



Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Tele-
comunicazioni

Tesi di Laurea Magistrale

Sensore in fibra ottica per misure distribuite di deformazione

Candidato:
Matteo Colucci
Matricola 1057238

Relatore:
Ch. Prof. Luca Palmieri

Anno Accademico 2013–2014

Ad Angelo, Maria Rosa, Margherita ed Emily,
ed a quanti mi hanno sostenuto lungo questo percorso.

Indice

1	Meccanica elastica	1
1.1	Elementi di elasticità lineare	1
1.1.1	Deformazione di un corpo solido	1
1.1.2	Stress di un corpo solido	2
1.1.3	La legge di Hooke	3
1.2	Cantilever Beam	4
2	Misure mediante strain gauges	7
2.1	Lo strain gauge	7
2.2	Conversione strain/tensione elettrica	8
2.2.1	Dimensionamento elettrico	10
2.2.2	Circuito amplificatore	10
3	Misure mediante fibra ottica	13
3.1	Introduzione alla sensoristica in fibra ottica	13
3.2	OBR 4600	14
3.3	Fibra e Cantilever Beam	16
4	Risultati sperimentali	19
4.1	Deformazione misurata con strain gauge e deformazione teorica	19
4.2	Incertezza associata alle misure con strain gauges	21
4.3	Deformazione misurata con fibra ottica	23
4.4	Calibrazione del sensore	29
4.5	Deformazione lungo la fibra	31
4.6	Mappe di deformazione	32
5	Conclusioni e sviluppi futuri	37
	Bibliografia	39

Introduzione

Il presente elaborato si pone l'obiettivo di mostrare come sia possibile sfruttare la fibra ottica come elemento sensore, in particolare per la rilevazione della deformazione meccanica indotta su di una trave a sbalzo.

Nella prima parte verrà trattata la teoria relativa alla meccanica elastica necessaria per realizzare lo studio, introducendo concetti quali stress e strain. Essi costituiscono il fondamento per l'analisi formale della prova di deformazione nota in letteratura come Cantelever Beam. Verrà successivamente presentata la tecnica classica di misura della deformazione che si avvale dell'elettronica, facendo uso di estensimetri (strain gauges) e circuiteria relativa all'acquisizione ed elaborazione dei dati. I campioni raccolti fungeranno da elemento di confronto e saranno utilizzati per la successiva calibrazione della fibra ottica. A seguire, la descrizione del setup sviluppato per la realizzazione di misure di deformazione meccanica tramite fibra ottica G.652 a basse perdite per curvatura. Nello specifico, caratteristiche e parametri relativi alla tecnica riflettometrica utilizzata per l'analisi di radiazioni luminose generate dal fenomeno noto come diffusione di Rayleigh. Negli ultimi capitoli di questo documento verrà dato ampio spazio ai risultati sperimentali, mettendo in luce le scelte operative adottate volte al raggiungimento dello scopo prefisso. La discussione dei risultati e la realizzazione di mappe di deformazione per la trave in esame concludono il presente studio.

I risultati presentati in questo elaborato sono frutto di attività svolte presso il *Laboratorio di campi elettromagnetici e fotonica* dell'Università degli Studi di Padova. Come strumento di studio ed analisi si è fatto largo impiego del software *MATLAB*.

Capitolo 1

Meccanica elastica

1.1 Elementi di elasticità lineare

Un solido è costituito da atomi, un atomo è a sua volta composto da elettroni, protoni e neutroni, ciascun elettrone è formato da... Questo tipo di approccio risulta essere eccessivamente dettagliato e non viene pertanto utilizzato nella teoria della elasticità, dove è stata sviluppata una teoria del continuo che, invece di considerare il comportamento dei singoli atomi, rappresenta una sorta di comportamento medio delle particelle che compongono il materiale stesso.

1.1.1 Deformazione di un corpo solido

Per studiare la deformazione di un corpo solido è sempre necessario confrontare almeno due configurazioni del corpo stesso, una di riposo, che costituisce il riferimento, e quella di interesse. Una qualsiasi configurazione può essere assunta come riferimento, e si definisce come *spostamento* il vettore attraverso il quale particelle del materiale considerato si muovono rispetto alla configurazione iniziale. Se tutte le particelle di un corpo si muovono rispetto allo stesso vettore spostamento, il corpo compie una traslazione solida. Se invece alcune particelle del materiale si muovono una rispetto all'altra si parla di *deformazione*. Nella flessione di una trave ad esempio le particelle appartenenti ad una faccia della trave si allontanano tra di loro e si ha dunque una tensione del materiale, contrariamente a quanto avviene sull'altra faccia del materiale stesso dove le particelle si avvicinano e si ha una compressione.

