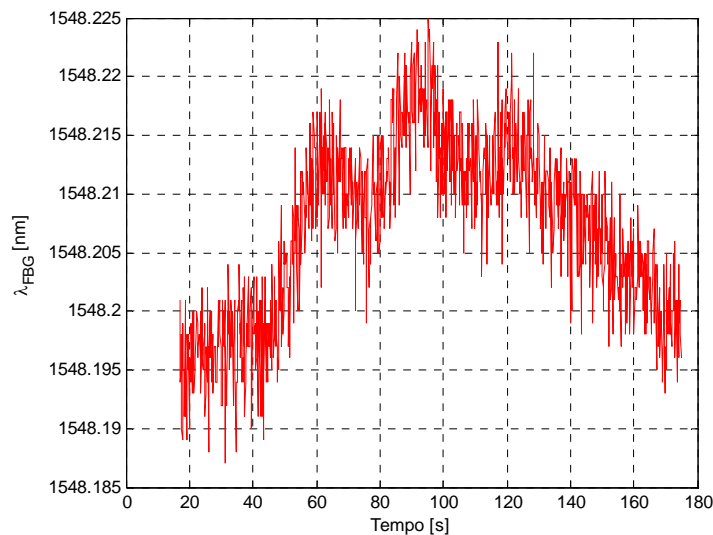


Figura 4.24 Segnale acquisito durante la prima prova termica

- analizzando il risultato della prima osservazione si vede che ci sono dei picchi più elevati, che corrispondono alle zone di maggior vicinanza fra il punto di riscaldamento e l'esatta posizione del sensore. Si va pertanto a sollecitare la zona delimitata dai punti corrispondenti alle tre misure maggiori aumentando la "risoluzione" attraverso il riscaldamento di altri cinque punti posti alla distanza di 3.8 mm l'uno dall'altro. Le modalità di prova sono le stesse descritte nel punto precedente. Il segnale acquisito è mostrato in figura 4.25.

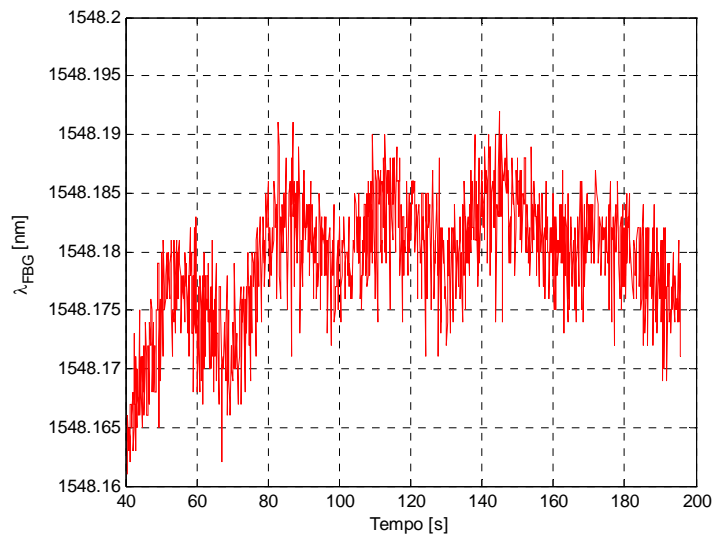


Figura 4.25 Segnale acquisito durante la seconda prova termica

- a questo punto ancora grazie ai tre picchi si è individuata una zona di circa 12 mm in cui è posizionato il sensore. Da ultimo si vanno ad indagare solo i tre punti corrispondenti ai picchi di misura con una modalità di esecuzione che porti ad un risultato più dettagliato. E' previsto il riscaldamento di ciascun punto per 20 s ed il successivo raffreddamento per un minuto. La frequenza di campionamento viene mantenuta a 250 Hz, con la registrazione del valor medio ogni 625 valori, corrispondenti a circa 2.5 s di acquisizione. L'andamento di λ_{FBG} è riportato in figura 4.26.

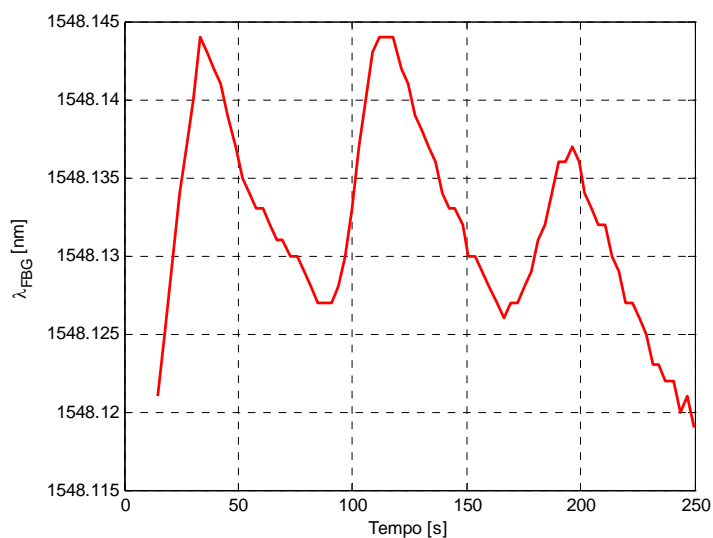


Figura 4.26 Segnale acquisito durante la seconda prova termica

Con questa terza prova termica si conclude con successo l'indagine volta ad individuare la posizione del sensore FBG. Si riportano nella tabella 4.15 i dati riassuntivi sulle modalità di prova e di acquisizione del segnale e nella figura 4.27 una rappresentazione dei punti di prova delle successive misurazioni.

Prova	1	2	3
Freq. di campionamento [Hz]	250	250	250
Dimensione del campione per il calcolo del valor medio	20	20	625
Tempo di riscaldamento [s]	10	10	20
Tempo di raffreddamento [s]	20	20	60
Punti di acquisizione	5	5	3

Tabella 4.15 Dati riassuntivi delle modalità di esecuzione delle prove termiche

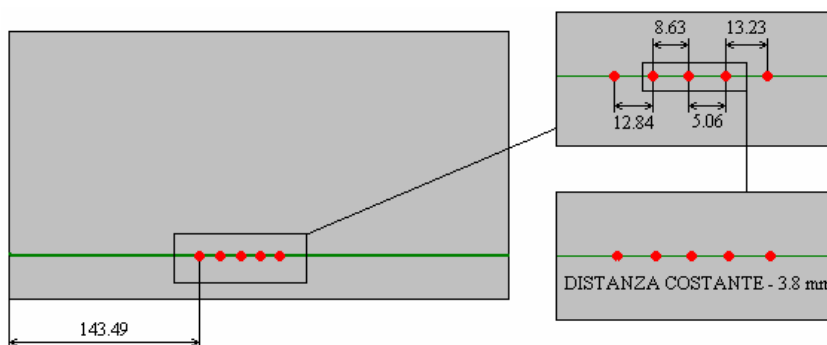


Figura 4.27 Posizione dei punti di prova nelle tre configurazioni approntate

4.4 Prove meccaniche

Terminata con successo l'indagine volta a determinare l'esatta posizione del sensore FBG all'interno del pannello si può procedere alla verifica della funzionalità in termini quantitativi: in precedenza infatti si è dimostrato che il sensore funziona, ma in termini solamente qualitativi.

Per ottenere l'obiettivo preposto ci si avvale di alcune prove meccaniche, eseguite su un provino estratto dalla lamina. Le caratteristiche del provino devono essere adeguate al tipo di prova effettuato di volta in volta: dato che la fibra ottica è stata posta a metà dello spessore (ed il mantenimento di tale posizione è stato verificato nel paragrafo precedente) essa si troverà presumibilmente sull'asse neutro di una prova a flessione nel piano della piastra. Questa sarà la prima prova da cui ragionevolmente dovremmo attenderci una misura nulla della deformazione.

Per svolgere una seconda prova di flessione sul piano uscente dal provino e perpendicolare al precedente con un valore della misura diverso da zero è necessario che il sensore FBG si trovi spostato, anche di poco, rispetto all'asse neutro. Lo spessore dell'elemento di prova sarà in questo caso molto elevato e per ottenere deformazioni sensibili si dovranno applicare carichi abbastanza elevati. La terza ed ultima prova è una semplice sollecitazione a trazione del provino: questa prova ha il compito di stabilire definitivamente una correlazione fra carico e spostamento, con misure "sporcate" in maniera minore dagli errori sulla definizione delle dimensioni.

4.4.1 Definizione delle prove

Se andiamo a vedere l'andamento degli sforzi, e quindi a meno di una costante di proporzionalità anche delle deformazioni, otteniamo dall'eq. (4.4) che essi valgono:

$$\sigma_{flex} = M_f \frac{y}{\frac{1}{12}ab^3} \quad (4.4)$$

Dove con σ si indica lo sforzo, M_f è l'azione interna nel provino, a e b le misure dei lati della sezione considerata. Un'ulteriore scelta da effettuare è il tipo di prova di flessione: si opta per una prova a "quattro punti", in grado di sollecitare il provino con un momento flettente costante in una zona definita dal posizionamento dei punti di applicazione dei carichi. Si elimina così una eventuale imprecisione nella valutazione dell'azione interna dovuta ad incertezze nel determinare la posizione esatta del sensore. Nella figura 4.28 viene mostrato il layout delle due prove di flessione, con le dimensioni del

provino tagliato, la posizione dei punti di applicazione dei carichi e l'andamento del momento flettente.

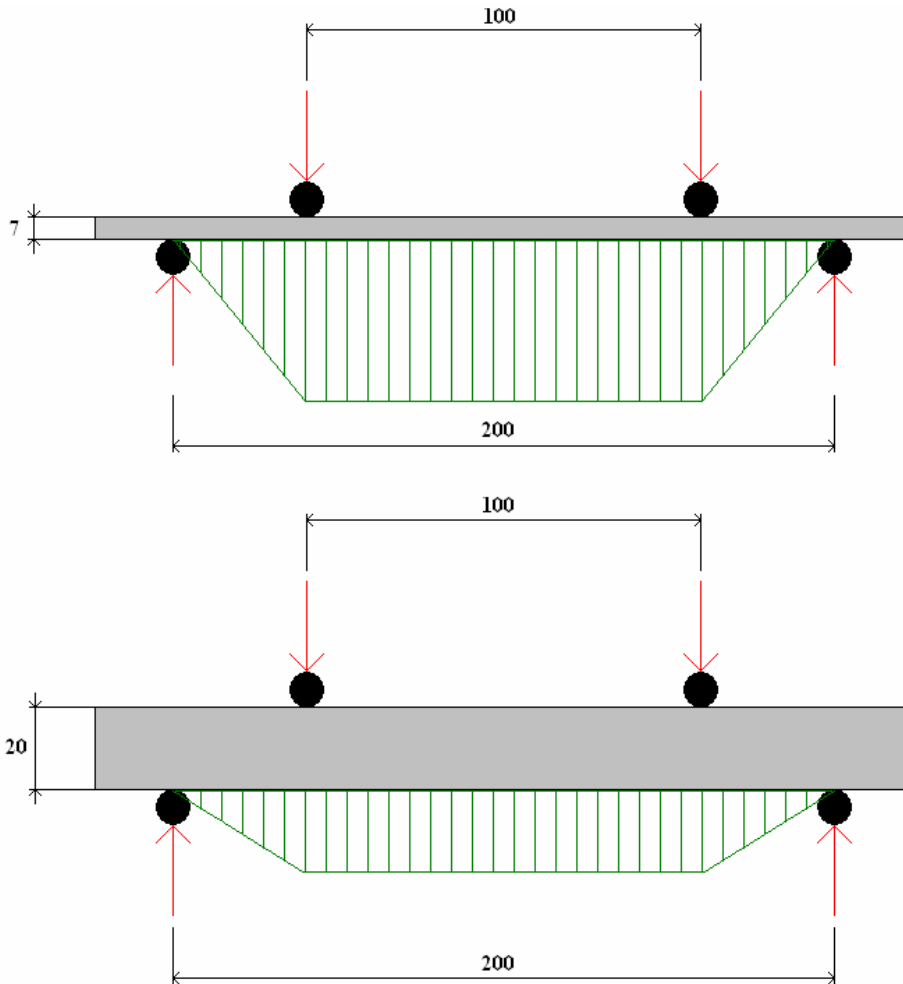


Figura 4.28 Schema delle prove a flessione, del provino spesso 7 mm (sopra) e 20 mm (sotto)

4.4.2 Sistema di misura

Oltre al sensore FBG inglobato nel provino si sono disposti quattro estensimetri sulla superficie dell'elemento da testare: i dati provenienti dai sensori di deformazione saranno quelli utilizzati per un confronto con quanto registrato dal sistema di acquisizione ottico. La posizione degli estensimetri è stata scelta in modo tale da corrispondere con quella del reticolo di Bragg, ottenendo così la misura della deformazione di fibre diverse, ma sollecitate dallo stesso momento flettente. Per misurare la deformazione dovuta alla flessione si utilizzano ogni volta due estensimetri posti sulla superficie, quindi sulle fibre tese e sulle fibre compresse corrispondenti alla sollecitazione di ampiezza massima. Da qui la

necessità di strumentare il provino con quattro sensori di deformazione estensimetrici. Nella figura 4.29 è mostrata la posizione degli stessi su due facce: la disposizione sulle facce rimanenti è uguale, si può pertanto omettere un'ulteriore rappresentazione.

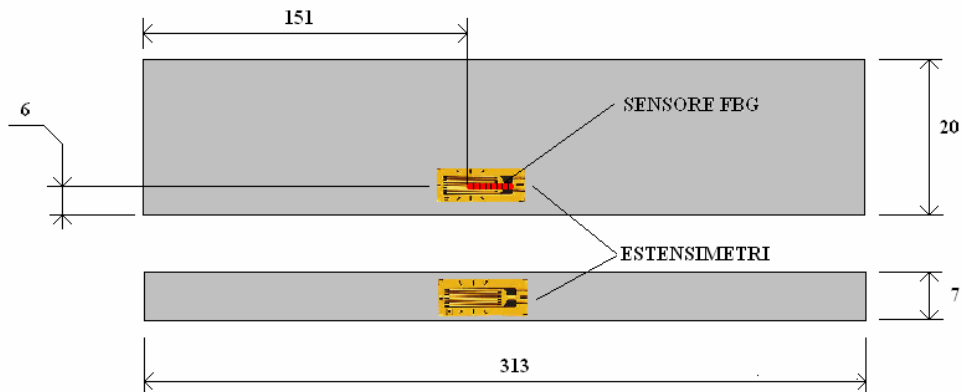


Figura 4.29 Posizione degli estensimetri sul provino

Per completezza i dati relativi agli estensimetri sono riportati nell'appendice A dei datasheets.

