



# **POLITECNICO**

## **MILANO 1863**

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica  
Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali

### **Sviluppo di un trasduttore in fibra ottica per l'identificazione dei carichi nelle strutture aeronautiche**

Supervisore: Ing. Paolo Bettini

Co-Supervisore: Ing. Daniela Rigamonti

Tesi di:

Alberto Grosso

Matricola n. 864780

Anno accademico 2018-2019



# Indice

<b>Indice</b> .....	<b>I</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>III</b>
<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>V</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>
<b>1. Stato dell'arte</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introduzione .....	1
1.2. Monitoraggio .....	4
1.2.1. <i>Estensimetri</i> .....	6
1.2.2. <i>Sensori piezoelettrici</i> .....	7
1.2.3. <i>MEMS</i> .....	9
1.2.4. <i>Fibre ottiche</i> .....	11
1.3. Diagnosi e prognosi .....	13
<b>2. Monito-Ring</b> .....	<b>17</b>
2.1. Teoria delle fibre ottiche .....	17
2.2. Sensori e interrogatori .....	19
2.2.1. <i>FBG</i> .....	20
2.2.2. <i>Connettorizzazione</i> .....	21
2.2.3. <i>Micron optics</i> .....	24
2.3. Teoria del Monito-Ring .....	25
2.4. Progettazione .....	27
2.5. Produzione del Monito-Ring .....	29
2.5.1. <i>Stampo</i> .....	29
2.5.2. <i>Sequenza di laminazione e inglobamento fibra</i> .....	30
2.5.3. <i>Ciclo di reticolazione e installazione</i> .....	33
2.6. Test e risultati .....	34
2.6.1. <i>Setup</i> .....	35
2.6.2. <i>Risultati</i> .....	36
<b>3. Studio della risposta ad un carico di taglio</b> .....	<b>39</b>
3.1. Tipologie di test .....	39
3.1.1. <i>Test di Iosipescu</i> .....	40
3.1.2. <i>Arcan Test</i> .....	42
3.1.3. <i>Trave di Wagner</i> .....	44
3.2. Studio preliminare .....	45
3.2.1. <i>I componenti</i> .....	47
3.2.2. <i>Modellazione con il metodo agli elementi finiti</i> .....	49
3.3. Produzione setup sperimentale .....	52

<b>4. Discussione dei risultati.....</b>	<b>55</b>
4.1. Risultati dell'analisi FEM .....	55
4.2. Fase di test .....	59
4.3. Risultati ed analisi dei dati .....	62
4.3.1. <i>FBG</i> .....	62
4.3.2. <i>Estensimetri</i> .....	65
<b>5. Conclusioni e sviluppi futuri .....</b>	<b>67</b>
<b>Appendice .....</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>75</b>

## Indice delle figure

Figura 1 - Confronto fra sistemi biologici e strutture intelligenti.....	2
Figura 2 - Monitoraggio delle strutture spaziali <sup>[4]</sup> .....	3
Figura 3 - Schema a blocchi di un sistema SHM.....	4
Figura 4 - Schema estensimetro .....	6
Figura 5 - Struttura atomica materiali piezoelettrici.....	7
Figura 6 - Effetto dielettrico diretto e inverso .....	8
Figura 7 - Polarizzazione dei materiali piezo-elettrici.....	9
Figura 8 - Struttura interna della fibra ottica .....	11
Figura 9 - Riflessione e rifrazione nelle fibre ottiche .....	18
Figura 10 - Effetti del raggio di curvatura .....	19
Figura 11 - Sensori a reticolo di Bragg .....	20
Figura 12 - Variazione della spettro di risposta .....	21
Figura 13 - Strumenti per la rimozione del coating ed il taglio della fibra ottica.....	22
Figura 14 - FSM 60S Fusion Splicer .....	23
Figura 15 - Difetti di giunzione delle fibre ottiche.....	24
Figura 16 - Micron Optics sm130 .....	25
Figura 17 - Posizionamento delle fibre ottiche inglobate nel Monito-Ring.....	26
Figura 18 - Andamento dei carichi a trazione e flessione ricavati numericamente.....	27
Figura 19 - Schema della piastra circolare .....	28
Figura 20 - Stampo, controstampo e dima per la produzione del Monito-Ring .....	30
Figura 21 - Dima per la produzione degli anelli di preimpregnato.....	31
Figura 22 - Strumento per l'identificazione della posizione del sensore FBG. Particolare della fibra .....	32
Figura 23 - Fissaggio degli elementi sulla base di supporto .....	33
Figura 24 - Sacco da vuoto prima dell'inserimento in autoclave .....	34
Figura 25 - Setup sperimentale per test a trazione e flessione .....	35
Figura 26 - Risultati sperimentali per la trazione .....	36
Figura 27 - Risultati sperimentali per la flessione .....	37
Figura 28 - Traslazione dello spettro di carico.....	38
Figura 29 - Azione di taglio .....	40
Figura 30 - Test di losipescu.....	41
Figura 31 - Schema del test di losipescu. Analisi dei carichi <sup>[12]</sup> .....	42

---

Figura 32 - Differenti configurazione dell'Arcan test <sup>[16]-[17]</sup> .....	43
Figura 33 - Schema del carico diagonale <sup>[18]</sup> .....	44
Figura 34 - Configurazione del test di Wagner a più pannelli .....	45
Figura 35 - Componenti e telaio .....	48
Figura 36 - Pannello ottagonale .....	48
Figura 37 - Modellazione su Abaqus del assemblaggio.....	49
Figura 38 - Condizioni di carico e vincoli applicati .....	50
Figura 39 - Mesh del modello.....	51
Figura 40 - Piastra ottagonale .....	52
Figura 41 - Fasi di lavorazione del telaio e foratura .....	53
Figura 42 - Foratura del telaio e assemblaggio .....	54
Figura 43 - Andamento dello sforzo in prossimità del carico .....	56
Figura 44 - Andamento delle deformazioni.....	57
Figura 45 - Andamento delle deformazioni.....	58
Figura 46 - Trave di Wagner, vista anteriore .....	59
Figura 47 - Trave di Wagner, vista posteriore .....	60
Figura 48 - Setup sperimentale completo. Base di supporto .....	60
Figura 49 - Sforzo rilevato dal Monito-Ring .....	62
Figura 50 – Sforzi rilevati dal Monito-Ring.....	63
Figura 51 - Fitting dei set di dati FBG R ed FBG B.....	64
Figura 52 – Sforzi rilevati dagli estensimetri .....	65
Figura 53 - Fitting dal set di dati degli estensimetri.....	65
Figura 54 - Comparazione FBG e estensimetro .....	66

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Tipologie di sensori .....	5
Tabella 2 - Approcci alla diagnostica <sup>[9]</sup> .....	14
Tabella 3 - Approcci alla prognostica .....	16
Tabella 4 - Dimensioni di piastra e Monito-Ring .....	28

# Nomenclatura

CNC: Computer Numerical Control

FBG: Fiber Bragg Gratings

FEM: Finite Element Method

FML: Fiber Metal Laminate

HUMS: Health and Usage Monitoring System

IEM: Interferenze Elettromagnetiche

MEMS: Micro-Electro-Mechanical Sensors

SHM: Structural Health Monitoring

$T_c$ : Curie Temperature



## **Abstract**

Il Monito-Ring è un sensore sviluppato a partire da un'idea del C.I.R.A., il Centro Italiano di Ricerca Aerospaziale. Esso sfrutta la tecnologia delle fibre ottiche che permettono di realizzare questo strumento per l'identificazione di diversi tipi di carico.

Il trasduttore è realizzato con un materiale composito fibra di vetro e resina epossidica. Una delle peculiarità dei materiali compositi è quella di poter inserire fra i vari strati determinati componenti, nel nostro caso le fibre ottiche; inoltre la deformabilità del materiale composito utilizzato permette di applicare il Monito-Ring su molteplici tipologie di strutture, anche deformabili.

Le fibre ottiche sono collocate fra i vari strati del materiale composito in diverse configurazioni, una a singolo ed una a doppio giro. Avere le fibre ottiche posizionate su diverse circonferenze e diverse altezze permette di discernere diversi tipi di carico applicati alla struttura.

Il lavoro di tesi presentato di seguito prosegue lo studio già iniziato su questo particolare sensore, concentrandosi sull'analisi di una struttura soggetta a taglio puro e di come il Monito-Ring sia in grado di rilevare questa tipologia di condizione di carico.

Inizialmente è stato realizzato uno studio numerico con l'approccio agli elementi finiti, per valutare le condizioni di funzionamento del sensore, estrapolando le deformazioni in corrispondenza del percorso circolare seguito dalla fibra ottica. Successivamente è stato effettuato un test reale e si è realizzata una comparazione tra dati sperimentali ottenuti con diversi strumenti di rilevazione.



# 1. Stato dell'arte

Il primo capitolo tratta lo stato dell'arte di tutte le tecnologie ed i materiali inerenti al lavoro che è stato sviluppato.

Nel primo paragrafo viene introdotto il concetto di *Structural Health Monitoring*, andando ad analizzare le ragioni per cui questo approccio si sta rivelando di sempre maggiore interesse in diversi campi ingegneristici. Nel secondo paragrafo si parla più specificatamente di ciò che concerne il monitoraggio delle strutture, mostrando quali tecniche e quali strumenti sono oggi più utilizzati per valutare il regime di funzionamento e lo stato di sforzo dei componenti analizzati. Infine nell'ultimo paragrafo vengono illustrati le modalità di diagnosi, che aiutano a ricostruire le condizioni di carico e gli eventuali danni a cui può essere soggetta la struttura, e di prognosi, che consentono di stimare quali possano essere le prestazioni future e valutare la vita operativa residua.

## 1.1. Introduzione

Nel settore dell'industria la ricerca e l'innovazione tecnologica hanno da sempre avuto un ruolo fondamentale per ottenere un vantaggio competitivo. Questo concetto viene ulteriormente amplificato quando si parla del settore aeronautico, che spesso si è trovato ad essere il primo banco di prova per lo studio ed applicazione delle tecnologie più all'avanguardia.

Se un tempo lo studio di nuove tecnologie in campo aeronautico si concentrava principalmente sull'aumento delle prestazioni dei velivoli, oggi sono altri gli aspetti chiave che vengono presi in esame. Compatibilità ambientale, risparmio energetico, affidabilità, fattori di risparmio economico sono oggi gli argomenti chiave verso i quali porre attenzione quando si intende investire tempo e denaro nella ricerca di nuove soluzioni.

Concentrandoci sul tema dell'affidabilità, l'utilizzo di nuovi materiali, l'ottimizzazione dei processi produttivi e l'affinamento delle tecniche di ispezione, garantiscono degli ottimi risultati. L'adozione di sistemi multifunzionali in grado di assolvere a diversi compiti è di fondamentale importanza, in quanto si rende possibile rilevare in tempo reale difetti in fase di produzione o dovuti alla degradazione delle strutture, minimizzare gli effetti di carichi inusuali, ridurre gli effetti di vibrazioni e di fatica. In tale modo è possibile monitorare il materiale dalla fase di produzione fino alla fine del suo ciclo di vita (*from the cradle to the grave*) <sup>[1]</sup>.

Lo *Structural Health Monitoring* (SHM), ovvero il monitoraggio dello stato di salute della struttura di interesse, è una tecnologia in rapida espansione che trova applicazioni su ogni tipo di struttura dall'ambito aeronautico <sup>[2]</sup> all'ambito civile <sup>[3]</sup> e molti altri. I possibili danni alla struttura possono essere rilevati ed interpretati da sistemi integrati nella struttura stessa, i quali trasmettono le informazioni ad un sistema esterno in modo da poter valutare la situazione in tempo reale. Le *Smart Structures* con sensori ed attuatori integrati, hanno la capacità di monitorare l'ambiente attraverso i sensori e di raccogliere ed analizzare i dati in modo da azionare gli attuatori in maniera appropriata. In questo modo le strutture intelligenti si ispirano alle proprietà dei sistemi biologici con lo scopo di incrementare l'efficienza delle strutture <sup>[1]</sup>. Come nel corpo umano il sistema nervoso riceve segnali dall'esterno e li manda al cervello per interpretarli e rispondere nella maniera adatta, così si comportano anche le strutture intelligenti.

In conclusione, l'SHM può essere definito come il monitoraggio in tempo reale di sistemi complessi e dei loro componenti utilizzando sensori integrati o installati successivamente, con lo scopo di assicurare l'integrità strutturale di un componente durante il normale utilizzo ed ottimizzare le ispezioni periodiche per la verifica delle condizioni di fatica, corrosione ed altri fenomeni che possano compromettere la funzionalità dei componenti <sup>[4]</sup>.

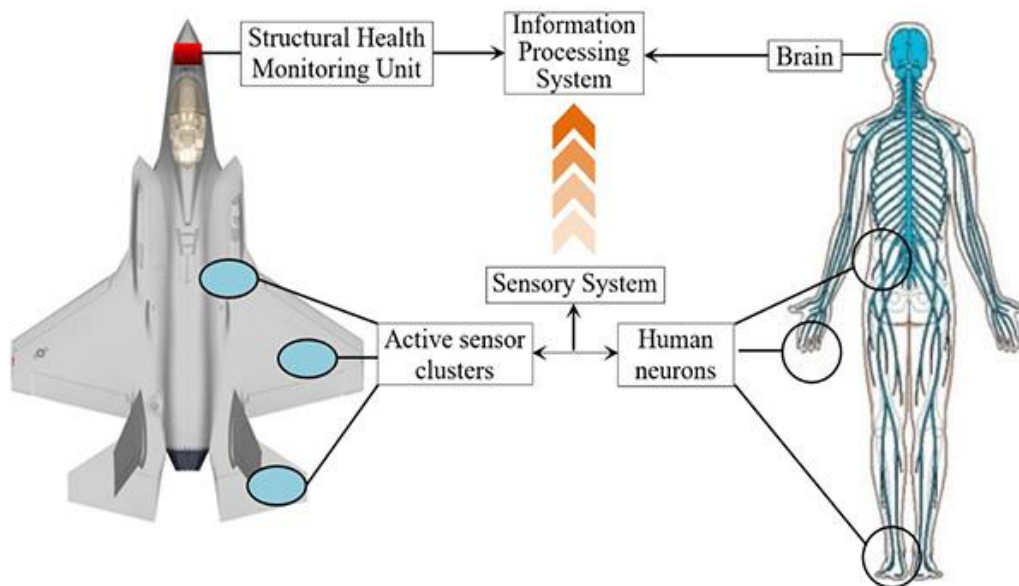


Figura 1 - Confronto fra sistemi biologici e strutture intelligenti

Lo SHM può anche essere definito *Health and Usage Monitoring System* (HUMS), ovvero un sistema che monitora l'utilizzo e la salute della struttura, quando la capacità del sistema di monitorare con continuità la salute della struttura permette di mantenere la funzionalità del componente quando l'identificazione del danno è già avvenuta.

La motivazione più importante per l'applicazione dell'*health monitoring* è la sicurezza delle strutture e di coloro che ne usufruiscono; tuttavia anche l'aspetto economico è un fattore chiave che spinge allo sviluppo e sempre maggiore applicazione di queste tecniche. L'utilizzo dello SHM permette di elevare gli standard di sicurezza ed è dunque possibile in fase di progetto applicare dei fattori di sicurezza ridotti. Ciò comporta la possibilità di ridurre le dimensioni di alcuni componenti importanti ottenendone un consistente risparmio di peso e di conseguenza, soprattutto in ambito aeronautico, risparmio di denaro. Essendo le strutture costantemente monitorate si possono anche allungare i tempi delle ispezioni programmate riducendo il tempo a terra del velivolo e massimizzando l'operatività. Gli intervalli di ispezione sono calcolati in funzione di modelli statistici basati su test a fatica e corrosione che sono i principali fattori di rischio per le strutture. Questi modelli possono essere ottimizzati sfruttando i dati reali raccolti in tempo reale.

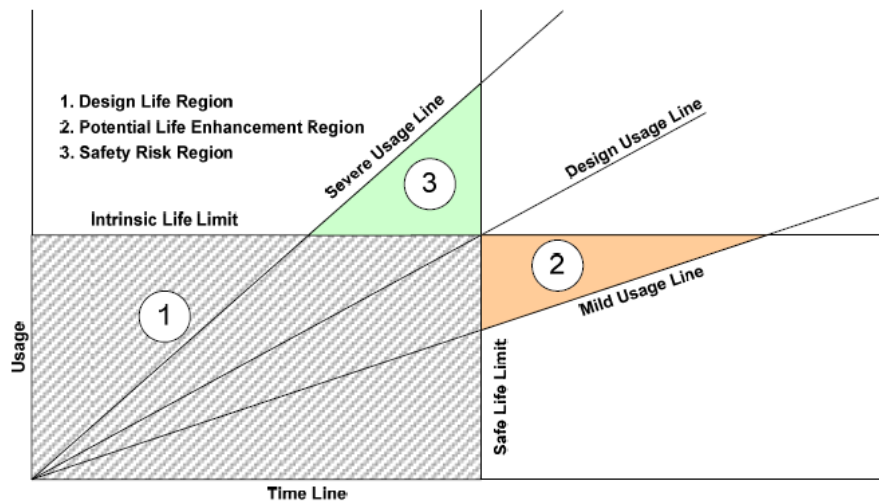


Figura 2 - Monitoraggio delle strutture spaziali <sup>[4]</sup>

L'*health monitoring* è un processo simile a quello effettuato nei controlli non distruttivi, con la differenza che il monitoraggio viene fatto in tempo reale su un componente durante le normali operazioni, permettendo di rilevare i carichi applicati e realizzare delle previsioni riguardo le prestazioni che il componente sarà in grado di fornire in futuro <sup>[5]</sup>.

In Figura 3 è descritto con uno schema a blocchi l'organizzazione tipica di un sistema SHM.

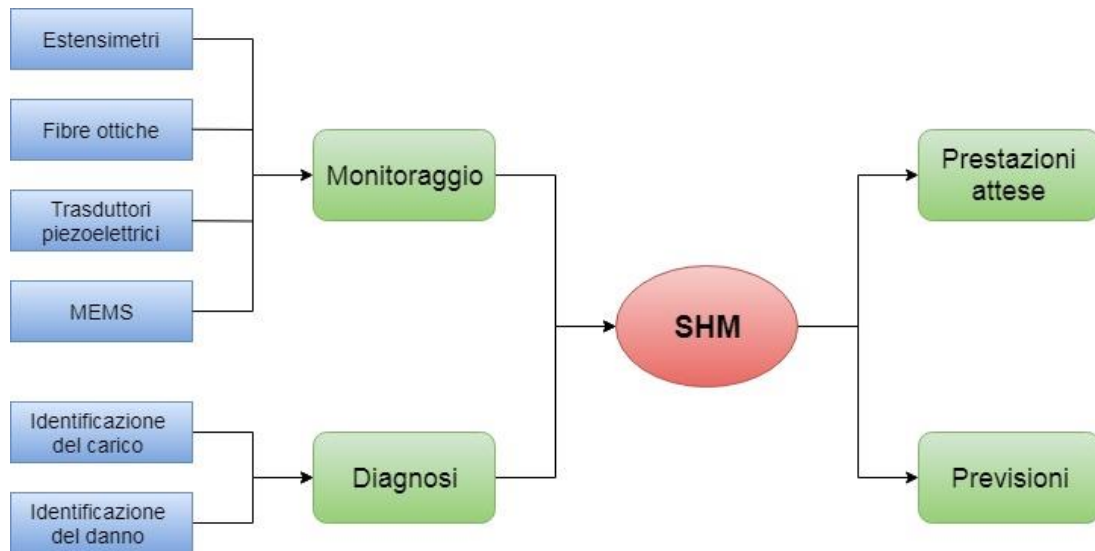


Figura 3 - Schema a blocchi di un sistema SHM

Le strutture intelligenti sono in grado di identificare quattro caratteristiche principali in relazione all'idoneità di un componente:

- I carichi, che possono essere dovuti alle condizioni di utilizzo o a fattori ambientali;
- I danni causati dai carichi;
- L'accrescimento del danno durante la vita operativa;
- Le prestazioni garantite mano a mano che il danno si propaga.

La prima parte del sistema consiste nelle funzioni di monitoraggio dell'integrità strutturale. A tale scopo possono essere utilizzati diversi tipi di sensori che vengono scelti in funzione del tipo di fenomeno fisico che scaturisce dal danno e che viene sfruttato dal sensore per generare il segnale. Il segnale viene acquisito dal controllore che genera la diagnostica del componente. Ciò consiste nell'identificare i carichi applicati e determinare la presenza di danni strutturali e la loro posizione. Infine è possibile effettuare una stima della vita residua del componente in funzione della conoscenza specifica delle meccaniche di danneggiamento.

## 1.2. Monitoraggio

Il monitoraggio della struttura viene effettuato attraverso i sensori, che ne analizzano le caratteristiche per valutare la presenza o meno di difetti. I sensori in generale possono essere applicati a qualsiasi tipo di tecnologia, indipendentemente dalla loro tipologia. La differenza consiste

in come i segnali rilevati vengono interpretati in funzione del comportamento meccanico del componente. Per questo lo SHM deve tenere in conto del tipo di materiale di cui è costituito il componente, come ad esempio alluminio o composito.

I materiali compositi hanno determinate peculiarità che li rendono estremamente performanti soprattutto nel campo dell'aviazione civile e militare. Tuttavia presentano un comportamento estremamente differente rispetto al ben più comune e conosciuto alluminio. I materiali compositi infatti presentano una elevata fragilità, il che riduce drasticamente il campo di deformazione prima di arrivare al cedimento definitivo del componente. La struttura interna dei materiali compositi è anisotropa e le proprietà dipendono dall'orientazione delle fibre all'interno della matrice. Questa particolare conformazione rende i tipi di danno e la loro propagazione di difficile analisi e di conseguenza risulta complesso determinare anche la vita residua del componente. In questo senso lo SHM si rivela di grande importanza, perché permette di monitorare costantemente lo stato di sforzo e il possibile insorgere di danneggiamenti. Diverse tecniche sono al momento utilizzate ed altre sono in fase di sviluppo; nella tabella seguente ne vengono elencate alcune, che saranno in seguito analizzate:

<i>Sensore</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Tipologia di danno</i>	<i>Area analizzata</i>
<i>Estensimetri</i>	Strumenti per la misurazione di carichi/deformazioni	Fessure	Locale
<i>Piezoelettrici</i> <i>Piezo-ceramici</i>	Materiali piezoelettrici per la rilevazione di danni	Fessure Corrosione	Estesa
<i>MEMS</i>	Strumenti integrati che sfruttano componenti elettriche e meccaniche	Carichi Impatti Delaminazione	Locale
<i>Fibre ottiche</i>	Guida d'onda per un segnale luminoso che attraversa il sensore	Carichi Impatti Delaminazione	Locale Estesa

*Tabella 1 - Tipologie di sensori*

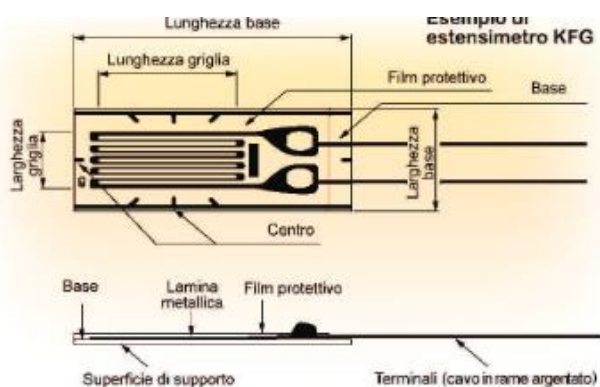
Un sensore viene definito passivo quando non agisce sulla struttura in nessun modo; non deve essere alimentato ma rileva direttamente la grandezza di interesse. Un sensore viene invece definito attivo quando viene introdotta dell'energia da un attuatore ed il sensore rileva la variazione di

segnale che deriva da come la struttura reagisce all'energia introdotta. I sensori devono essere in grado di minimizzare la sensibilità dovuta alla sorgente di variazione del segnale e massimizzare la sensibilità rispetto ai parametri di interesse. Alcune tipologie di sensori attivi possono anche essere utilizzati come attuatori.

### 1.2.1. Estensimetri

Gli estensimetri sono degli strumenti di misurazione di forza e deformazione usati per il monitoraggio del comportamento delle strutture. E' un sensore attivo, ovvero è alimentato e utilizza energia proveniente dall'esterno per garantire il funzionamento. Gli estensimetri sono sensibili alle deformazioni, quindi anche a carichi flessionali, assiali, torsionali e a taglio che determinano tali deformazioni. Per ottenere un buon funzionamento del sensore esso deve essere di piccole dimensioni e inerzia, in modo da minimizzare l'errore introdotto dall'elemento stesso, e mostrare una risposta lineare all'interno del range di interesse della misurazione.

L'estensimetro elettrico è uno degli strumenti più diffusi per le misure di deformazione. Esso è composto da una pista conduttiva deposta su un film polimerico. La relazione fondamentale dell'estensimetria fornisce la variazione di resistenza del conduttore soggetto a deformazione. Quindi quando alimentato l'estensimetro produce una variazione di tensione che può essere letta da un voltmetro.



Relazione fondamentale dell'estensimetria:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

Figura 4 - Schema estensimetro

L'estensimetro è sensibile alle deformazioni dovute a variazioni sia meccaniche che termiche. Quindi quando la struttura è soggetta a stress meccanico o termico, la resistenza elettrica del conduttore



varia in funzione della deformazione indotta. Il film polimerico che ricopre la resistenza serve a garantire l'isolamento elettrico tra il sensore ed il componente.

Gli estensimetri sono vantaggiosi perché basati su una tecnologia semplice e ben consolidata, sono facili da installare ed hanno un costo molto basso. Tuttavia hanno una bassa sensibilità e richiedono sistemi di amplificazione del segnale e riduzione del rumore.

### 1.2.2. Sensori piezoelettrici

I sensori piezoelettrici sfruttano l'effetto piezoelettrico, un fenomeno elettromeccanico che accoppia il campo elastico con quello elettrico. Il requisito fondamentale affinché esista tale tipo di interazione in un cristallo è che alcuni dei suoi assi posseggano intrinsecamente una polarità. Il reticolo dei cristalli piezoelettrici è una struttura metastabile cubica a facce centrate in cui l'atomo centrale si trova confinato in una posizione circondata da spazi ottaedrici a minore energia. Quando il materiale si trova ad una temperatura inferiore alla temperatura di Curie ( $T_c$ ), la struttura interna si comprime non lasciando spazio all'atomo centrale che è costretto a spostarsi dalla posizione centrale. Ciò si traduce in una distorsione della struttura atomica causando una carica permanente che conferisce al materiale proprietà piezoelettriche e ferromagnetiche.

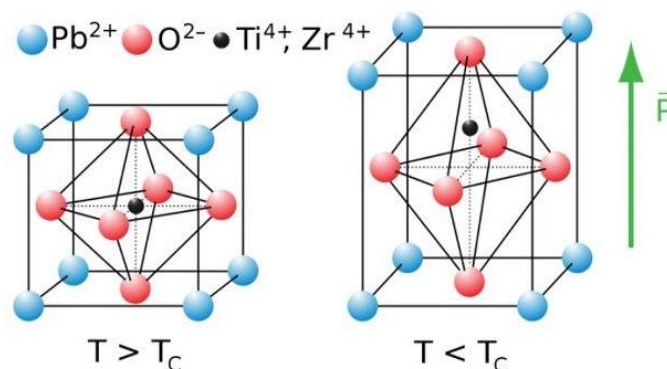


Figura 5 - Struttura atomica materiali piezoelettrici

Un componente realizzato in materiale piezoelettrico può svolgere la funzione sia di sensore che di attuttore. Si definisce effetto dielettrico diretto quando il reticolo viene deformato per via di una deformazione meccanica e si verifica uno squilibrio nella cariche elettriche che si estrinseca nella formazione di un dipolo elettrico. In questo senso esso rappresenta un sensore passivo, senza bisogno di alimentazione. Si presenta invece l'effetto dielettrico inverso quando a causa dell'azione

di un campo elettrico l'atomo centrale supera la soglia di potenziale e si sposta in uno dei due spazi ottaedrici realizzando una configurazione deformata a minore energia.