Per comprendere meglio i fenomeni studiati dalla meccanica elastica, si consideri un sistema di coordinate tridimensionali dove a ciascun punto del materiale sono associate tre coordinate (x, y, z) . Al tempo t , le funzioni $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$ e $w(x, y, z, t)$ rappresentano lo spostamento della particella (x, y, z) rispettivamente nelle direzioni x, y e z . Le funzioni considerate costituiscono il *campo di spostamento (displacement field)* dato il quale è possibile determinare il *campo di deformazione (strain field)*. Si considerino due particelle nella configurazione iniziale, la particella A di coordinate (x, y, z) e la particella B di coordinate $(x + dx, y, z)$. In questa configurazione di riferimento dunque le due particelle risultano separate da una distanza pari a dx . Si supponga ora che, ad un determinato tempo t , A e B si muovano in delle nuove posizioni. La componente x dello spostamento relativo

alla particella A è pertanto $u(x, y, z, t)$ e ugualmente lo spostamento relativo a B è $u(x + dx, y, z, t)$: la distanza tra A e B risulta dunque aumentata della quantità $u(x + dx, y, z, t) - u(x, y, z, t)$. La *deformazione assiale* nella direzione x è definita come

$$\varepsilon_x = \frac{u(x + dx, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (1.1)$$

La funzione $\varepsilon_x(x, y, z, t)$ rappresenta dunque la deformazione del materiale in un intorno del punto (x, y, z) ed è una componente del campo di deformazione del corpo. Per descrivere completamente lo stato di deformazione di un corpo è inoltre necessario introdurre la nozione di *deformazione di taglio (shear strain)*. Si considerino, nella configurazione di riferimento, due linee perpendicolari di particelle costituenti il materiale in oggetto. La deformazione agisce sull'angolo γ di incidenza tra le due linee modificandolo: questa variazione angolare prende il nome di deformazione di taglio. Tale definizione può essere utilizzata inoltre per ottenere una relazione deformazione-spostamento: considerando tre punti A , B e C di coordinate rispettivamente (x, y, z) , $(x + dx, y, z)$ e $(x, y + dy, z)$ nella configurazione deformata si ottiene che, nella direzione x , il punto A si è spostato della quantità $u(x, y, z, t)$ e C di $u(x, y + dy, z, t)$. Come conseguenza, la deformazione ruota il segmento AC attorno all'asse z di un angolo pari a

$$\frac{u(x, y + dy, z, t) - u(x, y, z, t)}{dy} = \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (1.2)$$

Analogamente la deformazione ruota il segmento AB attorno all'asse z di un angolo pari a

$$\frac{v(x + dx, y, z, t) - v(x, y, z, t)}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (1.3)$$

La deformazione di taglio nel piano xy è dunque la variazione netta dell'angolo

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (1.4)$$

Per un corpo solido immerso in uno spazio tridimensionale lo stato di deformazione è dunque definito da un totale di sei componenti:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.6)$$

1.1.2 Stress di un corpo solido

La deformazione di un corpo solido si ottiene come effetto dell'applicazione di sollecitazioni al corpo stesso. Tali sollecitazioni in meccanica prendono il nome di *stress*, definito rigorosamente come forza per unità d'area. Analogamente a quanto visto per la deformazione, anche lo stress viene descritto da un totale di 18 componenti, 3 per faccia. Si immagini un cubo di dimensioni infinitesime: su ciascuna faccia del cubo agiscono una componente normale alla faccia stessa (stress normale) e due componenti tangenziali (stress di taglio).

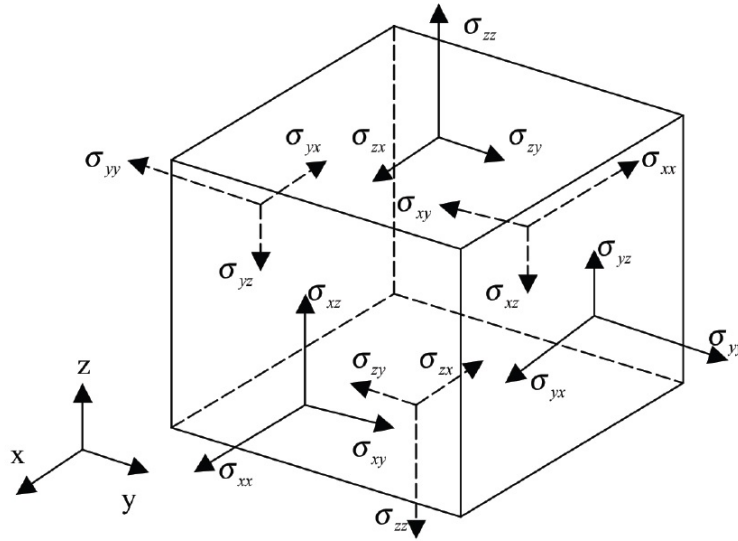


Figura 1.1: Componenti di stress.

In Fig.1.1 si ha che per σ_{ij} il primo indice identifica la direzione del vettore normale alla superficie, il secondo denota la direzione della componente di stress. Tenendo in considerazione il fatto che le forze agenti su di un corpo solido devono essere in qualsiasi momento in equilibrio, è possibile ridurre il numero di componenti da 18 a 6: i vettori di stress normale infatti formano delle coppie, mentre quelli di stress di taglio formano quadruplette. Lo stress applicato ad un corpo solido può pertanto essere descritto mediante una matrice simmetrica di dimensione 3:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

1.1.3 La legge di Hooke

La descrizione delle proprietà elastiche di un corpo solido non è generalmente banale, ma sotto le assunzioni di *isotropia* e *omogeneità* tale trattazione matematica si semplifica notevolmente.

- Un materiale si dice *isotropo* se la risposta alla sollecitazione in una determinata direzione è la stessa risposta che si ottiene in qualsiasi altra direzione applicando la medesima sollecitazione.
- Si considerino la scala macroscopica del corpo e la scala della microstruttura interna al materiale. Un materiale si dice *omogeneo* se la macro-scala di interesse è molto maggiore della scala della microstruttura.