4.4.3 Prima prova a flessione

Una volta approntato il sistema di misura e dopo averlo collegato con il sistema di acquisizione si procede con l'esecuzione delle prove meccaniche. La prima come detto consiste nel flettere il provino orientato in modo tale da avere spessore 7 mm. La prova è come di consueto comandata in spostamento: le specifiche delle operazioni sono riportate nella tabella 4.16.

Rateo di carico [mm/M]	0,25
Rateo di scarico [mm/M]	1
Carico massimo [N]	1006,5
Spostamento massimo [mm]	3

Tabella 4.16 Specifiche operative della prima prova di flessione

L'andamento di spostamento e carico in funzione del tempo è riportato in figura 4.31, seguito in figura 4.32 dalla curva forza-spostamento. Si nota dalla figura 4.32 che il percorso è lo stesso per la fase di carico e scarico del provino, mentre come si vedrà più avanti questo non succede per la flessione nel caso di spessore pari a 20 mm. Nella fotografia 4.30 si vede un'immagine scattata durante lo svolgimento della prova.

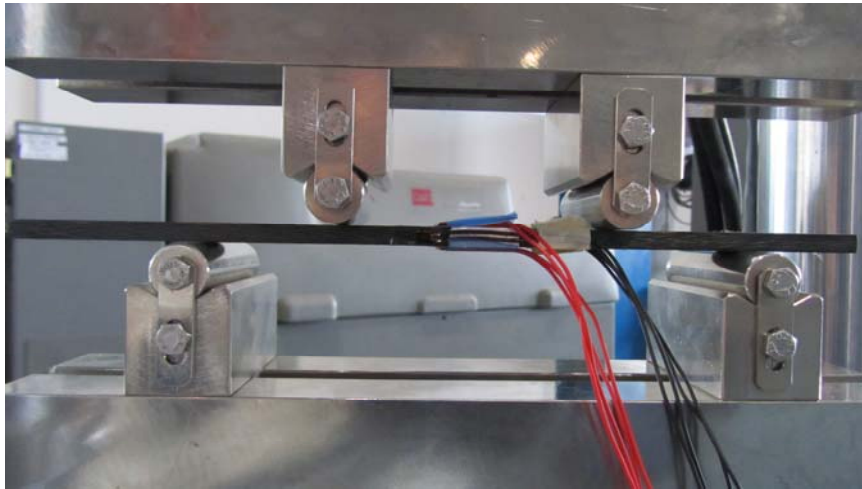


Figura 4.30 Provino estensimetrato sottoposto a prova di flessione a 4 punti

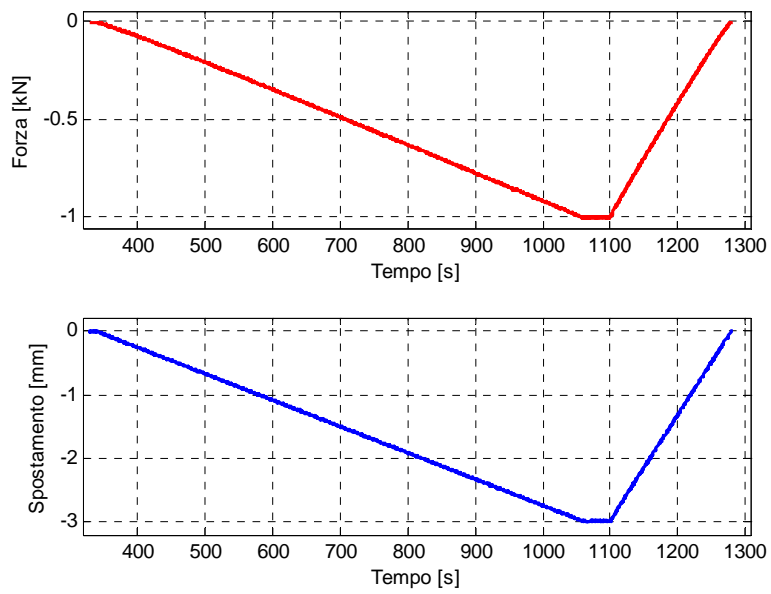


Figura 4.31 Andamento di carico e spostamento in funzione del tempo

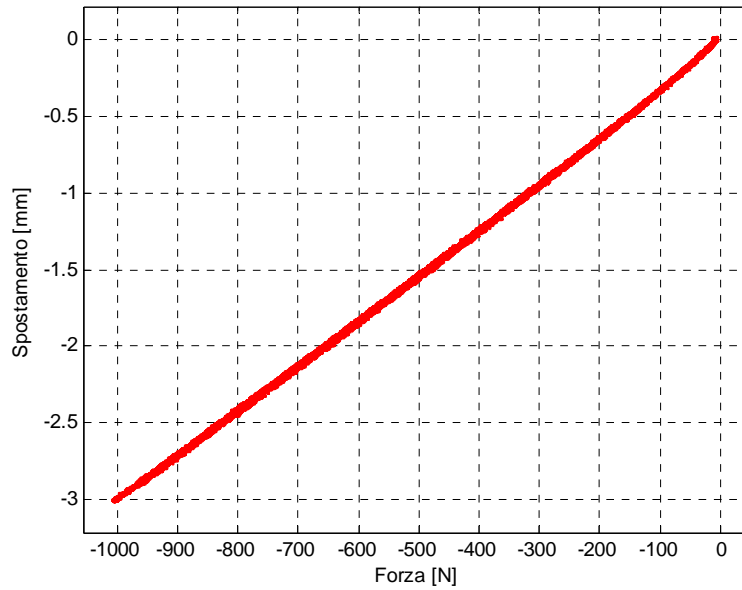


Figura 4.32 Curva forza-spostamento della prima prova di flessione

Andando ad esaminare i dati registrati dal sistema di acquisizione possiamo rappresentare il valore segnato da ciascun estensimetro durante la prova. Il tutto è rappresentato in figura 4.33, in cui per “Laterale 1” e “Laterale 2” si indicano i due estensimetri posti lungo lo spessore del provino la cui misura dovrebbe essere ragionevolmente nulla.

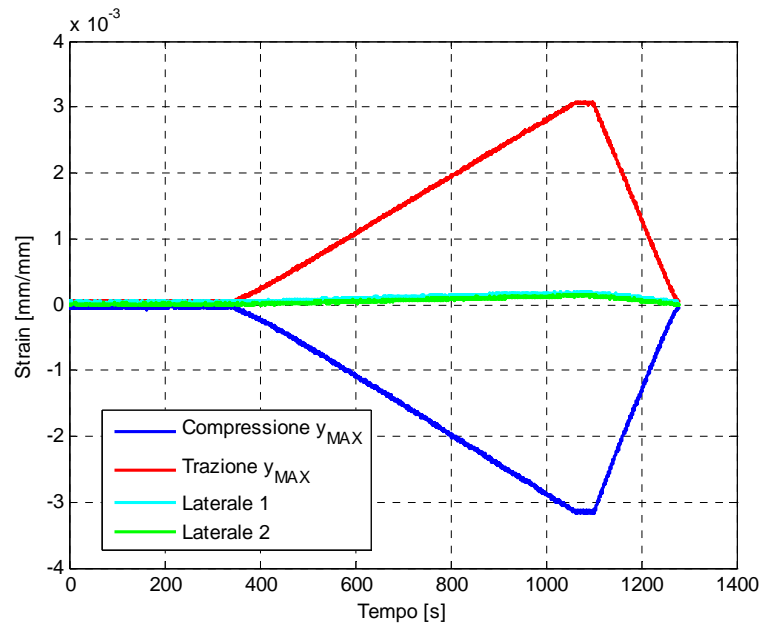


Figura 4.33 Grafico delle misure provenienti dagli estensimetri

L'interpretazione della dicitura “compressione” e “trazione” risulta invece immediata, riferendosi agli estensimetri posti sulle fibre tese o compresse alla distanza massima dall'asse neutro.

Venendo ai dati provenienti dal sensore FBG inglobato nel provino e posto a metà dello spessore per questa prova, quindi teoricamente sull'asse neutro, sarebbe lecito aspettarsi una misura nulla della deformazione. In figura 4.34 la lunghezza d'onda del segnale riflesso è rappresentata in funzione del tempo.

Situazione	Lunghezza d'onda del segnale riflesso [nm]
Riposo	1547,931
Sollecitazione massima	1547,897

Tabella 4.17 Lunghezze d'onda del segnale riflesso negli istanti significativi della prima prova

Come si vede la differenza fra il segnale a riposo e il segnale corrispondente alla sollecitazione massima dell'FBG è di $0,34 \text{ nm}$, corrispondenti a circa $22 \mu\epsilon$.

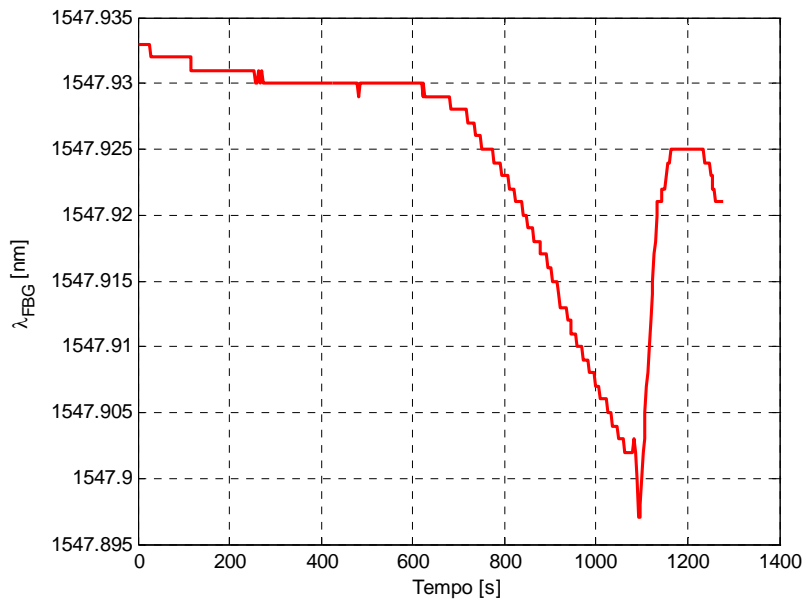


Figura 4.34 Andamento della lunghezza d'onda del sensore FBG

4.4.4 Seconda e terza prova a flessione

Al fine di ottenere dei dati relativi a misure del sensore FBG che dovrebbero essere diverse da zero si svolgono altre due prove di flessione a 4 punti del provino, secondo il layout indicato in precedenza in basso nella figura 4.35. In queste due prove l'unica cosa che cambia è dunque lo spessore (da 7 mm a 20 mm) del provino caricato, con le conseguenti ripercussioni sul momento d'inerzia e la distanza massima delle fibre dall'asse neutro: per questi motivi ci

si aspetta di dover procedere con carichi molto più elevati rispetto alla prova precedente. Le due prove vengono inglobate in questo paragrafo perché la modalità di esecuzione è la stessa, con l'elemento da testare girato nella seconda in modo tale da sottoporre alternativamente a trazione e compressione il sensore FBG, ottenendo così una correlazione con le misure degli estensimetri più completa. Se ne può vedere un'immagine nella figura 4.35. Nella tabella 4.11 è riportata la lista delle specifiche della seconda prova di flessione.

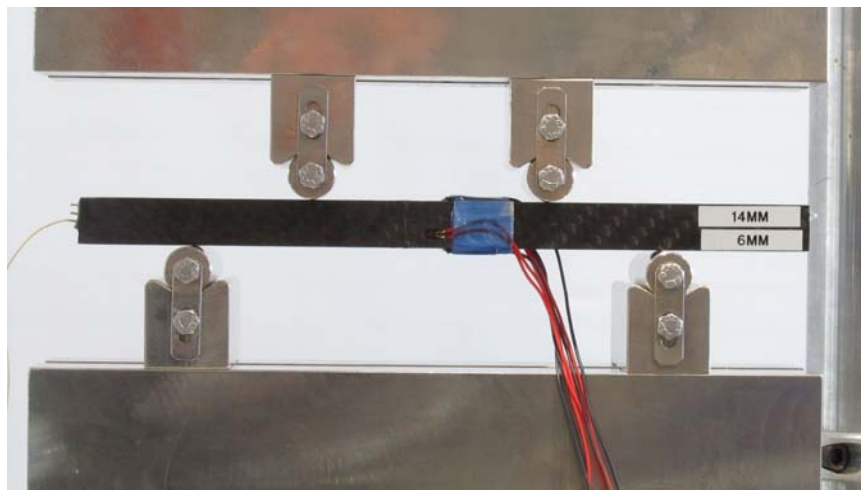


Figura 4.35 Provino di spessore 20 mm sottoposto a flessione a 4 punti

Dalla figura si nota come l'FBG sia in questa seconda prova immerso nelle fibre tese: infatti è stato mostrato in precedenza il suo posizionamento a 6 mm da un bordo del provino e a 14 mm dall'altro, distanze facilmente rintracciabili a destra nella figura 4.35. Ci si dovrà aspettare pertanto un aumento della lunghezza d'onda del segnale riflesso, concordemente con quanto prevede la legge di Bragg (2.4) in seguito all'aumento della spaziatura fra i dischi del reticolo di Bragg.

Rateo di carico [mm/M]	0,1
Rateo di scarico [mm/M]	0.25
Carico massimo [N]	4039.8
Spostamento massimo [mm]	1.736

Tabella 4.18 Specifiche operative della prima prova di flessione

Come si vede il rateo di carico/scarico della prova attuale è molto inferiore rispetto alla precedente: in questo test infatti il rischio di scorrimenti indesiderati del provino sui cilindri era consistente ed è per evitare questo inconveniente che il valore del rateo di carico è stato ridotto. Allo stesso modo lo spostamento

massimo (si ricorda che anche questa prova è comandata in spostamento) è poco superiore alla metà del precedente: il carico raggiunto è comunque quattro volte superiore e questo fatto è dovuto alle precedenti considerazioni sulle dimensioni del provino.