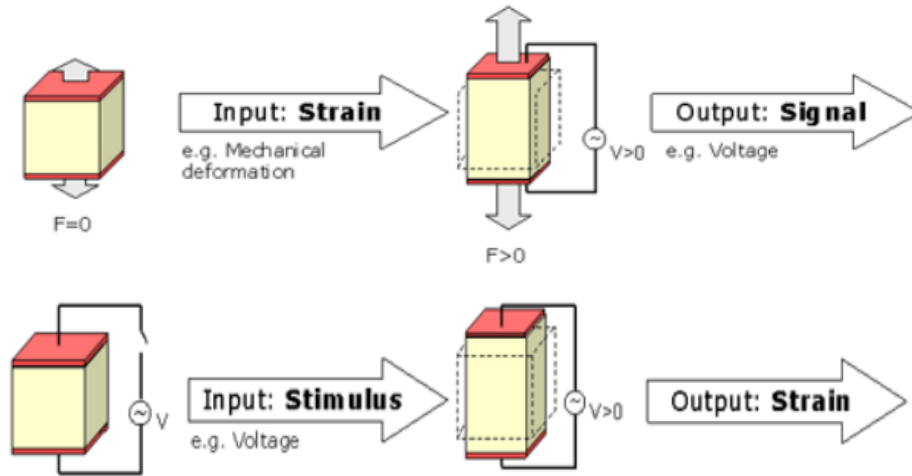


Figura 6 - Effetto dielettrico diretto e inverso

I due effetti dielettrici diretto e inverso sono i responsabili della bi-direzionalità propria dei materiali piezoelettrici e quindi del loro duplice utilizzo sia come sensori che come attuatori. Le proprietà piezoelettriche sono presenti in un certo numero di cristalli in natura, ma al giorno d'oggi è possibile realizzare artificialmente materiali con effetti piezoelettrici di intensità molto più elevata. Ne sono un esempio le ceramiche cristalline. Esse sono prodotte attraverso un processo di sinterizzazione in cui si mescolano assieme i componenti, solitamente polvere di zirconio, ossidi di titanio e ossidi di piombo, scaldati e mescolati a temperature elevate (800-1000°C). Successivamente viene fornita la forma desiderata al sensore ed infine si procede al raffreddamento. Queste particolari cariche contengono al proprio interno micro-domini con momenti di dipolo elettrici orientati casualmente ma a risultante nulla. Per sfruttare l'effetto piezoelettrico, si effettua un processo di polarizzazione in modo da cambiare l'orientazione dei momenti di dipolo; investendo il materiale con un campo elettrico costante si genera allineamento dei momenti di dipolo locali facendo seguire loro la direzione scelta.

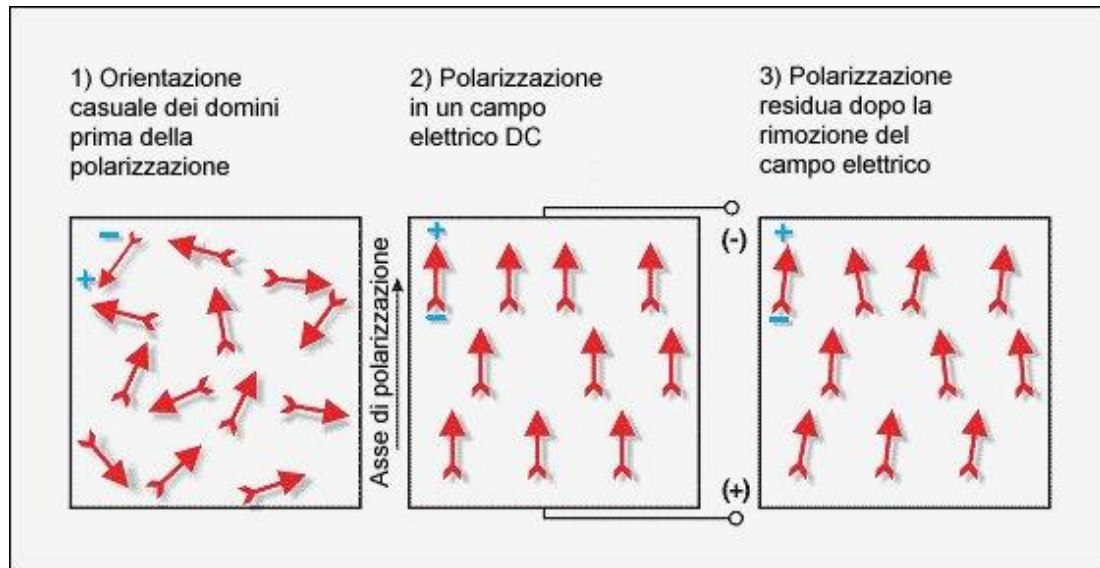


Figura 7 - Polarizzazione dei materiali piezo-elettrici

Il parametro che caratterizza i materiali piezoelettrici è la costante piezoelettrica, che è definita come la polarizzazione elettrica indotta in un materiale per unità di stress meccanico applicato. Quindi l'effetto diretto si manifesta in uno spostamento elettrico direttamente proporzionale allo sforzo applicato. Nel caso inverso la proporzionalità diretta lega il campo elettrico imposto alla deformazione del piezo.

L'uso dei sensori piezoelettrici allo scopo di monitorare le strutture è in continua espansione, grazie alla versatilità e al basso costo che li rendono adatti a diversi tipi di applicazione <sup>[6]</sup>. Le piezoceramiche risultano essere non solo ottimi sensori ma anche attuatori efficienti con ottime risposte in frequenza, utili nel controllo attivo delle vibrazioni delle strutture. Tuttavia le ceramiche presentano una elevata fragilità e una elevata isteresi qualora siano soggette a campi elettrici elevati. Inoltre l'effetto piezoelettrico fornito con la polarizzazione decade per invecchiamento con conseguente degrado delle prestazioni a causa dell'annullarsi nel tempo della polarizzazione. Per ovviare al problema della fragilità delle ceramiche sono stati sviluppati dei sensori piezo-compositi, che sono realizzati inglobando delle fibre in materiale piezoelettrico con direzione specifica all'interno di una matrice di resina.

### 1.2.3. MEMS

Le tecnologie basate sui MEMS (*Micro Electro-Mechanical Sensors*) stanno assumendo sempre più rilevanza come sistemi di monitoraggio delle strutture grazie alle dimensioni estremamente ridotte,

alla compatibilità con le più recenti tecnologie di integrazione e la propria robustezza <sup>[7]</sup>. I MEMS sono dei sensori attivi per cui hanno necessità di un'alimentazione elettrica per funzionare. La maggior parte sono prodotti con processi di micro fabbricazione come la stereolitografia e sono realizzati a base di silicio. Nella micro-fabbricazione dei dispositivi MEMS a base polimerica vengono utilizzati principalmente due tipi di polimeri. Il primo è un polimero strutturale, solitamente un polimero fotosensibile composto da uretano acrilato e acrilico epossidico come componenti principali. La multifunzionalità di tali polimeri permette di ottenere una grande deformabilità quando soggetti a campi elettrici e questo li rende ottimi attuatori per dispositivi basati sulla tecnologia MEMS. In generale questi polimeri sono biocompatibili e quindi utili anche in applicazioni mediche. Il secondo tipo di polimeri è costituito da polimeri sacrificali costituiti da resine acriliche contenenti il 50% di silicio.

I MEMS sono micro meccanismi/macchinari azionati da o generanti elettricità con la capacità di operare sia da attuatori che da sensori. Il loro utilizzo è ampiamente aumentato al punto tale che si possono comunemente trovare in strumenti e dispositivi di uso quotidiano come smartphones, stampanti, Personal Computer oltre che in campi più specifici come quello biomedico. La loro versatilità e compattezza permette di realizzare componenti unici con la tecnologia MEMS, integrando accelerometri, giroscopi, magnetometri e sensori di temperatura in un unico dispositivo<sup>[8]</sup>. Se combinati con sensori piezoelettrici si possono ottenere dei sensori di pressione, in cui l'architettura del componente MEMS comprende un diaframma ed una cavità sigillata. Esistono due metodi utilizzati per valutare il movimento del diaframma causato dalla differenza di pressione: capacitivo o resistivo. Il primo utilizza degli elettrodi depositati sul diaframma mentre il secondo utilizza sensori piezo-resistivi integrati nel diaframma.

Sensori piezoelettrici e capacitivi/resistivi possono essere utilizzati anche per la realizzazione di sensori di umidità relativa. Gli ultimi normalmente contengono uno strato attivo che funge da elemento sensibile. Le caratteristiche elettriche dello strato attivo si modificano in funzione delle reazioni chimiche e fisiche che si instaurano tra lo strato ed il vapore acqueo. Queste alterazioni di capacità o resistenza vengono misurate da elettrodi inglobati. I materiali tipici utilizzati per realizzare lo strato attivo sono costituiti da ceramiche, polielettroliti o ossidi metallici <sup>[7]</sup>.

I MEMS possono essere utilizzati per il monitoraggio del carico attraverso dei sensori distribuiti di variazione angolare applicati su una struttura che si possa deformare sotto l'azione di carichi. Deformazioni distribuite, sforzi e conseguentemente funzioni di carico possono essere calcolati utilizzando i dati ottenuti dai sensori MEMS installati nelle diverse posizioni <sup>[8]</sup>. Tuttavia garantire l'affidabilità dei micro-sensori per applicazioni HUMS risulta essere un compito molto gravoso specialmente considerando le particolari condizioni operative <sup>[7]</sup>.

## 1.2.4. Fibre ottiche

Le fibre ottiche sono strutture in grado di fornire una guida d'onda alla luce, portando il segnale luminoso a seguire un percorso prestabilito. Questo permette di realizzare trasmissioni a distanze anche molto elevate senza incorrere in perdite di potenza del segnale. Le fibre ottiche sono composte da silicio fuso o materiali polimerici che garantiscono un'elevata riduzione delle perdite.

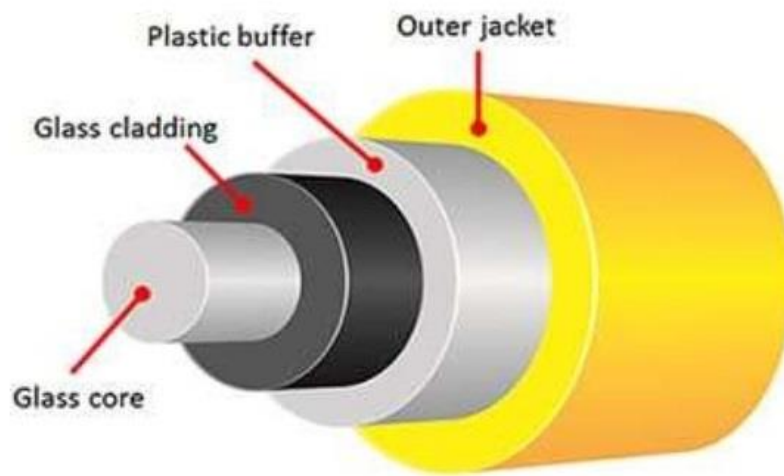


Figura 8 - Struttura interna della fibra ottica

La struttura si può suddividere in diversi strati coassiali:

- *Core*, filamento a sezione circolare del diametro di circa 8  $\mu\text{m}$  composto da fibra monomodale che permette la trasmissione del raggio luminoso;
- *Cladding*, strato vetroso dal diametro esterno di circa 125  $\mu\text{m}$  che presenta un indice di rifrazione minore rispetto a quello del core. La combinazione di core e cladding genera la guida luminosa vera e propria;
- *Coating*, strato protettivo che permette di offrire maggiore resistenza alla fibra ottica. Caratterizzato da spessore variabile in base al tipo di materiale con cui viene realizzato (poli-imide, poli-acrilato);
- *Jacket*, rivestimento esterno che varia in funzione del campo di applicazione a cui sarà destinata la fibra e che garantisce caratteristiche di protezione particolari. Il colore di questo strato esterno rispetta un codice standard che permette di identificare la tipologia di fibra ottica che si sta utilizzando.

La configurazione più semplice è quella con fibra monomodale in cui il core ha diametro molto ridotto ed è possibile trasmettere un solo segnale luminoso. In questo modo il raggio luminoso viaggia in maniera sostanzialmente rettilinea minimizzando le perdite di segnale ed estendendo al massimo la distanza raggiungibile. Situazione più complessa è quella che vede invece la fibra multimodale, la quale presenta un core più grande (fino a 100  $\mu\text{m}$ ) e con un maggiore numero di segnali in ingresso che permettono di trasferire molti più dati; tuttavia le aumentate dimensioni del core comportano un numero maggiore di riflessioni e dunque una minore efficienza di propagazione che comporta una attenuazione del segnale molto più rapida.

Il processo di produzione delle fibre ottiche si può sintetizzare in due step. Il primo consiste nella realizzazione di un preforma, un cilindro di vetro costituito dall'unione di diversi strati uniti assieme, ognuno dei quali può essere trattato tramite opportuni gas che ne modificano l'indice di rifrazione. Il secondo passaggio viene definito *drawing* e consiste nel posizionamento del preforma in una *drop tower*, all'interno della quale si porta il vetro a temperatura di fusione e si ricava il filamento di fibra per caduta. Alla fine di questo processo si applicano gli strati protettivi e si opera un processo di cura per fissare il tutto.

Le fibre ottiche costituiscono un ottimo supporto per realizzare strumenti di misura innovativi grazie alle peculiari caratteristiche che le contraddistinguono. Esse sono infatti immuni alle interferenze elettromagnetiche (IEM), sono elettricamente passive e quindi ideali in ambienti che presentano rischi di esplosione; grazie alle ridotte dimensioni riescono a trasmettere segnali a lunga distanza anche attraverso zone difficilmente accessibili e agevolano la loro integrazione all'interno dei materiali intelligenti, infine presentano semplicità di installazione e durabilità.

La possibilità di integrare i sensori all'interno di strutture andando a formare i così detti materiali intelligenti è un aspetto chiave nella scelta del tipo di tecnologia si voglia utilizzare. In questo senso le fibre ottiche costituiscono un'ottima soluzione nel caso sia necessario sensorizzare una struttura. Lo sviluppo di tecniche di inglobamento efficienti è necessario per garantire il corretto funzionamento dei sensori, preservandone le caratteristiche di accuratezza e affidabilità e limitandone l'invasività rispetto al materiale ospite. Per quanto riguarda l'inglobamento della fibra ottica all'interno dei materiali compositi, le criticità consistono nel preservare l'integrità del rivestimento di protezione esterno (*coating*), evitare distorsioni e deformazioni che possano compromettere il funzionamento dei sensori e limitare il disallineamento tra le fibre del materiale composito e le fibre ottiche, condizione che potrebbe mettere a rischio le proprietà meccaniche del componente portando nei casi più estremi alla delaminazione. Questi aspetti sono influenzati principalmente dalla sequenza di laminazione del materiale composito. La presenza di fibre di rinforzo diversamente orientate rispetto alla fibra ottica può causare su di essa delle pieghe localizzate che distorcono e riducono di intensità il segnale ottico fino a precluderne il corretto funzionamento. La condizione meno gravosa sarebbe quella di avere lamine unidirezionali con la fibra ottica parallela alle fibre, ma questo

renderebbe inutile l'utilizzo dei materiali in composito, che fanno della progettazione ad hoc delle sequenze di laminazione il punto cardine.

Per risolvere il problema relativo alla sequenza di laminazione è stata studiata una tecnica che permetta di inglobare i sensori a prescindere dalla sequenza utilizzata. Questa tecnica prende il nome di *Quick Pack* e consiste in una sequenza in due fasi attraverso due cicli distinti di polimerizzazione. Il primo passaggio consiste nell'inglobamento della fibra ottica fra due strati di tessuto in fibra di vetro con spessore ridotto ed alto contenuto di resina. La polimerizzazione del componente viene effettuata con sacco da vuoto e pressione ridotta. Queste condizioni di lavorazione permettono un totale controllo sulla fase di reticolazione, limitano i possibili danni alla fibra ottica e riducono la presenza di vuoti nel laminato. A questo punto l'oggetto ottenuto, il *Quick Pack*, risulta essere robusto, maneggevole e molto più semplice da collocare successivamente. Nella seconda fase infatti si procede ad inglobare il *Quick Pack* all'interno del materiale ospite vero e proprio potendo procedere alla seconda laminazione e polimerizzazione senza la necessità di rivolgere attenzioni particolari al sensore. E' comunque da tenere in considerazione che la presenza di uno strato aggiuntivo costituito dal *Quick Pack* causa inevitabilmente una variazione nella sequenza di laminazione e ciò può avere una ricaduta sulle prestazioni meccaniche globali della struttura. In questo senso esistono dei casi in cui l'inglobamento diretto della fibra ottica risulta essere la soluzione più vantaggiosa.

In conclusione l'utilizzo della tecnologia delle fibre ottiche presenta dei vantaggi tecnici ed economici rispetto ad altre soluzioni quando si ha la necessità di avere un sistema di sensori senza bisogno di attuazione. Rispetto ai sensori piezoelettrici le fibre ottiche mostrano una maggiore semplicità nella realizzazione di collegamenti e connessioni e mostrano una capacità unica di rilevare variazioni di sforzo, temperatura e altri parametri grazie alla grande versatilità e capacità di gestire segnali multipli. Presenta inoltre vantaggi di resistenza a campi elettrici, fatica, corrosione, il che le rende particolarmente adatte ad applicazioni in molti ambiti, compreso quello civile, biomedico e dell'aviazione.

### **1.3. Diagnosi e prognosi**

Una struttura può essere monitorata sfruttando i sensori installati grazie all'utilizzo delle tecniche HUMS. Le ispezioni dunque sono rese possibili non solo senza che si renda necessario smontare il componente dalla struttura complessiva, ma anche durante il normale utilizzo sfruttando una strategia che lavora in tempo reale per rilevare cedimenti o danneggiamenti di varia natura e ne prognostica gli effetti sull'affidabilità complessiva della struttura <sup>[2]</sup>. La procedura di monitoraggio

utilizza tecniche per ricavare degli indicatori di condizione relativi allo stato di salute della struttura, i quali vengono interpretati e classificati attraverso l'uso di algoritmi prestabiliti. Tuttavia sono comuni i casi in cui si rilevano errori nella diagnostica e limitate capacità di determinare prognosi adeguate. E' possibile migliorare sensibilmente le performance di analisi dei dati e predizione dello stato di funzionamento applicando algoritmi più avanzati. La Tabella 2 illustra due tipi di approcci alla diagnostica <sup>[9]</sup>. Per effettuare la diagnosi di un sistema si utilizzano dei sensori integrati in grado di monitorare i carichi agenti sulla struttura ed identificare quali di essi possano determinare la nascita di possibili danneggiamenti.

	Technique	Operation	Advantages	Limitations and risks
<b>Diagnostics</b>	<b>Traditional Diagnostics</b>	Compares feature or CI values against pre-established thresholds indicative of hazardous conditions; the thresholds are derived from statistical studies of fleet wide behaviors and known cases of faults	Useful for monitoring fault modes that are known to be severe, frequent and "testable" on the basis of a Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA)	Useful only for a finite number of fault modes with well identified and sufficiently understood behaviors. Good correlation between specific condition indicators and each fault mode must be sufficiently well established; monitoring is applicable to predefined and highly repeatable operating conditions, or else the risk for false alarms increases considerably
	<b>Anomaly Detection Diagnostics</b>	Uses a model of the system under consideration and the observation of an "innovation" or "discrepancy" between the actual plant output and the model output, for all possible operating conditions, to detect an unanticipated fault	Provides greater "coverage" in terms of the number of fault modes that can be detected, isolated, and identified. Can in effect detect a fault as an "anomalous" or "extraneous" behavior in the system that should be given attention	Requires an accurate model of system behaviors and operating modes. Performance limited by model accuracy; fault mode coverage limited by model breadth or complexity. Requires a set of baseline (reference) conditions representative of healthy operating conditions that are difficult to define and bound adequately in the context of potential, not-fully-understood system anomalies. Inadequate "baselining" can lead to poor detection performance

Tabella 2 - Approcci alla diagnostica <sup>[9]</sup>

Comprendere quali carichi esterni agiscano effettivamente sulla struttura è un aspetto fondamentale. La corretta identificazione di tali carichi permette di comprendere correttamente quali danni possono generarsi a seguito di un evento non previsto ed aggiornare di conseguenza le previsioni relative alla rimanente vita operativa della struttura. Spesso risulta troppo costoso in termini di tempo e denaro, se non impossibile, misurare direttamente i carichi agenti; tuttavia è possibile valutare come viene modificata la struttura a seguito di tali carichi e determinarne dunque la natura. L'identificazione dei carichi come processo indiretto di identificazione si può dividere in due classi: nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze. Le tecniche tempo dominanti sono applicabili quando si verificano casi di vibrazioni periodiche, mentre le tecniche nel dominio delle frequenze



quando non è possibile determinare una ripetitività ciclica dei fenomeni, cosa che avviene nella maggior parte dei casi <sup>[10]</sup>.

I sensori integrati vengono utilizzati per determinare i carichi agenti sulla struttura dovuti alla normale operatività o alle condizioni ambientali. E' fondamentale monitorare le strutture in maniera continua. Se consideriamo ad esempio la vita operativa di un velivolo vi sono alcuni carichi generati mentre il motore è a massima potenza, altri durante le manovre che precedono il decollo o seguono l'atterraggio, altri ancora possono capitare in maniera fortuita durante riparazioni o altri lavori sul velivolo. Una volta che si siano raccolti gli intervalli di frequenza, l'intensità e tutti i parametri relativi ai diversi tipi di carico applicati alla struttura, è possibile effettuare delle ispezioni mirate alla valutazione dell'integrità della struttura e in secondo luogo offrire informazioni utili per modificare le specifiche di progetto. Infine è possibile prevedere quali carichi possano aver più probabilità di verificarsi in futuro, ponendo le basi per determinare quali possano essere le prestazioni future.

Le informazioni ottenute riguardo ai danni e ai carichi a cui è soggetta la struttura possono essere combinate per prevedere quanto rapidamente si propagherà il danno in futuro. Per effettuare questo tipo di analisi è fondamentale conoscere le specifiche di progetto che indicano il tipo di materiali e la geometria dei componenti sotto analisi. Esistono diverse leggi che descrivono in maniera specifica i meccanismi che governano la propagazione del danno in funzione del materiale e di parametri geometrici. Queste leggi vengono ricavate attraverso le storie di carico di componenti già testati in precedenza e risultano molto affidabili quando le condizioni di carico del componente corrispondono o risultano essere molto simili a quelle già presenti nei database. Qualora questa condizione non fosse verificata, i modelli già presenti non possono essere considerati affidabili ed è dunque necessario utilizzare metodi predittivi basati su modelli fisici che possano riprodurre in maniera più fedele le condizioni operative.

È possibile implementare valutazioni predittive dello stato di salute della struttura sfruttando processi avanzati di diagnostica, modelli appropriati di degradazione dei componenti, algoritmi di rappresentazione delle incertezze, dati relativi a carichi applicati e condizioni operative. In tabella sono descritti due differenti approcci alla prognostica <sup>[9]</sup>.

	Technique	Operation	Advantages	Limitations and risks
Prognostics	Usage Based Prognostics	Combines usage monitoring (load/stress tracking) with a wear or life model to estimate the rate at which a component degrades, accumulates damage or “consumes” its design life. A prognosis is based on remaining design life at any given time	Can track wear or degradation in parts and, by using planning triggers dependent upon usage of assets, can also offer support for replacement logistics that are “smarter” than scheduled maintenance programs. Reduces risk of life limiting approach when usage is intense	Does not take into account unanticipated faults. Most applicable for components that degrade as intended by design, although it can use “life factors” or adjustments for well-established and well-understood conditions leading to modified rates of degradation (outside of nominal). Requires an estimate of future system usage to provide an accurate prognosis or else a “worst-case-scenario” must be assumed for future system usage, potentially leading to excessively conservative results
	Health Based Prognostics	Combines health monitoring (damage assessment via diagnostics) with a damage progression model to estimate the rate at which a <i>faulted component</i> continues to degrade	Capable of tracking a degraded condition (once a fault or anomaly is detected) and providing early warnings for components in need of maintenance due to unanticipated faults or the presence of damage. It can potentially support life extension of degraded components because <i>prognosis estimates future damage progression in a faulty component</i>	Works only as a follow up to the detection of a fault or anomaly (i.e., requires a positive diagnosis of a fault or anomaly), which immediately implies that the <i>prognosis is operating over a damaged component that is at risk of failing</i> . Because planning actions are triggered depending on system condition, there is the risk that an error in the characterization of future damage progression can lead to (a) maintenance actions need to be rescheduled if the prognosis changes, or (b) a prognosis with a long lead time can lead to a false sense of safety

Tabella 3 - Approcci alla prognostica

## 2. Monito-Ring

In questo capitolo vengono sviluppate le tematiche riguardanti i principi di funzionamento e le tecnologie associate alla produzione del Monito-Ring.

Il primo paragrafo è dedicato all'approfondimento della fisica che sta alla base del funzionamento delle fibre ottiche, in modo da comprenderne le peculiarità ed i limiti che contraddistinguono queste strutture. Nel secondo paragrafo ci si concentra sui sensori a reticolo di Bragg (FBG) integrati nelle fibre ottiche utilizzate nei nostri esperimenti; successivamente viene trattata la metodologia con cui si realizzano le giunzioni con le fibre ottiche ed infine gli strumenti utilizzati per inviare e leggere i segnali trasmessi dal sensore. Nel terzo paragrafo si parla degli studi preliminari che hanno portato all'ideazione del Monito-Ring come sensore in grado di rilevare diverse tipologie di carico e delle prime simulazioni numeriche. Il quarto ed il quinto paragrafo trattano le fasi di progettazione e produzione del sensore reale, nonché della realizzazione del setup sperimentale adibito allo svolgimento dei primi test. L'ultimo paragrafo affronta l'analisi dei risultati dei primi test sperimentali svolti in un'altra attività di tesi.

### 2.1. Teoria delle fibre ottiche

L'argomento delle fibre ottiche è già stato in parte trattato, tuttavia vale la pena approfondire gli aspetti fisici che caratterizzano queste strutture ed analizzarne il funzionamento in modo da comprendere meglio i limiti e le peculiarità che le contraddistinguono. La fibra ottica si comporta come un conduttore che confina la luce al suo interno attraverso il fenomeno della riflessione totale. La riflessione ha luogo nella zona di interfaccia che si trova fra i due strati più interni della fibra, ovvero il *core* ed il *cladding*, i quali sono caratterizzati da indici di rifrazione leggermente differenti. Il fenomeno della rifrazione prevede che quando un raggio luminoso, definito raggio incidente, colpisce una superficie di interfaccia tra due mezzi differenti, esso si separa in due onde distinte; uno viene definito raggio riflesso e prosegue il proprio percorso attraverso il mezzo iniziale con una variazione di angolo, l'altro è definito raggio rifratto (o trasmesso) e si propaga all'interno del secondo mezzo.

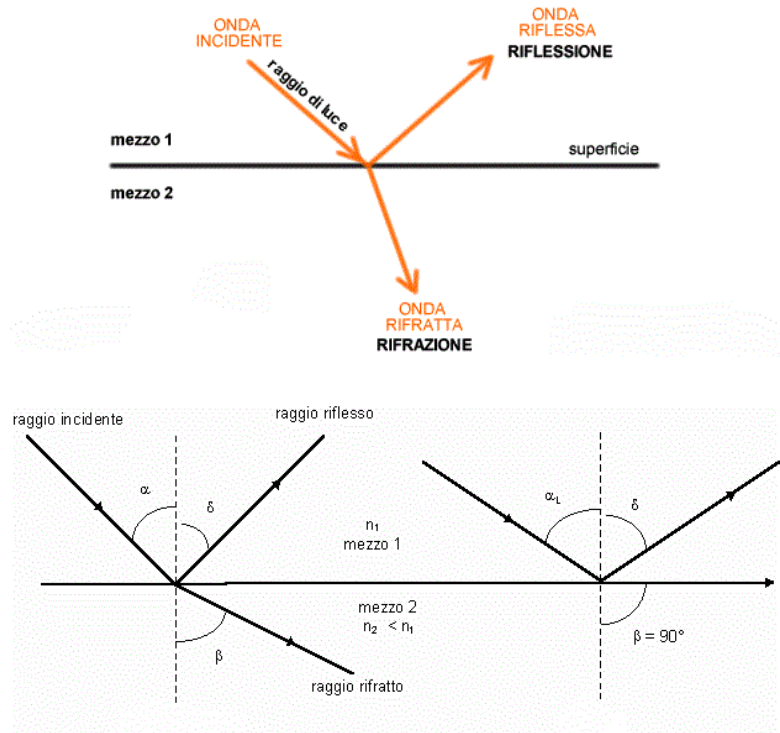


Figura 9 - Riflessione e rifrazione nelle fibre ottiche

Questo fenomeno fisico è descritto dalla Legge di Snell:

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

dove  $n_1$  e  $n_2$  sono gli indici di rifrazione dei due mezzi. La riflessione totale avviene quando non esiste più onda rifratta, ovvero l'angolo  $\beta = 90^\circ$ . Dalla Legge di Snell si può facilmente ricavare che questo fenomeno può accadere solamente nel caso in cui l'onda luminosa passi da un mezzo più denso ad uno meno denso. L'angolo  $\alpha_L$  tale per cui non esiste onda rifratta viene chiamato angolo critico ed è pari a:

$$\alpha_L = \sin^{-1}(n_2/n_1)$$

Quando  $\alpha > \alpha_L$  non appare alcun raggio rifratto. È possibile ricavare il valore dell'angolo critico relativo ad una fibra ottica conoscendo gli indici di rifrazione di core e cladding, i quali hanno tipicamente valori pari a  $n_{core} = 1,5$  e  $n_{cladding} = 1,475$ .