I metalli sono un tipico esempio di materiali isotropi ed omogenei (in seguito le misure di deformazione verranno svolte su di un metallo, l'alluminio). Per descrivere le proprietà elastiche di un corpo solido isotropo e omogeneo sono sufficienti tre costanti indipendenti:

- il modulo di Young E , noto anche come modulo elastico o costante elastica, fornisce una misura della rigidità di un corpo elastico ed è definito dal rapporto

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [Pa/m^2, N/m^2]; \quad (1.7)$$

- il rapporto di Poisson ν , definito come

$$\nu = -\frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \varepsilon_x} = -\frac{\partial \varepsilon_z}{\partial \varepsilon_x} \quad (1.8)$$

ipotizzando l'applicazione di uno stress avente direzione parallela all'asse x ;

- il coefficiente di espansione termica α che caratterizza la deformazione indotta dalla variazione di temperatura.

La combinazione di stress multi-assiali e della variazione di temperatura permettono la determinazione dello stato di deformazione:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha \Delta T \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha \Delta T \quad (1.10)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha \Delta T \quad (1.11)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{xy}, \gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sigma_{zx}. \quad (1.12)$$

Concentrando tutte le informazioni descritte si ottiene la forma

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (1.13)$$

dove $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ e δ_{ij} vale 1 per $i = j$ e 0 altrimenti.

1.2 Cantilever Beam

Cantilever Beam tradotto letteralmente significa trave a sbalzo, e rappresenta una delle configurazioni più classiche per effettuare misure di deformazione in quanto la sua analisi matematica risulta agevole.

Come illustrato in Fig.1.2, si tratta di una trave ancorata ad una sola estremità mentre all'estremità libera viene applicata una forza F , generalmente un carico di massa m posto sopra alla trave o appeso ad essa ($F = mg$).

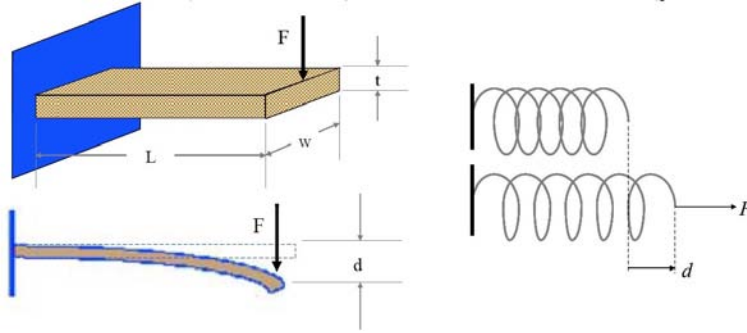


Figura 1.2: Trave a sbalzo vs molle elicoidali.

Tra la forza applicata e la deflessione della trave esiste una relazione lineare, che risulta valida se non si supera il limite di cedimento del materiale considerato oltre il quale il comportamento non è più elastico. Questa relazione è descritta da

$$F = \frac{3EI}{L^3}d \quad (1.14)$$

dove:

- E indica il modulo di Young ed è una caratteristica intrinseca del materiale utilizzato;
- L è la lunghezza della trave considerata;
- d la deflessione a fine trave;
- I rappresenta il momento di inerzia della sezione della trave. Tale grandezza fornisce una misura di come l'area della sezione trasversale sia distribuita attorno al centro della trave stessa, e per una trave a sezione rettangolare come quella in Fig.1.2 risulta essere

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (1.15)$$

con w che identifica la larghezza della barra e t il suo spessore.

Sostituendo la (1.15) nella (1.14) si ottiene che

$$F = \frac{Ewt^3}{4L^3}d. \quad (1.16)$$

Per misurare la deformazione di una trave a sbalzo soggetta ad un carico di flessione è necessario considerare innanzitutto che lo stress applicato varia da punto a punto. Flettendo la barra verso il basso, la superficie superiore della trave risulterà allungata in quanto sotto l'effetto di una tensione meccanica, a differenza della superficie inferiore che risulterà invece compressa. Nel passaggio da una condizione di tensione ad una di compressione, in un intorno del centro della barra si troverà un piano che non si allunga nè comprime: esso prende il nome di *asse neutro* (Fig.1.3).

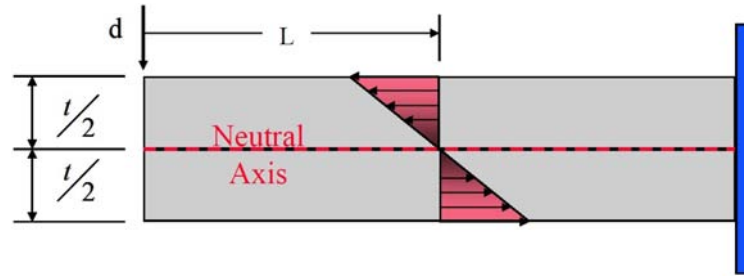


Figura 1.3: Distribuzione dello stress in una trave a sbalzo.

Per determinare lo stress, e dunque la deformazione, in ogni punto della trave si deve tener conto della relazione tra lo stress e il momento torcente M

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{Fxy}{I} \quad (1.17)$$

dove:

- $M = Fx$ è il momento torcente, con F forza applicata e x distanza tra il punto considerato ed il punto di applicazione della forza;
- y distanza tra il punto considerato e l'asse neutro.

Il punto di massimo stress si ha dunque per $x_{max} = L$, ovvero l'estremità ancorata della trave, e nullo per $x_{min} = 0$, ossia il punto di applicazione del peso. Ancora, considerando una sezione trasversale della barra, lo stress è massimo sulla superficie superiore ed inferiore dove $y_{max} = t/2$ e nullo sull'asse neutro.