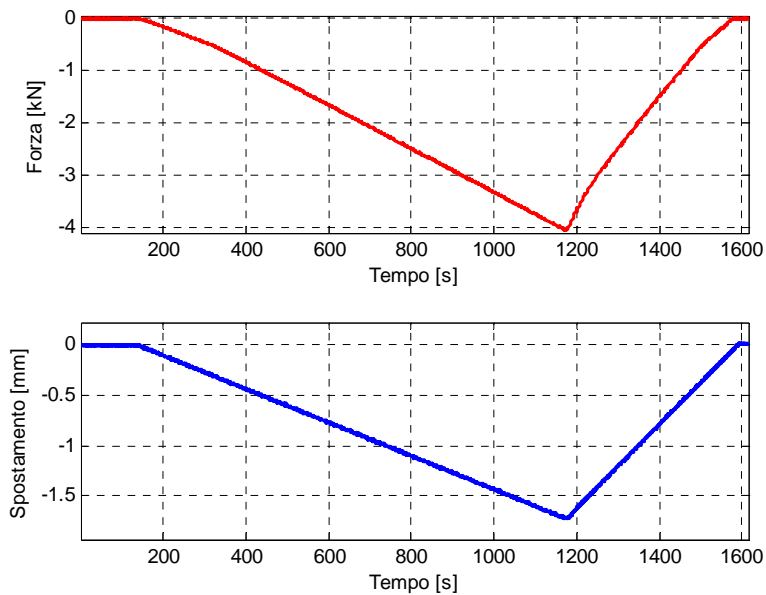


Figura 4.36 Andamento di carico e spostamento in funzione del tempo per la seconda prova di flessione

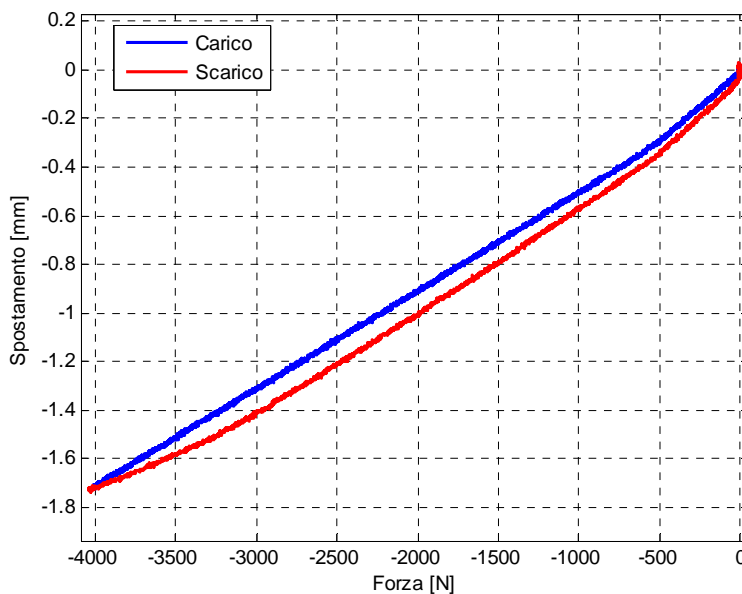


Figura 4.37 Curva forza-spostamento della seconda prova di flessione

Nella figura 4.36 si rappresentano in un grafico le curve di spostamento e forza in funzione del tempo: come è lecito aspettarsi le hanno un andamento simile. Guardando nella figura 4.37 si può vedere invece il diagramma forza-spostamento, che presenta una differenza rispetto alla prima prova: la curva di carico e quella di scarico non coincidono. Si rimanda al capitolo successivo dell'analisi dei risultati la trattazione e le annesse considerazioni relative a questo fenomeno.

Dopo aver elaborato i dati provenienti dalla macchina di prova si può procedere con quanto registrato dal sistema di acquisizione grazie agli estensimetri. Nella figura 4.38 si riporta l'andamento del segnale elettrico convertito in segnale di deformazione in funzione del tempo. Per l'uso delle diciture "Compressione", "Trazione", "Laterale 1" e "Laterale 2" si rimanda a quanto detto nel paragrafo precedente.

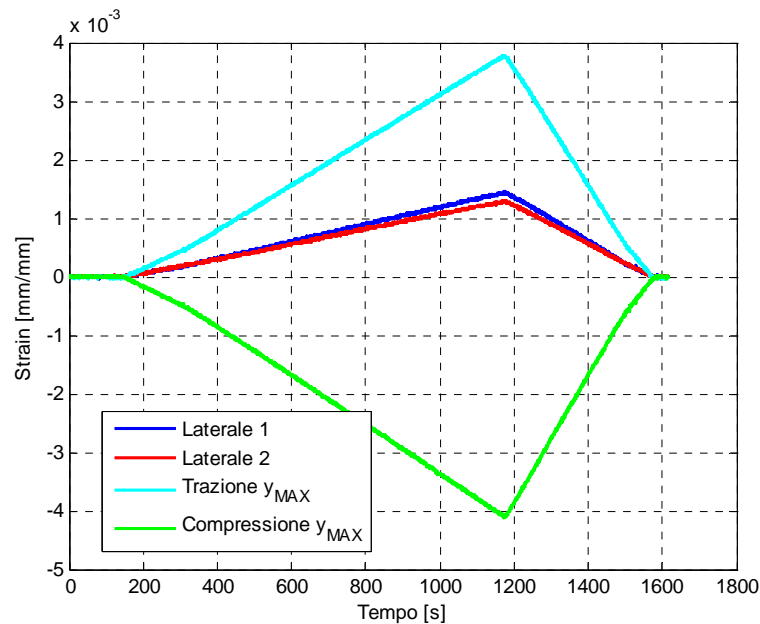


Figura 4.38 Misure provenienti dagli estensimetri nella seconda prova di flessione

L'ultima sequenza di dati acquisiti e registrati è quella proveniente dal sensore FBG inglobato. Questa volta sarà significativa anche dal punto di vista numerico anziché da quello prevalentemente qualitativo, infatti note le posizioni degli estensimetri e quelle del sensore rispetto all'asse neutro sarà possibile arrivare ad una correlazione delle misure di deformazione per verificarne la correttezza. L'andamento della lunghezza d'onda del segnale riflesso dal reticolo di Bragg è rappresentato nella figura 4.39.

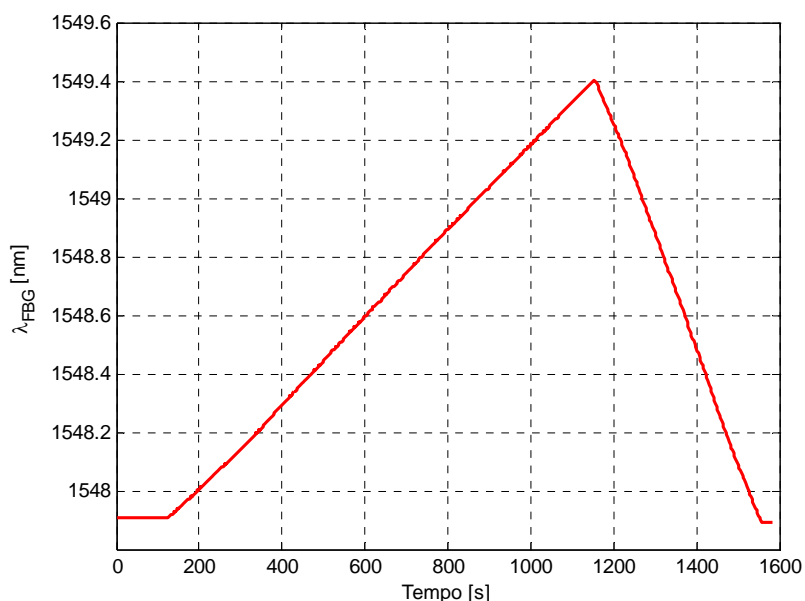


Figura 4.39 Lunghezza d'onda del sensore FBG nella seconda prova di flessione

Nella tabella seguente, la 4.12, sono riportate le caratteristiche di lunghezza d'onda del segnale riflesso in termini numerici per gli istanti più significativi della prova. Da esse è possibile desumere la variazione di λ_{FBG} dovuta alla sollecitazione massima, ovvero 1.511 nm.

Situazione	Lunghezza d'onda del segnale riflesso [nm]
Riposo	1547,891
Sollecitazione massima	1549,402

Tabella 4.19 λ_{FBG} negli istanti significativi della seconda prova

Come già anticipato la terza prova è stata condotta sulla falsariga della seconda, ovvero con le stesse modalità di esecuzione, ma con il provino girato in modo da mantenere lo stesso spessore a flessione. L'immagine 4.40 dissipa ogni possibile incomprensione sulla configurazione di prova attuale. In tabella 4.20 si riportano per completezza le informazioni relative a questa ultima prova.

Rateo di carico [mm/M]	0,1
Rateo di scarico [mm/M]	0.25
Carico massimo [N]	4027.7
Spostamento massimo [mm]	1.736

Tabella 4.20 Specifiche operative della seconda prova di flessione

Come si vede c'è una insignificante differenza rispetto alla tabella relativa alla seconda prova soltanto nel valore di picco del carico applicato. A questo punto si possono riportare gli stessi tipi di diagrammi della prova precedente, in cui noteremo che i valori dei segnali registrati saranno giustamente invertiti, avendo cambiato il segno della posizione girando il provino.

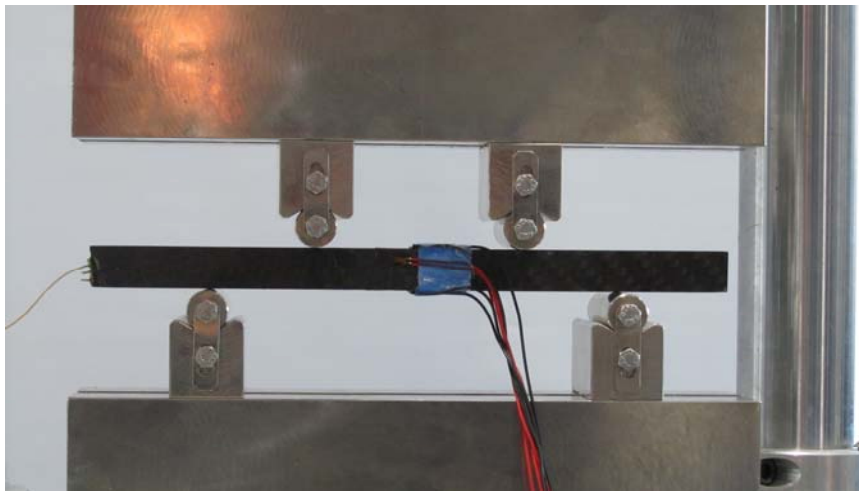


Figura 4.40 Provino di spessore 20 mm girato e sottoposto a flessione a 4 punti

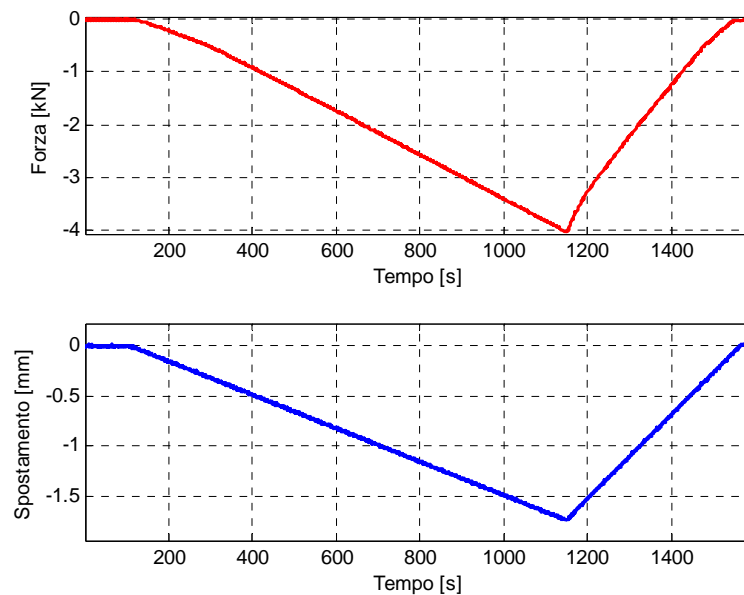


Figura 4.41 Andamento di carico e spostamento in funzione del tempo per la terza prova di flessione

Analogamente alle prove precedenti si rappresenta l'andamento di carico e spostamento in funzione del tempo, visibile in figura 4.41, e in seguito la curva forza-spostamento, in figura 4.42.

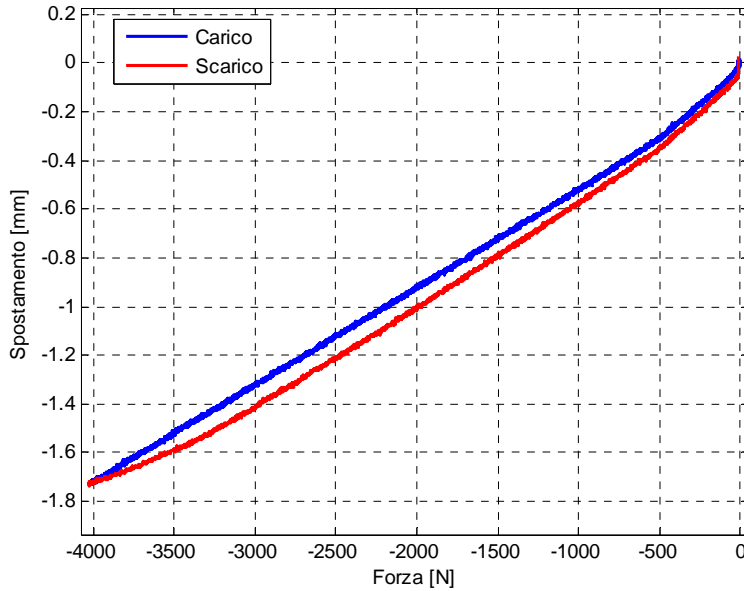


Figura 4.42 Curva forza-spostamento della seconda prova di flessione

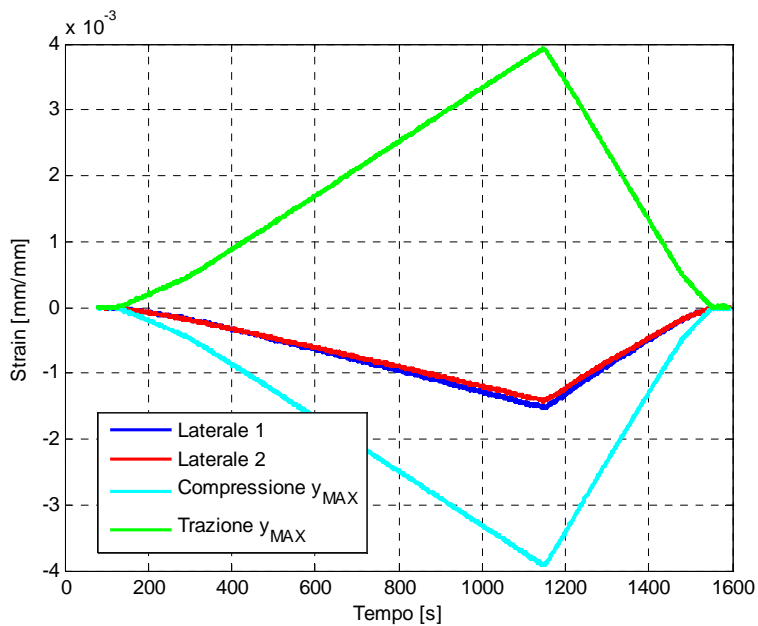


Figura 4.43 Dati provenienti dagli estensimetri nella terza prova di flessione

Ancora una volta si può notare l'analogia degli andamenti delle ultime due prove effettuate. Nella figura 4.35 si passa ad una prima analisi delle misure provenienti dagli estensimetri, rappresentate in un unico grafico in funzione del tempo. Anche in questo caso si nota l'inversione della posizione di ciascun estensimetro conseguenza diretta dell'aver riposizionato il provino. Nella figura seguente, la 4.43, si mostra l'andamento del segnale campionato grazie al sensore FBG