Da questa considerazione si evince che non tutti i fasci luminosi che entrano nel core della fibra ottica saranno in grado di percorrerla, in quanto raggi con un angolo di ingresso troppo elevato perderanno potenza ad ogni riflessione fino ad attenuarsi totalmente. Viene dunque definito cono di accettazione il limite entro il quale i raggi devono essere immessi nella fibra in modo da garantirne la riflessione totale senza eccessive attenuazioni e perdite di intensità del segnale. Questo fenomeno

genera un certo limite nell'utilizzo della fibra ottica stessa. Qualora si dovesse studiare il percorso da far seguire alla fibra ottica, sarà necessario porre adeguata attenzione a non sottoporla ad angoli di curvatura troppo stretti, pena la fuoriuscita totale o parziale del fascio luminoso dal *core* attraverso il *cladding* in funzione dell'angolo di incidenza troppo elevato, che andrebbe a causare la rifrazione del raggio luminoso attraverso il *cladding* e la perdita del segnale.

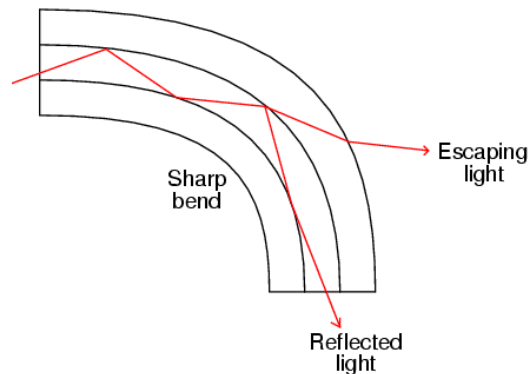


Figura 10 - Effetti del raggio di curvatura

Per ovviare al problema legato alle perdite di segnale dovute a raggi di curvatura della fibra troppo elevati, sono state sviluppate delle fibre ottiche insensibili alle curvature.

## 2.2. Sensori e interrogatori

I sensori sviluppati con la tecnologia in fibra ottica si dividono in tre categorie, sensori integrali, discreti e distribuiti. I sensori integrali permettono di ottenere informazioni come media di ciò che viene rilevato all'interno della struttura; ciò comporta che qualora la differenza di intensità del fenomeno rilevato tra picchi massimi e minimi fosse rilevante, si avrebbe una notevole perdita di informazioni. I sensori discreti forniscono invece informazioni estremamente dettagliate dello stato di sollecitazione del materiale ospite, ma solo in punti ristretti nell'ordine di pochi millimetri. I sensori distribuiti infine sono in grado di effettuare rilevazioni lungo tutta la lunghezza della fibra ottica sfruttando effetti ottici generati a causa di inomogeneità del materiale della fibra. In questa tesi si è scelto di utilizzare i sensori a reticolo di Bragg (FBG) che rappresentano una tipologia di sensori discreti; nel prossimo capitolo sarà illustrato il loro principio di funzionamento nonché il tipo di strumentazione necessaria per permetterne l'utilizzo.

## 2.2.1. FBG

I sensori a reticolo di Bragg (FBG - *Fiber Bragg Gratings*) sono dei sensori intrinseci a modulazione spettrale capaci di misurare diverse grandezze fisiche come deformazione e temperatura. Tramite l'applicazione di raggi ultra violetti è possibile incidere all'interno della fibra ottica un reticolo che va a modificare il valore locale dell'indice di rifrazione del *core*. Questo permette di modulare la distribuzione spettrale della luce che attraversa la fibra, lasciando passare solo una parte dell'intero spettro luminoso. Il dispositivo così realizzato agisce come filtro ottico per quanto riguarda il segnale trasmesso e come riflettore selettivo quando il segnale torna all'emettitore.

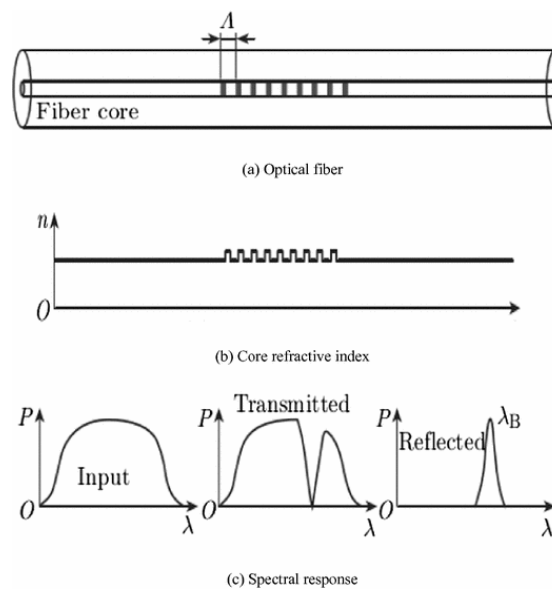


Figura 11 - Sensori a reticolo di Bragg

L'equazione fondamentale che descrive questo fenomeno è quella di Bragg e lega la spaziatura del reticolo con la lunghezza d'onda centrale dello spettro riflesso, definita come lunghezza d'onda di Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

$n_{eff}$  rappresenta l'indice di rifrazione efficace del reticolo e  $\Lambda$  rappresenta il periodo del reticolo. Ogni coppia di frange riflette una piccola percentuale di luce ad una specifica lunghezza d'onda  $\lambda_B$ ; lo spettro di riflessione è dato dalla somma dei contributi di ogni singola frangia. Ogni effetto che provoca una variazione nella lunghezza del reticolo, nell'indice di rifrazione o nel periodo, genera un

cambiamento nella lunghezza d'onda di Bragg e quindi può essere misurato correlando il  $\Delta\lambda_B$  alla misura della grandezza osservata tramite opportune costanti termoelastiche.

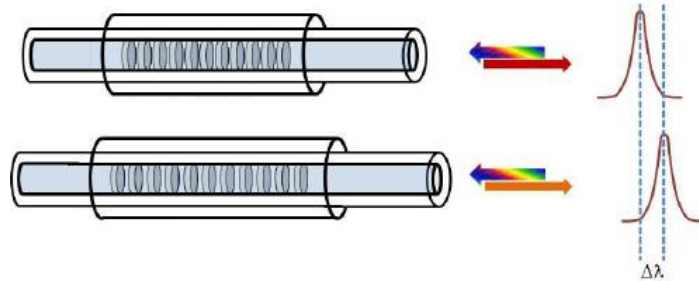


Figura 12 - Variazione della spettro di risposta

Nel caso in cui la sollecitazione sia uniforme su tutto il reticolo, si osserva che lo spettro di riflessione manifesta una traslazione rigida lungo l'asse delle lunghezze d'onda. Invece nel caso di una sollecitazione lineare lungo il reticolo si può osservare un aumento della larghezza dello spettro ed una riduzione del suo valore di picco.

I sensori a reticolo di Bragg permettono di ricavare informazioni qualitative e quantitative delle principali variabili di interesse e presentano diverse caratteristiche vantaggiose: la lunghezza d'onda di Bragg presenta un andamento lineare rispetto alle sollecitazioni termiche e meccaniche lungo un ampio range di misura; la grandezza misurata è codificata attraverso lo spettro del segnale, per cui il sensore è affetto in minima parte da perdite di segnale e di potenza fintantoché sia possibile rilevarne i picchi; il sensore è inscritto all'interno della fibra stessa senza aumento di volume, quindi l'inglobamento all'interno delle strutture in composito è molto semplice e poco invasivo; è possibile inserire nella stessa fibra più di un reticolo in diverse posizioni sfruttando poi per l'interrogazione tecnologie multiplexing.

## 2.2.2. Connettorizzazione

Per consentirne il funzionamento, i sensori in fibra ottica hanno necessità di essere collegati ad una sorgente che sia in grado di mandare un segnale luminoso in input e ad un ricevitore che legga il segnale in output; ciò consente di interpretare le variazioni del segnale e permette quindi la ricostruzione dello stato di sollecitazione della struttura ove il sensore è inglobato. La realizzazione di questo tipo di setup dipende dal tipo di sensore associato alla fibra, da cui consegue la definizione

degli strumenti atti alla generazione del segnale ed all'interrogazione. Per quanto concerne l'utilizzo dei sensori FBG, il dispositivo per l'emissione del segnale e per la sua ricezione coincidono, in quanto il segnale mandato in ingresso viene parzialmente riflesso dalle frange del sensore a diverso coefficiente di rifrazione; la frazione di onda luminosa che attraversa il sensore andrà a degradarsi naturalmente lungo la lunghezza della fibra oppure verrà attenuata attraverso un sistema di dispersione posto alla fine della stessa. Esistono anche casi in cui si renda necessario collegare due rami di fibra ottica tra loro.

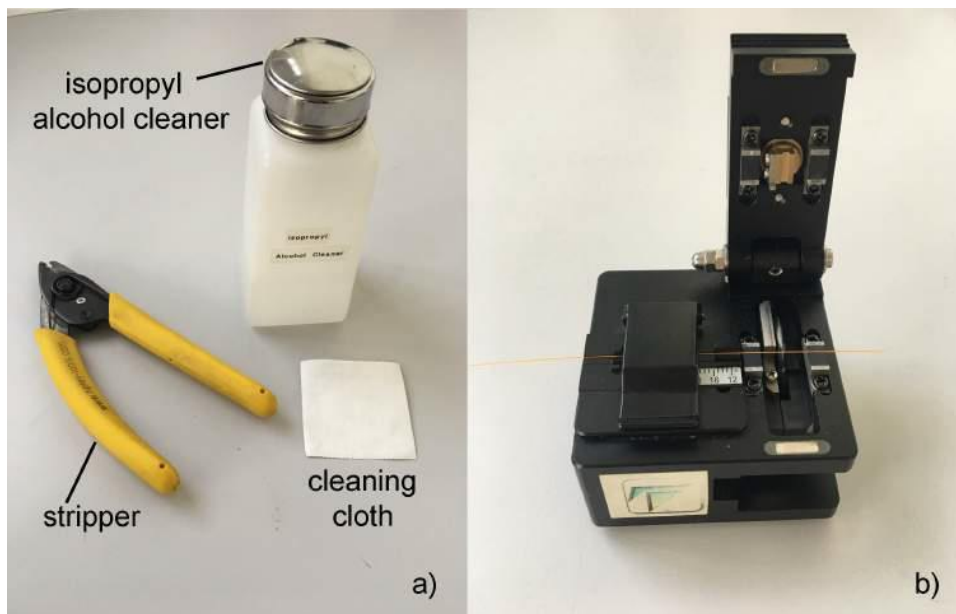


Figura 13 - Strumenti per la rimozione del coating ed il taglio della fibra ottica

Per procedere alla giunzione o connettorizzazione della fibra ottica, la prima operazione da fare è la rimozione del coating esterno in modo da lasciare la fibra nuda composta da core e cladding. Per questa operazione viene utilizzato lo *stripper*, una pinza che riesce ad incidere con precisione lo strato di copertura esterno della fibra che viene sfilato senza intaccare gli strati interni. La fibra viene quindi sottoposta a pulizia con alcool isopropilico in modo da rimuovere tutte le impurità e viene inserita in uno strumento in grado di tagliare con precisione il fondo della fibra in modo da ottenere una superficie perfettamente perpendicolare all'asse della stessa. Questa operazione è molto importante in quanto l'efficacia del collegamento dipende da come le terminazioni delle due fibre riescano a combaciare alla perfezione. A questo punto le due fibre vengono inserite nella macchina giuntatrice che, con l'ausilio di due afferraggi movimentati, allinea automaticamente le due estremità delle fibre e con un arco elettrico le scalda fino a fonderle insieme creando il collegamento tra i due core. Il modello utilizzato presso il laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano è il FSM-60S Fusion Splicer. Esso è in grado di dare una indicazione della bontà del collegamento in funzione



dell'angolo relativo tra le due facce all'estremità delle fibre ed alle impurità presenti nella fibra in prossimità del punto di contatto. Per rinforzare il collegamento ed impedire possibili cedimenti viene apposta una copertura con un tubo in teflon contenente una piccola asta in metallo che impedisce di applicare curvature in prossimità della giunzione.



Figura 14 - FSM 60S Fusion Splicer

I fattori critici che caratterizzano l'operazione di collegamento tra fibra e connettore o tra fibra e fibra, sono costituiti dal rischio di indebolimento strutturale della fibra e di degradazione o perdita di segnale. L'indebolimento della fibra è dovuto a due fattori associati alla procedura di collegamento, ovvero la rimozione degli strati esterni di protezione della fibra (*coating*) ed alla procedura di fusione delle fibre, che non può garantire le stesse caratteristiche di robustezza ottenibili durante la produzione in fabbrica del filamento di fibra di vetro.

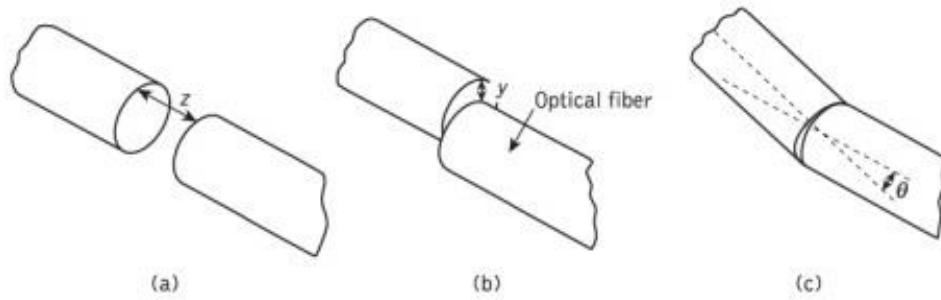


Figura 15 - Difetti di giunzione delle fibre ottiche

La degradazione del segnale è invece dovuta a problemi di disallineamento tra le due estremità della fibra. I disallineamenti si possono distinguere in longitudinali, laterali e angolari. È possibile determinare quantitativamente le perdite di segnale dovute a problemi di disallineamento:

$$K = -10 \log_{10} \left( \frac{P_u}{P_i} \right)$$

Dove K rappresenta il valore delle perdite in decibel, mentre  $P_i$  e  $P_u$  rappresentano la potenza in ingresso ed in uscita dal punto di collegamento tra le due fibre.

### 2.2.3. Micron optics

L'interrogatore utilizzato per leggere il segnale del sensore FBG è il Micron Optics sm130. Il Micron Optics utilizza una tecnologia con filtro modulabile a fibra Fabry-Perot (FFP-TF Fibre Fabry-Perot Tunable Filter). Lo strumento di misura del sensore FBG utilizza il filtro per elaborare lo spettro ottico riflesso. In questa architettura, un fascio luminoso viene immesso all'interno della fibra ottica e i sensori FBG distribuiti riflettono parzialmente questa luce, ognuno con una propria lunghezza d'onda caratteristica. L'interrogatore quindi determina la lunghezza d'onda di ciascun sensore e le informazioni raccolte permettono di calcolare le variazioni di temperatura e sforzo. In particolare lo sforzo misurato dalla fibra ottica dipende dalla differenza che si rileva nel picco centrale della lunghezza d'onda del sensore FBG,  $\Delta\lambda_B$ , e dalla costante fotoelastica,  $p_e$ , tramite l'equazione:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}$$

La costante fotoelastica per la silice fusa è pari a  $p_e = 0,22$ .



Figura 16 - Micron Optics sm130

## 2.3. Teoria del Monito-Ring

Il Monito-Ring è un sensore sviluppato con lo scopo di ricavare lo stato di sforzo della struttura a cui è applicato. Esso si basa sulla tecnologia della fibra ottica e presenta una forma circolare ricavata dalla sovrapposizione di diversi strati di materiale composito. Attraverso la misura della deformazione dei sensori iscritti nella fibra ottica è possibile ricostruire lo stato di sforzo ed i carichi applicati. Questa idea è stata concepita e sviluppata dal C.I.R.A., il Centro Italiano Ricerche Aerospaziali. Attraverso la cooperazione con il Politecnico di Milano è stato realizzato uno studio atto alla progettazione e realizzazione materiale di questo trasduttore.

I sensori in fibra ottica, in virtù della loro geometria filiforme, risultano essere molto affidabili nel rilevare deformazioni solamente qualora siano orientate in direzione parallela agli stessi. L'idea innovativa alla base del Monito-Ring è proprio quella di porre un rimedio a questa lacuna intrinseca della fibra ottica, andando a sviluppare un sensore che possa essere in grado di rilevare le deformazioni mostrate dalla struttura strumentata indipendentemente dalla loro orientazione, permettendo così di ricostruire il carico generico che le ha causate. In questo senso è stato identificato nel pattern circolare, la configurazione ottimale per aumentare la sensibilità dei sensori in fibra ottica estendendo il loro campo di applicabilità.

Per dimostrare la bontà dell'idea sono state realizzate delle simulazioni numeriche preliminari in modo da ricavare profili di deformazione e sforzo associati a differenti tipi di carico. Nella prima fase sono stati simulati carichi semplici come quelli assiali e flessionali. A questo scopo si è ipotizzato di avere un sensore che avesse tre percorsi circolari, due sullo stesso piano e concentrici ma di raggio differente, ed un terzo posizionato su un altro piano parallelo ai precedenti.

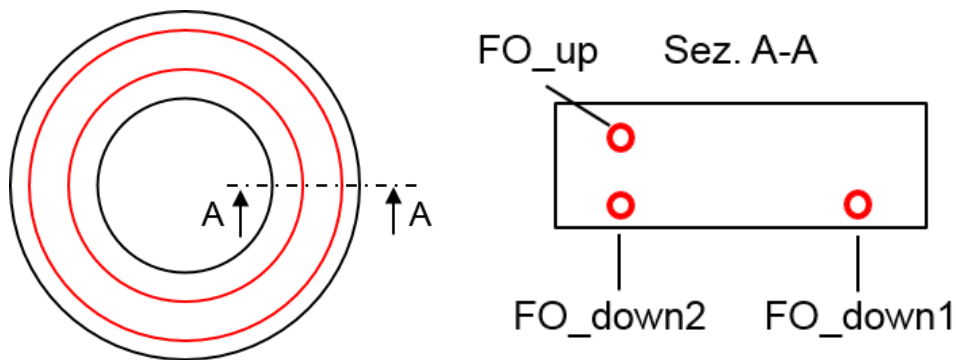


Figura 17 - Posizionamento delle fibre ottiche inglobate nel Monito-Ring

Lo scopo che si voleva ottenere posizionando due percorsi di fibra ottica sullo stesso piano era quello di valutare se ci fossero differenze nella rilevazione di carichi a trazione derivanti dal posizionamento delle fibre lungo diversi percorsi. Al contrario il posizionamento della fibra su piani distinti rappresentava una condizione necessaria per l'identificazione di carichi a flessione che sono per definizione fuori dal piano.

In questa configurazione sono stati dunque valutati prima un carico fittizio a trazione e successivamente un carico che inducesse nel sensore una deformazione flessionale. I risultati hanno dimostrato un andamento sinusoidale prevedibile in virtù della doppia simmetria mostrata dal Monito-Ring combinata con la simmetria dei carichi.

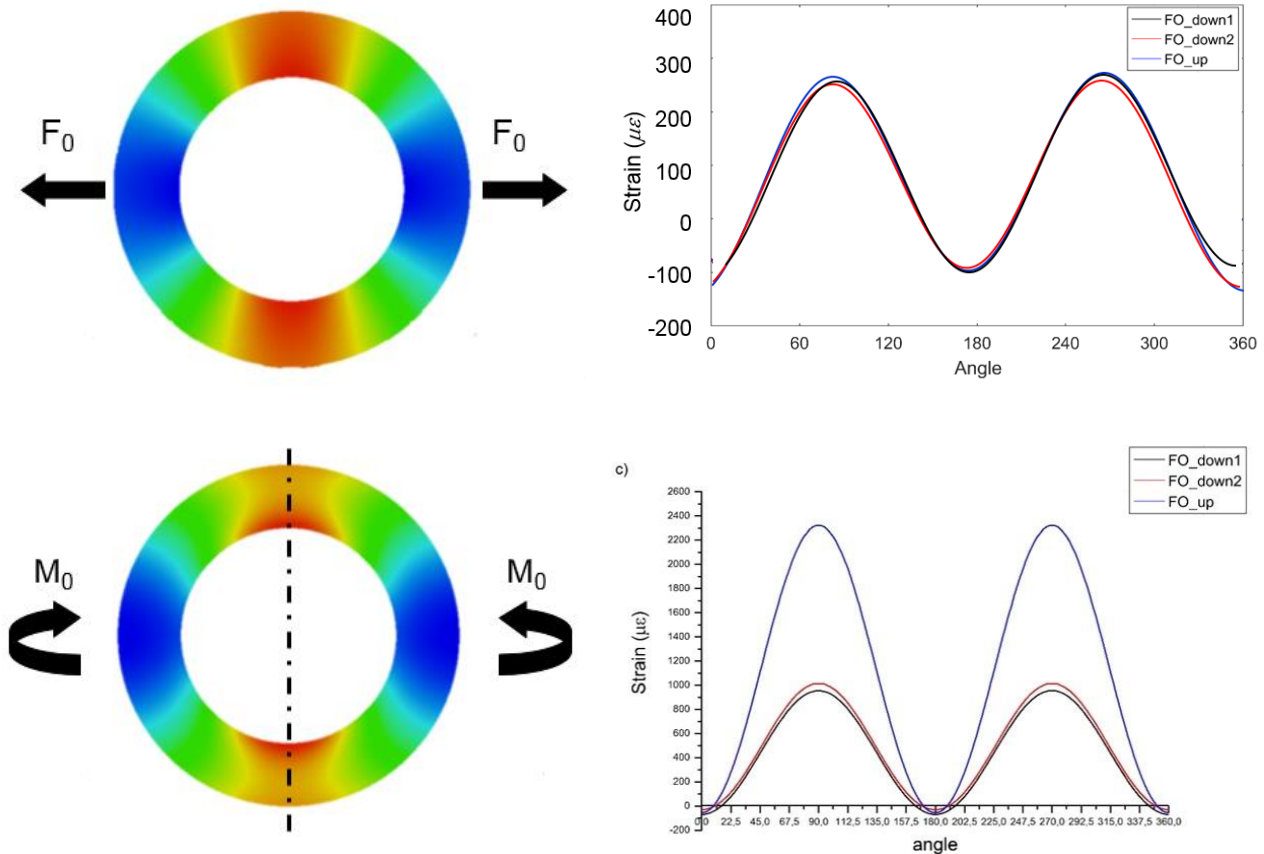


Figura 18 - Andamento dei carichi a trazione e flessione ricavati numericamente

Nel caso di carico a trazione è stata evidenziata una sostanziale sovrapposizione tra le deformazioni rilevate dai sensori nelle diverse posizioni. Nel caso di deformazione flessionale è stata osservata la sovrapposizione delle deformazioni rilevate dai due sensori co-planari mentre il sensore fuori dal piano fornisce come previsto risultati differenti. In entrambe le simulazioni si è potuto notare come una variazione nella direzione di applicazione del carico porti ad una variazione di fase del profilo di deformazione. Allo scopo di validare i risultati numerici si è proceduto con la fase di progettazione e realizzazione di un prototipo del Monito-Ring.

## 2.4. Progettazione

Alla base dello sviluppo del prototipo di Monito-Ring è stato realizzato un modello agli elementi finiti (FEM) con l'utilizzo del programma di simulazione Abaqus CAE. Il modello considera il sensore come realizzato in materiale composito ed applicato su una piastra di supporto in alluminio. Per validare i dati numerici, la fase iniziale di studio aveva come obiettivo quello di rilevare quali fossero

le risposte del sensore qualora la struttura di supporto fosse stata soggetta a carichi assiali o flessionali provenienti da diverse direzioni e ricostruire lo spettro di carico. A questo scopo si è scelto di realizzare la piastra con una geometria circolare tale da permettere la rotazione della stessa e simulare le diverse orientazioni del carico.

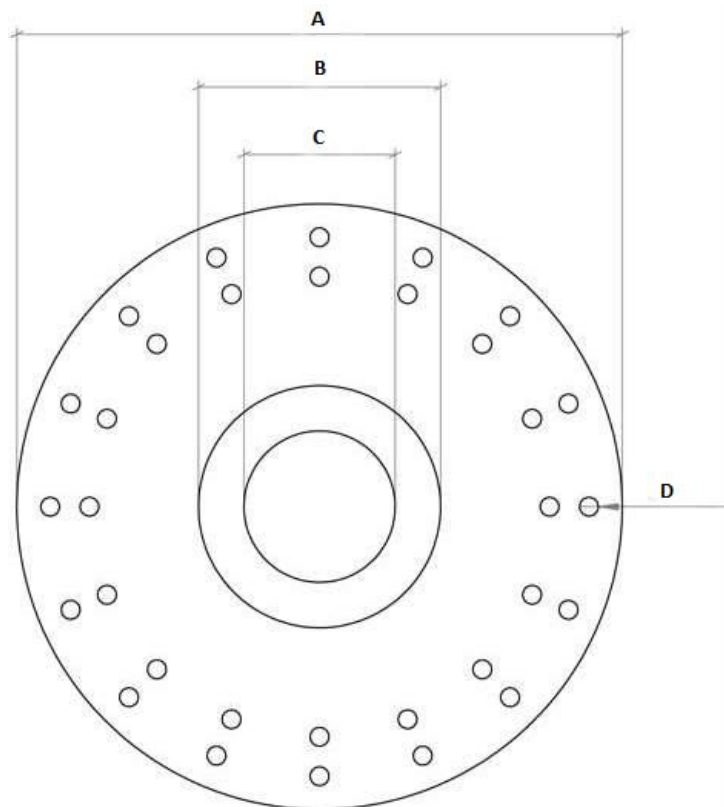


Figura 19 - Schema della piastra circolare

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Spessore</b>	<b>Unità di misura</b>
<b>Piastra</b>	200	-	-	6.2	0.5	mm
<b>Monito-Ring</b>	-	80	50	-	-	mm

Tabella 4 - Dimensioni di piastra e Monito-Ring

Il diametro della piastra è stato definito in 200 mm, dimensioni tali da permettere la corretta installazione del Monito-ring in posizione centrale, abbastanza distante dagli afferraggi per l'applicazione del carico e garantire uno stato di sforzo costante agente sul sensore; per la scelta

dello spessore si è effettuato un test ad instabilità ed è risultato che la scelta migliore fosse di utilizzare una piastra da 0,5 mm, abbastanza sottile da garantire la flessione della piastra anche con l'applicazione di carichi ridotti senza il rischio di plasticizzare il materiale. Nella zona esterna della piastra sono state ricavate due file concentriche di fori per consentire l'accoppiamento con il sistema di cinematismi atto all'applicazione del carico. L'accoppiamento tra il sensore e la piastra viene realizzato tramite un incollaggio, tuttavia per semplificare il modello è stato ipotizzato che il Monito-Ring fosse perfettamente aderente alla piastra con una trasmissione perfetta dei carichi senza perdite dovute alla presenza dell'adesivo. Per il dimensionamento del sensore si è deciso di realizzare un componente dalle dimensioni contenute del diametro esterno di 80 mm e diametro interno di 50. Questa configurazione permette di inglobare due avvolgimenti di fibra ottica su circonferenze distinte di rispettivamente 60 mm e 70 mm di diametro. Una volta portate a termine le simulazioni con l'utilizzo di Abaqus CAE si è proceduto alla realizzazione del modello reale.