Noto lo stress in un punto della trave, la deformazione è ottenuta banalmente mediante

$$\varepsilon = \sigma/E \quad (1.18)$$

e risulta costante per tutti i punti appartenenti alla stessa sezione della trave.

Si tratta di una deformazione uniassiale e come mostrato in Fig.1.2 può essere comparata con l'elongazione di una molla soggetta ad una forza esterna: non è più necessario dunque considerare derivate parziali e lo strain assume il significato di variazione relativa di lunghezza, ovvero

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (1.19)$$

È un valore adimensionale la cui unità di misura è definita come *strain* e indicato con ε e, date le entità delle deformazioni, spesso si ragiona in termini di *microstrain* ($\mu\varepsilon$).

Nel presente studio è stata utilizzata una trave di alluminio con i seguenti parametri:

- lunghezza complessiva pari a 50 cm , di cui 15 cm sono occupati dal sistema di ancoraggio al banco di lavoro e dunque la lunghezza utile effettiva è pari a $L = 35\text{ cm}$;
- larghezza $w = 25\text{ cm}$;
- spessore $t = 1.6\text{ mm}$.

Capitolo 2

Misure mediante strain gauges

Il sensore utilizzato per convertire lo strain meccanico in una grandezza quantificabile da un circuito elettronico è lo *strain gauge*, la cui resistenza elettrica varia in funzione della deformazione a cui è soggetto. Sebbene la variazione resistiva possa essere misurata mediante un ohmetro, si preferisce generalmente convertire tale variazione in una equivalente di tensione al fine di effettuare un'elaborazione del segnale. Tale tensione può infatti essere amplificata e consentire l'acquisizione di misure più soddisfacenti.

2.1 Lo strain gauge

Esistono vari tipi di strain gauges, le cui caratteristiche principali sono identificabili in:

- resistenza nominale $[\Omega]$, tipicamente compresa tra 120Ω e $1k\Omega$;
- gauge factor, che rappresenta la variazione di resistenza relativa allo strain applicato (valori tipici 1.9-2.1), definito come

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

- materiale di cui è composta la parte attiva, generalmente una lega Cu-Ni;
- materiale di cui è composta la base di supporto, tipicamente poliestere o polimide;
- dimensione e forma della parte attiva.

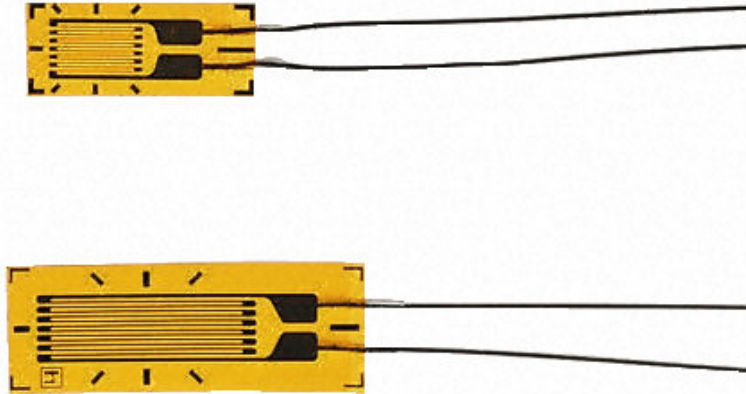


Figura 2.1: Strain gauge.

In questo studio è stato scelto uno strain gauge di forma analoga a quello mostrato in Fig.2.1, che risulta ottimizzato per misure di strain uni-direzionale. La dimensione scelta è di 8 mm per quanto riguarda la parte attiva, che rappresenta un buon compromesso tra le esigenze di maneggevolezza nel posizionamento e di costanza dello strain nell'area occupata dalla parte attiva. La resistenza nominale ha valore pari a $120\Omega \pm 0.5\%$ con gauge factor $GF = 2.1$, valori tipici e dunque più facilmente reperibili in commercio, che permettono di effettuare misure di deformazione fino al 4% (equivalenti a $40000 \mu\varepsilon$).

Il fissaggio sulla barra di alluminio utilizzata è stato realizzato mediante araldite, una resina epossidica bicomponente che garantisce una stabilità meccanica a lungo termine. Fondamentale prima di procedere al montaggio dello strain gauge è la pulizia della superficie di applicazione, realizzata mediante carteggiamento con carta abrasiva seguito da pulizia con acqua, per la rimozione dei residui di alluminio. L'ultima fase consiste in una pulizia con alcol per favorire il fissaggio della resina.

2.2 Conversione strain/tensione elettrica

Per misurare piccole variazioni di resistenza e convertirle in analoghe di tensione viene utilizzato il ponte resistivo di Wheatstone mostrato in Fig.2.2.

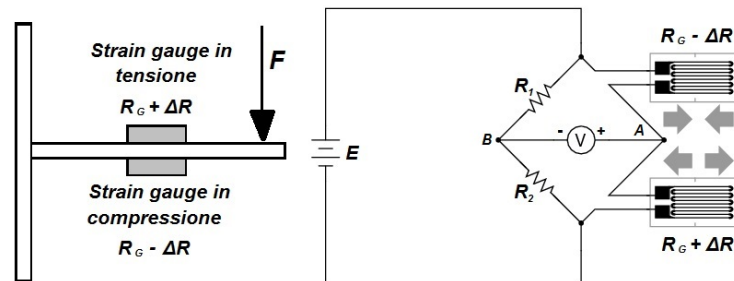


Figura 2.2: Ponte di Wheatstone - Configurazione half-bridge.