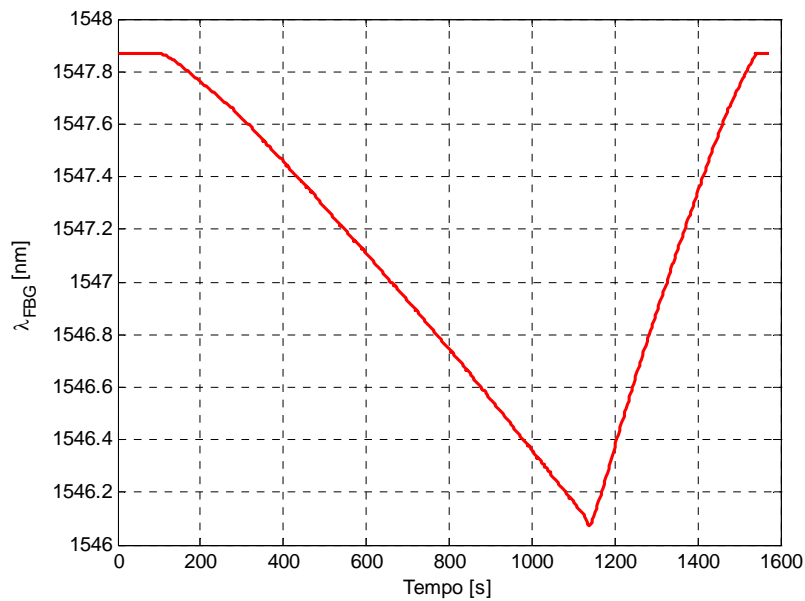


Figura 4.44 Lunghezza d'onda del sensore FBG nella terza prova di flessione

Nella tabella 4.21 si riportano i valori assunti dalla lunghezza d'onda del segnale riflesso nella fibra ottica nella situazione a riposo e di spostamento massimo per la terza ed ultima prova di flessione a quattro punti. La differenza fra i due valori è di 1,795 nm.

Situazione	Lunghezza d'onda del segnale riflesso [nm]
Riposo	1547,871
Sollecitazione massima	1546,076

Tabella 4.21 λ_{FBG} negli istanti significativi della seconda prova

Capitolo 5

Analisi dei risultati

5.1 Infusioni

5.1.1 Contenuto di vuoti

Dopo ogni infusione si dedica una certa attenzione alla valutazione qualitativa del contenuto di difetti dei prodotti: per far ciò si osserva la lamina innanzitutto in spessore (le pareti laterali), una delle zone più difficili da raggiungere da parte della resina e quindi significativa in quanto mostra quella che dovrebbe essere la parte più affetta dalla presenza di difetti. In secondo luogo, anche a causa della sua minore influenza nel contenuto globale di vuoti, si va ad osservare la finitura superficiale. Per questa seconda osservazione con il succedersi delle infusioni si sono notate poche differenze fra i valori rilevati: il motivo, già spiegato in precedenza, è che lo stampo ha una cattiva finitura superficiale. La cattiva finitura superficiale non è imputabile ai parametri del processo perché (a differenza del contenuto di vuoti globale che si è ridotto di pari passo con l'ottimizzazione dei parametri) variando i parametri non si è registrata una concomitante variazione della qualità della finitura superficiale.

In tabella 5.1 si riassume il contenuto di vuoti espresso in frazione di volume per i prodotti della 5 infusioni portate a compimento: questi valori si riferiscono invece a valutazioni quantitative già spiegate in precedenza che portano a un dato numerico procedendo per differenza di pesate.

Infusione	Contenuto di vuoti in % di volume
I	6
II	4
III	3
IV	2
V	2

Tabella 5.1 Stima del contenuto di vuoti dei prodotti delle infusioni effettuate

Variabile	I	II	III	IV	V
Binder	SI	NO	NO	NO	NO
Misura della resina infusa	NO	SI	SI	SI	SI
Durata variabile dell'infusione	NO	NO	SI	SI	SI
Regolazione della pressione	NO	NO	SI	SI	SI

Tabella 5.2 Parametri variati durante le cinque infusioni

Si può affermare sulla base dei dati appena riportati che l'ottimizzazione dei parametri di processo è avvenuta con successo. Analizzando in maniera approfondita quelle che sono state le differenze fra i parametri nelle varie infusioni, che vengono riportati in tabella 5.2), ci si accorge del fatto che il cambiamento più influente è stata l'eliminazione del binder. La misura della resina infusa, la conseguente variazione della pressione di infusione e la regolazione della durata dell'infusione in base al tempo impiegato dalla resina per raggiungere l'uscita dallo stampo hanno ulteriormente diminuito il contenuto di vuoti, anche se in misura minore rispetto all'uso del binder. Non va comunque dimenticato che una volta raggiunto un valore basso del contenuto di vuoti è più difficile ridurlo ulteriormente.

5.1.2 Flusso della resina all'interno dello stampo

Basandosi sul monitoraggio dell'infusione effettuato tramite i sensori costituiti dalle punte delle fibre ottiche si può invece indagare il flusso della resina all'interno dello stampo, eventualmente arrivando a considerazioni su discrepanze fra la permeabilità effettiva della preforma e quella prevista sulla base dei dati ricavati da precedenti esperienze.

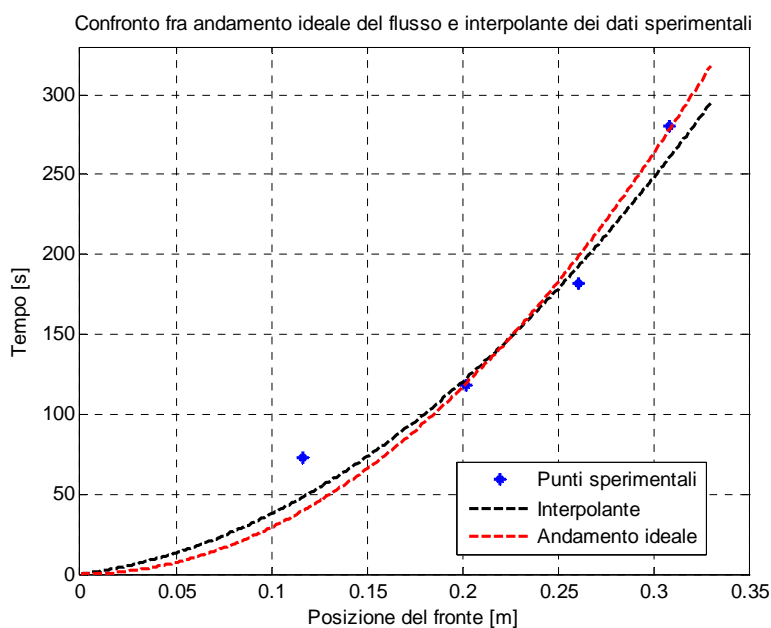


Figura 5.1 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali per la quarta infusione

In figura 5.1 e 5.2 si riportano i confronti fra le leggi derivanti dall'interpolazione delle misure temporali dell'arrivo della resina (effettuate dai

sensori rispettivamente nella quarta e quinta infusione) e la posizione ideale del fronte del flusso di resina basata sul dato noto di permeabilità.

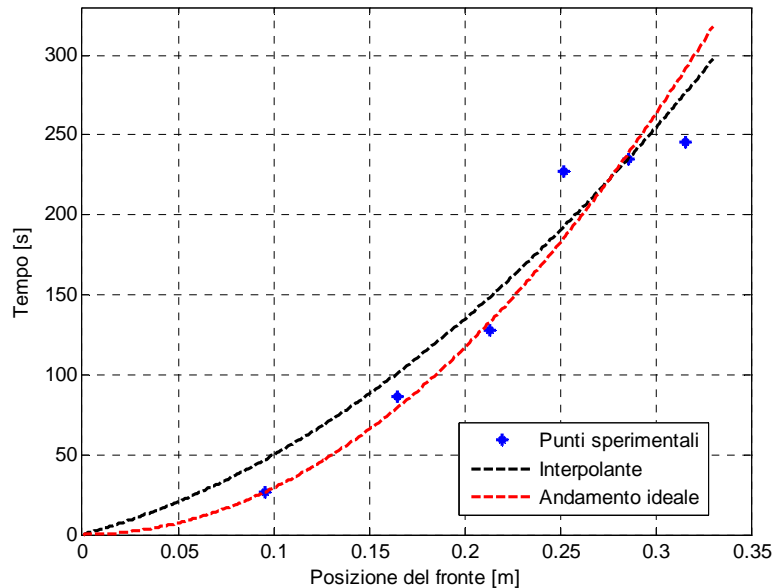


Figura 5.2 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali per la quinta infusione

Come si nota nelle figure sopra riportate, in entrambe le infusioni il flusso che si è instaurato all'interno dello stampo non differisce di molto rispetto alla previsione fatta sulla base della teoria. In particolare si nota come il risultato sia migliore per la quarta infusione: nella quinta infusione si hanno due punti di misura molto diversi da quanto ci si aspetta. Pur essendo gli altri quattro punti quasi sovrapposti alla curva teorica l'interpolante si discosta in maniera apprezzabile dall'andamento ideale.

Analizzando separatamente i dati delle fibre posizionate nella metà sinistra e nella metà destra possiamo ricostruire due differenti flussi che si sviluppano all'interno della preforma: nella figura 5.3 si nota come il flusso che sviluppa nella metà sinistra sia perfettamente coincidente con quanto previsto dalla teoria. Se si guarda invece la figura 5.4 si scopre che è nella parte destra dello stampo che si sono concentrati i problemi derivanti dalla realtà della situazione: l'interpolante si discosta molto dalla curva ideale e questo fatto deve essere ricondotto alla formazione di percorsi preferenziali per la resina, che scorre al loro interno più o meno velocemente del dovuto.

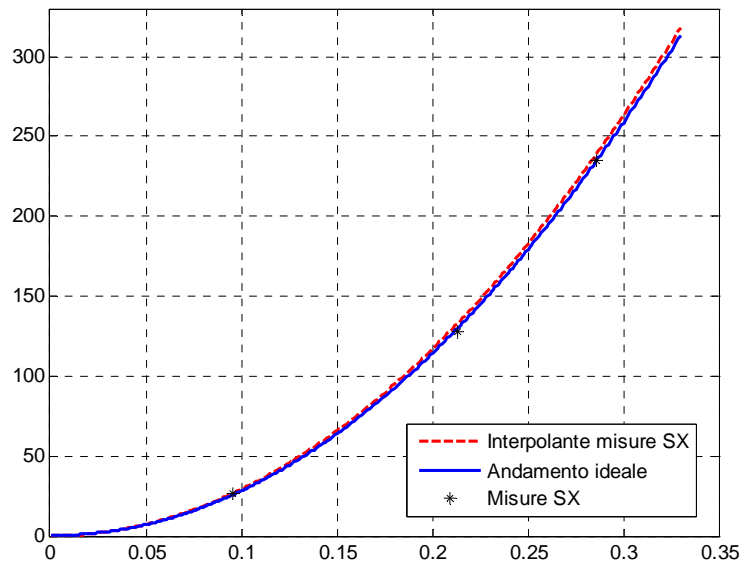


Figura 5.3 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali nella parte sinistra

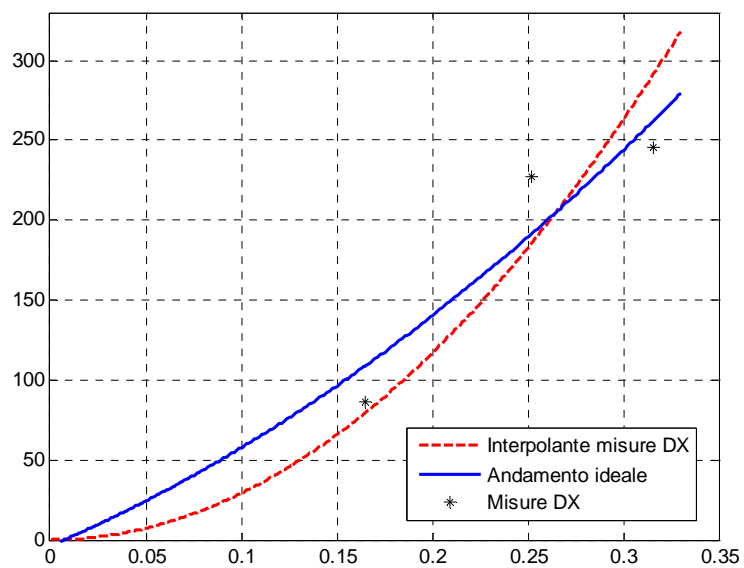


Figura 5.4 Confronto fra andamento ideale del flusso di resina e andamento derivante dall'interpolazione delle misure sperimentali nella parte sinistra

Il monitoraggio dell'infusione permette dunque di stabilire se la resina abbia attraversato una preforma con permeabilità omogenea o se all'interno dello

stampo vi siano delle zone in cui il fluido si possa muovere con più o meno facilità.