## **2.5. Produzione del Monito-Ring**

La produzione del Monito-Ring richiede di svolgere diversi passaggi. Avendo determinato che il trasduttore debba avere la forma di un anello, è stato necessario progettare uno stampo che permettesse di alloggiare questo anello e garantisse una base piana per la formatura del materiale composito. Successivamente si può procedere con la fase di laminazione del materiale composito definendo la sequenza con cui gli strati devono essere posizionati nonché il posizionamento della fibra fra i diversi strati. Al termine della fase di laminazione si procede al posizionamento dell'insieme all'interno del sacco da vuoto per poi effettuare il ciclo di cura in autoclave. L'ultimo passaggio consiste nella verifica del prodotto finito e nell'installazione del Monito-Ring sulla piastra di supporto per i test. Queste procedure vengono di seguito illustrate più nel dettaglio.

### **2.5.1. Stampo**

Per la produzione del Monito-Ring è stato progettato e realizzato uno stampo apposito presso il laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano. Le principali caratteristiche richieste per tale stampo erano quelle di permettere una semplice deposizione dei vari strati di preimpregnato, agevolare il corretto posizionamento delle fibre ottiche nelle posizioni prestabilite e infine fornire una base idonea per il passaggio finale in autoclave. Lo stampo è stato realizzato in alluminio e presenta un solco

sagomato con le misure finali del Monito-Ring per il suo alloggiamento. Su uno dei lati esterni presenta due intagli che permettono l'ingresso della fibra ottica per il suo posizionamento, mentre al centro è stato realizzato un foro per garantirne l'uscita. Entrambi gli incavi permettono inoltre la libera fuoriuscita della resina in eccesso, qualora ci fosse, durante il processo di reticolazione in autoclave.

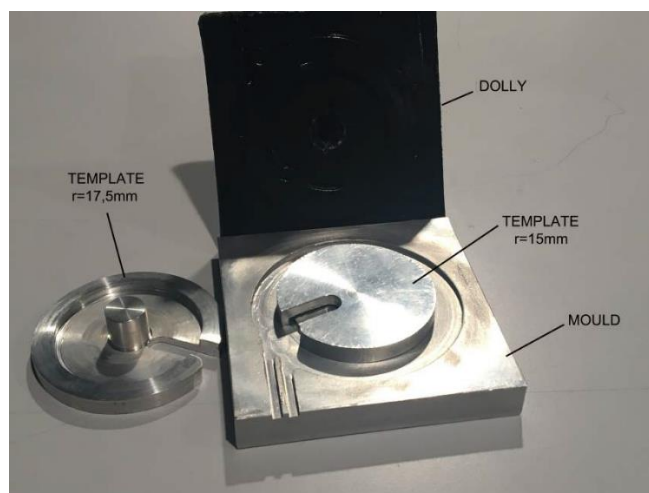


Figura 20 - Stampo, controstampo e dima per la produzione del Monito-Ring

Assieme allo stampo sono stati realizzate due dime di diverse dimensioni che potessero fungere da guida circolare per garantire il corretto posizionamento della fibra ottica lungo il percorso prestabilito. Infine un controstampo in AIRPAD™ è stato utilizzato per permettere una compressione omogenea su tutta la superficie del sensore durante il ciclo di reticolazione ed ottenere una migliore qualità del prodotto finale. Prima di procedere alla fase successiva è necessario effettuare una pulizia accurata dello stampo per sgrassarne la superficie e effettuare una procedura di applicazione di uno strato di distaccante che permetta una più semplice rimozione del manufatto dopo il passaggio in autoclave. Questa operazione va ripetuta ciclicamente dopo un certo numero di passaggi in autoclave quando si dovesse riscontrare una maggiore difficoltà nella separazione del Monito-Ring dallo stampo.

## 2.5.2. Sequenza di laminazione e inglobamento fibra

La fase di laminazione del materiale composito ha luogo in una camera specifica presente nel laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano, la *cleanroom* (camera bianca). All'interno di questo spazio vengono garantite condizioni ambientali particolari con una temperatura di circa 22°C, umidità controllata al 50% e un livello massimo di particelle sospese in aria pari a 10000 particelle per metro



cubo. Eseguire le operazioni in queste condizioni di atmosfera controllata è importante per evitare possibili contaminazioni del preimpregnato, garantendosi anche un fattore di ripetibilità che risulta essere fondamentale quando si producono dei provini per dei test. Per ottenere le prestazioni desiderate del materiale composito, è stata studiata una sequenza di laminazione quasi isotropa, che presentasse una rigidità e resistenza omogenea in tutte le direzioni. La sequenza di laminazione prevede la deposizione di otto strati di preimpregnato con la sequenza  $[0/45/-45/90]_s$ . Il preimpregnato utilizzato è il SAATI EE24 ET23, un tessuto bilanciato di 0,04 mm di spessore che si presenta in rotoli di diverse lunghezze; essendo la superficie del preimpregnato estremamente collosa, essa è ricoperta su entrambe le facce da due strati di materiale distaccante. Per ottenere degli anelli di materiale composito si è utilizzata una dima apposita che permettesse di ritagliare agevolmente i dischi prima del posizionamento.



*Figura 21 - Dima per la produzione degli anelli di preimpregnato*

Per quanto concerne l'inglobamento delle fibre ottiche, è necessario porre attenzione al posizionamento della stessa lungo i percorsi prestabiliti evitando di generare angoli di curvatura troppo stretti che, come precedentemente illustrato, potrebbero causare gravi attenuazioni del segnale. La fibra ottica nella configurazione studiata per la rilevazione dei carichi a trazione e flessione, viene depositata tra il primo ed il secondo strato di preimpregnato, e fra il settimo e l'ottavo strato. Per una ricostruzione ottimale dello spettro di carico è necessario effettuare una verifica preliminare atta alla precisa identificazione del posizionamento del sensore FBG inglobato nella fibra ottica. A tale scopo viene utilizzato uno strumento che si compone sostanzialmente di una base movimentata ed un filo di rame riscaldato per effetto Joule. La fibra connettorizzata e collegata al Micron Optics viene posizionata sulla base e mossa sotto il filo caldo. Quando muovendo la base il sensore viene a trovarsi in prossimità del filo caldo, la variazione di temperatura causa un picco nel segnale di risposta del sensore rivelandone così la posizione.

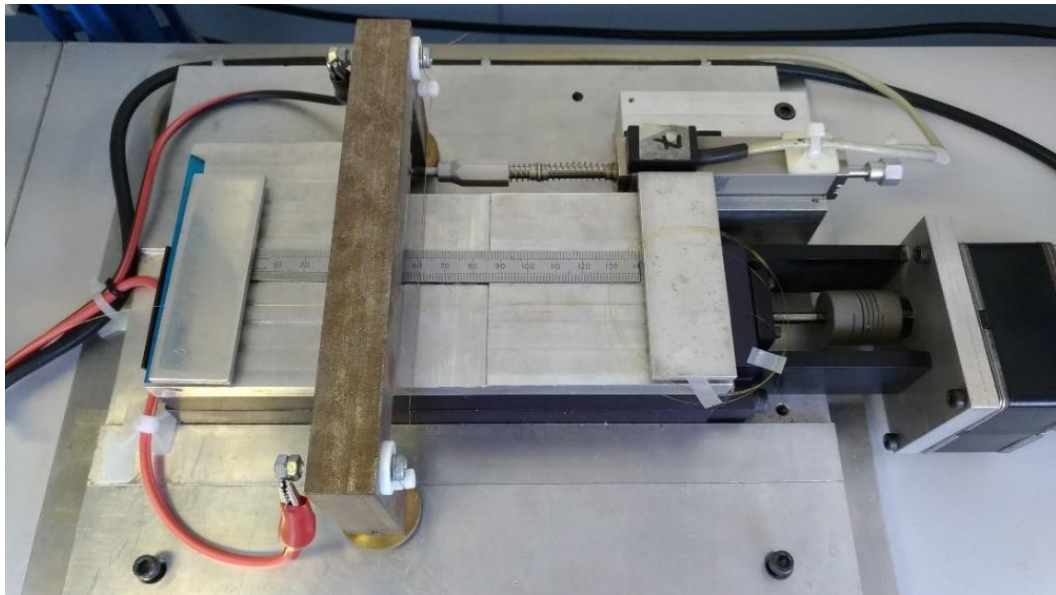


Figura 22 - Strumento per l'identificazione della posizione del sensore FBG. Particolare della fibra

Una volta rilevata la posizione del sensore FBG si procede all'applicazione alle estremità della fibra ottica di due tubi in teflon. Lo scopo di questi tubi, che devono essere di spessore appena superiore a quello della fibra utilizzata, è quello di proteggere la fibra stessa durante la fase di cura posizionandoli in prossimità dell'ingresso e dell'uscita della fibra dagli strati di preimpregnato. Inoltre bisogna operare il fissaggio degli stessi con del collante per impedire che la resina fluidificata durante il ciclo in autoclave possa risalire il tubo per capillarità e degradare il coating protettivo. A questo punto è possibile procedere alla deposizione dei vari strati di preimpregnato inglobando ove necessario la fibra ottica. Dopo aver depositato l'ultimo strato, si applica uno strato di materiale distaccante, chiamato *peel-ply*, che impedisce l'incollaggio tra il Monito-Ring ed il controstampo ad opera della resina.

### 2.5.3. Ciclo di reticolazione e installazione

Per svolgere il ciclo di reticolazione è necessario seguire alcune procedure che garantiscano la buona riuscita della lavorazione. Inizialmente si procede al posizionamento dello stampo su una base d'appoggio. A scopo precauzionale si procede al fissaggio di tutte le parti mobili, comprese le fibre scoperte; questo procedimento consente di poter maneggiare più agevolmente i componenti durante la realizzazione del sacco da vuoto.

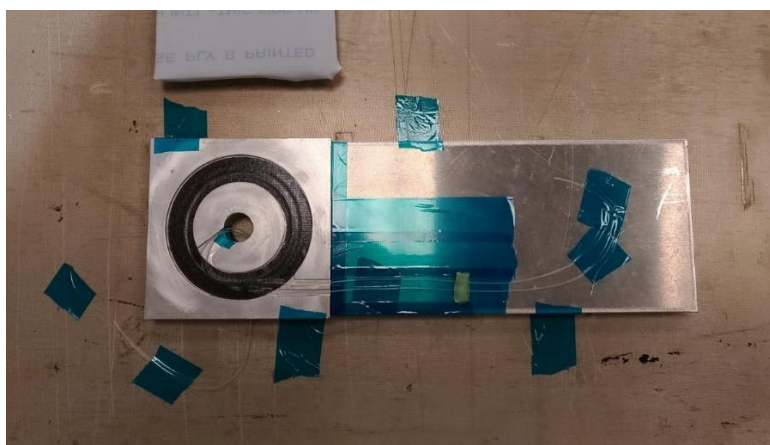


Figura 23 - Fissaggio degli elementi sulla base di supporto

Il sacco da vuoto viene realizzato in modo da avvolgere i componenti ed è composto di diversi materiali allocati su diversi strati. Di solito il sacco da vuoto è realizzato in nylon o gomme silconiche. All'interno del sacco viene creato il vuoto applicando delle valvole e collegando ad esse un compressore che aspira l'aria contenuta all'interno. Nel sacco vengono inseriti dei sensori termici che permettono di verificare e controllare istante per istante la variazione di temperatura interna durante il ciclo di reticolazione. Nell'ordine vengono applicati: uno strato di materiale distaccante (*peel-ply*); uno strato di tessuto poroso assorbente (*breather*), che assorbe la possibile resina in eccesso fuoriuscita dal preimpregnato; due film polimerici per sacco da vuoto sopra e sotto l'assemblato, uniti e chiusi ermeticamente con l'ausilio di uno strato di mastice posto alle estremità del sacco. Il ciclo di cura per completare la lavorazione del preimpregnato, prevede di mantenere il componente ad una temperatura di 125°C per un'ora in autoclave a 5 bar di pressione. L'operazione può anche essere effettuata con un forno apposito, ma si è preferito utilizzare l'autoclave per permettere di avere un maggior controllo sui tempi e sul gradiente di temperatura durante il riscaldamento del componente, e quindi maggior consistenza delle operazioni e dei risultati ottenuti durante la realizzazione di più Monito-Ring.



*Figura 24 - Sacco da vuoto prima dell'inserimento in autoclave*

Terminato il ciclo di reticolazione e lasciato raffreddare il componente, si può procedere all'apertura del sacco da vuoto e all'estrazione del sensore dallo stampo.

La produzione del Monito-Ring viene completata procedendo alla connettorizzazione delle estremità in modo da poter collegare il sensore allo strumento di interrogazione. Infine si effettua l'installazione del sensore tramite incollaggio sulla piastra adibita per il test. Prima dell'incollaggio è necessario carteggiare leggermente entrambe le superfici da mettere a contatto e pulire con alcool isopropilico la piastra in modo da assicurare le migliori condizioni di adesione. Per l'incollaggio è stato usato un adesivo bicomponente Loctite EA 1623986, che prevede un ciclo di cura a temperatura ambiente (25°C) di 48 ore.

## **2.6. Test e risultati**

Lo scopo dei test era di verificare il funzionamento del Monito-Ring, ovvero valutare se fosse in grado di rilevare valori di deformazione della struttura di supporto quando questa fosse soggetta ad un carico noto. Bisognava altresì verificare se ci fosse una correlazione tra i valori reali e quelli



numerici ricavati attraverso le simulazione al computer. A tale scopo era stato realizzato un setup sperimentale che permetteva di imporre alla struttura carichi a trazione e carichi a flessione.

### 2.6.1. Setup

Per realizzare il test è stato ideato un meccanismo apposito che permettesse di imporre alla piastra di supporto un carico a trazione o alternativamente un carico a flessione. Lo strumento consiste in una base d'appoggio su cui è fissato un blocco in alluminio. All'interno del blocco trova alloggiamento una vite senza fine che ruotando movimentata un secondo blocco mobile. Sui due blocchi sono incernierati due afferraggi che collegano la piastra al meccanismo con l'ausilio di una giunzione bullonata. Le cerniere hanno un ruolo fondamentale perché permettono l'inclinazione delle estremità della piastra quando attraverso la vite senza fine si impone una compressione alla piastra che va ad instabilizzarsi ed incurvarsi dando origine alla flessione richiesta. Per avere un controllo sulla forza applicata sulla piastra nei due casi di trazione e flessione sono installati sul supporto per il test degli estensimetri ed una cella di carico. Alla piastra strumentata con il Monito-Ring sono applicati degli estensimetri che permettono di avere una verifica strumentale del valore delle deformazioni causate dal carico applicato.



*Figura 25 - Setup sperimentale per test a trazione e flessione*

## 2.6.2. Risultati

Per quanto riguarda il test a trazione si sono effettuati diversi cicli di carico ruotando progressivamente la piastra circolare in alluminio. I risultati rilevati dal sensore FBG integrato all'interno del Monito-Ring sono stati raccolti ed interpolati con un *fitting* a sommatoria di seni ed è stato ricavato lo spettro complessivo degli sforzi agenti sulla piastra. Questa operazione è stata ripetuta per i due sensori FBG posizionati sui percorsi più interno e per gli estensimetri posizionati in prossimità del Monito-Ring.

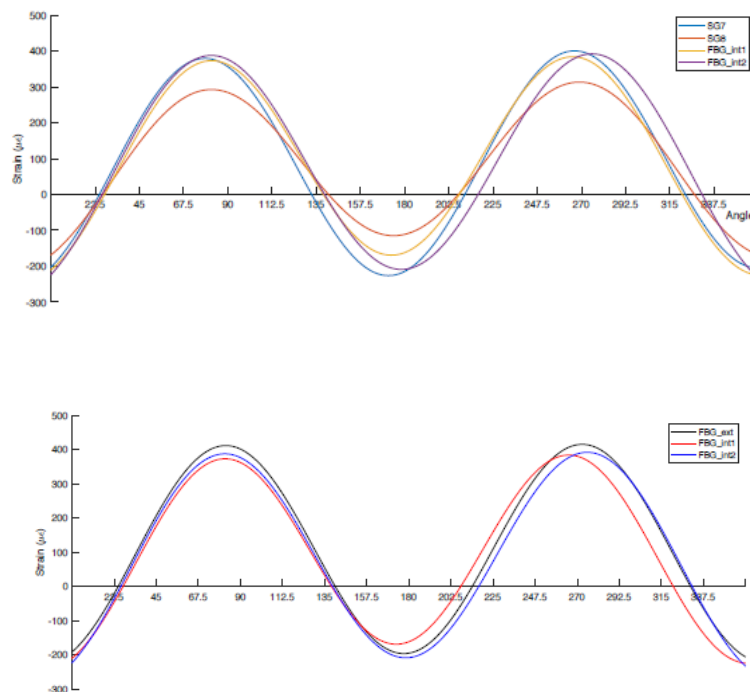


Figura 26 - Risultati sperimentali per la trazione

Si può notare come l'andamento delle deformazioni è molto simile in tutte e quattro le rilevazioni. I valori che si discostano maggiormente sono quelli relativi a SG8 che tuttavia era un estensimetro posizionato sulla faccia inferiore rispetto a quella su cui era installato il Monito-Ring e l'estensimetro SG7. Per quanto riguarda i valori massimi e minimi è evidente come i picchi siano ubicati in corrispondenza della posizione dove il sensore FBG era orientato parallelamente alla direzione del carico, mentre si riscontra una compressione ove il sensore era posizionato perpendicolarmente al carico. In Figura 26 sono stati messe a confronto le rilevazioni di tutti e tre i sensori FBG sui diversi percorsi, mostrando come sia trascurabile il posizionamento del sensore nel caso di sforzo a

trazione. Questo andamento dei risultati era ampiamente previsto e verifica l'andamento rilevato con le simulazioni numeriche.

Per quanto riguarda il test a flessione è stata adottata la stessa procedura di analisi ed elaborazione dei dati. Si può notare come le curve delle deformazioni associate agli estensimetri siano simmetriche rispetto all'asse orizzontale. Questo risultato si ottiene poiché essi sono posizionati su facce opposte della piastra per cui se da un lato si ha uno stato di trazione, dal lato opposto si avrà invece una compressione. Per quanto riguarda il confronto tra l'estensimetro ed i sensori FBG sulla stessa faccia, era ragionevole avere valori leggermente diversi in quanto tali sensori non sono posizionati alla stessa distanza dall'asse di simmetria della piastra. L'andamento delle deformazioni è comunque rispettato.

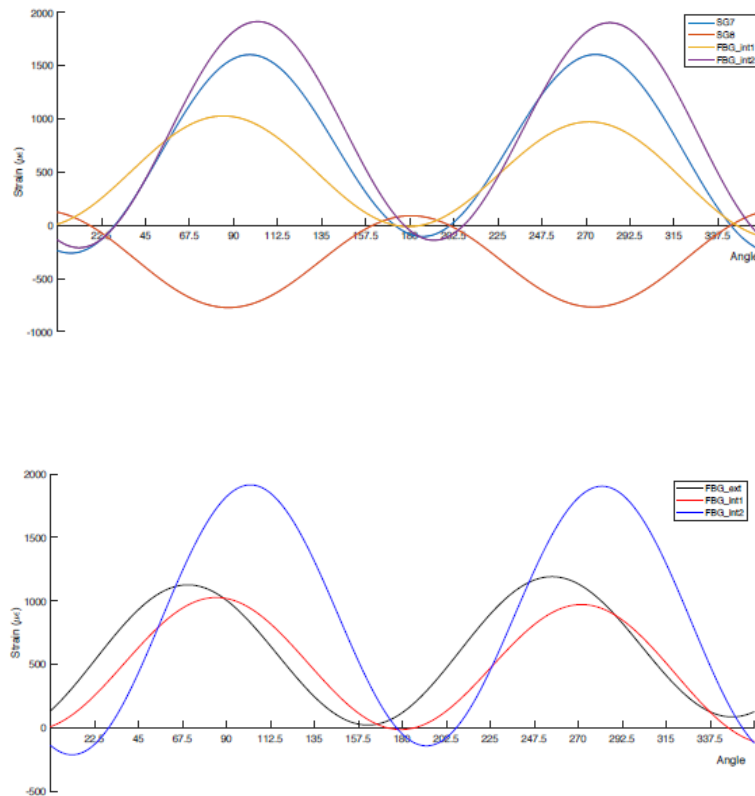


Figura 27 - Risultati sperimentali per la flessione

Nel secondo grafico è chiaramente possibile distinguere tra i sensori FBG posizionati sulle diverse circonferenze ma sullo stesso piano e il sensore posizionato sul piano differente.

Sfruttando le condizioni di simmetria del sensore circolare è possibile evidenziare per entrambi i test, sia a trazione che a flessione, come varia lo spettro di carico. Dai grafici ricavati si nota come da direzioni di carico differenti derivino andamenti simili ma traslati. Nel caso specifico sono stati riprodotte due condizioni di carico con una direzione relativa di  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Questi risultati dimostrano come la particolare geometria del Monito-Ring, che sfrutta la simmetria della circonferenza, renda possibile identificare la direzione di provenienza del carico in funzione della traslazione dello spettro di carico.

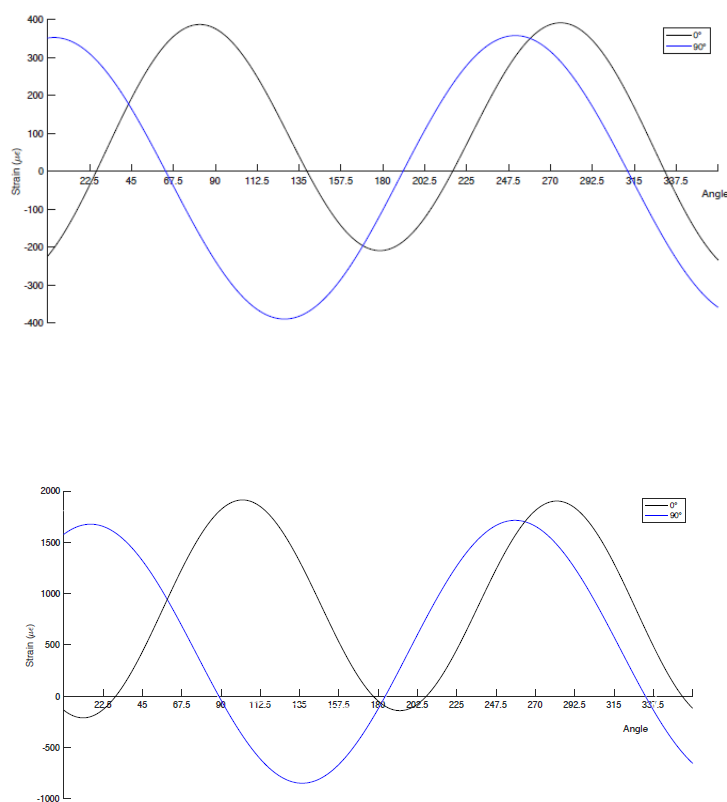


Figura 28 - Traslazione dello spettro di carico



### **3. Studio della risposta ad un carico di taglio**

Il Monito-Ring rappresenta un prototipo sviluppato allo scopo di rilevare le deformazioni a cui sia soggetta la struttura a cui esso è applicato. Analizzando la natura dei dati raccolti attraverso il sensore deve risultare possibile procedere ad una ricostruzione dello spettro di carico, identificando quali forze vadano ad agire sul componente. Determinare la natura dei carichi, la loro direzionalità ed intensità è un fattore chiave per il monitoraggio delle strutture. Nell'ambito della caratterizzazione e dello sviluppo del Monito-Ring si è cominciato ad analizzare carichi semplici di una sola natura con valori e direzioni note. Come illustrato nel precedente capitolo sono stati ricavati risultati importanti riguardo la capacità del trasduttore di rilevare le deformazioni derivanti da sforzi generati per trazione e flessione. Lo scopo di questo studio è di proseguire nell'analisi di questo dispositivo, andando a valutare la risposta del sensore qualora la struttura su cui sia installato fosse soggetta ad un carico di puro taglio. Nel prosieguo del capitolo si andranno a trattare dunque tutti gli aspetti chiave riguardanti le modalità di applicazione di un carico di puro taglio. Si partirà da un metodo abbastanza diffuso quale il test di Iosipescu, spesso utilizzato per la caratterizzazione delle travi, per poi passare a test più particolari ed adatti al nostro studio come l'Arcan test ed infine la trave di Wagner. A questo punto si dovrà determinare la modalità di test più consona per la valutazione sperimentale delle prestazioni del Monito-Ring e realizzare uno studio preliminare per determinare le caratteristiche del setup sperimentale che si andrà a realizzare. Saranno discussi i passaggi e le problematiche relative alla produzione dei componenti di supporto per i test ed infine illustrate le prime prove sperimentali che hanno aiutato ad apportare alcune correzioni prima di procedere agli esperimenti finali.

#### **3.1. Tipologie di test**

Il taglio, assieme a compressione, trazione, flessione e torsione, rappresenta uno degli sforzi elementari a cui un corpo solido può essere soggetto. Un corpo si dice sollecitato a taglio quando una forza viene applicata perpendicolarmente all'asse del corpo tendendo a far scorrere tra di loro facce adiacenti della sezione.

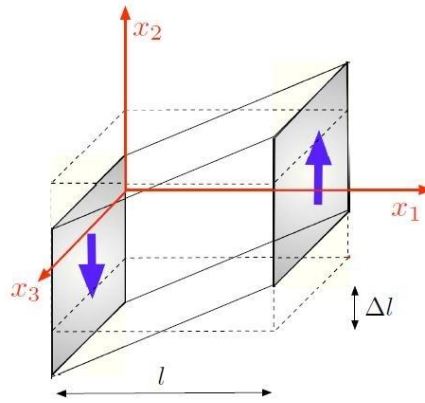


Figura 29 - Azione di taglio

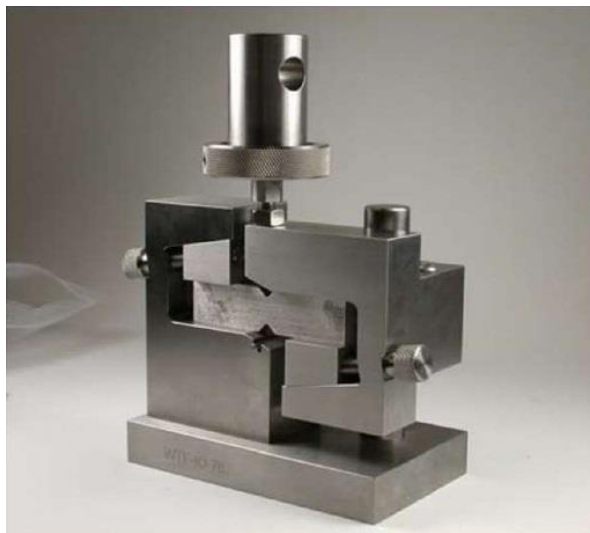
Generalmente nello studio delle strutture gli sforzi di taglio e flessionale vengono analizzati assieme, in quanto l'applicazione di un carico perpendicolare alla struttura tende a generare entrambi gli stati di sollecitazione. Inoltre, a parità di forza applicata, lo stato di sforzo indotto sulla struttura dalla componente flessionale tende a produrre effetti molto più importanti rispetto alla componente legata al solo taglio. In questo senso l'obiettivo di produrre un test di puro taglio come quello che si intende realizzare, risulta essere un compito non banale e che presenta diverse complicazioni. Se consideriamo ad esempio una trave, lo sforzo di taglio puro può essere rappresentato tramite due forze applicate in direzione normale all'asse principale, con uguale direzione ed intensità, ma verso opposto e con punti di applicazione molto vicini tra loro. Applicare le due forze ad una distanza molto piccola l'una dall'altra renderà lo sforzo associato alla flessione praticamente nullo, poiché il braccio di applicazione del momento tenderà a zero.

Con l'obiettivo di realizzare un test che permettesse di generare uno stato di sforzo di puro taglio, è stata svolta una ricerca bibliografica che andasse ad indagare quali metodi fossero più significativi ed utili alla progettazione del nostro setup sperimentale. Di seguito vengono quindi descritti brevemente tre test: il test di Iosipescu, l'Arcan test ed infine il test tramite trave di Wagner.

### 3.1.1. Test di Iosipescu

Il test di Iosipescu, noto anche come test con intaglio a V, è un metodo utilizzato per la determinazione del modulo di taglio di materiali di interesse ingegneristico. Ideato da Nicolae Iosipescu a inizio anni '60, divenne noto alla comunità scientifica dopo che lo stesso inventore pubblicò in lingua inglese la sua ricerca nel 1967. L'interesse verso cui era rivolta la pubblicazione era la possibilità di testare materiali isotropi come i metalli; tuttavia già nei primi anni che seguirono

la pubblicazione di questa ricerca, il suo campo di applicazione venne esteso alla sperimentazione dei materiali compositi <sup>[11]</sup>. Per primi furono i ricercatori della compagnia Ford Aerospace ad applicare questa modalità per testare materiali rinforzati in composito carbonio-carbonio. Negli anni successivi anche altre aziende come la Lockheed Martin cominciarono ad utilizzare questo test, così come la NASA presso i propri laboratori di ricerca di Langley, per lo studio e la caratterizzazione dei materiali compositi <sup>[12]</sup>.