In questa configurazione la relazione tra tensione applicata E e tensione misurata V è definita da

$$V = \frac{GF \times \varepsilon}{2} E \quad (2.2)$$

dove GF rappresenta il gauge factor ed ε lo strain misurato. Manipolando la (2.2) si ottiene facilmente l'espressione dello strain misurato in funzione della tensione applicata E :

$$\varepsilon = \frac{2V}{GF \times E} \quad (2.3)$$

In condizioni di riposto, poste $R_1 = R_2 = R_G = 120\Omega(1\%)$, il ponte risulta in equilibrio ed i potenziali elettrici dei punti A e B risultano entrambi equivalenti a $E/2$: la differenza di potenziale V apprezzata è dunque nulla. Ipotizzando l'applicazione di uno stress meccanico sulla trave di interesse, si ha che sul punto B, che svolge il ruolo di riferimento, permane un potenziale di $E/2$, mentre il potenziale del punto A cresce. Questo permette di misurare una differenza di potenziale V che cresce proporzionalmente allo stress (e dunque allo strain) applicato sulla barra.

Esistono diversi tipi di configurazioni del ponte di Wheatstone, a seconda del numero di strain gauges utilizzati. In questo studio è stata scelta la configurazione *half-bridge*: collocando gli strain gauges nella stessa posizione sulla trave ma su facce opposte, le variazioni di resistenza sono uguali ed opposte e la variazione di tensione apprezzata risulta dunque doppia rispetto alla configurazione *quarter-bridge* che prevede l'utilizzo di un solo strain gauge. Esiste inoltre una terza configurazione che prevede l'utilizzo di 4 strain gauges come resistori componenti il ponte (*full-bridge*), che presenta il vantaggio di avere una sensibilità quadrupla rispetto alla configurazione *quarter-bridge* e doppia rispetto alla *half-bridge*, ma necessita di un dispendio di strain gauges notevole.

Gli strain gauges utilizzati in questa esperienza presentano un gauge factor $GF = 2.1$, ciò significa che per una deformazione pari a $500\mu\varepsilon$ la variazione di resistenza indotta è pari a $\Delta R = 2.1 \times 500\mu\varepsilon = 0.105\%$. Utilizzando strain gauges con resistenza pari a 120Ω si ha che la variazione di resistenza è, in valore assoluto, pari a circa 0.12Ω . Come si può intuire, tale variazione è troppo piccola per garantire una variazione di tensione V apprezzabile con sufficiente accuratezza, pertanto è necessario praticare uno o più dei seguenti rimedi:

- utilizzare degli strain gauges con resistenza nominale più elevata in modo che, a parità di deformazione, la variazione resistiva sia più ampia. Questa semplice soluzione presenta tuttavia l'inconveniente della reperibilità commerciale, in quanto presso i principali distributori online si trovano strain gauges di valore standard pari a 120Ω , sebbene nelle specifiche del costruttore siano presenti modelli con valori di resistenza fino a $1k\Omega$;
- aumentare la tensione di alimentazione E , i cui valori tipici sono compresi tra $3V$ e $10V$. Intuitivamente si sarebbe tentati di aumentare il più possibile tale tensione, non tenendo conto della corrente elettrica che si induce nei rami resistivi. Valori di corrente troppo elevati causano infatti un'eccessiva dissipazione di potenza per effetto Joule negli strain gauge e dunque un surriscaldamento: ciò a sua volta provoca un'alterazione dello strain misurato

($\pm 2\mu\varepsilon/^\circ C$) dovuta alla temperatura dei gauges stessi che è difficile da stimare e quindi compensare. Per misure consecutive di deformazione inoltre non si ha la certezza della costanza della temperatura e questo fattore può essere un'ulteriore fonte di errore;

- amplificare il segnale V in maniera adeguata, soluzione adottata in questo studio e in altri studi presenti in letteratura per la scarsa praticabilità e l'esiguo guadagno che si ottiene dalle soluzioni precedenti.

2.2.1 Dimensionamento elettrico

Per quanto riguarda il dimensionamento elettrico, è stata imposta una tensione di alimentazione $E = 10V$. Essa induce su ciascun ramo del ponte resistivo una corrente elettrica pari a

$$I = \frac{1}{2} \frac{E}{R} = \frac{1}{2} \frac{10V}{120\Omega} \cong 41.6mA \quad (2.4)$$

con una dissipazione di potenza sugli elementi resistivi di

$$P_R = RI^2 = 120\Omega(41,6mA)^2 \cong 208mW \quad (2.5)$$

Essendo $250mW$ la massima potenza dissipabile nominalmente dai resistori utilizzati, si è scelto di non eccedere oltre i $10V$ per quanto riguarda E , evitando così i problemi di instabilità termica trattati in precedenza. Ipotizzando di voler misurare una deformazione di ad esempio $500\mu\varepsilon$, con questo dimensionamento del ponte di Wheatstone si ottiene una tensione V misurata pari a

$$V = \frac{GF \times \varepsilon}{2} E = \frac{2.1 \times 500\mu\varepsilon}{2} 10V \cong 5.25mV. \quad (2.6)$$

Tale valore risulta piuttosto modesto, da qui la necessità di una amplificazione dell'ordine di grandezza del migliaio.