5.1.3 Acquisizione del sensore FBG

All'interno del capitolo 4 si è riportato l'insieme delle misure effettuate dal sensore FBG durante tutto il processo di produzione VaRTM. Di seguito si propone un'analisi delle varie fasi della produzione considerate separatamente: cominciando dalla chiusura dello stampo si nota che aumentando la coppia di serraggio dei bulloni e quindi il carico di chiusura il sensore viene sollecitato con la diretta conseguenza dell'aumento della lunghezza d'onda del segnale riflesso dal sensore FBG. Quanto appena spiegato è riportato in figura 5.5.

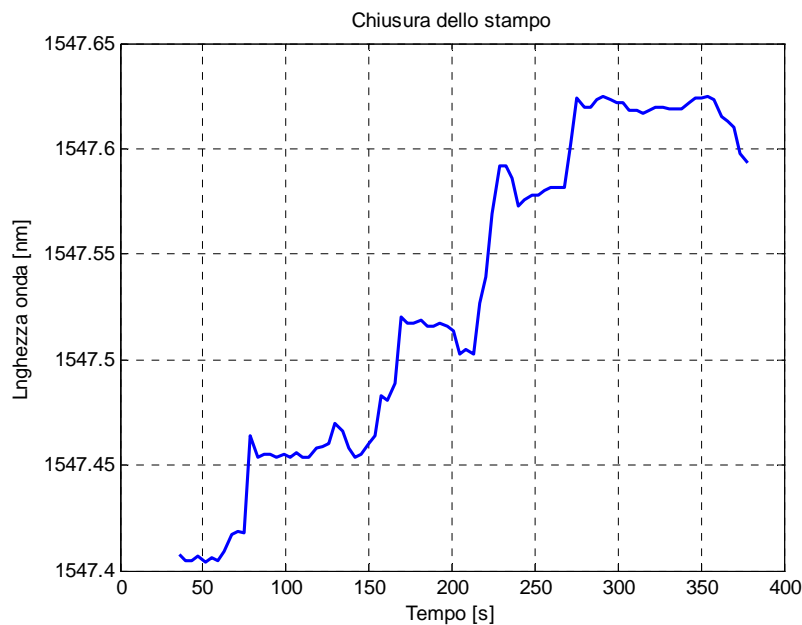


Figura 5.5 Andamento della misura del sensore FBG durante la fase di chiusura dello stampo

La fase meritevole di attenzione successiva alla chiusura dello stampo è quella contenente il processo di infusione e di reticolazione della resina. Nella figura 5.6 si vede la progressiva diminuzione della misura del sensore dovuta al raffreddamento causato dall'ingresso della resina nello stampo, che si ricorda essere alla temperatura di 80°C, di 40°C inferiore a quella dello stampo. Questa diminuzione avviene in maniera graduale finchè la resina non arriva a toccare proprio la parte della fibra ottica su cui è inciso il sensore FBG: la variazione della lunghezza d'onda riflessa è in questo caso molto marcata. Alla fine dell'infusione la temperatura viene alzata fino a raggiungere i 180°C e portare la resina a reticolazione: questa ultima fase si può facilmente individuare sul

grafico. Se infatti si considera l'andamento della temperatura in una reazione di reticolazione e si guarda poi alla misura del sensore FBG, gli andamenti sono molto simili.

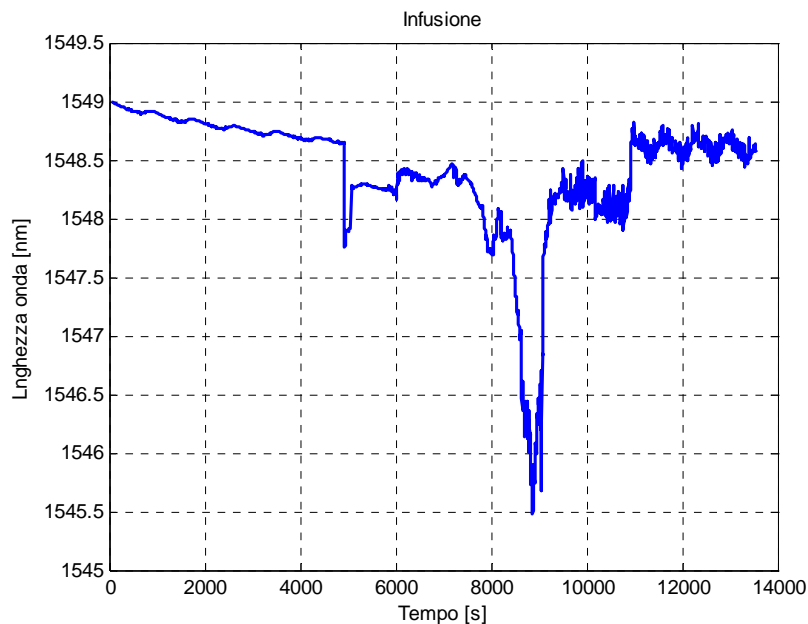


Figura 5.6 Andamento della misura del sensore FBG durante la fase di infusione

L'ultima fase oggetto di indagine è stata quella di raffreddamento successivo al completamento della reticolazione della resina, che si può vedere nella figura 5.7. In questa fase ancora una volta il segnale misurato diminuisce gradualmente fino a che la temperatura del sensore non arriva al valore della temperatura ambiente. L'acquisizione è proseguita anche successivamente e l'andamento della misura segue quello della temperatura ambiente, che raggiunge il suo livello minimo nella notte per poi risalire a partire dal sorgere del sole.

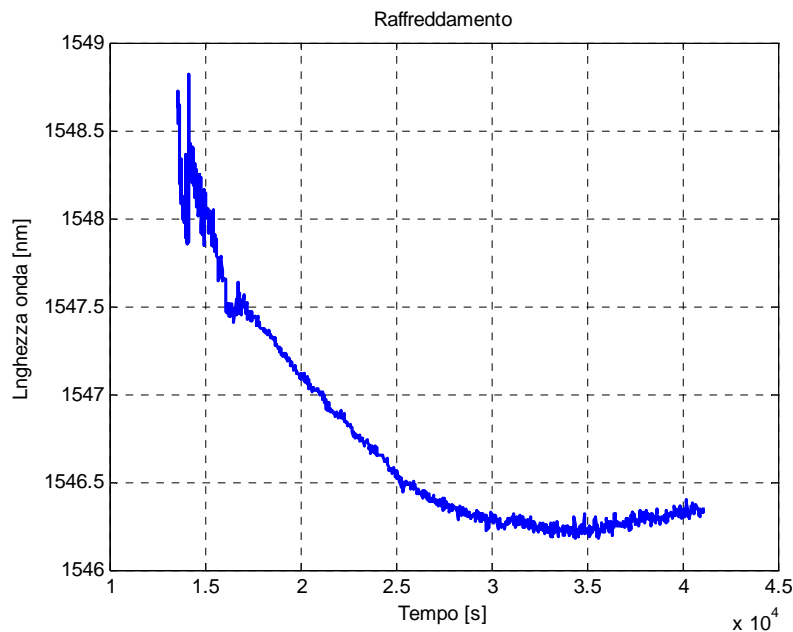


Figura 5.7 Andamento della misura del sensore FBG durante la fase di raffreddamento

Quanto appena detto va a confermare ancora una volta l'utilità del sensore FBG per monitorare l'andamento delle varie fasi produttive: esso infatti consente di verificare il completamento di ciascun passaggio della produzione e di agire sulla procedura standard nel caso gli eventi registrati fossero diversi da quanto sarebbe lecito aspettarsi.

5.3 Posizione del sensore FBG

Con le prove descritte nel paragrafo 4.3 si è stabilito un metodo di indagine per determinare l'esatta posizione del sensore FBG nel pannello prodotto, valido comunque per qualsiasi altro tipo di pezzo prodotto.

Attraverso l'osservazione di una sezione terminale del provino si determina la posizione della fibra ottica nello spessore del laminato. Le immagini mostrano che la fibra si trova a metà dei 7 mm di spessore della piastra mantenendo la posizione iniziale fra due strati di tessuto anche successivamente alla chiusura dello stampo e all'arrivo della resina risultando immersa nella resina reticolata.

Osservando le radiografie effettuate si ottengono altre interessanti informazioni che meritano alcune considerazioni. Relativamente al percorso di tutte fibre ottiche all'interno del pezzo finito, si nota nell'immagine 5.8 che le fibre pur non spostandosi in maniera tale da determinare un posizionamento significativamente diverso da quello previsto, hanno comunque deviato dalla

traiettoria rettilinea nella fase di chiusura dello stampo e in quella successiva di impregnazione dei tessuti.

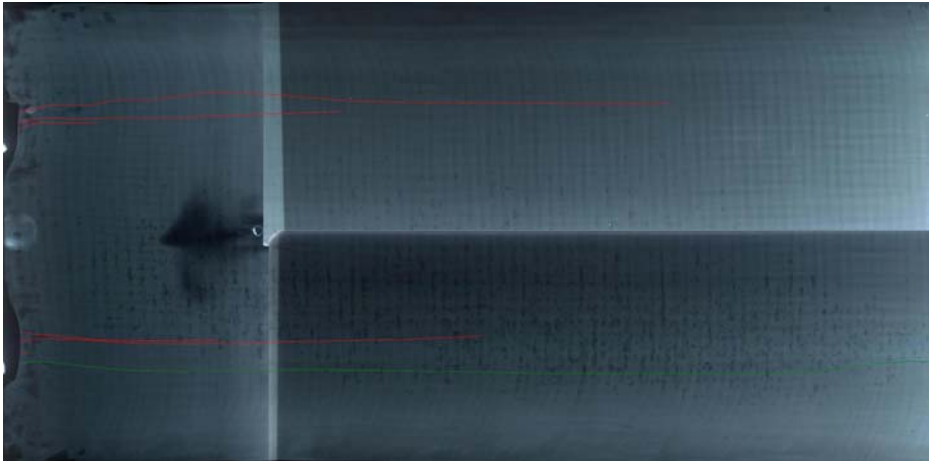


Figura 5.8 Traiettoria delle fibre ottiche diversa da quella rettilinea

Come ci si ricorderà da quanto spiegato nel capitolo 3, la fibra ottica contenente il sensore FBG arrivava al di fuori della parte di tessuto della preforma essendo di fatto costretta nella sua posizione rettilinea dalle forze esercitate attraverso i punti di chiusura dello stampo. Questo accorgimento non è stato sufficiente a mantenerla in posizione, ottenendo lo stesso effetto di distorsione della traiettoria per tutte le fibre. La causa è dunque da imputare alla fase di posizionamento e non alla successiva fase di arrivo di un fronte di flusso della resina sicuramente non omogeneo.

Relativamente alla presenza di difetti, nella stessa immagine 5.8 si notano anche delle zone di colorazione non omogenea che rivelano la presenza di imperfezioni. Si possono distinguere due diversi effetti: nella parte vicina all'ingresso delle fibre ottiche, corrispondente allo sbocco della resina, si presentano delle zone impregnate in maniera meno efficace rispetto al resto della preforma.

L'altro effetto è dovuto alla cattiva finitura superficiale dello stampo e ad una distribuzione più o meno omogenea del distaccante sulle pareti dello stesso: il risultato è la presenza diffusa di difetti superficiali di piccole dimensioni che vanno ad annerire localmente le radiografie.

Complessivamente però si può dire che, anche a fronte del risultato dell'osservazione al microscopio, l'impregnazione dei fasci di fibre è avvenuta in maniera corretta e completa con le eccezioni appena descritte. Queste comunque non sono causate da errori nella scelta dei parametri dell'infusione

che, in termini di penetrazione da parte della resina, porta ad un risultato più che soddisfacente.

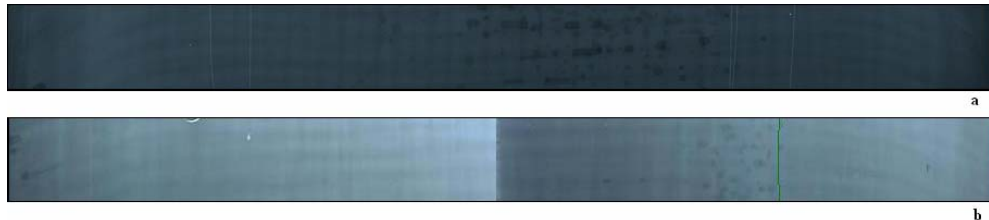


Figura 5.9 Effetti di bordo all'inizio (a) e alla fine (b) della piastra

Osservando attentamente una sezione trasversale al flusso della resina, come quelle visibili in figura 5.9 ci si accorge immediatamente di una curvatura dei tessuti in corrispondenza dei lati dello stampo. La causa può essere ricondotta con sicurezza agli effetti di bordo, il cui sviluppo è stato ampiamente descritto nel capitolo 1. Nella stessa figura 5.9 si vede come l'effetto diventi più marcato allontanandosi dall'ingresso della resina: questo significa che lungo la corsa della resina viene man mano vanificato l'effetto di "omogeneizzazione" del fronte di flusso introdotto dallo svaso inserito all'imbocco dello stampo.

Grazie a questa considerazione si può affermare che l'uso di un binder per irrigidire i tessuti potrebbe risolvere questo problema pur non essendo la soluzione più appropriata. Sarebbe invece opportuno l'uso di strumenti che consentano di mantenere rettilineo il fronte del flusso in tutta la cavità dello stampo, senza andare a modificare le caratteristiche di permeabilità della preforma. Dato che l'effetto si riduce tramite una cava posta all'ingresso della resina l'unica soluzione sembra essere quella di prevedere il posizionamento di ingressi aggiuntivi quando vi siano delle zone altrimenti molto lontane degli ingressi già previsti. Questo accorgimento avrebbe l'ulteriore effetto di rendere più omogenea la pressione che decresce naturalmente in conseguenza delle perdite di carico introdotte dall'attraversamento dei tessuti. La diretta conseguenza sarebbe la scomparsa o comunque la riduzione di quei difetti descritti poco sopra che si presentano vicino all'uscita dello stampo e quindi lontano dall'ingresso.