*Figura 30 - Test di Iosipescu*

Il test di Iosipescu permette di imporre uno stato di sollecitazione di puro taglio nella zona centrale del provino applicando una coppia di forze. Il provino è costituito essenzialmente da una barra di sezione quadrata su cui sono stati ricavati due intagli a 90° su due facce opposte. L'applicazione di un carico antisimmetrico ad una struttura simmetrica, comporta la presenza di un momento nullo a metà della lunghezza del provino, così come ricavato dal diagramma del momento flettente. Nel suo lavoro Iosipescu ha dimostrato che applicando un intaglio con una profondità compresa tra il 20% ed il 25% dell'altezza del provino, la distribuzione del taglio risulta uniforme nel caso di materiali isotropi <sup>[13]</sup>.

Questo test, nonostante sia oggi diffuso e riconosciuto ufficialmente dall'American Society for Testing and Materials (ASTM) come protocollo standard per le analisi a taglio, presenta alcune criticità. La presenza dell'intaglio in alcuni casi può comportare il cedimento anticipato del provino a causa dell'insorgere di una concentrazione di stress alla radice dell'intaglio; questo problema risulta ancora più evidente qualora si dovessero testare materiali compositi, che sono caratterizzati da una meccanica della frattura più complessa rispetto ai materiali isotropi. L'effetto di intaglio, determinato solitamente dalla presenza di fori, cave, raccordi e smussi, genera concentrazioni di sforzo con valori

di picco molto più alti rispetto a quelli dello sforzo nominale. Tale incremento è espresso dal coefficiente di intaglio, che si ricava dal rapporto tra il picco dello sforzo e quello nominale. Il coefficiente di intaglio è un coefficiente sperimentale che dipende da diversi aspetti geometrici, fra cui l'angolo che si genera alla radice della cava. Per questo nel caso del test di Iosipescu si tende a smussare tale angolo, realizzando un raggio di raccordo anche minimo, che aiuta a limitare l'insorgere di concentrazioni di carico [12]. Altri fattori che possono compromettere la buona riuscita del test sono fenomeni di disallineamento del provino rispetto ai supporti, che ha come conseguenza l'imposizione del carico in una posizione differente da quella centrale.

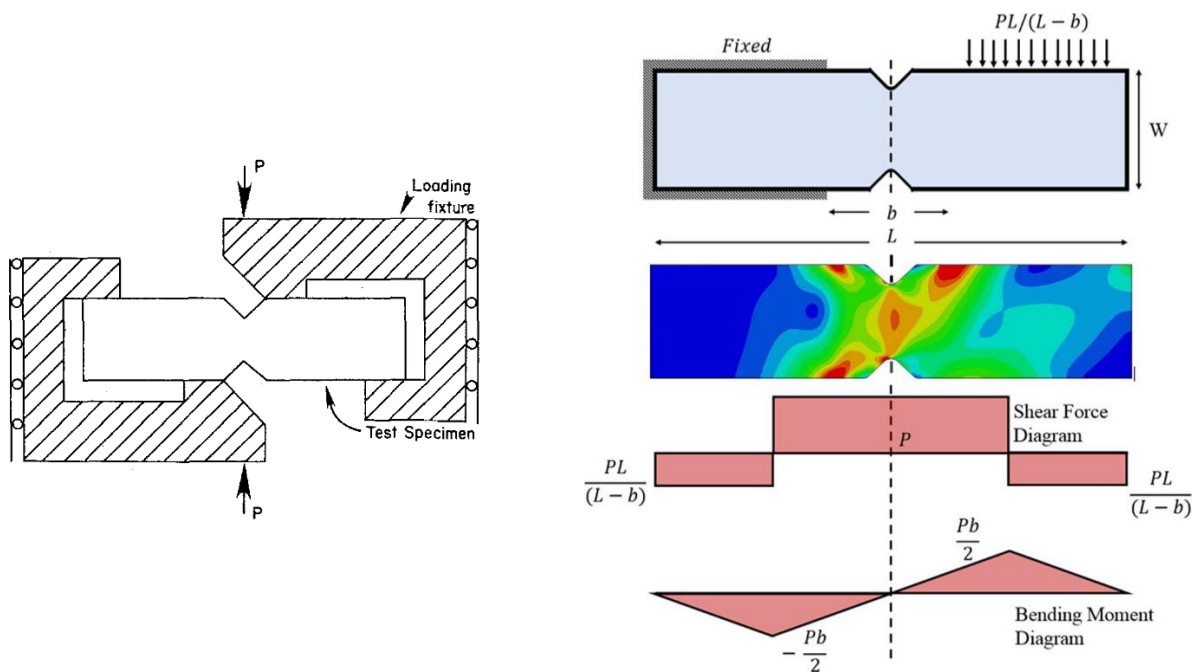


Figura 31 - Schema del test di Iosipescu. Analisi dei carichi [12]

### 3.1.2. Arcan Test

L'Arcan test fu ideato da M. Arcan et al. nel 1976 presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Tel Aviv. L'obiettivo della ricerca era quello di sviluppare un metodo sperimentale per produrre uno stato di sforzo piano uniforme con applicazione su materiali compositi [14]. Il principio su cui si basava lo studio era che per ottenere una zona in cui il taglio fosse costante, era necessario che il provino avesse un contorno che tendesse alla zona di interesse con un angolo di  $\pm 45^\circ$  [15].

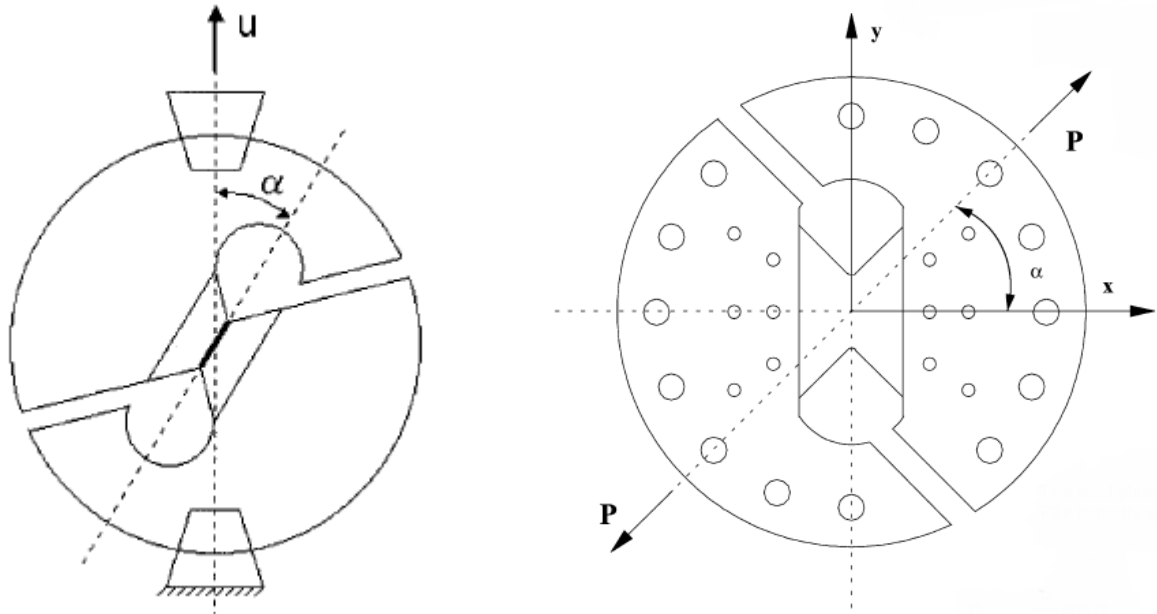


Figura 32 - Differenti configurazione dell'Arcan test<sup>[16]-[17]</sup>

Inizialmente l'Arcan test prevedeva di sagomare una piastra circolare in modo da ottenere esternamente un'ampia zona per l'afferraggio e l'imposizione del carico, mentre nella parte centrale dovevano verificarsi le condizioni di restringimento con l'angolo stabilito in modo da ottenere la zona a taglio costante. La forma del provino permetteva inoltre di poter effettuare delle rotazioni e variare secondo necessità l'orientazione del carico, dando la possibilità di imporre anche sforzi a trazione. Durante gli anni questa tipologia di test è stata affinata e migliorata. Ad oggi la configurazione più comune è quella che prevede l'utilizzo di un provino così detto a farfalla, realizzato nel materiale di cui si intende valutare le caratteristiche<sup>[16]</sup>. Tale provino viene poi fissato ad un sistema di afferraggi, realizzato tipicamente con un materiale più rigido, che ricrea la forma circolare; infine l'assemblato viene installato sul sistema per l'imposizione del carico. Tutti i collegamenti vengono realizzati attraverso delle bullonature. Il vantaggio di questa configurazione è quello di poter riutilizzare per ogni test gli stessi afferraggi, andando a sostituire di volta in volta solo il provino, portando ad una riduzione di spreco di materiale, tempo di realizzazione e tempi di montaggio e smontaggio del setup. Come nel caso del test di Iosipescu, la criticità di questo esperimento risiede nella possibilità che l'intaglio generi condizioni di sforzo anomale che portino al cedimento del materiale prima del raggiungimento del suo limite di sforzo nominale.

### 3.1.3. Trave di Wagner

Il metodo della trave di Wagner è stato sviluppato da Herbert Wagner intorno agli anni '30, con una pubblicazione intitolata "*Flat sheet metal girders with very thin metal web*", a seguito di una collaborazione con la Rohrbach Metal Airplane Company. Wagner teorizzò che i metodi di progettazione dei velivoli dell'epoca erano troppo conservativi, così introdusse il concetto di tensione diagonale. Utilizzando i principi della meccanica dei solidi, dimostrò analiticamente che se un carico a taglio viene applicato alla struttura fino ad instabilizzazione, viene meno solamente la capacità del materiale di resistere a carichi di compressione. In questo senso una struttura rinforzata con pannelli sottili in metallo, quando sottoposta ad un carico a taglio, si comporta come una normale travatura reticolare <sup>[18]</sup>. Il fenomeno della tensione diagonale fu poi approfondito in anni successivi da ricercatori della NACA e da altre società del campo aeronautico allo scopo di comprenderne sempre meglio la natura e di sviluppare campagne sperimentali più accurate.

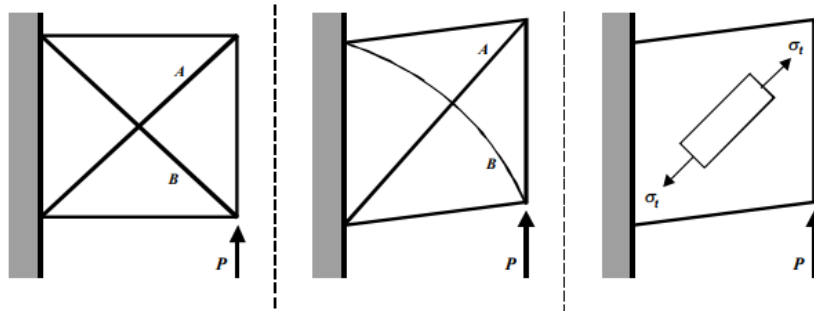


Figura 33 - Schema del carico diagonale <sup>[18]</sup>

Il risultato di questa ricerca portò alla realizzazione di un setup sperimentale che permettesse di imporre a delle sottili piastre di metallo uno stato di sforzo con direzionalità puramente diagonale per valutarne le condizioni di instabilità. Lo studio si proponeva dunque di valutare i margini di sicurezza qualora questi pannelli fossero stati caricati fino ad instabilizzazione <sup>[19]</sup>. La ricerca analitica svolta portò alla determinazione di un apparato che consisteva in un pannello sottile di forma quadrata, collegato ai lati a quattro componenti rigidi di forma allungata giuntati tra loro alle estremità, che costituivano in pratica una cornice per il provino. La struttura così realizzata veniva quindi vincolata ad una estremità, mentre dalla parte opposta veniva applicato un carico perpendicolare. Il carico così applicato alla cornice esterna più rigida, veniva trasferito al pannello sotto forma di carico puramente a taglio. Questa configurazione risulta essere la più semplice, ma è possibile realizzare

combinazioni più complesse con un numero maggiore di pannelli collegati in serie, potendo applicare il carico perpendicolare in diverse posizioni.



Figura 34 - Configurazione del test di Wagner a più pannelli

Oggi il test con la trave di Wagner viene utilizzato per testare diverse tipologie di pannelli, come nelle ricerche svolte per la caratterizzazione di materiali innovativi come i *Fiber Metal Laminate* (FML). Inoltre trova ampia applicazione in ambito civile per la valutazione e progettazione di travi e colonne con criteri anti-sismici.

### 3.2. Studio preliminare

Alla luce delle ricerche svolte nell'ambito della teoria e degli esperimenti riguardanti i test a taglio, è stato necessario decidere quale fosse il setup sperimentale più idoneo allo studio ed allo sviluppo del Monito-Ring. Oltre alle peculiarità delle varie configurazioni di test che sono state precedentemente illustrate, sono stati tenuti in considerazione anche altri fattori esterni. Innanzitutto bisognava verificare la possibilità o meno di poter realizzare i componenti necessari all'interno del laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano. Questa valutazione ha tenuto conto della complessità generale legata alla produzione degli strumenti necessari per la realizzazione del test specifico, nonché delle tempistiche per la loro lavorazione. E' stata poi verificata la compatibilità fra le attrezzature dei test ed i macchinari presenti adibiti all'imposizione del carico. In ultima analisi è stata valutata la consistenza tra i nuovi test e quelli già effettuati con carico a trazione e flessione.

Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza, perché nonostante l'obiettivo in questa fase di ricerca sia quello di valutare la reazione del sensore ad un carico di puro taglio, non va dimenticato che l'obiettivo finale è quello di caratterizzare il comportamento associato ad ogni tipo di carico e sviluppare alla fine un sistema automatico di identificazione. Realizzare test troppo differenti in termini di geometria, modalità ed intensità di imposizione del carico, potrebbe portare a risultati utili per delle valutazioni preliminari, ma difficilmente utilizzabili nel corso di uno studio d'insieme della risposta a carichi generici.

Il test di Iosipescu è stato scartato in virtù del fatto che l'applicazione del Monito-Ring sarebbe dovuta avvenire su un provino troppo differente rispetto alle piastre utilizzate per gli esperimenti precedenti. Inoltre la condizione di taglio costante è verificata solo sulla linea media del provino, quindi gran parte del sensore avrebbe rilevato condizioni di taglio agenti sul provino stesso molto diverse. Un altro fattore che ha indirizzato l'attenzione verso differenti alternative è stato il possibile dimensionamento del provino. Il Monito-Ring prodotto con lo stampo in nostro possesso e studiato durante la fase precedente di questo progetto, prevede un diametro esterno di 80 mm. Per garantire di posizionare il sensore evitando possibili effetti di bordo, sarebbe stato necessario utilizzare una trave di alluminio a sezione quadrata di almeno 200 mm per lato. I componenti per la realizzazione del setup sarebbero stati troppo ingombranti ed i carichi da applicare troppo elevati per uno studio di questo tipo.

L'attenzione si è dunque spostata sull'Arcan test. Il provino a farfalla risultava geometricamente differente rispetto alle piastre circolari utilizzate nei test precedenti. Tuttavia si trattava in ogni caso di applicare il Monito-Ring su una piastra, seppur di forma differente. Inoltre l'Arcan test risultava essere un esperimento interessante grazie alla possibilità di ruotare il componente ed imporre carichi provenienti da direzioni differenti, condizione questa molto importante per la caratterizzazione del sensore. Tuttavia anche in questo caso sono state rilevate delle criticità che ci hanno spinto ad abbandonare questa tipologia di test. Il primo problema riscontrato è stato il dimensionamento. Come riportato in precedenza il diametro esterno del Monito-Ring prodotto è di 80 mm, quindi per garantire una zona a taglio costante, senza l'influenza degli effetti di bordo, si sarebbe dovuto produrre una piastra di almeno 200 mm in corrispondenza del restringimento. Le dimensioni complessive sarebbero state ancora maggiori per poter realizzare la forma a farfalla del provino; a tutto ciò si sarebbe dovuto poi aggiungere l'ingombro costituito dagli afferraggi, andando a creare una strumentazione per il test di dimensioni troppo elevate. Un altro fattore che si è tenuto in considerazione, era il problema relativo alle concentrazioni di sforzo dovute alla presenza dell'intaglio in corrispondenza del restringimento della piastra, condizione che avrebbe reso di difficile valutazione il reale stato di sforzo a cui sarebbe stato soggetto il provino, pur partendo da un carico applicato noto.



Si è optato quindi per la produzione dei componenti necessari alla realizzazione del test con la trave di Wagner. Questa tipologia di setup permetteva di utilizzare senza problemi il Monito-Ring con le misure già studiate, grazie alle dimensioni contenute della cornice esterna necessaria per il trasferimento del carico alla piastra. In questo modo si è potuto sfruttare tutto lo spazio a disposizione sul macchinario per l'imposizione del carico per aumentare le dimensioni della piastra e garantire delle condizioni di carico ottimali nella zona ove era posizionato il sensore. Il problema maggiore riscontrato con questa tipologia di test era l'impossibilità di modificare la direzione di provenienza del carico. A questo scopo si è deciso di realizzare una piastra ottagonale anziché quadrata. Il vantaggio della piastra ottagonale è quello di garantire delle condizioni di sforzo omogenee nella zona centrale, ma permettere di simulare otto direzioni di carico differenti ottenute attraverso la rotazione ciclica della piastra su cui è installato il sensore. Un ultimo fattore ha giocato un ruolo importante nella scelta del test. Un setup molto simile era stato infatti realizzato qualche anno prima presso il Politecnico di Milano allo scopo di valutare le prestazioni di un particolare pannello di GLARE <sup>[20]</sup>. È stato quindi possibile recuperare e studiare la vecchia attrezzatura ed usarla come modello per il nuovo setup sperimentale.

### **3.2.1. I componenti**

Definita la tipologia di test ritenuta più adatta, si è proceduto alla definizione e progettazione dei componenti necessari ed al loro dimensionamento. In questa fase è stato anche sviluppato un modello agli elementi finiti dei componenti in modo da avere una prima verifica numerica dell'esperimento che si intendeva realizzare. Il macchinario utilizzato per imporre il carico è una pressa idraulica, che verrà descritta in seguito, presente presso il laboratorio tecnologico. Questa permette l'installazione di una base di appoggio e di imporre il carico centralmente. In virtù della configurazione della pressa e della necessità di imporre il carico a taglio, è stato studiato un setup con due pannelli in serie. Ciò ha consentito di posizionare dei vincoli alla base collocati alle estremità del telaio, mentre l'applicazione della forza avviene in posizione centrale garantendo il carico diagonale. Questo setup presenta l'interessante vantaggio di poter realizzare contemporaneamente due misurazioni vista la presenza delle due piastre. Gli elementi che vanno a comporre il modello sono fondamentalmente tre: il telaio, i pannelli ed i rinforzi (tavole in appendice).

Il telaio è composto complessivamente da dodici elementi, ricavati da una travatura angolare in lega di alluminio. Il complesso dei componenti del telaio crea due maschere identiche, fra le quali si vanno ad inserire e fissare i due pannelli. Prendendo come riferimento le dimensioni della base d'appoggio disponibile, si sono dimensionati i componenti del telaio in modo tale da sfruttare al meglio lo spazio presente. Sono stati realizzati quattro elementi orizzontali di lunghezza pari a 600 mm, quattro

elementi verticali posizionati centralmente di lunghezza 290 mm ed infine quattro elementi verticali posizionati lateralmente di lunghezza 300 mm. Ove necessario si sono effettuati dei fori che permettessero l'accoppiamento tra il telaio ed i pannelli e fra il telaio e gli elementi di rinforzo.

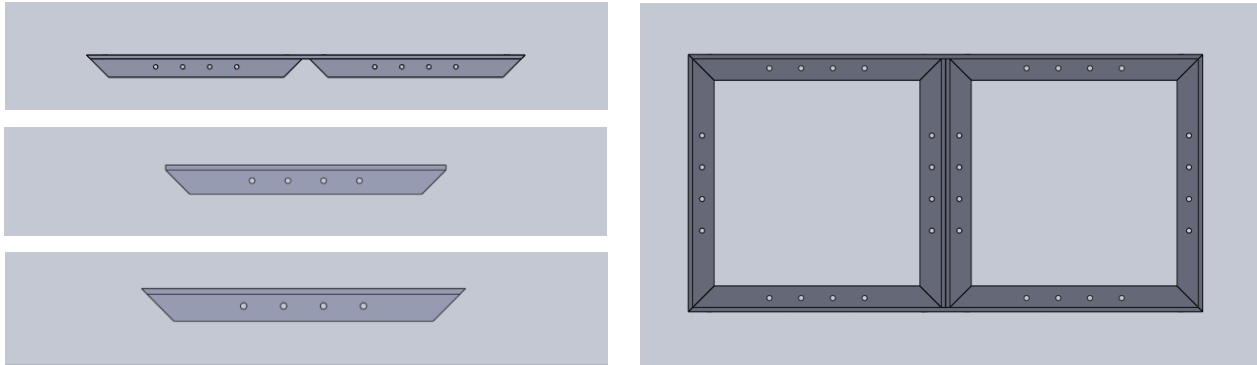


Figura 35 - Componenti e telaio

I pannelli sono due, realizzati in alluminio e di forma ottagonale. Hanno dimensione 300 x 300 mm ed inizialmente avevano spessore 0,5 mm. Questa misura era stata scelta allo scopo di mantenere inalterato lo spessore della piastra rispetto a quella utilizzata nei test a trazione e flessione. Lo spessore è stato successivamente modificato come verrà illustrato in seguito. I pannelli presentano alle estremità una serie di 24 fori equispaziati che consentono di realizzare le giunzioni con il telaio attraverso l'imbullonatura.

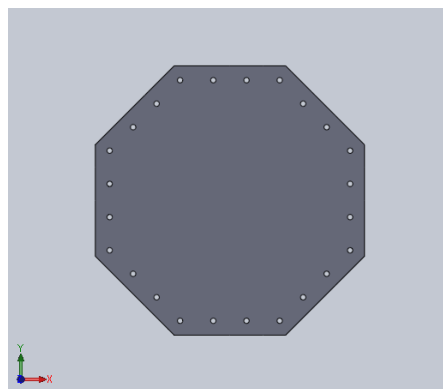


Figura 36 - Pannello ottagonale

Infine sono stati realizzati dei rinforzi angolari allo scopo di creare le giunzioni tra i vari componenti del telaio.

### 3.2.2. Modellazione con il metodo agli elementi finiti

Le simulazioni numeriche consentono di ottimizzare la progettazione di componenti meccanici e test. Il principale vantaggio che offrono è la capacità di realizzare un modello al computer, su cui è possibile simulare le condizioni di carico che si intendono applicare nell'esperimento finale. Attraverso questi calcoli si può valutare se il comportamento della struttura corrisponda a quello ipotizzato nella teoria, o se sia necessario apporre delle modifiche sul componente in modo da soddisfare le richieste di progetto. Ciò consente un grande risparmio in termini di tempo e di spesa per i test.

Per realizzare le simulazioni relative al nostro studio sul Monito-Ring si è utilizzato il programma di analisi FEM Abaqus CAE. Con l'ausilio di questo programma è stato realizzato un modello agli elementi finiti che si può osservare in Figura 36. Nel modello sono stati riprodotti tutti i componenti necessari per la realizzazione del setup, mentre attraverso l'imposizione di vincoli si sono modellate le imbullonature.

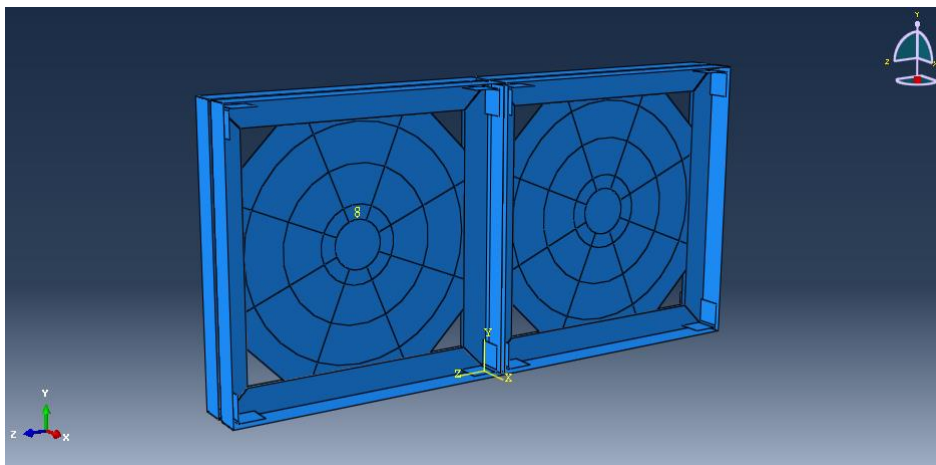


Figura 37 - Modellazione su Abaqus del assemblaggio

Nelle proprietà dei componenti sono stati definiti gli spessori, pari a 0,5 mm per le piastre ottagonali e 5 mm per le travi angolari. Per il materiale si sono definiti un modulo elastico di 30 GPa e modulo di Poisson pari a 0,3.

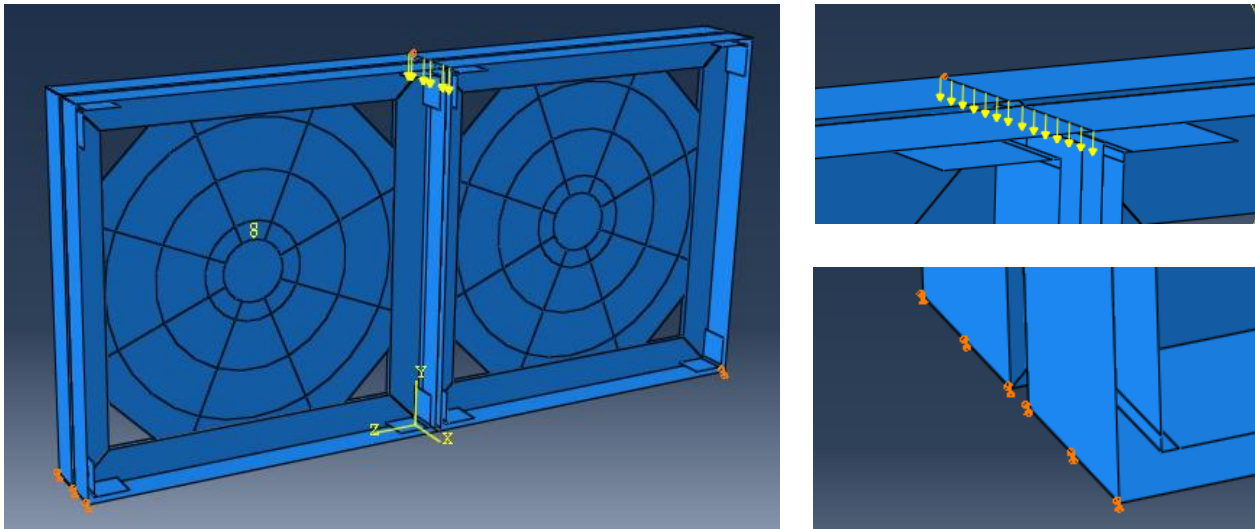
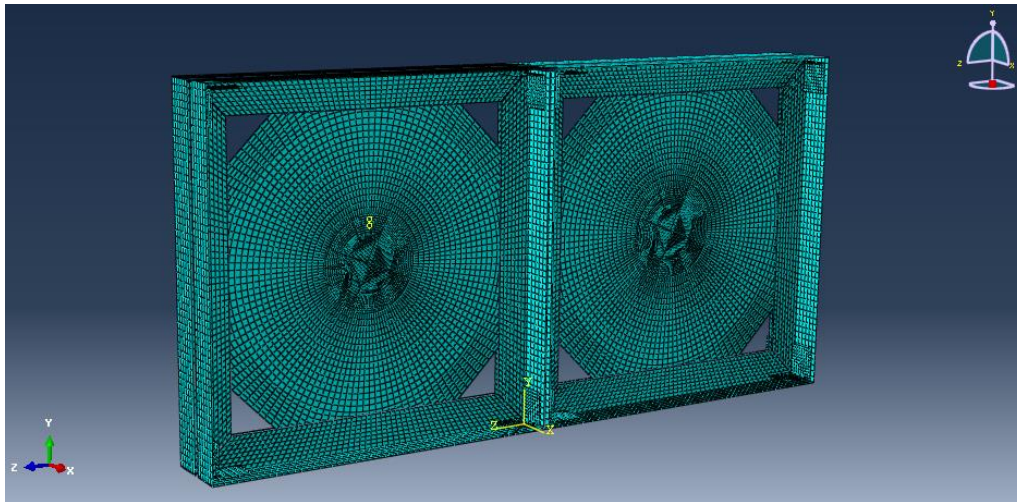


Figura 38 - Condizioni di carico e vincoli applicati

Le superfici di contatto sono state collegate utilizzando il vincolo *tie* in modo da creare una connessione perfetta tra le parti. Questo tipo di vincolo dovrebbe essere in grado di riprodurre correttamente il collegamento tra i componenti che nel modello reale è realizzato attraverso le imbullonature. La struttura durante il test è appoggiata alle estremità della parte inferiore del telaio, supportata da due cilindri. Questa condizione al contorno viene riprodotta imponendo come pari a zero gli spostamenti verticale, orizzontale e le rotazioni, tranne quella attorno all'asse trasversale (asse x). Queste condizioni sono imposte sulle linee di nodi che appartengono agli spigoli esterni della parte inferiore del telaio del modello FEM. La condizione di carico è imposta applicando un set di forze sulla linea dei nodi centrale appartenenti alla parte superiore del telaio.