2.2.2 Circuito amplificatore

La scelta dell'amplificatore operazionale si è dunque basata sulla necessità di un alto guadagno unito ad un'elevata impedenza di ingresso, al fine di non distorcere il funzionamento del ponte di Wheatstone. Queste specifiche hanno portato all'individuazione dell'amplificatore per strumentazione *INA126* prodotto dalla Burr-Brown®, in grado di fornire fattori di guadagno fino a 10000 per segnali a bassa frequenza. I segnali di interesse hanno una banda molto esigua, dell'ordine degli Hz , quindi tale integrato soddisfa appieno le richieste. In Fig. 2.2.1 viene illustrato lo schema elettrico utilizzato, dotato di un *OPA237* per la calibrazione della tensione di riferimento.

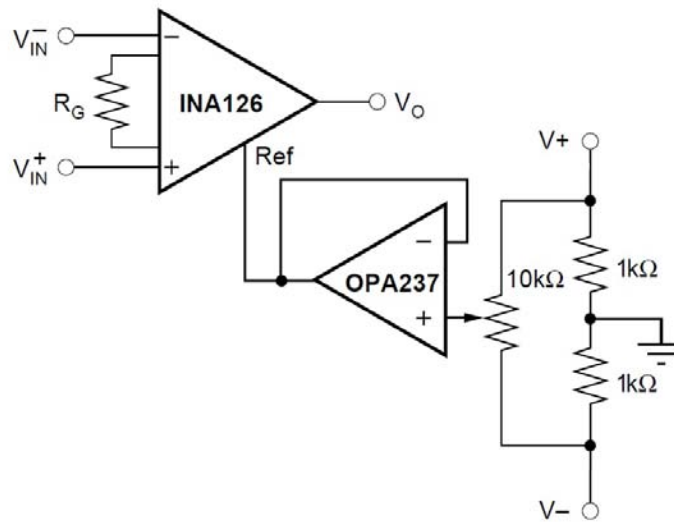


Figura 2.3: Amplificatore per strumentazione - Schema elettrico.

Ai capi dei morsetti indicati con V_{IN}^+ e V_{IN}^- è stata applicata la tensione V prelevata dal ponte di Wheatstone, fornendo una tensione di alimentazione duale pari a $\pm 10V$. Il guadagno, regolabile per mezzo del resistore esterno R_G , è dominato da

$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} \quad (2.7)$$

Dato il set di resistori presente in laboratorio, come resistenza di guadagno è stato posto un parallelo di due resistenze identiche di valore 82Ω . Il valore resistivo misurato tra i pin 1 e 8 dell'INA126, pin deputati alla calibrazione del guadagno, risulta pari a 40.3Ω con conseguente gain $G \cong 1956.22$. La relazione finale che regola la conversione strain/tensione è data dunque da

$$V_O = G \frac{GF \times \varepsilon}{2} E \quad (2.8)$$

Ipotizzando di nuovo una deformazione pari a $500\mu\varepsilon$ ed offset nullo, si ottiene una tensione di uscita V_O pari a circa $10.27V$. Tale valore supera la tensione di alimentazione, tuttavia fornendo un offset negativo si riesce ad abbassare il punto di lavoro iniziale per poter sfruttare pienamente l'escursione di tensione da $-10V$ a $+10V$.

Per effettuare una misura di deformazione si può quindi così procedere:

- impostare una tensione di riferimento negativa;
- effettuare la prima misura di tensione V_O' in assenza di deformazione;
- applicare uno stress meccanico per indurre una deformazione;
- effettuare la seconda misura di tensione V_O'' ;
- calcolare la variazione netta di tensione $V_O = V_O'' - V_O'$;

- determinare l'entità della deformazione invertendo la (2.8)

Effettuando più misure con diversi stress meccanici è possibile tracciare una curva stress/strain e confrontarla dunque con l'analogia ottenuta con le formule di teoria elastica presentate precedentemente. In questa esperienza sono stati posizionati 6 strain gauges, 3 per faccia, lungo l'asse di simmetria della trave e nella medesima posizione sia nel lato *top* che *bottom*: le 3 coppie sono collocate ad una distanza dal punto di applicazione del carico rispettivamente di *5cm*, *15cm* e *25cm*.

I dati necessari sono stati acquisiti con un convertitore analogico/digitale, precisamente il U2542A prodotto dalla Agilent. Esso dispone di 4 canali analogici di acquisizione con convertitori A/D a 16 bit, con frequenze di campionamento fino a 100 kHz. I campioni raccolti sono stati salvati in file di testo *.txt* per permetterne una successiva elaborazione tramite software *MATLAB*.

Capitolo 3

Misure mediante fibra ottica

3.1 Introduzione alla sensoristica in fibra ottica

L'idea di utilizzare la fibra ottica come elemento sensore è datata almeno quanto quella di utilizzarla come mezzo trasmissivo. I sensori in fibra ottica (OFS - Optical Fiber Sensor) offrono diversi vantaggi rispetto ai tradizionali elettronici e meccanici, come l'essere passivi, poco invadenti ed immuni ai disturbi elettromagnetici. La proprietà regina risiede tuttavia nella possibilità di misurare campi fisici come temperatura, strain, campi elettromagnetici con continuità lungo la fibra stessa. Da questo concetto deriva l'acronimo DOFSs, Distributed OFSs, le cui principali caratteristiche sono il range di misura e la risoluzione spaziale: il primo rappresenta la lunghezza massima della fibra, mentre il secondo individua l'accuratezza spaziale con cui è possibile monitorare i campi di interesse. Il rapporto tra queste due grandezze di fatto può essere interpretato come il numero di punti in cui vengono effettuate le misure e dunque il numero di sensori idealmente puntiformi.