L'indagine fin qui svolta ha consentito di individuare il percorso delle fibre ottiche: la parte successiva invece porta a determinare la posizione esatta del sensore FBG. Le prove è stata descritta nel paragrafo 4.3 in cui vengono esposti anche i risultati grafici. Ogni prova è caratterizzata da picchi corrispondenti a lunghezze d'onda riflesse maggiori dovute alla variazione dell'indice di rifrazione conseguenza del riscaldamento della parte interessata. La procedura prevede di fornire una quantità di calore costante ad ogni punto di riscaldamento: quando ci si trova davanti a un picco più alto vuol dire che si è

scaldata una zona che si trova nelle immediate vicinanze del sensore. Il picco più alto servirà ad individuare la posizione esatta. Dalla prima prova risultano quindi evidenti i punti più vicini al sensore, che sono il II, III e IV punto di misura. Muovendo da questa evidenza si è proceduto a sollecitare la zona compresa fra questi tre punti, con una risoluzione maggiore. Il risultato, mostrato nel capitolo 4, porta a ridurre ulteriormente la zona d'indagine al II, III e IV punto scaldati in questa prova.

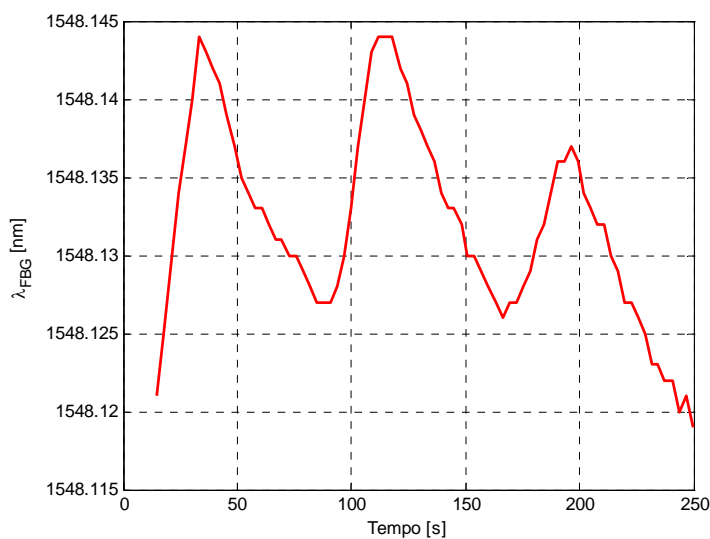


Figura 5.10 Risultato della terza prova termica

Procedendo alla terza ed ultima prova si fornisce calore con tempistiche differenti, in modo da esaltare le differenze tra i picchi più alti che erano invece molto simili nelle due prove precedenti. Il risultato è stato quello di ottenere la posizione del sensore, che si trova fra il I e il II punto di riscaldamento della terza prova, come si può vedere nella figura 5.11.

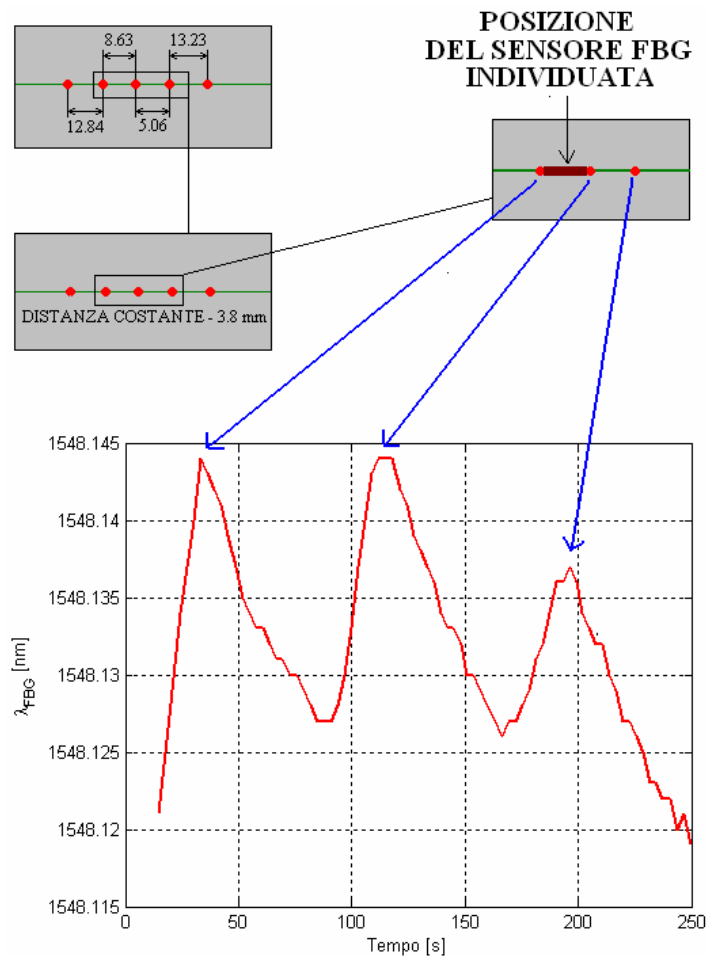


Figura 5.11 Analisi del risultato della terza prova e successiva determinazione della posizione del sensore FBG

L'indagine si è quindi conclusa con successo, fornendo la posizione del reticolo di Bragg oltre a confermare il corretto funzionamento dello stesso: era infatti la prima prova condotta dopo l'estrazione del pezzo finito dallo stampo.

5.4 Prove meccaniche

5.4.1 Prima prova di flessione

Nella figura 5.12 si riprende il segnale registrato dagli estensimetri già riportato all'interno del capitolo 4. Andando a osservare l'andamento degli estensimetri isolato a coppie come rappresentato in figura 5.13 si possono fare alcune riflessioni.

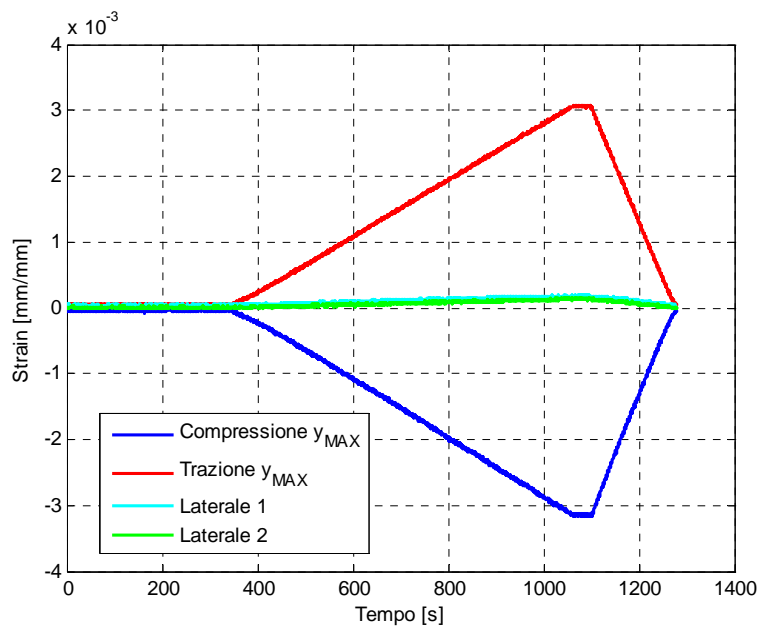


Figura 5.12 Segnale estensimetrico della prima prova di flessione

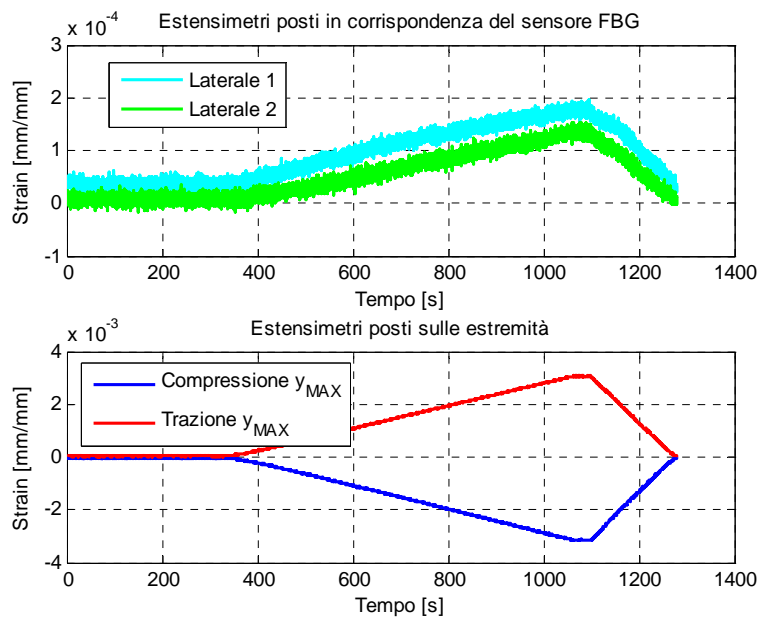


Figura 5.13 Segnali degli estensimetri rappresentati a coppie

Dall'esame visivo della figura superiore risulta evidente il fatto che gli estensimetri posti lateralmente al provino non hanno registrato segnale nullo. Questo equivale a dire che non sono mediamente disposti sull'asse neutro, ovvero a metà dello spessore. L'errore è comunque piccolo, infatti si vede che il

segnale massimo misurato è di un ordine di grandezza inferiore rispetto al valore di picco delle fibre alla distanza massima dall'asse neutro. Numericamente si vede bene quanto detto grazie ai dati riportati nella tabella 5.3.

Estensimetro	Deformazione massima [$\mu\epsilon$]
Fibre tese	3081
Fibre compresse	-3166
Laterale 1	196
Laterale 2	152

Tabella 5.3 Picchi dei valori misurati dagli estensimetri

In particolare dalla natura positiva del valore misurato si può affermare che gli estensimetri sono stati posti leggermente al di sotto dell'asse neutro, trovandosi le fibre tese nella parte inferiore del provino. I valori di picco dei sensori posti alle distanze y_{MAX} presentano, naturalmente con segno opposto, una differenza di valore molto piccola (circa 2,7%) come ci si aspettava.

Per quanto riguarda il sensore FBG ci si aspettava che la lunghezza d'onda del segnale riflesso non variasse durante la prova: come calcolato nel paragrafo 4.4.3 il reticolo di Bragg misura una deformazione massima di circa $22 \mu\epsilon$: ricordando che il valore massimo assunto dalla deformazione, a 3,5 mm di distanza dall'asse neutro, è $3166 \mu\epsilon$ si può ragionevolmente affermare che il sensore FBG si trova esattamente sull'asse neutro. Questa considerazione acquisisce un'importanza notevole se si pensa alle implicazioni conseguenti relativamente al processo RTM: la fibra era stata posta fra due strati costituiti dallo stesso numero di lamine di tessuto in carbonio e poiché dopo l'infusione e la reticolazione si trova ancora sull'asse neutro si può dire (ancora una volta e con precisione crescente) che l'impregnazione è avvenuta in maniera omogenea

5.4.2 Seconda e terza prova di flessione

L'analisi dei dati relativi alle due prove seguenti porta ad ulteriori interessanti considerazioni. Avendo infatti posizionato il sensore FBG ad una quota diversa da quella dell'asse neutro avremo delle misure di deformazione la cui correttezza si può verificare grazie al segnale proveniente da una tecnica assodata ed affidabile come quella di misura delle deformazioni attraverso estensimetri a resistenza elettrica. In primis dunque si analizzano separatamente le registrazioni degli estensimetri, accoppiati secondo la loro distanza dall'asse neutro della flessione. Il risultato è riportato in figura 5.14.

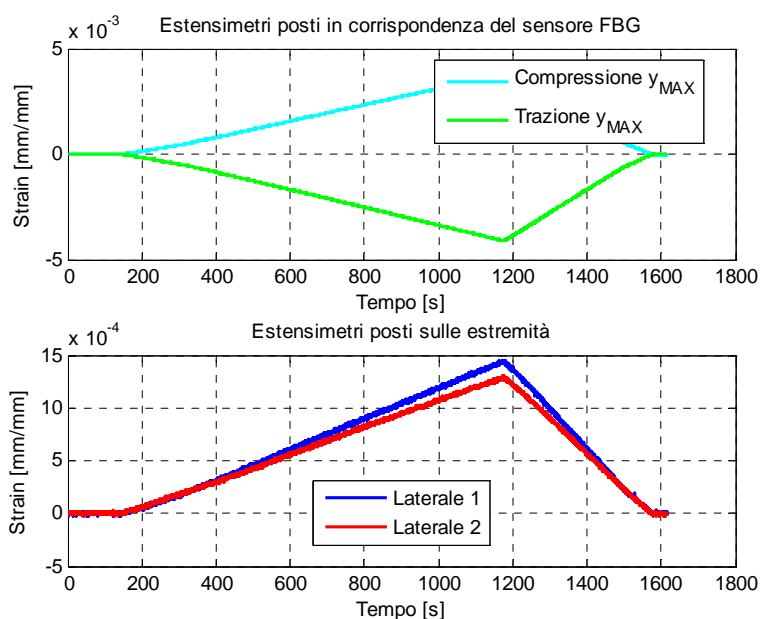


Figura 5.14 Segnali degli estensimetri per la seconda prova di flessione

Analizzando i valori assunti dalle misure riportati in tabella 5.4 possiamo fare un primo confronto: ci si attenderebbe un valore identico per gli estensimetri laterali e lo stesso per il modulo di quelli posti alla distanza massima dall'asse neutro. Vediamo che le misure di "Laterale 1" e "Laterale 2" differiscono del 6.94%, e tale errore è imputabile più ad una leggera differenza di posizionamento che alle differenze che connaturate da una misura di tipo sperimentale. Questa tesi è avvalorata dalla minore differenza fra le misure della deformazione a trazione e a compressione che invece sono relative a fibre poste alla stessa distanza dall'asse neutro.

Estensimetro	Misura massima [$\mu\epsilon$]	Differenza
Laterale 1	1435	10.55 %
Laterale 2	1298	
Trazione	3776	8.53 %
Compressione	-4098	

Tabella 5.4 Valori massimi delle misure estensimetriche nella II prova di flessione

Per quanto riguarda il sensore FBG ci aspettiamo che misuri la deformazione delle fibre poste a distanza di 4 mm dall'asse neutro, tale infatti è la posizione prevista in sede di definizione dell'operazione di taglio del provino. Questa misura dovrebbe corrispondere al 40% di quanto misurato dagli estensimetri che lavorano a trazione ed a compressione, posti invece a 10 mm dallo stesso asse. Il

sensores FBG in questa prova ha lavorato a trazione, come si può vedere in figura 5.15 dalla natura positiva assunta dai valori registrati.