Successivamente si è effettuata l'operazione di *meshing*, ovvero la suddivisione della geometria in un certo numero di elementi di forma semplice e assegnata, caratterizzati da un certo numero di nodi. Gli elementi possono essere bi-dimensionali o tri-dimensionali ed in funzione di ciò variano i gradi di libertà dei nodi. La soluzione all'interno degli elementi viene approssimata mediante combinazione lineare delle soluzioni ai nodi dell'elemento attraverso le funzioni di forma. Quindi è possibile esprimere gli spostamenti di un generico punto all'interno di un elemento come combinazione lineare degli spostamenti nodali di quell'elemento, attraverso le funzioni di forma. Il rapporto tra lo spessore e le altre grandezze caratteristiche degli elementi della geometria è inferiore di uno a dieci; quindi si è deciso di adottare come elementi le *shell 2D*. In particolare, la tipologia di elementi è S4R: elementi bidimensionali standard adatti ad usi generici, definiti con quattro nodi. Questa scelta permette di definire sulla superficie quale tipologia di contatto esiste tra le diverse parti. Per ottenere un buon rapporto tra le grandezze degli elementi della *mesh*, il pannello ottagonale è stato partizionato in un disco centrale e otto settori esterni. Il disco centrale è caratterizzato da un numero di elementi sulla circonferenza otto volte maggiori del numero di

elementi su ogni lato; inoltre esso è stato realizzato delle stesse dimensioni del Monito-Ring in modo da semplificare le analisi successive.



*Figura 39 - Mesh del modello*

Il telaio doveva riuscire a lavorare in regime elastico senza mostrare segni di plasticizzazione, in modo da permettere di riutilizzare la stessa struttura per il numero necessario di test. Inoltre era importante che garantisse una elevata rigidità per ottenere una corretta trasmissione del carico alle piastre. Attraverso la simulazione così impostata si è potuto procedere al corretto dimensionamento del telaio, ed è stato inoltre possibile ottenere una stima dell'andamento e del valore delle deformazioni in corrispondenza del sensore.

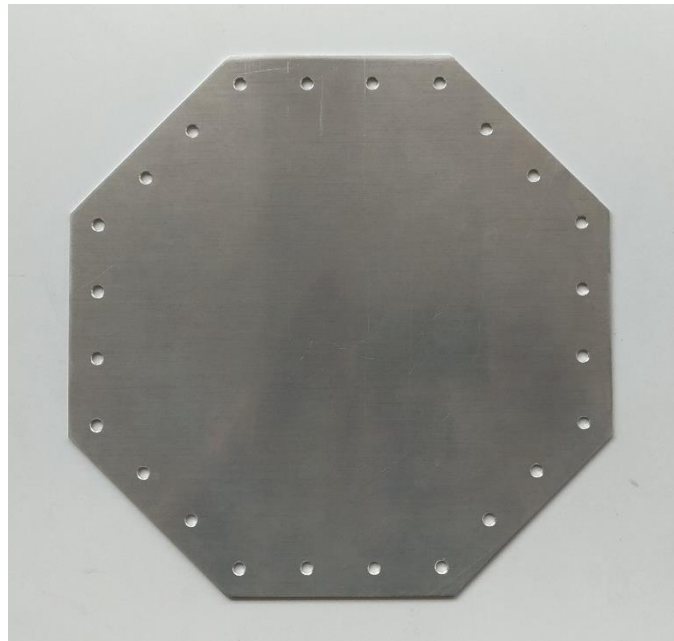
E' stata svolta un'analisi statica generale in un solo step allo scopo di ottenere la distribuzione delle deformazioni generate dal carico. Al termine della simulazione, utilizzando un sistema di coordinate cilindrico, si è cercato di ricostruire quale deformazione dovesse rilevare la fibra ottica, come componente tangenziale di deformazione lungo la fibra stessa. Per fare ciò, si sono definiti due percorsi circolari, centrati al centro del pannello, aventi lo stesso raggio delle fibre reali inglobate all'interno del Monito-Ring. Il percorso è stato definito attraverso un numero di punti discreti pari al numero di nodi, cosicché ogni punto rilevato corrisponda ad un nodo.

I risultati dell'analisi vengono mostrati e commentati nel capitolo 4.1

### 3.3. Produzione setup sperimentale

La fase di produzione dei componenti necessari per la realizzazione del test è stata svolta presso il laboratorio tecnologico del politecnico di Milano. I pannelli sono stati ricavati da una piastra di alluminio EN AW 1050 H24 mentre i componenti del telaio e gli angolari sono stati ottenuti da quattro travi ad L da due metri ciascuna dello stesso alluminio.

I primi componenti ad essere realizzati sono stati i pannelli. Prima sono stati ricavate delle piastre quadrate di dimensioni leggermente maggiori di quelle richieste per il prodotto finito.

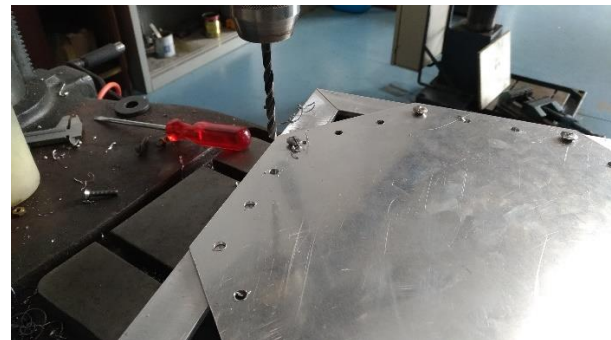
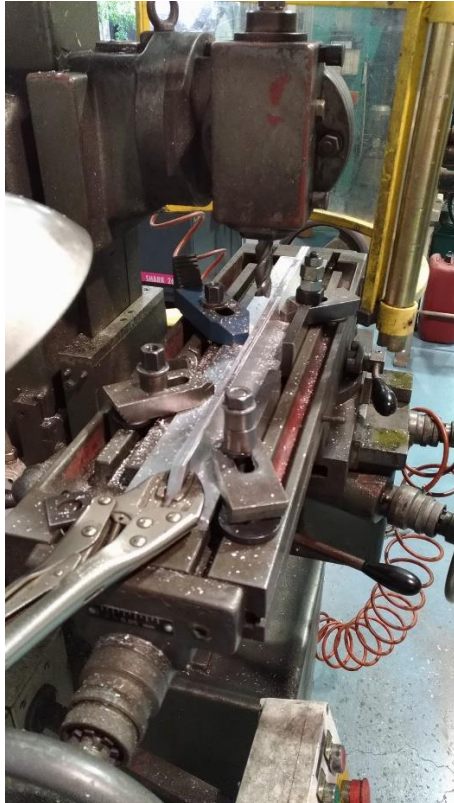


*Figura 40 - Piastra ottagonale*

Successivamente si sono ottenuti gli ottagoni con l'ausilio di una fresa a controllo numerico. L'utilizzo della fresa a CNC è stato necessario per ottenere la massima precisione nel posizionamento dei fori. Una delle caratteristiche fondamentali richieste per il setup è infatti la possibilità di ruotare la piastra per simulare diverse direzioni di carico. Per questo era richiesta una precisione molto elevata e ciò ha reso la realizzazione dei fori su pannelli e telaio estremamente complicata. Le piastre sono state realizzate in tre esemplari, due da utilizzare nel test ed una più spessa che fungesse da dima per realizzare i fori sul telaio. I tre pannelli sono stati impilati e lavorati assieme in modo da garantire le medesime dimensioni e posizioni dei fori.

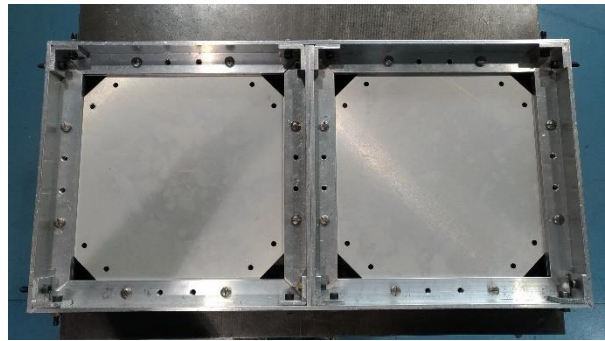
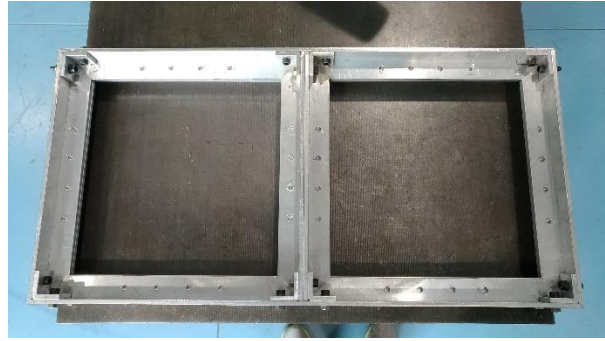
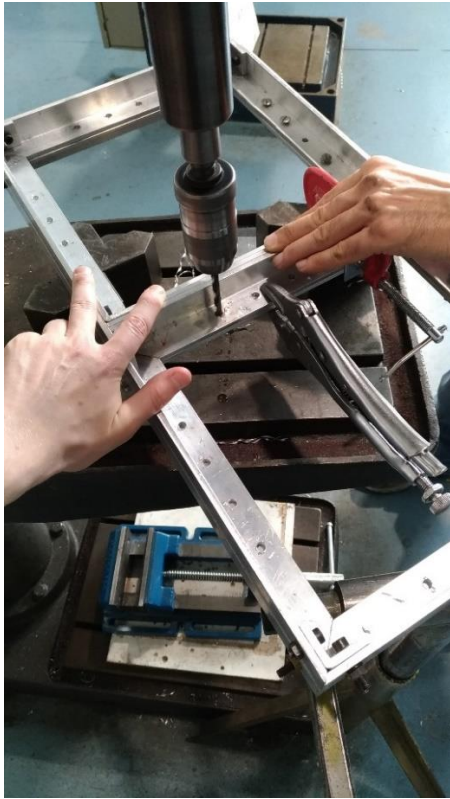


Successivamente si è passati alla produzione dei componenti del telaio. Questi sono stati realizzati a coppie in modo da ottenere una perfetta simmetria delle due maschere. In questa fase i fattori più critici sono stati la realizzazione dell'incavo centrale dei componenti orizzontali, che doveva permettere l'alloggiamento della coppia di elementi verticali centrali, e la precisione richiesta nella realizzazione delle estremità degli angolari, che dovevano garantire un corretto accoppiamento.



*Figura 41 - Fasi di lavorazione del telaio e foratura*

Una volta completata la realizzazione dei componenti si è proceduto a fissarli in posizione tramite gli angolari di rinforzo. Per questa operazione si sono utilizzate delle piastre da 290 x 290 mm che servissero da guida per il corretto posizionamento degli elementi. Fissati entrambi i telai, si sono effettuati i fori con un trapano a colonna utilizzando la dima per i fori.



*Figura 42 - Foratura del telaio e assemblaggio*

Una volta effettuati i fori sul primo telaio si è utilizzato lo stesso come guida per forare il secondo. Al termine di tutte queste operazioni si sono testati gli accoppiamenti tra i telai e le piastre, provando le diverse posizioni e orientazioni, allargando leggermente i fori ove necessario per garantire un ottimale accoppiamento senza che si rendesse necessario forzare per l'inserimento dei bulloni.



## 4. Discussione dei risultati

L'obiettivo del seguente capitolo è quello di illustrare e discutere i risultati ottenuti durante i test sperimentali realizzati nell'ambito dello sviluppo del Monito-Ring. In particolare si dovrà valutare se il sensore installato sull'apparato sperimentale sia in grado di rilevare le deformazioni della struttura qualora quest'ultima sia soggetta ad un carico di puro taglio. L'analisi dei dati raccolti dovrebbe permettere attraverso un processo di identificazione di ricostruire l'intensità e la direzione del carico imposto sulla struttura.

Nel primo paragrafo si riporteranno alcuni risultati ricavati durante l'analisi numerica svolta preliminarmente durante la fase di progettazione. Nel secondo paragrafo verrà descritta la fase di preparazione al test e le modalità del suo svolgimento. Si illustreranno inoltre alcune problematiche riscontrate durante l'esperimento che hanno portato alla modifica parziale del setup sperimentale. Nell'ultimo paragrafo si mostreranno i risultati ottenuti attraverso i due differenti sistemi di acquisizione. Dunque si procederà ad un confronto fra le interpolazioni ottenute dai diversi set di dati in nostro possesso.

### 4.1. Risultati dell'analisi FEM

L'obiettivo dell'analisi FEM consiste nell'ottimizzare la progettazione dei componenti, creando un modello in grado di fornire una previsione circa il comportamento della struttura soggetta al carico. In particolare con questa simulazione si intendevano verificare due condizioni: la prima consisteva nell'escludere che il telaio potesse andare in campo plastico durante il test; la seconda era di avere una stima qualitativa dell'andamento delle deformazioni lungo i percorsi determinati dai sensori in fibra ottica inglobati nel Monito-Ring.

Per prima cosa consideriamo l'andamento degli sforzi sul telaio nelle zone prossime a quella di applicazione del carico. Inizialmente lo studio prevedeva l'applicazione di una forza pari a 1 KN. Di seguito è rappresentato un grafico che riporta l'andamento dello stato di sforzo del telaio mano a mano che ci si allontana dal punto di applicazione. Questa analisi è stata effettuata per valutare la capacità del telaio di sopportare il carico senza deformarsi in corrispondenza del punto di applicazione.

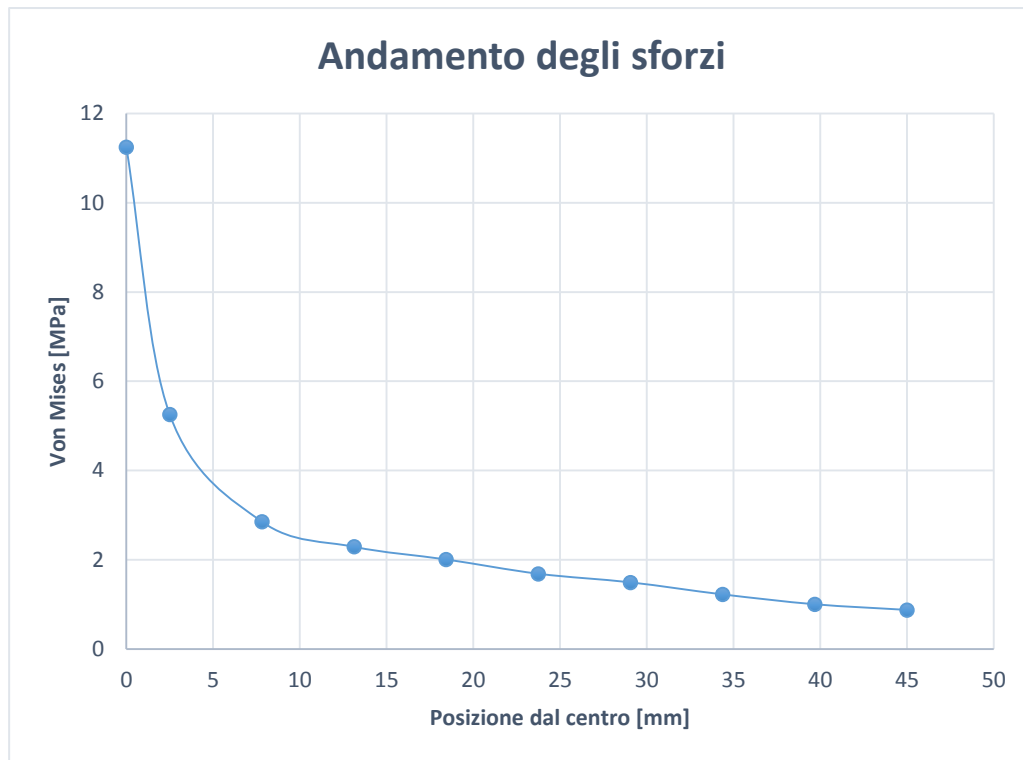


Figura 43 - Andamento dello sforzo in prossimità del carico

Come si può notare la zona più sollecitata corrisponde ai nodi su cui è stato imposto il carico; tuttavia spostandosi verso l'esterno la sollecitazione si riduce drasticamente. Nel test reale bisogna considerare che non si avrà mai una condizione di appoggio perfettamente puntiforme, quindi il valore di picco risulta comprensibilmente molto elevato a causa delle modalità con cui viene imposto il carico nella simulazione. E' più importante osservare il rapido decadimento dello stato di sforzo, che ci dà un'idea di come la sollecitazione si distribuisca nelle zone adiacenti. Possiamo dunque ritenere che la struttura possa sopportare correttamente le forze applicate.

Successivamente si sono estratti i dati relativi alle deformazioni ed agli sforzi associate ai percorsi dei sensori in fibra ottica. Per ottenere questi grafici si è determinato un sistema di riferimento in coordinate cilindriche centrato nel pannello, poi si è ottenuto il percorso come circonferenza determinata dai valori in corrispondenza della distribuzione discreta di nodi della *mesh*.

Ricavando dai risultati la componente tangenziale del campo delle deformazioni si sono potuti ricavare anche i valori degli sforzi lungo i due percorsi, permettendoci di ottenere il seguente andamento:

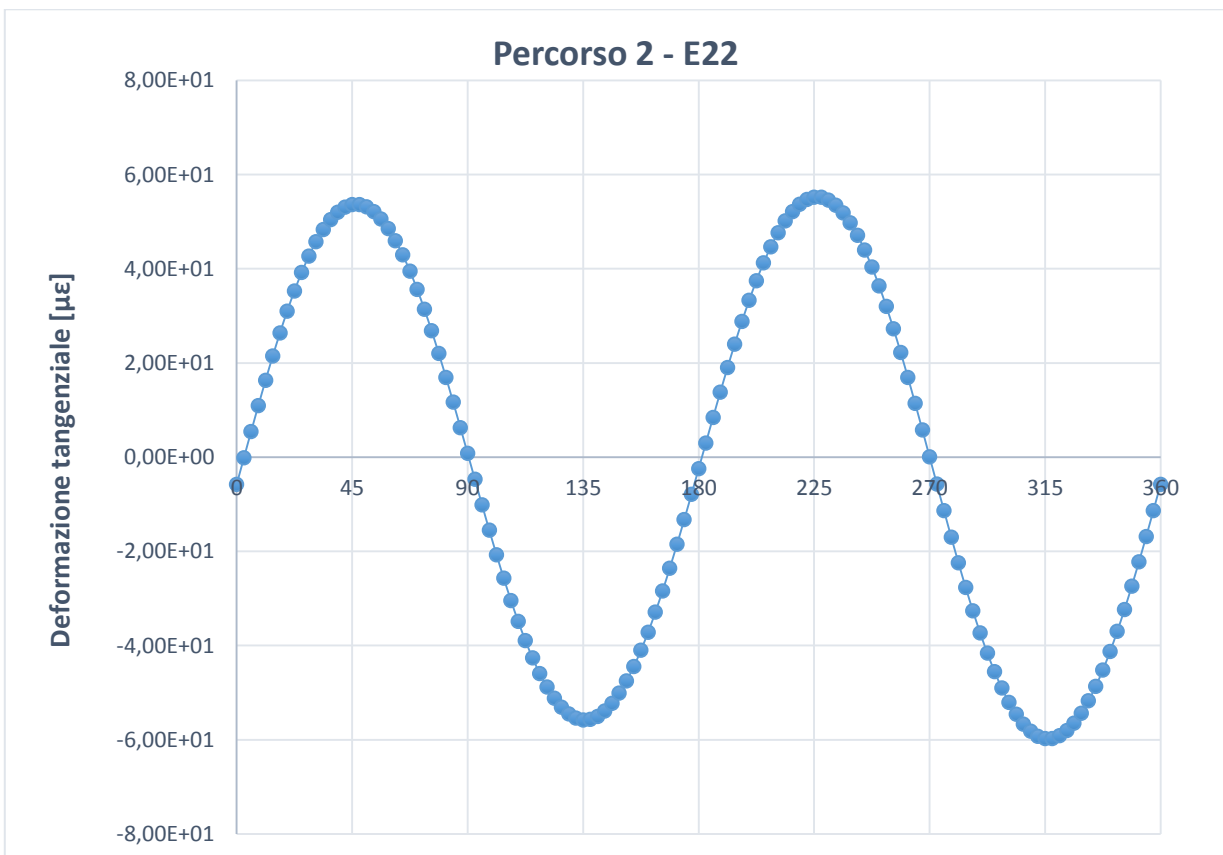
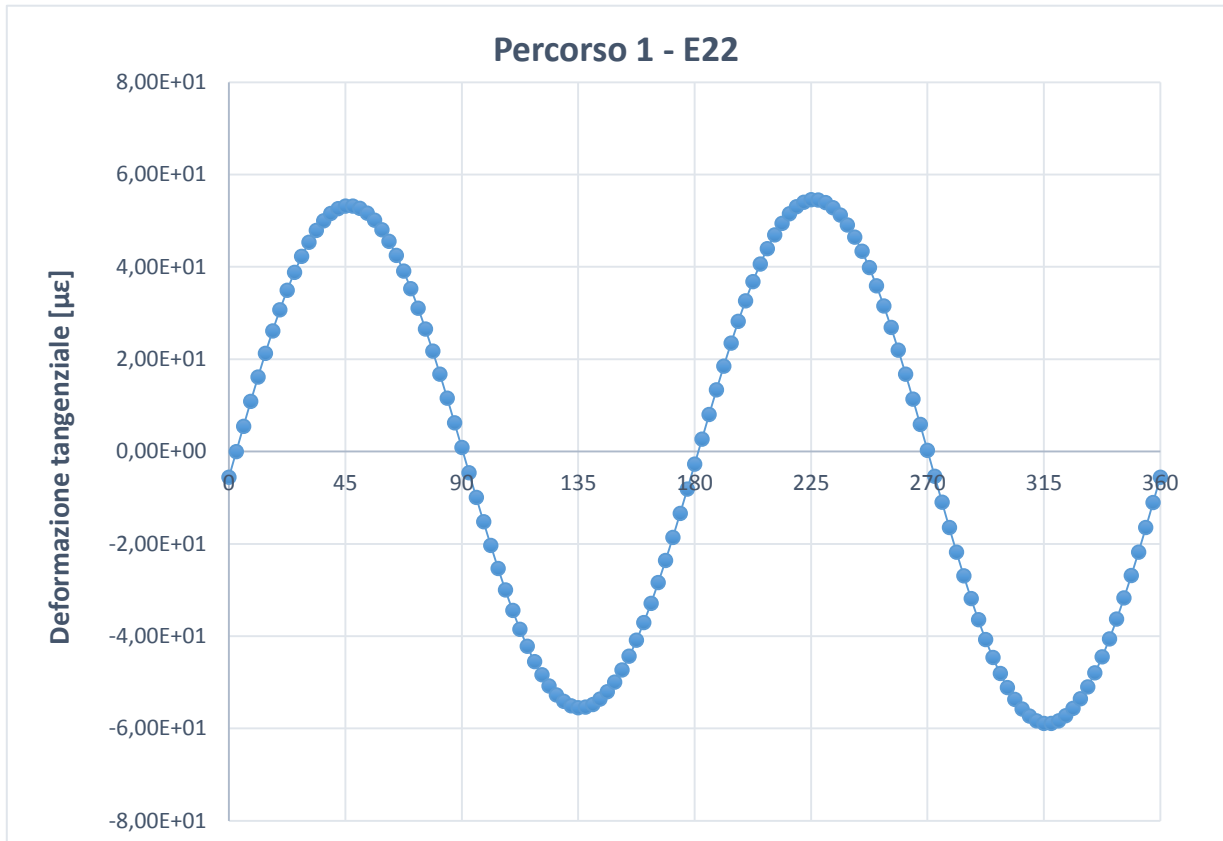