L'origine fisica della capacità della fibra di prestarsi come elemento sensore risiede in quei processi che vengono identificati dal termine *retrodifusione*. Quando la fibra è sollecitata con un segnale ottico, la natura intrinseca della matrice vetrosa di cui la fibra stessa è costituita genera una radiazione luminosa che si diffonde in tutte le direzioni. Una parte di essa dunque risulta avere direzione parallela all'asse della fibra, e tale radiazione contro-propagante può essere utilizzata per leggere le proprietà locali della fibra. Questo meccanismo prende il nome di *retrodifusione*, ed è la risultante della somma di tre diversi fenomeni di diffusione: *Raman*, *Brillouin* e *Rayleigh*. I dettagli delle prime due non verranno considerati in questo studio, in quanto di complessità superiore e di intensità modesta e dunque dominata dalla retrodiffusione di Rayleigh. In Fig.3.1 viene mostrato il setup di un generico riflettometro utilizzato per analizzare il segnale retrodiffuso.

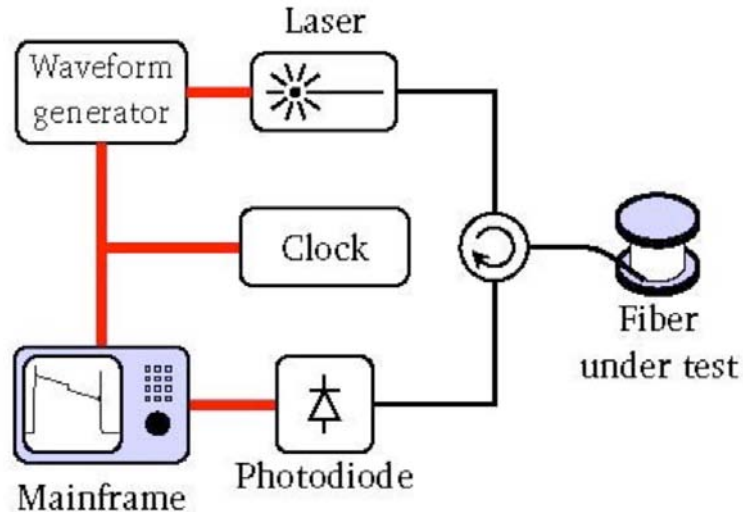


Figura 3.1: Schema del setup di un generico riflettometro.

Un generatore di forme d'onda pilota un laser, la cui radiazione emessa viene fatta propagare in fibra ed un fotodiodo, collegato ad un mainframe, trasduce la radiazione luminosa retrodiffusa in un segnale elettrico corrispondente. Il clock consente di realizzare l'aggancio di fase tra il segnale originale fornito in ingresso alla fibra e quello retrodiffuso, servendosi di un circolatore per l'opportuna canalizzazione dei segnali.

L'analisi del segnale retrodiffuso può avvenire nel dominio del *tempo* o nel dominio della *frequenza*. Nel primo caso il riflettometro prende il nome di *OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)*, ed è basato sostanzialmente sull'esame dell'ampiezza del segnale retrodiffuso in funzione del tempo di *roundtrip* dell'impulso lanciato in fibra. Nel secondo caso invece, si tiene sempre in considerazione il tempo di *roundtrip* dell'impulso che si propaga in fibra ma con lo scopo di caratterizzarne la risposta in frequenza: si parla dunque di *OFDR (Optical Frequency Domain Time Reflectometer)*. Come verrà evidenziato nelle prossime sezioni, cambiamenti di temperatura e deformazioni meccaniche locali della fibra ottica ne modificano le proprietà spettrali. Da qui l'esigenza di utilizzare un OFDR per compiere misure di questo tipo; nello specifico è stato utilizzato un *OBR 4600 (Optical Backscatter Reflectometer)* prodotto dalla Luna Technologies®.

3.2 OBR 4600

L'OBR 4600 utilizza una radiazione coerente per effettuare misure tramite tecnica riflettometrica. I principali parametri che è possibile impostare sono:

- lunghezza di emissione λ , che per la presente esperienza non rappresenta un elemento decisivo in quanto si è interessati a variazioni spettrali più che alla minimizzazione delle perdite del segnale. Valori di lunghezza d'onda appartenenti alla terza finestra ($\lambda = 1550nm$) sono da considerarsi ottimali per le misure di interesse;

- intervallo spaziale di interesse, impostato a $7 - 12.5m$. I primi 7m di fibra costituiscono la bretella necessaria per giungere dall'OBR alla fibra di interesse, che termina ad una distanza dall'OBR pari a $12.5m$;
- *spacing*, che rappresenta la risoluzione spaziale sul DUT (Device Under Test) ed è dunque la distanza tra i punti in cui viene valutata la variazione spettrale. Il valore più spesso utilizzato in questa esperienza è di $0.25mm$ per ottenere almeno un paio di punti presenti in un tratto di fibra di lunghezza pari alla zona attiva degli strain gauges (8 mm);
- *gauge length*, che identifica la porzione di fibra sul quale lo strumento effettua le medie dei valori letti. Un valore troppo piccolo di tale grandezza comporta misure molto rumorose, mentre un sovradimensionamento inficia la validità della misura analizzando un tratto di fibra la cui dimensione è molto maggiore della scala su cui avviene il fenomeno che si intende misurare. Un valore ottimale per questo studio è risultato essere $0.5mm$.