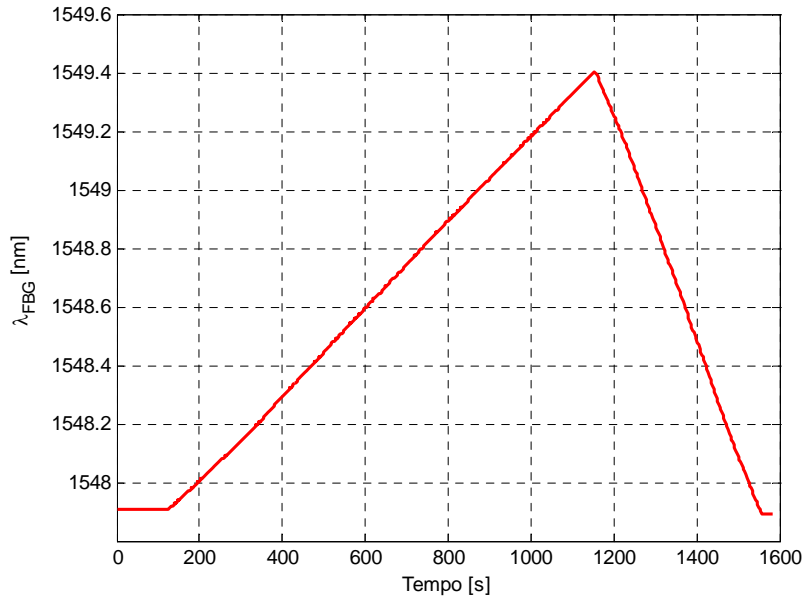


Figura 5.15 Segnale campionato dal sensore FBG nella II prova di flessione

La variazione massima di lunghezza d'onda è stata di 1.511 nm, valore da cui si può risalire [16] alla deformazione misurata attraverso l'eq. (5.1):

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{FBG}}{(1 - p_e) \cdot \lambda_{FBG}} \quad (5.1)$$

In questa equazione compare a denominatore il termine p_e : esso tiene conto attraverso il coefficiente di Poisson ν e degli indici di Pockel P_{ij} dell'effetto delle tensioni sull'indice di riflessione ed è definito dalla formula (5.2).

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) \cdot [P_{12} - \nu \cdot (P_{11} + P_{12})] \approx 0.22 \quad (5.2)$$

il valore di deformazione riferito alla lunghezza d'onda iniziale $\lambda_{FBG} = 1547.891$ nm è dunque 1251.49 $\mu\varepsilon$ mentre il valore misurato dall'estensimetro che ha lavorato a trazione è stato 3776 $\mu\varepsilon$: il rapporto è dunque

$$\frac{\varepsilon_{FBG}}{\varepsilon_{EST}} = \frac{1251.49}{3776} = 0.3314$$

Si deve eseguire la stessa procedura anche per la terza prova di flessione che, ci si ricorderà, prevede l'inversione del provino per scambiare i sensori sollecitati a trazione con quelli a compressione.

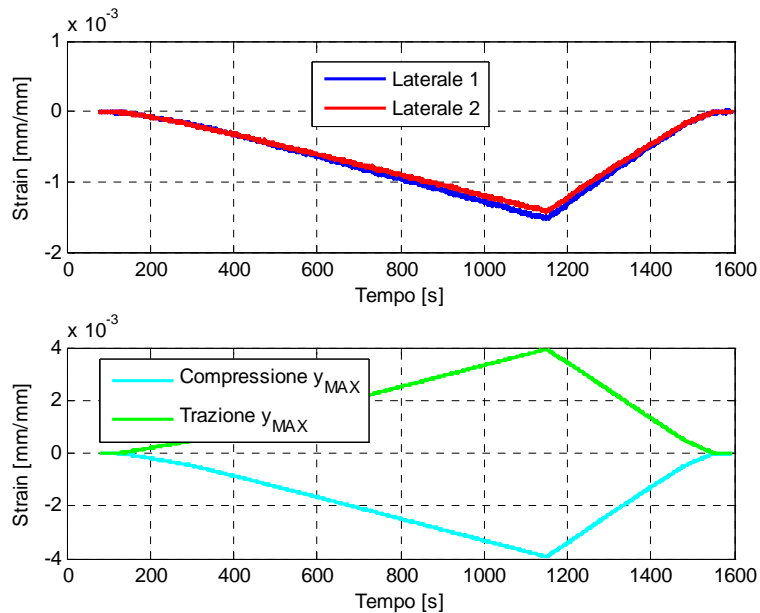


Figura 5.16 Segnali degli estensimetri per la terza prova di flessione

Nella figura 5.16 si rappresenta l'andamento della deformazione per gli estensimetri raggruppati a coppie secondo il loro posizionamento, e nella tabella 5.5 si riassumono i valori massimi assunti dalla misura di deformazione.

Estensimetro	Misura massima [$\mu\epsilon$]	Differenza
Laterale 1	-1528	6.94 %
Laterale 2	-1422	
Trazione	3926	0.7 %
Compressione	-3898	

Tabella 5.5 Valori massimi delle misure estensimetriche nella III prova di flessione

Si nota che le misure corrispondono maggiormente alle ipotesi avanzate in precedenza, ovvero le differenze fra i picchi dei sensori posti alla stessa distanza dall'asse neutro sono minori, addirittura trascurabili nel caso degli estensimetri posti a y_{MAX} . Nella figura 5.17 è mostrato l'andamento della lunghezza d'onda λ_{FBG} , con il sensore posizionato in questa ultima prova dalla parte delle fibre compresse e quindi con misura negativa.

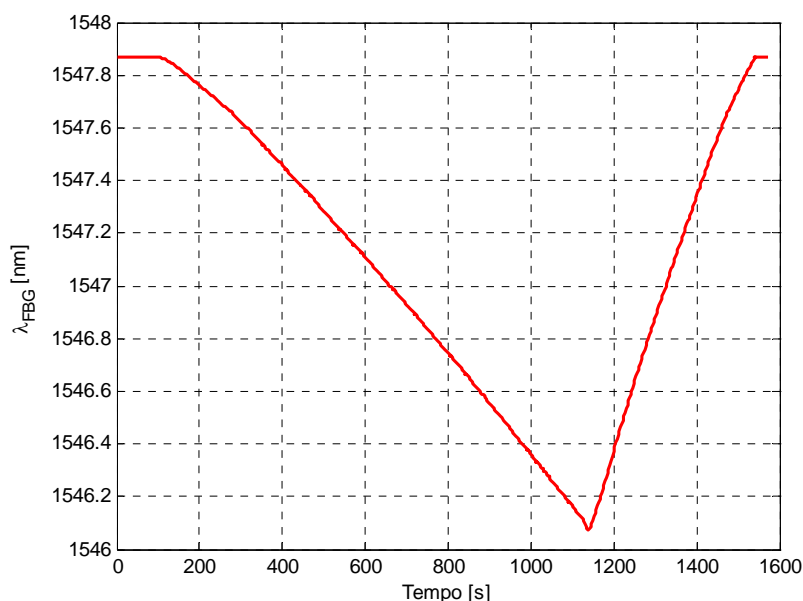


Figura 5.17 Segnale campionato dal sensore FBG nella III prova di flessione

In questo caso la differenza fra la misura a riposo e a deformazione massima è di 1.795 nm, che corrispondono sempre secondo la formula (5.1) a

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{FBG}}{(1 - p_e) \cdot \lambda_{FBG}} = 1488.46 \mu\varepsilon$$

Dalla tabella 5.5 si ricava il valore proveniente dall'estensimetro compresso corrispondente al sensore FBG, ovvero 3898 $\mu\varepsilon$. Ancora una volta si deve fare il rapporto fra queste due quantità:

$$\frac{\varepsilon_{FBG}}{\varepsilon_{EST}} = \frac{1488.46}{3898} = 0.3818$$

Nella tabella 5.6, dove sono riassunti i valori appena calcolati, si vede che a fronte di un'aspettativa di un rapporto costante intorno al valore di 0.4 in entrambi i casi le misure disattendono in difetto quanto previsto.

Prova	Rapporto	Valore atteso
II	0.3314	0.4
III	0.3818	

Tabella 5.6 Valori ottenuti e il valore atteso per il rapporto $\varepsilon_{FBG}/\varepsilon_{EST}$

Fare un discorso sull'affidabilità della misura dell'FBG sulla base di una singola misura è però riduttivo: se si guarda all'andamento globale di quanto misurato dal sensore FBG confrontandolo con le misure dell'estensimetro e con una linea teorica rappresentante il 40 % di queste ultime si vede che l'andamento è peggiore proprio nel punto considerato. Il confronto per la II e la III prova è visibile nelle figure 5.17 e 5.18.

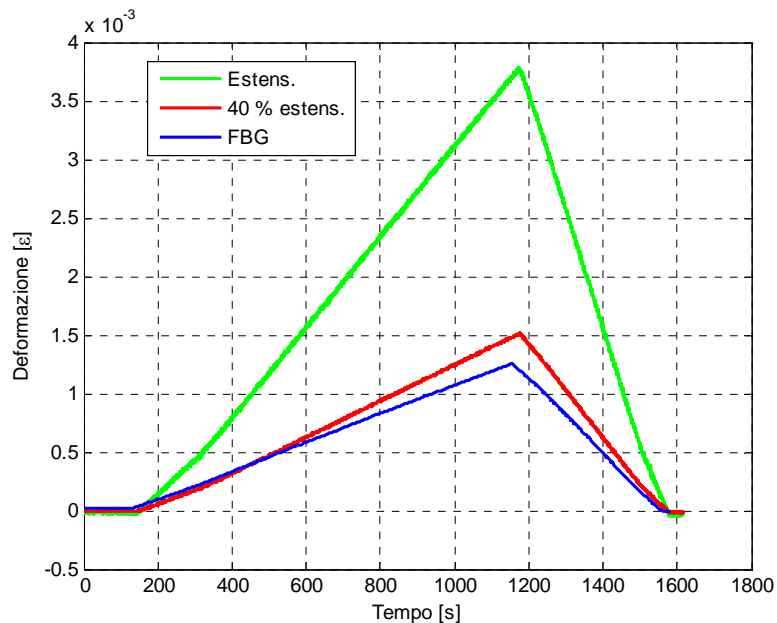


Figura 5.17 Confronto fra valore atteso e reale della misura del sensore FBG – II prova

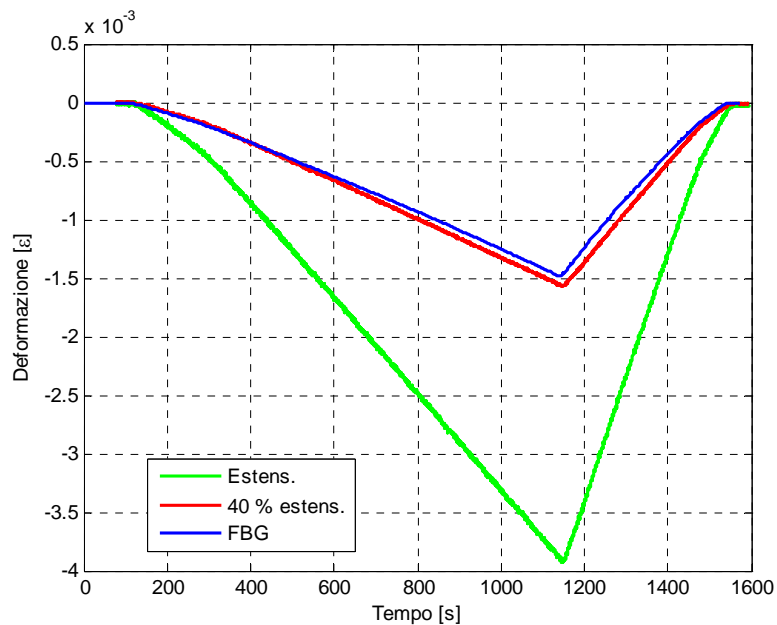


Figura 5.18 Confronto fra valore atteso e reale della misura del sensore FBG – III prova

Le misure del sensore FBG si mantengono sempre al di sotto della soglia rappresentata dal 40 % delle misure degli estensimetri. Questo potrebbe far pensare a rivalutare l'esatta posizione della fibra ottica all'interno del provino. In tal senso si rielaborano statisticamente i dati, facendo la media del rapporto fra ε_{FBG} ed ε_{EST} all'interno delle singole prove e un'ulteriore media fra i due valori appena ottenuti. Particolare attenzione va però posta verso una possibile correzione in tal senso: bisogna infatti tenere conto degli errori sulla conoscenza della posizione degli estensimetri: essi sono applicati manualmente e fra loro e il provino è interposto uno strato di colla. In ogni caso si può affermare che l'affidabilità della misura del sensore FBG è stata ampiamente dimostrata, valicando di fatto tutte le misure precedenti provenienti da questo sensore.

Capitolo 6

Conclusioni

L'attività di tesi si è articolata su diversi aspetti della tecnologia RTM, da quello strettamente tecnologico di ottimizzazione del processo produttivo a quello di valutazione e registrazione dello stato di deformazione durante l'esercizio dei componenti ottenuti, passando per il monitoraggio dell'infusione.

Perfezionando la tecnica di produzione dei componenti è stato possibile ottenere prodotti di buona qualità, caratteristica da cui non si poteva prescindere per procedere alle fasi successive di verifica della funzionalità e di determinazione delle caratteristiche del sistema di misura introdotto.

Le fasi cruciali sono state dunque la realizzazione delle infusioni per ottenere dei prodotti, base degli studi successivi: lamine con matrice in fibra di vetro prima e poi in fibra di carbonio. Il senso in cui ci si muoveva era quello di aumentare la frazione di volume delle fibre (e quindi le proprietà meccaniche del prodotto): nel frattempo si doveva mantenere basso o addirittura diminuire il contenuto di difetti di impregnazione che solitamente procedono di pari passo con il contenuto di fibre.

Durante le infusioni si posizionavano i sensori nella posizione desiderata, calcolata a partire dalle descrizioni matematiche del fenomeno di impregnazione dei tessuti. Attraverso i sensori si procedeva poi al monitoraggio delle infusioni: si sono ricavate informazioni importanti sull'andamento del flusso della resina ed è stato possibile confrontare i risultati ottenuti con quanto ci si sarebbe aspettato dalla teoria. Si è notato che la permeabilità della preforma non è uniforme e infatti vi sono zone in cui il flusso procede più velocemente ed altre in cui procede più lentamente.

I sensori FBG inglobati nei componenti prodotti hanno costituito un punto di misura delle deformazioni interno al provino: quando si procede alla misura di una deformazione è necessario conoscere con precisione la posizione del sensore, e a tal proposito è stata messa a punto la procedura di indagine esposta. Grazie ad indagini ottiche, radiografiche e termiche la posizione del sensore è ricavabile con ottima approssimazione.