Figura 44 - Andamento delle deformazioni

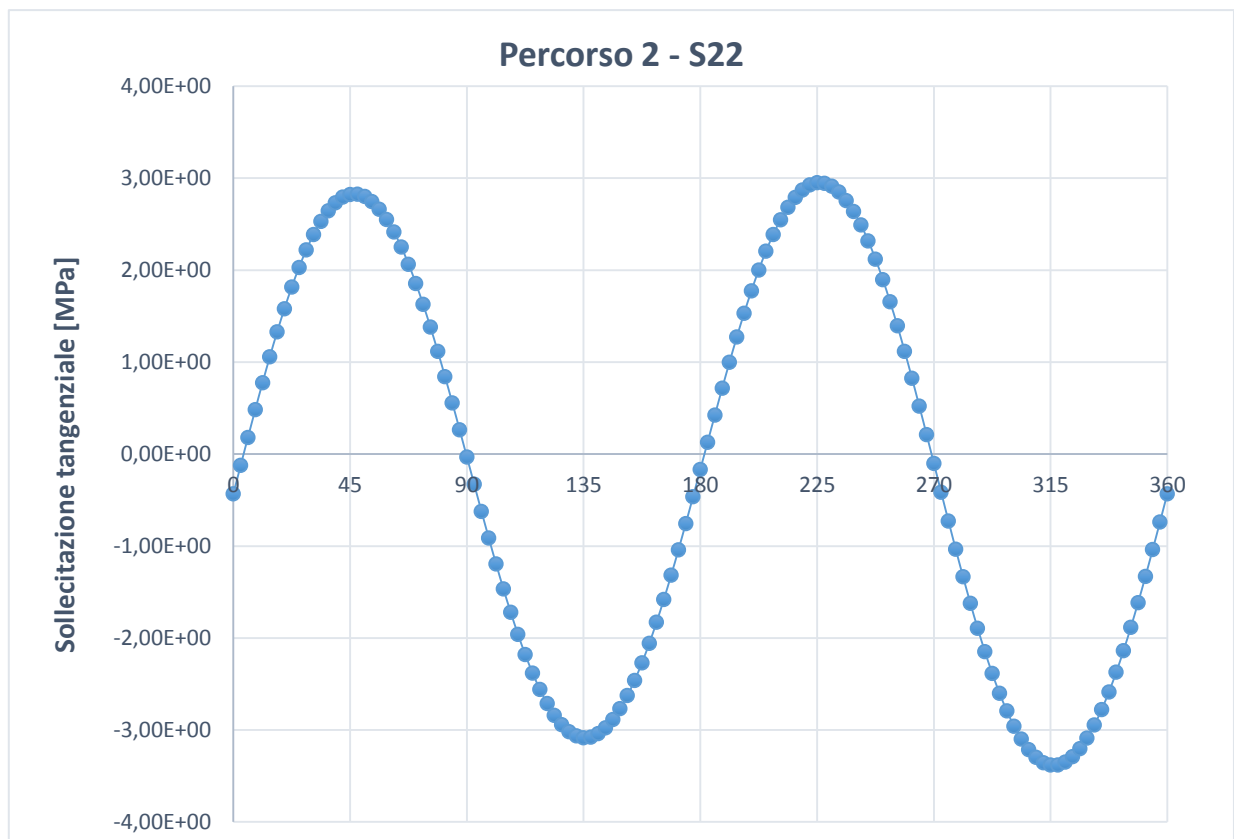
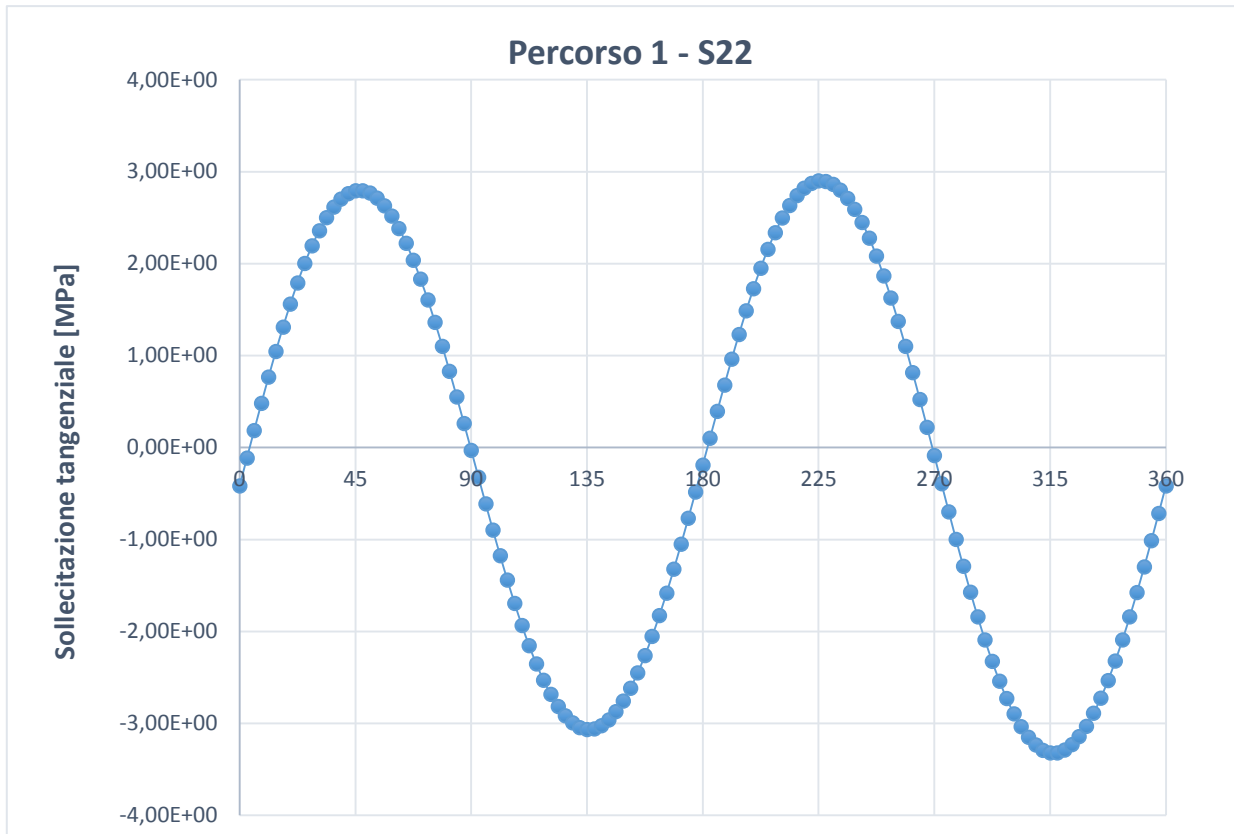
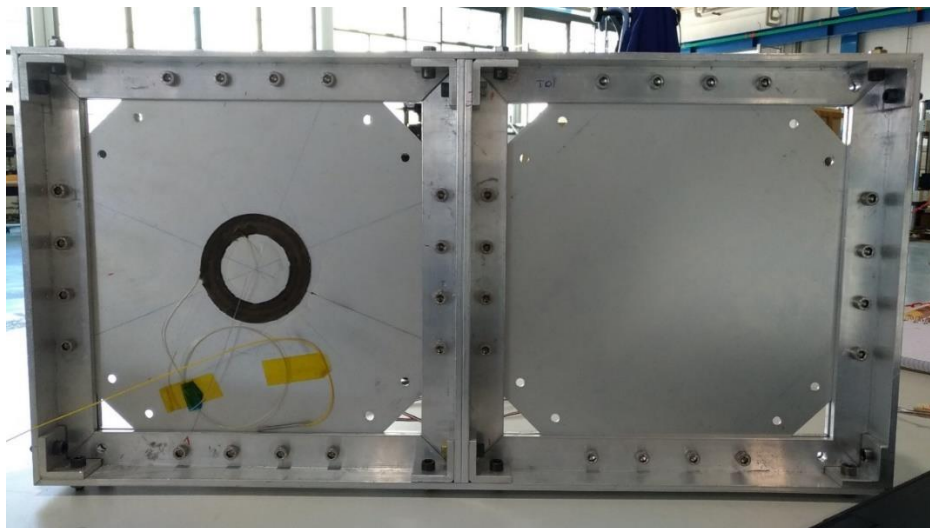


Figura 45 - Andamento delle deformazioni

Con S22 ed E22 si definiscono i valori di sforzo e deformazione associati alla seconda componente nel sistema di riferimento in coordinate cilindriche, ovvero quella tangenziale. Entrambi i set di dati mostrano un andamento che si può approssimare a quello di una sinusoide. Come nel caso dei test a trazione si può immediatamente notare che i valori di deformazione, così come quelli associati allo sforzo, sono equivalenti fra i due differenti percorsi. Osservando i risultati sul contorno, si può notare che il Monito-Ring non risenta degli effetti di bordo, quindi si può ritenere che sia verificata la condizione di puro taglio. Le deformazioni trasversali sono trascurabili.

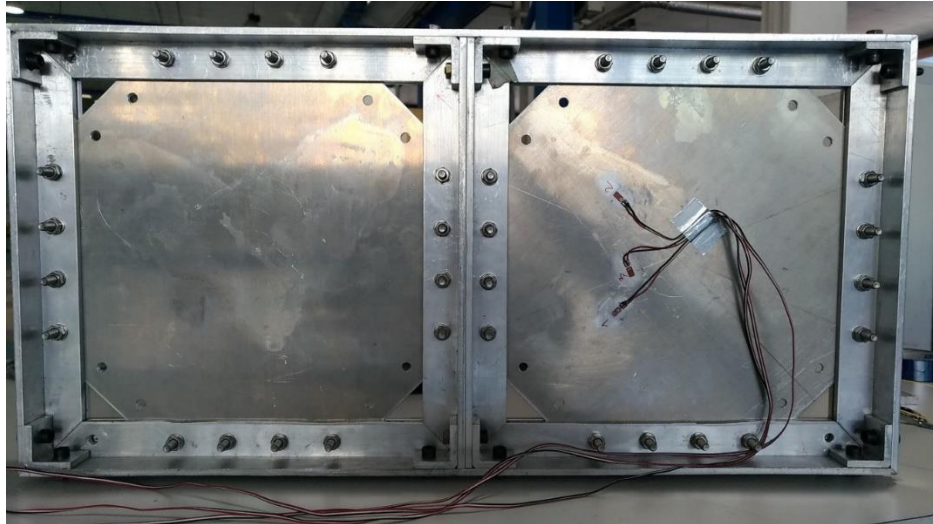
## 4.2. Fase di test

La fase di test è iniziata con il montaggio dei pannelli all'interno del telaio. Da un lato è stata installata la piastra strumentata con il Monito-Ring, mentre dall'altro si è utilizzata una piastra semplice, necessaria a garantire una condizione di simmetria nella struttura. Il fissaggio dei bulloni avviene con l'ausilio di una chiave dinamometrica allo scopo di garantire la corretta coppia di serraggio.



*Figura 46 - Trave di Wagner, vista anteriore*

Sulla faccia opposta della piastra strumentata sono installati tre estensimetri in posizioni differenti: due hanno la funzione di verificare le condizioni di carico imposte, il terzo è stato posizionato in corrispondenza di uno dei sensori FBG inglobati nel Monito-Ring. La corrispondenza nel posizionamento dei trasduttori consente di avere un controllo sul valore di deformazione che il sensore dovrebbe rilevare.



*Figura 47 - Trave di Wagner, vista posteriore*

Il telaio è stato quindi posizionato sulla pressa idraulica. La macchina di prova monoassiale in dotazione al laboratorio tecnologico che si è deciso di utilizzare è una MTS 858 Mini Bionix.II. E' una macchina di prova da banco adatta a diversi tipi di test statici e dinamici con un range di carico che si estende fino a 25 KN. Attraverso l'applicazione di diversi adattatori è possibile realizzare test a trazione, compressione, flessione e test a fatica.



*Figura 48 - Setup sperimentale completo. Base di supporto*

In figura si può osservare la configurazione adottata per l'esperimento ed il particolare della base d'appoggio, su cui sono stati montati i cilindri per vincolare le estremità inferiore del telaio.

A questo punto si sono collegati il Monito-Ring al sistema di acquisizione dati Micron Optics descritto precedentemente, mentre gli estensimetri sono stati collegati ad un secondo sistema di acquisizione. Le rilevazioni sono state effettuate con una frequenza di due al secondo per quanto riguarda il sensore FBG; il sistema di acquisizione degli estensimetri invece effettuava rilevazioni dieci volte al secondo.

Per l'applicazione del carico si è realizzata una rampa, imponendo la velocità di spostamento dell'afferraggio mobile della macchina. Controllando manualmente la pressa idraulica si è partiti da una condizione di carico nullo ed una volta giunti a 1 KN si è invertito lo spostamento del mandrino per ritornare ad una condizione scarica della struttura. Questo processo di imposizione del carico ed acquisizione dati è stato ripetuto otto volte; di volta in volta si effettuavano i test, dopodiché si smontava il telaio e si procedeva alla rotazione di 45° della piastra strumentata, in modo da simulare diverse direzioni di carico. In questo modo è stato possibile ricostruire per interpolazione dei dati lo spettro di carico rilevato dal Monito-Ring.

E' da notare che la prima campagna di test è stata interrotta. Infatti applicando il carico stabilito di 1 KN, in alcune configurazioni la deformazione era troppo lieve ed era impossibile distinguere il segnale determinato dallo sforzo dal rumore nel segnale rilevato dai sensori. Si è deciso dunque di aumentare il carico a 5 KN; tuttavia in questo caso si è riscontrato un problema differente. In alcune configurazioni i dati rilevati dal Monito-Ring e dagli estensimetri erano molto differenti. Analizzando i dati si è riscontrato che le deformazioni acquisite dai due differenti sistemi avevano segno opposto, portandoci a pensare che la piastra avesse subito fenomeni di flessione dovuti ad instabilizzazione. Allo stato attuale di studio del sensore non siamo ancora in grado di distinguere e separare i diversi contributi di deformazione associati ai singoli carichi. Per questo utilizzando la dima in nostro possesso sono state realizzate altre due piastre di spessore maggiore. Per determinare lo spessore è stato preso in esame lo studio realizzato presso il Politecnico di Milano riguardo il GLARE <sup>[20]</sup>, dove era stato prodotto un setup sperimentale molto simile. In quell'occasione la piastra di GLARE utilizzata aveva uno spessore di 1,85 mm e durante i test non aveva mostrato segni di instabilizzazione fino ad un carico di 20 KN. Il GLARE è un laminato composto dalla sovrapposizione di pannelli di alluminio e pannelli in composito e a parità di spessore presenta un modulo di Young inferiore ad un pannello di solo alluminio. Alla luce di ciò, si è adottata una strategia conservativa, decidendo di applicare un carico di 5 KN, carico inferiore a quello imposto nei test sul GLARE, e realizzando due nuovi pannelli strumentati di spessore pari a 2,5 mm. A questo punto si sono ripetuti nuovamente i test e si è passati all'analisi dei dati raccolti.

### 4.3. Risultati ed analisi dei dati

In questo paragrafo vengono illustrati e commentati i risultati ottenuti attraverso gli esperimenti relativi al test a taglio tramite la trave di Wagner. Verrà illustrato come i dati ricavati con il Monito-Ring sono stati elaborati ed analizzati allo scopo di ricavare il valore dello stato di sforzo nella zona ove il trasduttore è installato. Si illustreranno poi i dati ricavati attraverso i sensori estensimetrici e successivamente si verificherà il grado di accuratezza delle misurazioni comparando i risultati ottenuti attraverso i due sistemi di acquisizione.

#### 4.3.1. FBG

I dati ottenuti dal sensore FBG sono stati raccolti ed elaborati automaticamente dal programma di acquisizione dati. Esso è stato impostato in modo tale da elaborare i dati relativi alle deformazioni ricavate dal sensore FBG e fornire lo sforzo associato a tale deformazione.

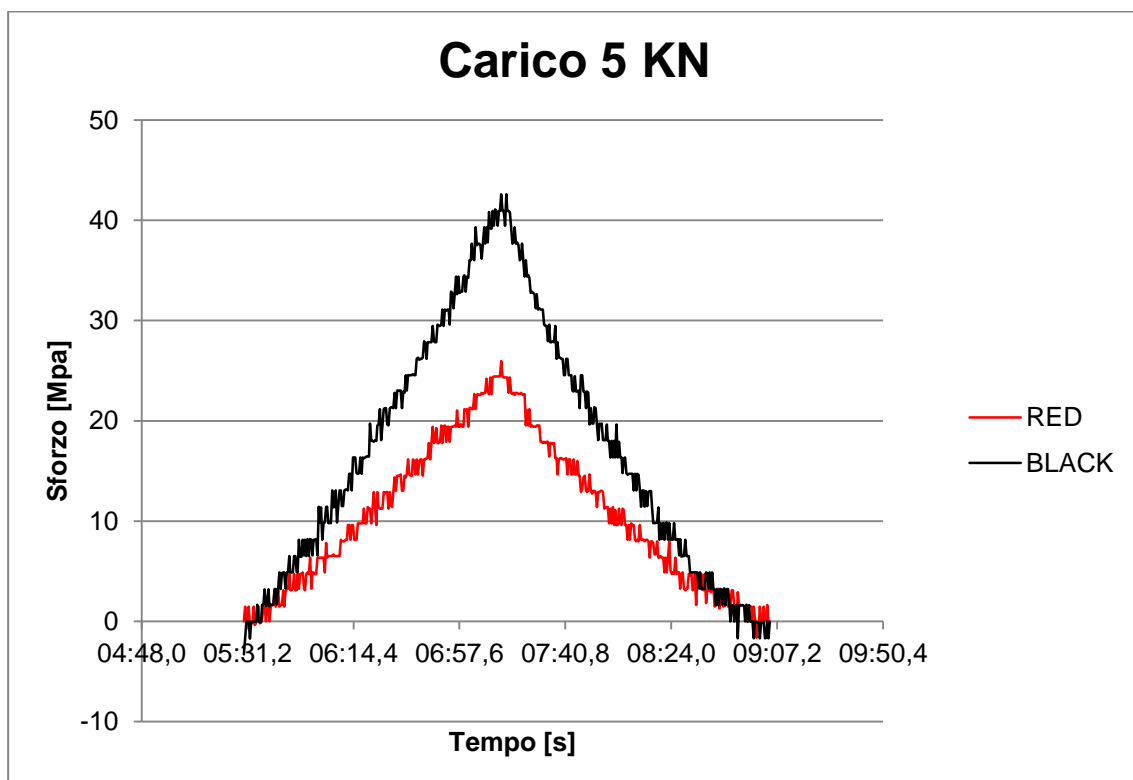


Figura 49 - Sforzo rilevato dal Monito-Ring



Con RED e BLACK vengono denotati i valori ricavati dai due sensori FBG inglobati all'interno del Monito-Ring. Si può immediatamente notare come le due serie di dati differiscano; infatti i due sensori sono posizionati con uno sfasamento di circa  $22^\circ$  lungo la circonferenza del sensore, dunque rilevano il carico come proveniente da due direzioni distinte. Il dato di nostro interesse è quello relativo al picco di sforzo che si riscontra quando il carico applicato è pari a 5 KN. Come si può notare la serie di dati è affetta da rumore. Per questo allo scopo di ricavare il valore di picco di sforzo si è fatta una media dei cinque valori più alti registrati. Nelle zone dove il carico determinava una compressione e quindi uno stato di sforzo negativo, si è fatta la media sui cinque valori più bassi.

Dalla elaborazione dei picchi raccolti per i due sensori FBG si sono potuti ricavare i seguenti andamenti.

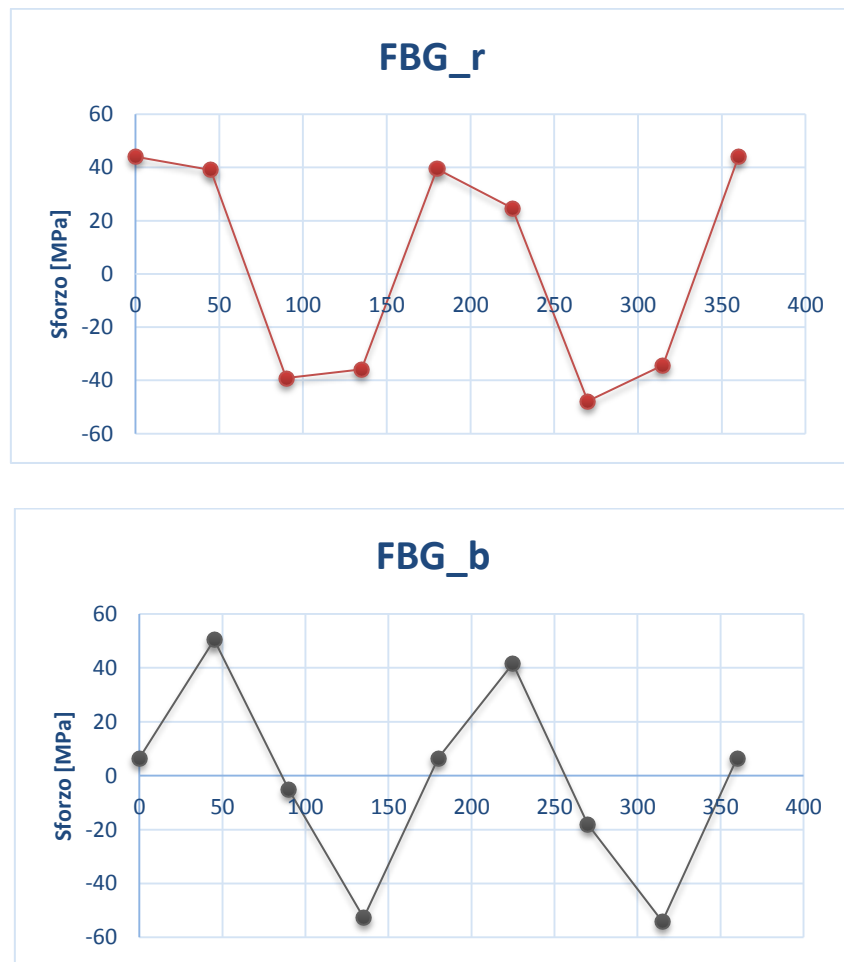


Figura 50 – Sforzi rilevati dal Monito-Ring

Da questi primi grafici si può notare un certo grado di simmetria nei valori di sforzo associati alle diverse orientazioni di carico. Per avere un'idea migliore della distribuzione degli sforzi e del loro andamento si è realizzato un *fitting* dei dati con l'ausilio del programma di calcolo Matlab. Per

eseguire l'interpolazione si è utilizzato il toolbox Curve fitting; sapendo dalle analisi numeriche che l'andamento degli sforzi era approssimabile ad una funzione sinusoidale, si è utilizzata un'interpolazione di tipo *sum of sine* con un troncamento al terzo termine ottenendo i seguenti andamenti:

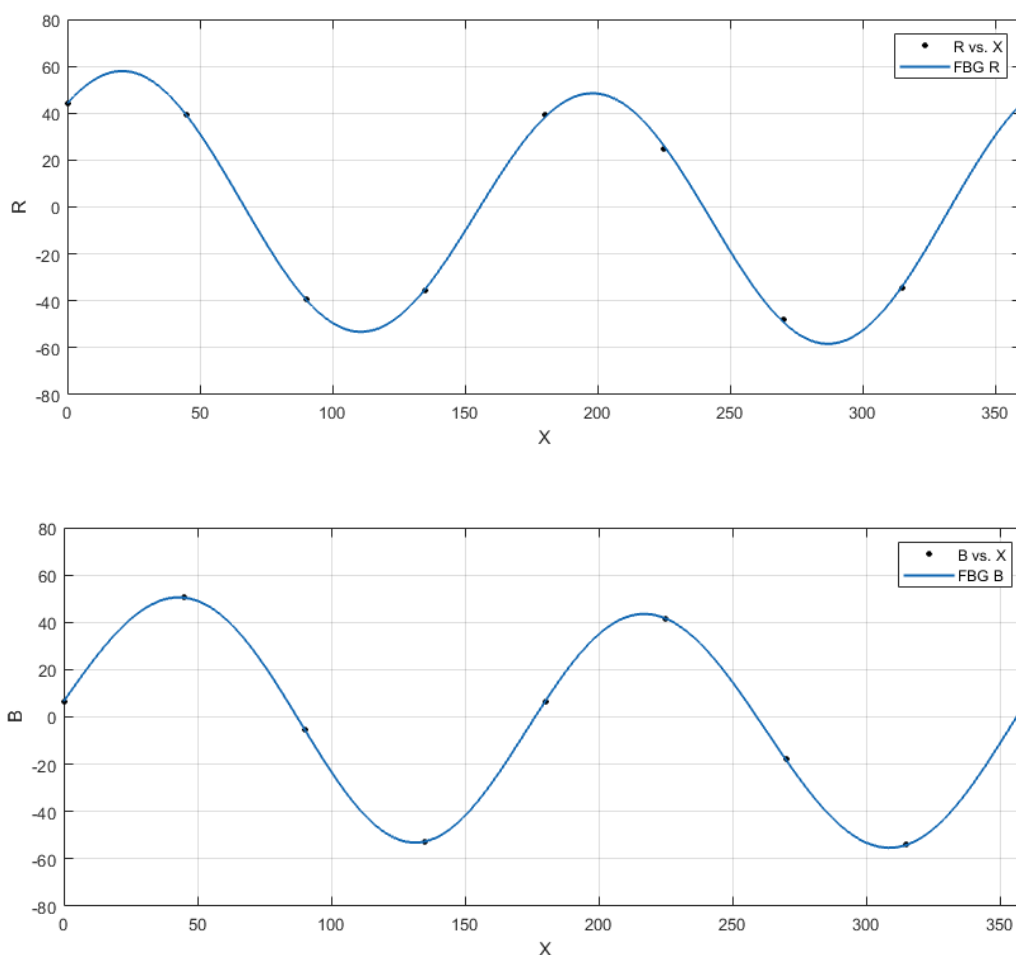


Figura 51 - Fitting dei set di dati FBG R ed FBG B

In questa elaborazione è ancora più evidente la simmetria negli sforzi rispetto all'asse neutro. Il valore zero sull'asse delle ascisse determina la posizione della prima rilevazione ottenuta con il singolo sensore FBG. Come già riportato i due sensori inglobati presentano una sfasatura di circa  $22^\circ$  sul percorso circolare del Monito-Ring, per questo motivo i due set di dati risultano traslati. Questa particolare condizione ci aiuta ad osservare nuovamente la capacità del Monito-Ring di rilevare le differenti direzioni di provenienza del carico come variazione di fase degli spettri di carico. Grazie a questa ricostruzione è possibile ottenere una previsione dello stato di sforzo nei punti non rilevati.

### 4.3.2. Estensimetri

Gli estensimetri reagiscono alla deformazione imposta alla piastra, variando la propria resistenza elettrica. Attraverso la legge fondamentale dell'estensimetria, il sistema di acquisizione dati ricostruisce lo stato di deformazione e da esso lo stato di sforzo locale a cui è soggetto il pannello ottagonale. Anche in questo caso per ovviare al rumore del segnale si è fatta una media dei valori massimi e minimi di sforzo rilevati e successivamente si è ricavato il grafico in Figura 51.

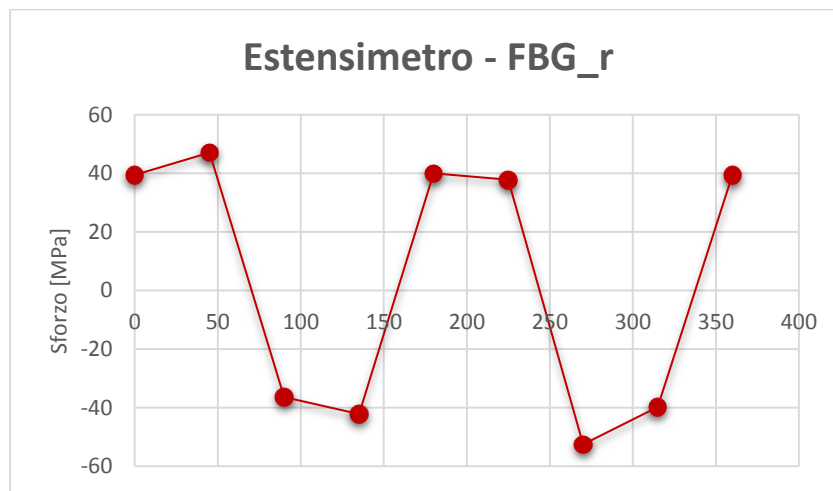


Figura 52 – Sforzi rilevati dagli estensimetri

Si è poi realizzato un *fitting* di dati con il programma Matlab ottenendo questo andamento:

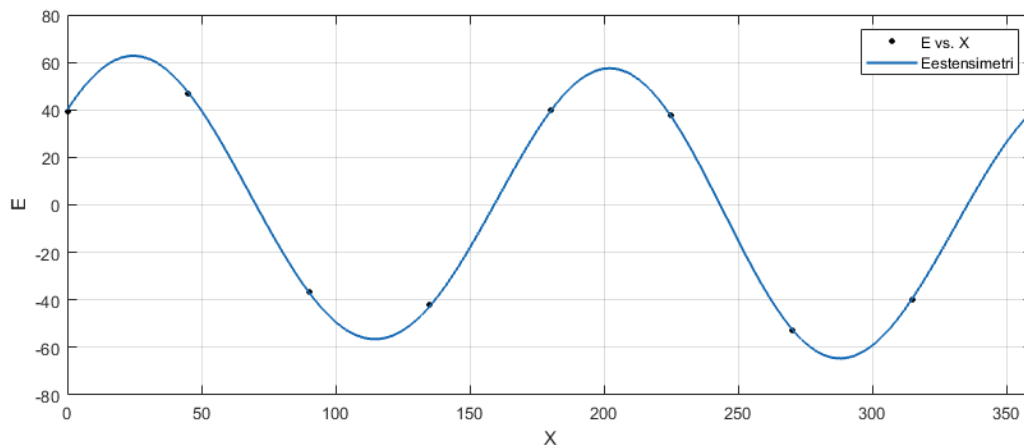


Figura 53 - Fitting dal set di dati degli estensimetri

Anche in questo caso si è effettuato un *fitting* con approssimazione *sum of sine*. Come nel caso dei sensori FBG, gli estensimetri mostrano chiaramente un andamento degli sforzi simmetrico rispetto all'asse neutro.

Per verificare l'accuratezza delle misurazioni ottenute con il Monito-Ring, si è realizzato un confronto fra i dati ricavati dall'estensimetro ed i dati forniti dal sensore FBG posizionato nello stesso punto, sull'altro lato del pannello.

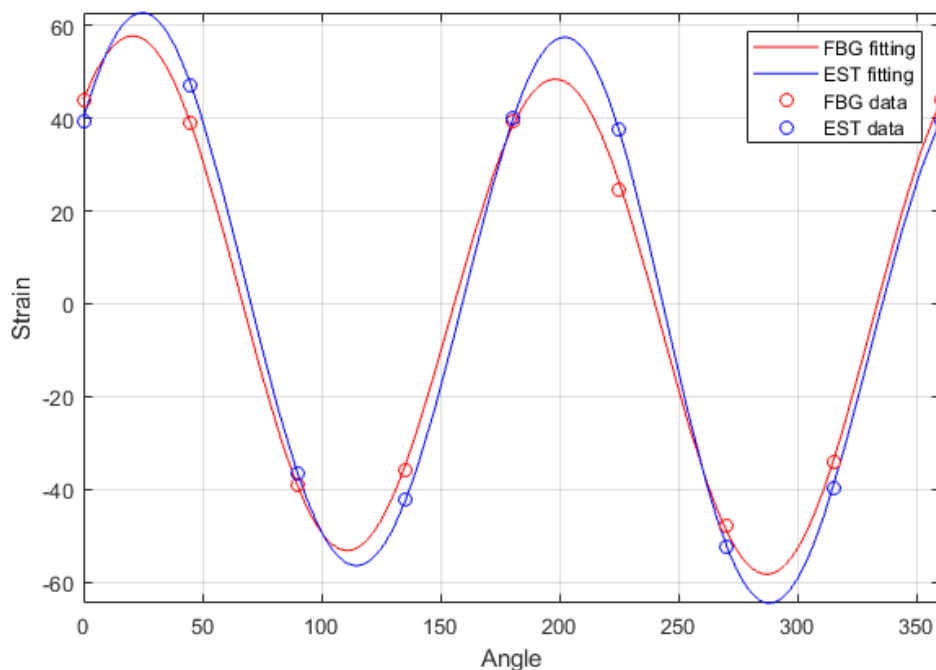


Figura 54 - Comparazione FBG e estensimetro

L'andamento delle curve si mostra sostanzialmente identico. I valori di picco ricostruiti invece presentano una scarsa correlazione. Le motivazioni di questa discrepanza possono essere molteplici. Durante la fase di test si è potuto notare che le due maschere del telaio non poggiavano sempre in maniera equivalente sui cilindri di supporto. Ogni test effettuato comportava lo smontaggio del telaio per permettere la rotazione della piastra strumentata. Piccoli errori nella sequenza di serraggio dei bulloni possono causare leggeri disallineamenti della struttura complessiva. Questa condizione può aver portato ad una applicazione del carico non perfettamente simmetrica fra le due facce opposte del pannello strumentato. In Figura 54 si può notare infatti come in alcune rilevazioni ci sia una marcata corrispondenza, mentre in altre i valori presentino difformità. Un altro fattore da considerare è la possibilità che otto punti di rilevazione non siano un numero sufficiente di dati per ricostruire fedelmente lo spettro di carico lungo tutta la circonferenza del Monito-Ring.

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scopo del presente lavoro di tesi era finalizzato allo sviluppo di un trasduttore che utilizzasse la tecnologia dei sensori in fibra ottica per la rilevazione dei carichi nelle strutture intelligenti. Essere in grado di rilevare gli sforzi a cui una struttura è soggetta rappresenta un fattore chiave nell'ambito dello *Structural Health Monitoring*. Inoltre poter ricostruire la direzione, il verso e l'intensità dei carichi agenti attraverso algoritmi di identificazione, costituisce una grande opportunità per lo sviluppo di metodi predittivi sul ciclo di vita delle strutture. Riuscire a sviluppare tecniche affidabili e non invasive che permettano la rilevazione di deformazioni e sforzi agenti sulle strutture rappresenta un compito non semplice ma di grande utilità. In questo senso lo studio sul Monito-Ring costituisce un interessante opportunità per sviluppare un sensore innovativo che sia in grado di rilevare le deformazioni del componente su cui sia installato, ricavarne lo stato di sforzo e identificare i carichi che hanno causato tale stato di sollecitazione.

Il Monito-Ring è un trasduttore ad anello realizzato con un preimpregnato di fibra di vetro che sfrutta i sensori in fibra ottica inglobati al proprio interno per la rilevazione delle deformazioni. La particolare geometria di questo componente è stata ideata per poter ottenere i valori di deformazione indipendentemente dalla loro orientazione. I sensori in fibra ottica possono essere inglobati su diversi percorsi circolari e tra diversi strati del laminato per ottenere le configurazioni più adatte allo scopo. Inoltre la capacità delle fibre ottiche di sfruttare diverse tipologie di sensori rende il Monito-Ring estremamente versatile.

In questa ricerca l'attenzione si è rivolta alla capacità del trasduttore in esame di rilevare un carico planare di puro taglio. La ricerca effettuata nel campo dei test a taglio ci ha portati a sviluppare il setup sperimentale illustrato che ha permesso di produrre un esperimento con il metodo della trave di Wagner. Il processo di sviluppo è passato da una prima fase di analisi numerica che è stata utile per progettare i componenti necessari per il test e ha fornito dei risultati preliminari sul funzionamento del Monito-Ring. Successivamente si è potuto procedere alla realizzazione e montaggio dei componenti presso il laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano.

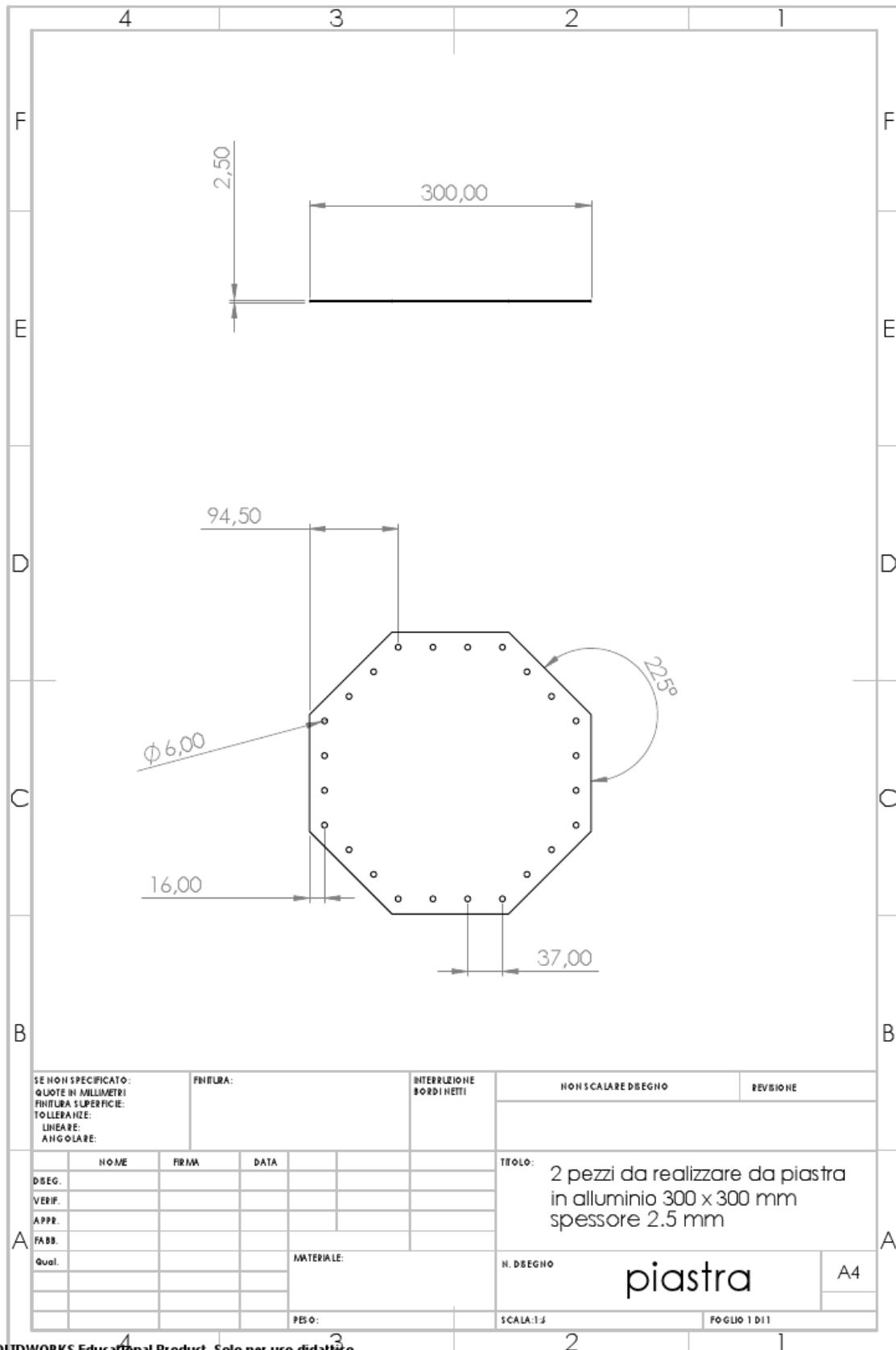
Durante la fase di test sono state riscontrate alcune difficoltà, tuttavia con un'analisi critica dei risultati ottenuti si sono potute effettuare le modifiche necessarie per procedere al corretto svolgimento dell'attività sperimentale. I dati ottenuti hanno fornito risultati interessanti circa la capacità del Monito-Ring di rilevare le deformazioni prodotte su una piastra caricata a taglio. Si è potuto osservare in particolare la presenza di simmetrie negli andamenti che andavano a confermare i risultati numerici ottenuti con le simulazioni. Inoltre la differenza di fase mostrata dal campo di deformazione associato

ai due sensori FBG inglobati, ci ha mostrato come il Monito-Ring abbia le potenzialità per permetterci attraverso algoritmi di identificazione di ottenere informazioni sulla direzionalità del carico.

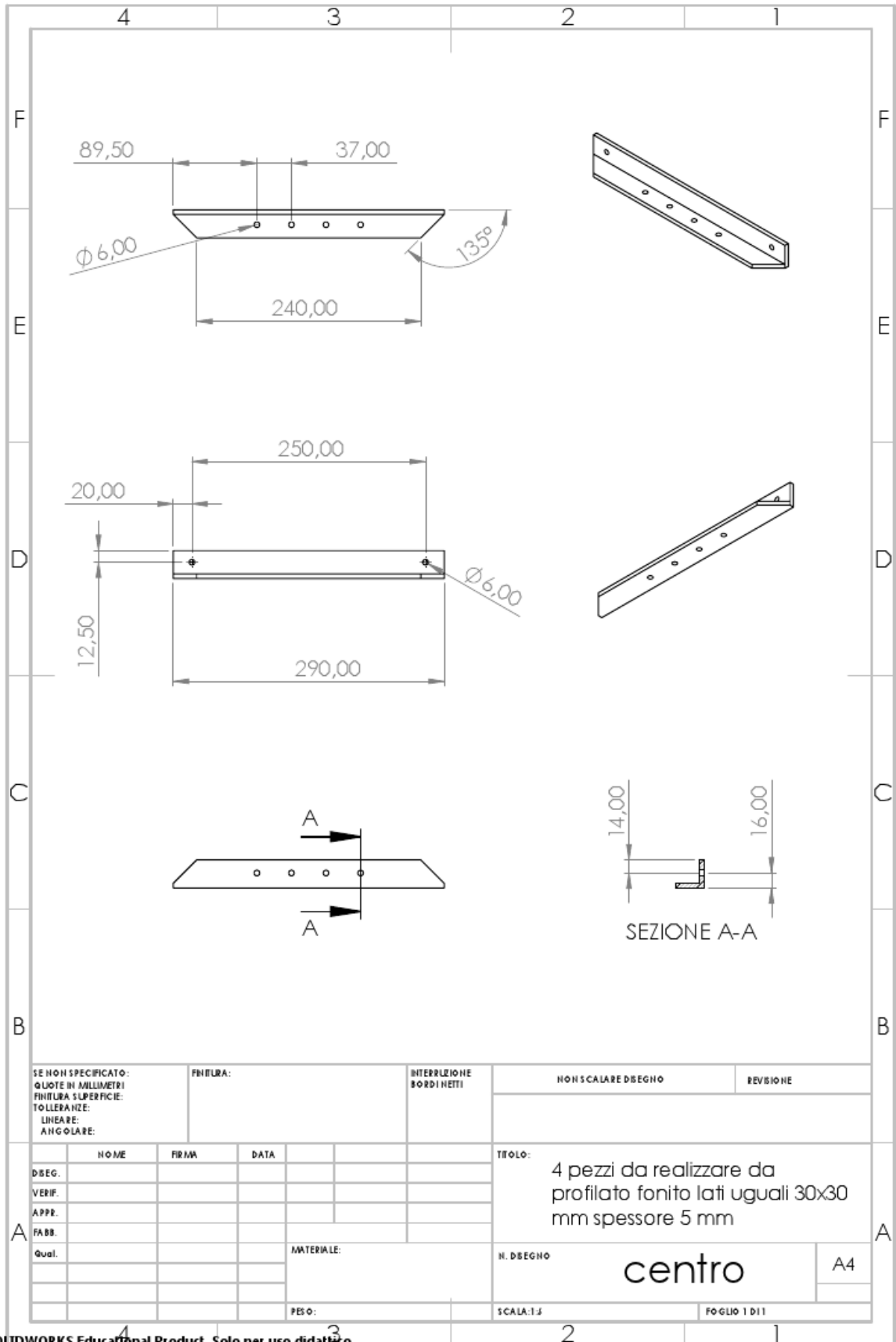
La comparazione tra i dati ottenuti con il Monito-Ring e gli estensimetri ci mostra come il trasduttore studiato sia effettivamente in grado di rilevare correttamente l'andamento degli sforzi generati da un carico a taglio. Tuttavia la limitata corrispondenza di alcuni dati suggerisce che ci siano margini di miglioramento per quanto riguarda questa tipologia di test. Ricerche future si potranno concentrare su metodi che permettano di garantire una maggiore simmetria nell'imposizione del carico sulle piastre strumentate. Inoltre tecniche di assemblaggio differenti potrebbero permettere una rotazione delle piastre più rapida ed efficiente.

Per quanto riguarda il Monito-Ring ed il suo sviluppo ci sono ancora molti aspetti da approfondire. In questo studio ci si è limitati all'utilizzo di fibre ottiche con sensori FBG, ma come illustrato esistono tecnologie di rilevazione alternative basate sulla fibra il cui utilizzo può essere valutato. Dopo aver analizzato la risposta a carichi di trazione, flessione e taglio, il prossimo studio si potrebbe concentrare sulla risposta ad altri tipi di carichi semplici come quello torcente. Quando si avranno risultati completi relativi ad ogni tipologia di sollecitazione, si potrà procedere alla completa taratura di questo trasduttore. Lo scopo finale sarà quello di studiare algoritmi di identificazione che siano in grado, partendo dai dati sulle deformazioni ottenuti attraverso il Monito-Ring, di darci informazioni dettagliate sulle forze agenti sulle strutture, riuscendo a discernere la natura dei differenti carichi applicati.

# Appendice

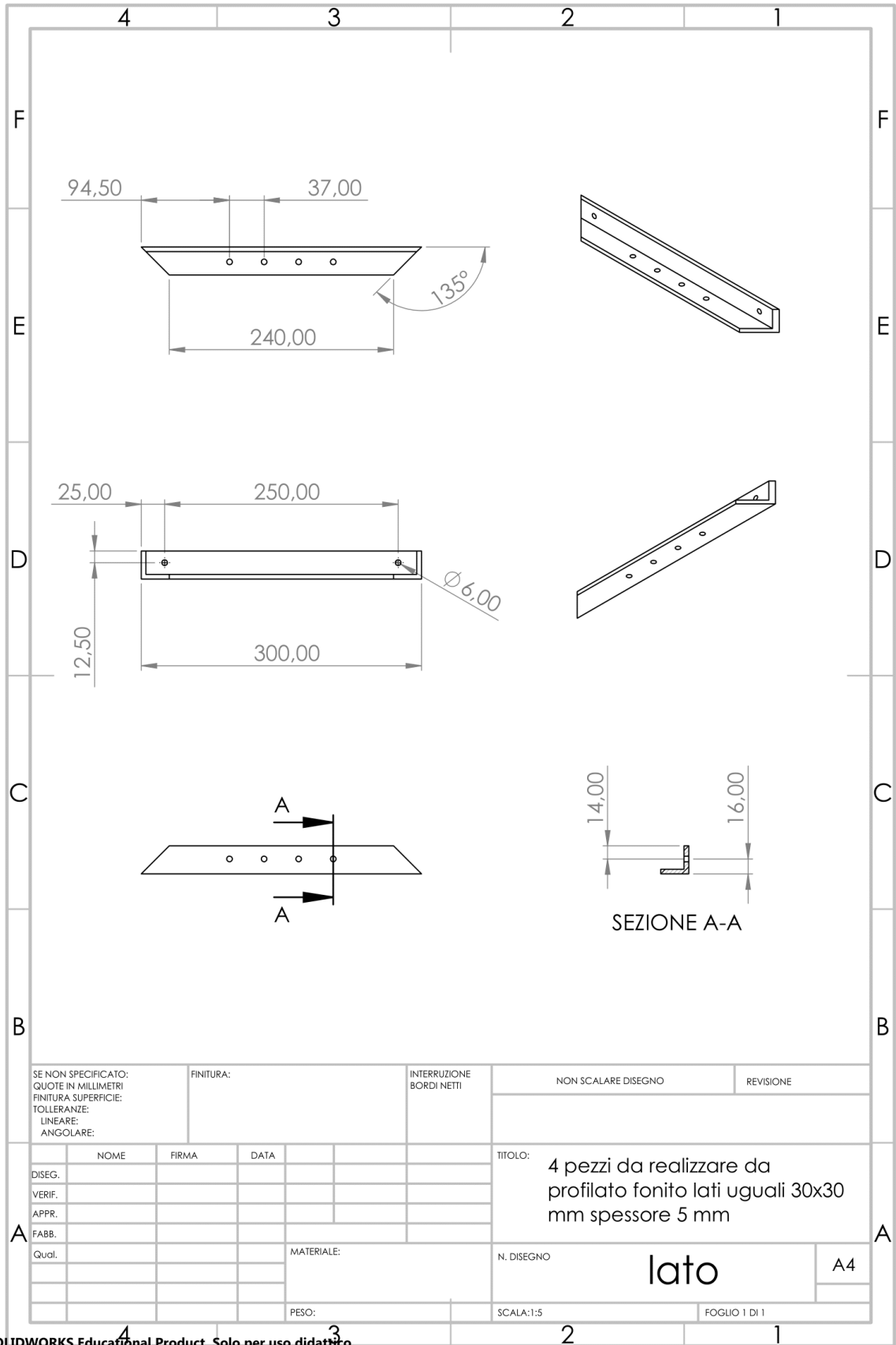


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

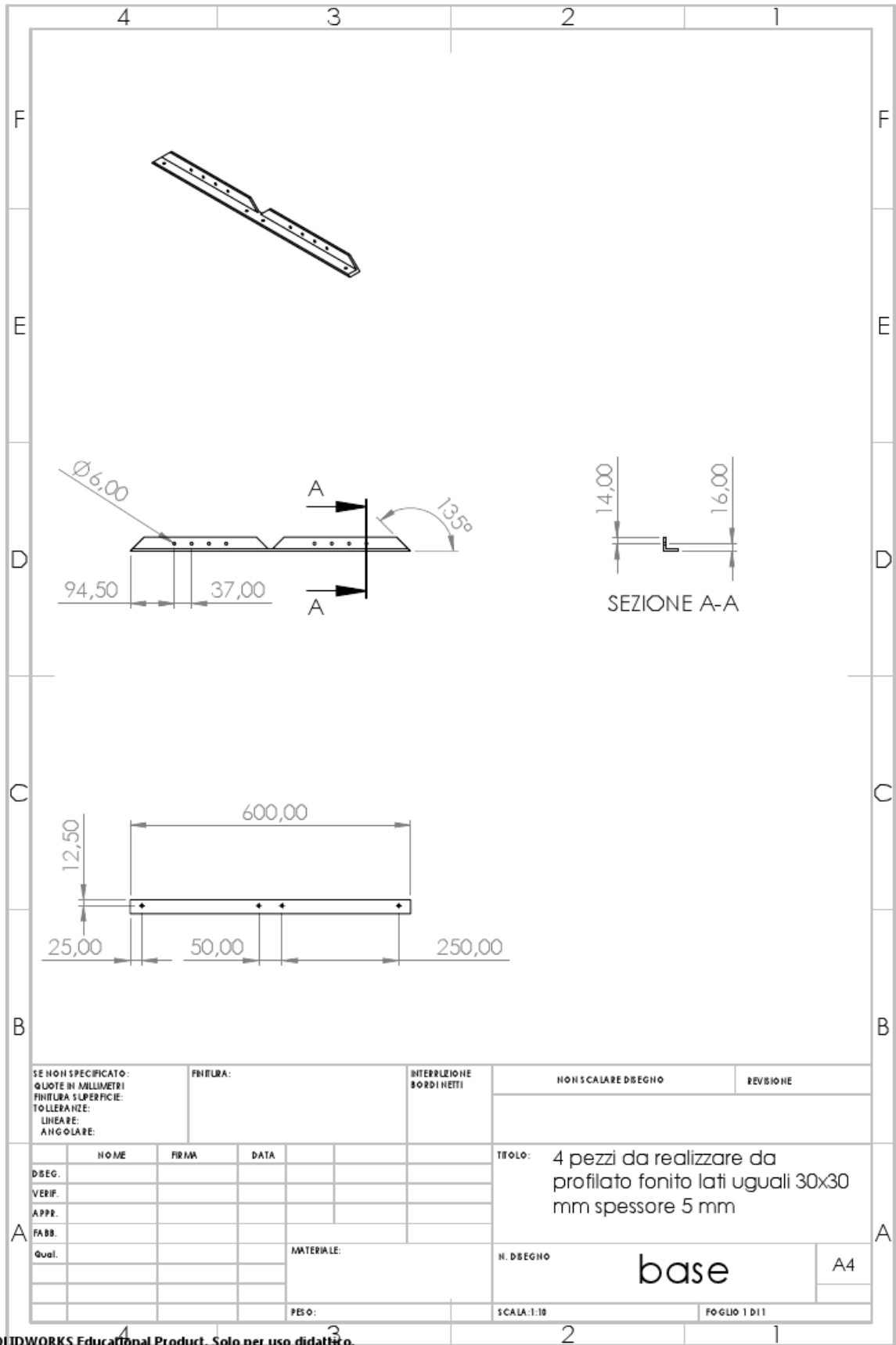


SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

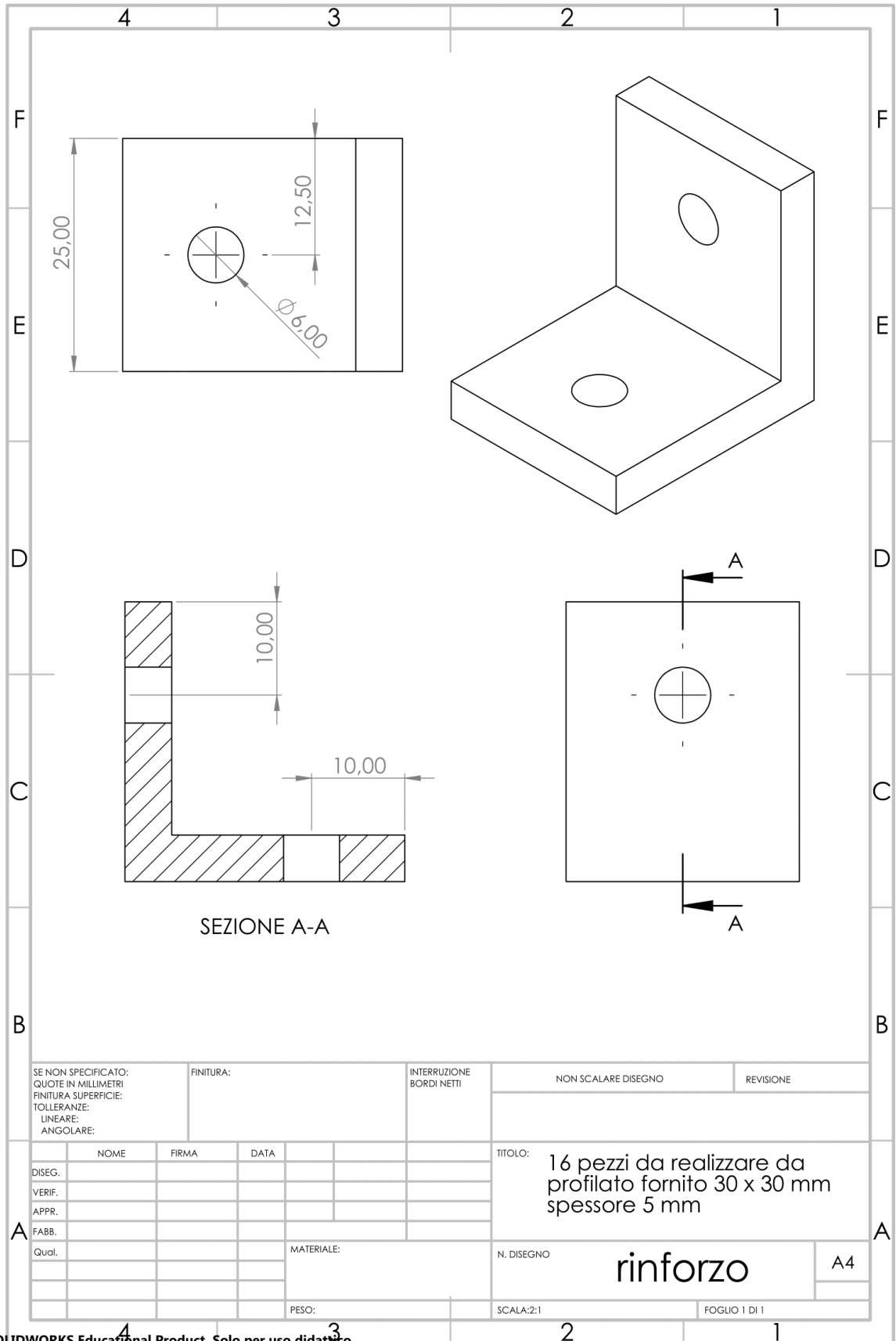




SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



## Bibliografia

- [1] Sala G., Di Landro L., Airoldi A., Bettini P., Dispense di tecnologie e Materiali Aerospaziali, Cap. 52 – Materiali intelligenti, Politecnico di Milano
- [2] Sbarufatti C., Manes A., Giglio M., Mariani U., Molinaro R., Matta W. et al., Application of structural health monitoring over a critical helicopter fuselage component
- [3] Shanker R., Bhalla S., Gupta A. & Kumar M. P. (2011), Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* pp. 1-16
- [4] Khan A., Zafar S., Khan N., & Mehmood Z. (2014), History, current status and challenges to structural health monitoring system aviation field. *Journal of Space Technology*
- [5] Scott I. & Scala C. (1982), A review of non-destructive testing of composite materials. *NDT International*
- [6] Dan C., Malinowski P., Kudela P., Opoka S., Radzieński M., Mieloszyk M. et al., Validation of macro fiber composites for strain measurements in structural health monitoring applications of complex aerospace structures
- [7] Xu Z., Koltsov D., Richardson A., Le L. & Begbie M. (2010), Design and simulation of a multi-function MEMS sensor for health and usage monitoring. 2010 Prognostics and System Health Management Conference
- [8] Martinez M., Rocha B., Li M., Shi G., Beltempo A., Rutledge R. et al. (2012), Load monitoring of aerospace structures using micro-electro-mechanical systems (MEMS). ASME 2012 Conference on Smart Materials Adaptive Structures and Intelligent Systems
- [9] Byington C. S., Patrick R., Smith M. J. & Vachtsevanos G. J., Integrated software platform for diagnostics and prognostics with air vehicle HUMS
- [10] Pawar P. & Ganguli R. (2007), Helicopter rotor health monitoring - A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*
- [11] Walrath D. E. & Adams D. F. (1983), The Iosipescu shear test as applied to composite materials
- [12] Stojcevski F., Hilditch T. & Henderson L. C. (2018), A modern account of Iosipescu testing
- [13] Kumosa M. & Hull D. (1987), Mixed-mode fracture of composite using Iosipescu shear test
- [14] Arcan M., Hashin Z. & Yoloshin A. (1976), An experimental method to produce uniform plane stress states with application to fiber reinforced materials
- [15] Arcan M. (1984), The Iosipescu shear test as applied to composite material – Discussion
- [16] Mohr D. & Doyoyo M. (2002), Analysis of the Arcan apparatus in the clamped configuration

- [17] El-Hajjar R. & Haj-Ali R (2003), In-plane shear testing of thick-section pultruded FRP composites using a modified Arcan fixture
- [18] Jodoin A., Poon C., Straznicky P. V., Shi G. & Kok L., Diagonal tension in fibre-metal laminates
- [19] Wagner H., Flat sheet metal girders with very thin metal web – Part I, General theories and assumptions
- [20] Airoidi A., Bettini P., Lanzi L. & Sala G., Glare at Politecnico di Milano: Experiments and computation