Per misurare delle deformazioni si è proceduto a realizzare delle semplici prove di flessione a quattro punti dei provini realizzati: confrontando la risposta del sensore FBG con quella degli estensimetri posizionati opportunamente è stato possibile affermare che il sensore ottico misurava in maniera corretta le deformazioni.

Questo lavoro di tesi, attraverso i risultati raggiunti, costituisce quindi il naturale prosieguo dello studio della tecnologia RTM e dell'health monitoring basato sull'uso di sensori in fibra ottica intrapreso al Politecnico di Milano. Getta inoltre le basi per le attività future che potrebbero percorrere innumerevoli strade: lo studio più approfondito della fase di inglobamento dei sensori e conseguente messa a punto di una precisa procedura finora mancante. Un'altra possibilità è quella di procedere all'applicazione vera e propria all'health monitoring del sistema di misura che si è messo a punto e di cui si è dimostrata l'affidabilità in questa tesi.

Ci si potrebbe dilungare ancora per molto nell'elenco delle possibili attività future nel campo della tecnologia RTM: il mondo dei materiali compositi costituisce di certo una delle principali vie che verranno percorse alla continua ricerca di prestazioni sempre più elevate. Per questo motivo la ricerca applicata in questo campo è fondamentale per contribuire allo sviluppo tecnico ed industriale del Paese. Con la speranza che l'impegno profuso in tal senso abbia portato un seppur minimo contributo a questo sviluppo non può mancare un riconoscimento all'indispensabile lavoro quotidiano delle persone che mi hanno assistito. Riconoscimento dovuto anche all'Istituzione pubblica che essi, assieme a molti altri, vanno a formare: il Politecnico di Milano da cui ho ricevuto una formazione tecnica e personale dal valore inestimabile culminata ad oggi nel lavoro descritto in queste pagine.

Appendice A

DATASHEETS

A.1 – Resina HexFlow RTM6 by HEXCEL



Description

HexFlow® RTM 6 is a monocomponent resin already degassed, specifically developed to fulfil the requirements of the aerospace and space industries in advanced resin transfer moulding (RTM) process.

Nature

HexFlow® RTM 6 is a premixed epoxy system for service temperatures from -60°C up to 180°C (-75°F up to 350°F). At room temperature, it is a brown translucent paste but its viscosity decreases quickly by increasing the resin temperature.

Advantages

- Monocomponent system
- Already degassed. Ready for use
- High glass transition temperature
- Excellent hot/wet properties
- Easy to process (low injection pressure)
- Long injection window \leq 150 min at recommended injection temp.
- Low moisture absorption
- Short, simple cure cycles

Availability

HexFlow® RTM 6 resin is available with a wide range of Injectex®, HexForce® and multiaxials (carbon, glass, aramid, hybrid).

Storage

- Shelf Life @ 23°C 15 days minimum
- Guaranteed Shelf Life @ -18°C 9 months

Typical Resin Properties

Gel Time

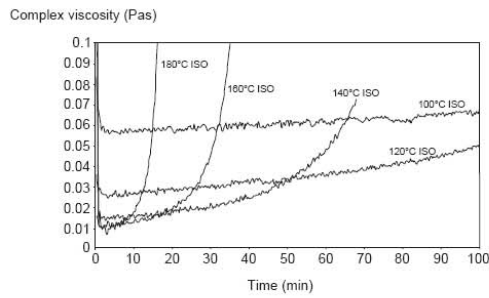
Temperature (°C)	Time (min)
120	> 240
140	95
180	30
210	12
240	5



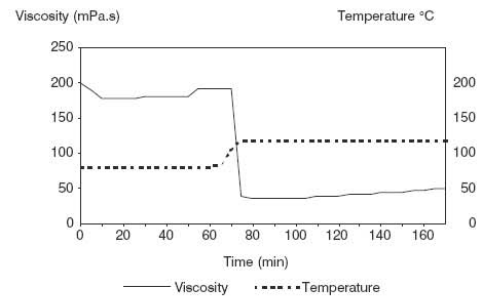


HexFlow® RTM 6

Viscosity Profile

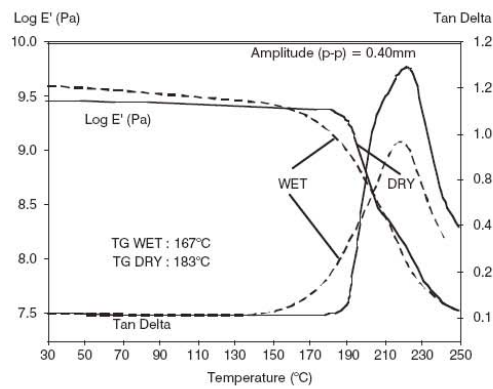


HexFlow® RTM 6 Isothermal viscosity



Viscosity for a standard injection cycle

Glass Transition Temperature



Comparison dry/wet (14 days in water/70°C)

Viscosity evolution versus storage time at 80°C

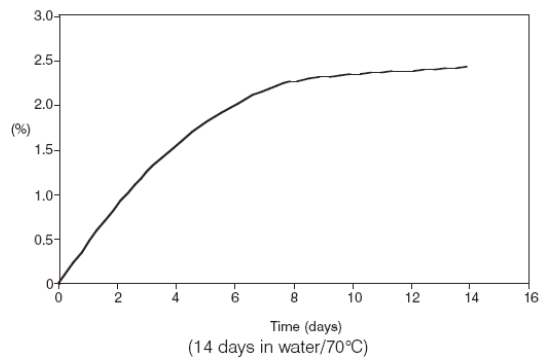
	Initial viscosity 120°C (mPa.s)	Viscosity after 2h at 120°C (mPa.s)
T0	33	59
T0 + 2h30 80°C	32	59
T0 + 5h00 80°C	33	63
T0 + 7h30 80°C	35	75
T0 + 10h00 80°C	38	89

T0: time to reach 80°C.



180°C epoxy system for Resin Transfer Moulding monocomponent system

Water Pick-up (neat resin)



Neat Resin Properties

	Tensile	Flexure
Strength (MPa)	75	132
Modulus (MPa)	2890	3300
Strain (%)	3.4	
Standard specifications	ASTM D638	ASTM D790

Uncured resin density: 1.11 g/cm³ at 25°C
 Cured resin density: 1.14 g/cm³ at 25°C
 Fracture toughness (G_{1C}/ASTM E399): 168 J/m²

Properties on Composite Laminate

Composition of the laminate: Injectex® G0926: 5H Satin weave of 370g/m², HR 6K
 Epoxy powdered fabric
 Fibre volume fraction: 57%
 HexFlow® RTM 6 resin
 Injection pressure of 1 bar + vacuum in mould
 Cure cycle 75 min at 160°C
 Post-cure cycle 120 min at 180°C (1°C/min)

Dry/RT Properties

	Tensile Warp	I.L.S. Warp	Compression Warp	In Plane Shear
Strength (MPa)	860	67	700	100
Modulus (GPa)	63	-	60	4.3
Standard specifications	Pr EN 2597 B	Pr EN 2563	Pr EN 2856 TA	AiTM 1.0002



HexFlow® RTM 6 Product Data

Wet/80°C Properties

	Tensile Warp	I.L.S. Warp	Compression Warp	IPS
Strength (MPa)	830	44	536	78
Modulus (GPa)	63	-	63	35
Standard specifications	Pr EN 2597 B	Pr EN 2563	Pr EN 2850 TA	AiTM 1.0002

Process Specification

Injection:

- Preheat resin at 80°C
- Preheat the mould at 120°C
- Inject the resin (80°C) under vacuum/low pressure (1 to 3 bar)

Standard Cure and Post-cure Cycle

Cure in mould: 75 min at 160°C
 Free standing post-cure: 120 min at 180°C (ramp: 1°C/min)

Cure Cycle Possibilities

		Cycle No.1	Cycle No.1 +P.C.	Cycle No.2	Cycle No.3	Cycle No.4	Cycle No.5
Cure cycle							
160°C	min	75	75	120	/	/	/
180°C	min	/	120	/	60	90	120
α poly	%	91	94	91	95	96	96
DMA dry							
Glass Transition	°C	160	183	173	189	193	196
Tan δ onset	°C	166	189	174	194	196	198
Tan δ max	°C	224	222	224	224	222	222
Moisture weight gain 14 days at 70°C	%	2.1	2.4	2.1	2.5	2.55	2.55
DMA wet							
Glass Transition	°C	150	167	155	170	169	170
Tan δ onset	°C	153	162	158	164	165	167
Tan δ max	°C	219	219	195-219	186-215	188-219	187-220

Important

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required. All sales are made subject to our standard terms of sale which include limitations on liability and other important terms.


*Copyright Hexcel Corporation
 Publication ITA 065d (March 2007)

A.2 - Tessuti in fibra di carbonio SEAL

TESSUTI IN FIBRA DI CARBONIO				CARBON FABRICS						
ARTICOLO	fili x cm		fibra		spessore		peso		armatura	
	ordito	trama	ordito	trama	thickness		ordito	trama	totale	
ARTICLE	threads x cm		fibre		(mm) ± 15%		warp	weft	total	weave
	warp	weft	warp	weft	(UNI EN ISO 5084)		(g/mq) ± 4%			
	(UNI EN 1049-2)		(tex)		(UNI EN 5114-82)					(UNI 8099)
CC 284	7,0	7,0	HS 3K	HS 3K	0,30	140	140	280	balavia 2/2	twill 2/2
CC 285	1,7	1,8	HS 12K	HS 12K	0,34	136	144	280	tela	plain
CC 288	3,5	3,5	HS 6K	HS 6K	0,32	140	140	280	raso lurco	crowsfoot satin
CC 289	7,0	7,0	HS 3K	HS 3K	0,33	140	140	280	raso da 5	5 H satin
CC 292	4,5	5,3	HS 3K	HS 6K	0,34	90	210	300	tela	plain
CC 301	3,7	3,7	HS 6K	HS 6K	0,33	150	150	300	balavia 2/2	twill 2/2
CC 302	3,7	3,7	HS 6K	HS 6K	0,37	150	150	300	tela	plain
CC 370	4,6	4,6	HS 6K	HS 6K	0,36	184	184	368	raso da 5	5 H satin
CC 371	4,6	4,6	HS 6K	HS 6K	0,36	184	184	368	raso lurco	crowsfoot satin
CC 380	9,5	9,5	HS 3K	HS 3K	0,37	190	190	380	raso da 8	8 H satin
CC 381	2,3	2,3	HS 12K	HS 12K	0,42	190	190	380	balavia 2/2	twill 2/2
CC 420	2,5	2,6	HS 12K	HS 12K	0,38	204	212	416	balavia 2/2	twill 2/2
CC 450	5,6	5,6	HS 6K	HS 6K	0,43	225	225	450	balavia 4/4	twill 4/4
CC 600	3,8	3,8	HS 12K	HS 12K	0,60	300	300	600	balavia 2/2	twill 2/2
CC 700	4,2	4,2	HS 12K	HS 12K	0,65	336	336	672	balavia 2/2	twill 2/2
CC 950	5,7	5,7	HS 12K	HS 12K	0,83	460	460	920	raso da 8	8 H satin
CPA*	5,1	7,3	3K(C)	3K(C)-334(PES)	0,28	100	90(C)-15(PES)	205	balavia 2/2	twill 2/2
CPB*	3,0	6,0	12K(C)	12K(C)-334(PES)	0,60	240	240(C)-5(PES)	485	tela	plain

*C=carbonio, PA=poliestere rosso; PB= poliestere blu
 *C=carbon, PA=red polyester, PB=bleu polyester

Tutti i prodotti possono essere forniti impregnati coi vari sistemi di resina SEAL
 All products can be supplied impregnated with the different SEAL resin systems



Tecnologia al servizio della Creatività.
Technology for your imagination.

SEAL SpA - Via Quasimodo 33 - 20025 Legnano (MI)
 Tel. +39 0331 467 555 - Fax. +39 0331 467 777
 e-mail: info.it@seal.it
 web site: www.seal.it

TEXIPREG®
TEXINDUSTRIA®

Valori indicativi / indicative values

1_1_Industria_tessuti_in_fibra_di_carbonio_pag2_16.02.01 Rev. 9

Bibliografia

- [1] Thierry Woignier, J. Primera, L. Anes, *The sol-gel Process: a method to prepare synthetic materials and to understand natural materials*.
- [2] D. Lukas and N. Pang. *Wetting of a fiber bundle in fibrous structures*. Polymer composites, 23(5), 2003.
- [3] Doh Hoon Lee, Woo Il Lee, Moon Koo Kang, *Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process*. Composites Science and Technology, (66), 2006
- [4] Kevin Potter, *Resin transfer moulding*, Chapman & Hall, 1997
- [5] C. Lekakou, S. Cook, Y. Deng, T.W. Ang, G.T. Reed, *Optical fibre sensors for monitoring flow and resin curing in composites manufacturing*, Composites: Part A 37 (2006) 934–938
- [6] Goker Tuncol, Murat Danisman, Alper Kaynar, E. Murat Sozer, *Constraints on monitoring resin flow in the resin transfer molding (rtm) process by using thermocouple sensors*. Composites: Part A, 38:1363– 1386, 2007.
- [7] Raman Kashyap, *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, 1999
- [8] Buonocuore Giancarlo, *Monitoraggio dei parametri di processo e della velocità d'infusione nella produzione di compositi mediante VaRTM*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2009
- [9] Gerosa Renato, *Monitoraggio del processo VaRTM per la produzione di compositi e caratterizzazione dei laminati*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2008
- [10] Francesco Vincenzo, *Caratterizzazione della fase di infusione di un processo RTM attraverso misure di permeabilità*, Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2004

- [11] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, J.Brèard, *Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites*, Composites Science and Technology 66 (2006) 475–486
- [12] N. Kuentzer, P. Simacek, S.G. Advani, S. Walsh, *Correlation of void distribution to VARTM manufacturing techniques*, Composites: Part A 38 (2007) 802–813
- [13] D. Bender, J. Schuster, D. Heider, *Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing*. Composites Science and Technology 66 (2006) 2265–2271
- [14] W. Du, X.M. Tao, H.Y. Tam, C.L. Choy, *Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites*. Composite Structures 42 (1998) 217-229
- [15] K. Haase, *Strain sensors based on Bragg Gratings*, IMEKO, 2007
- [16] F. Felli, A. Brotzu, *Impiego di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche*, Sapienza Università di Roma, 2010