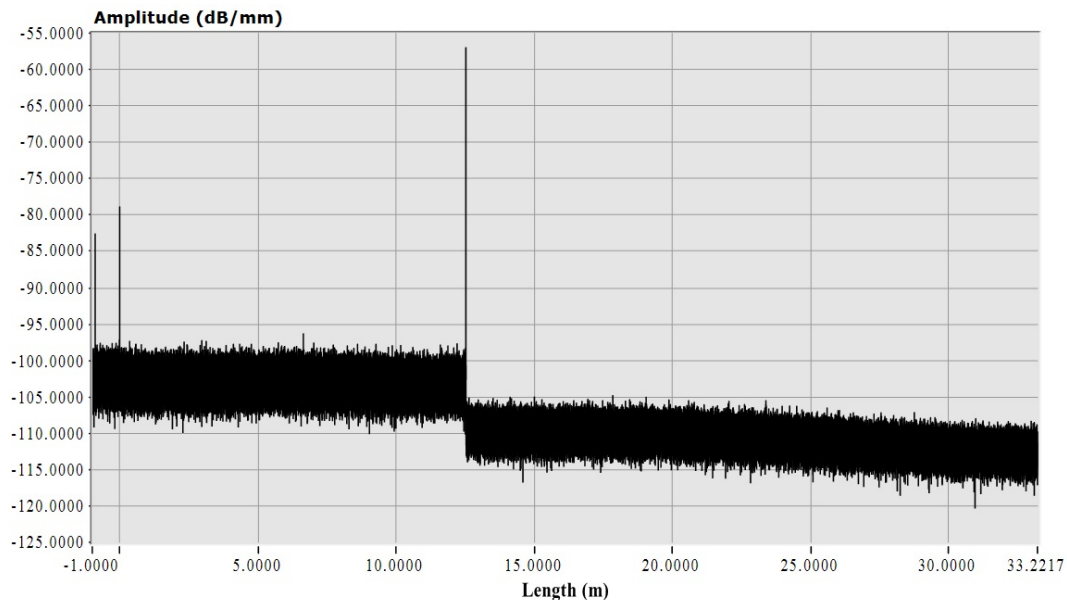


Figura 3.2: Traccia acquisita tramite OBR 4600.

Come evidenziato dalla Fig.3.2, in un punto nell'intorno di $z = 12.5m$ è collocato il massimo assoluto di ampiezza: esso denota la fine della fibra ed è dunque il risultato della riflessione dell'impulso sull'interfaccia fibra/aria. Oltre questo punto il valore dell'ampiezza del segnale retrodiffuso cala di circa $10dB$ e quanto segue è di fatto puro rumore. Il primo picco, avente posizione z negativa, è relativo all'ottica interna all'OBR a differenza del secondo picco, in posizione $z = 0$, che è causato dalla riflessione sul connettore dello strumento.

Per quanto riguarda le misure di deformazione, si deve tener conto del fatto che temperatura e strain hanno lo stesso effetto sullo spettro del segnale retrodiffuso.

Variazioni di queste due grandezze provocano una traslazione dello spettro rispetto alla misura di riferimento, dunque correlando lo spettro ottenuto con la misura di riferimento e quello ottenuto dalla misura di interesse è possibile determinare il cosiddetto *Rayleigh shift*. Tale traslazione viene individuata dal massimo di correlazione ottenuto sul tratto di fibra di lunghezza pari al *gauge length* imposto. La relazione che lega lo *spostamento spettrale* alle variazioni di temperatura ed alla deformazione è

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon \quad (3.1)$$

e secondo le specifiche dell'OBR valori di correlazione superiori a 0.15 sono da ritenersi affidabili. I valori di default assegnati ai coefficienti moltiplicativi sono $K_T = 6.45 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $K_\varepsilon = 0.780$, ma possono essere modificati a seconda della fibra in utilizzo. Questi coefficienti sono infatti relativi ai droganti e alla loro concentrazione presente nel nucleo della fibra, ma tengono in qualche modo conto anche del mantello e del rivestimento. È rilevante notare che deformazioni dell'entità di $1\mu\varepsilon$ sono equivalenti a variazioni di temperatura di 0.1°C , o analogamente una variazione centigrada pari a 1°C corrisponde ad una deformazione applicata di $10\mu\varepsilon$. Da qui l'esigenza di raggiungere una condizione ambientale di pressoché stabilità termica al fine di effettuare misure di sola deformazione: qualsiasi variazione di temperatura dunque influisce negativamente su valutazioni di deformazione ed è pertanto da considerarsi rumore. Una volta determinato lo spostamento spettrale relativo alla deformazione di interesse, per calcolare l'entità della deformazione in oggetto è sufficiente moltiplicare tale spostamento spettrale per il coefficiente moltiplicativo ε , i cui dettagli saranno discussi nel Cap.4.

3.3 Fibra e Cantilever Beam

La fibra utilizzata in questo studio è una G.652 a basse perdite per curvatura, priva di rivestimento secondario. Tale accortezza è necessaria per far sì che la deformazione meccanica sia trasmessa il più possibile fedelmente dalla trave in alluminio alla fibra: così operando si va a diminuire lo scostamento tra lo strain letto tramite la fibra e quello a cui è realmente soggetta la trave. La G.652 è stata incollata alla barra di alluminio mediante araldite, la stessa resina utilizzata per il fissaggio degli strain gauges, preceduta da una tecnica di pulizia analoga. In Fig.3.3 viene riportato un disegno in scala relativo al posizionamento della fibra e degli strain gauges sulla trave di interesse.

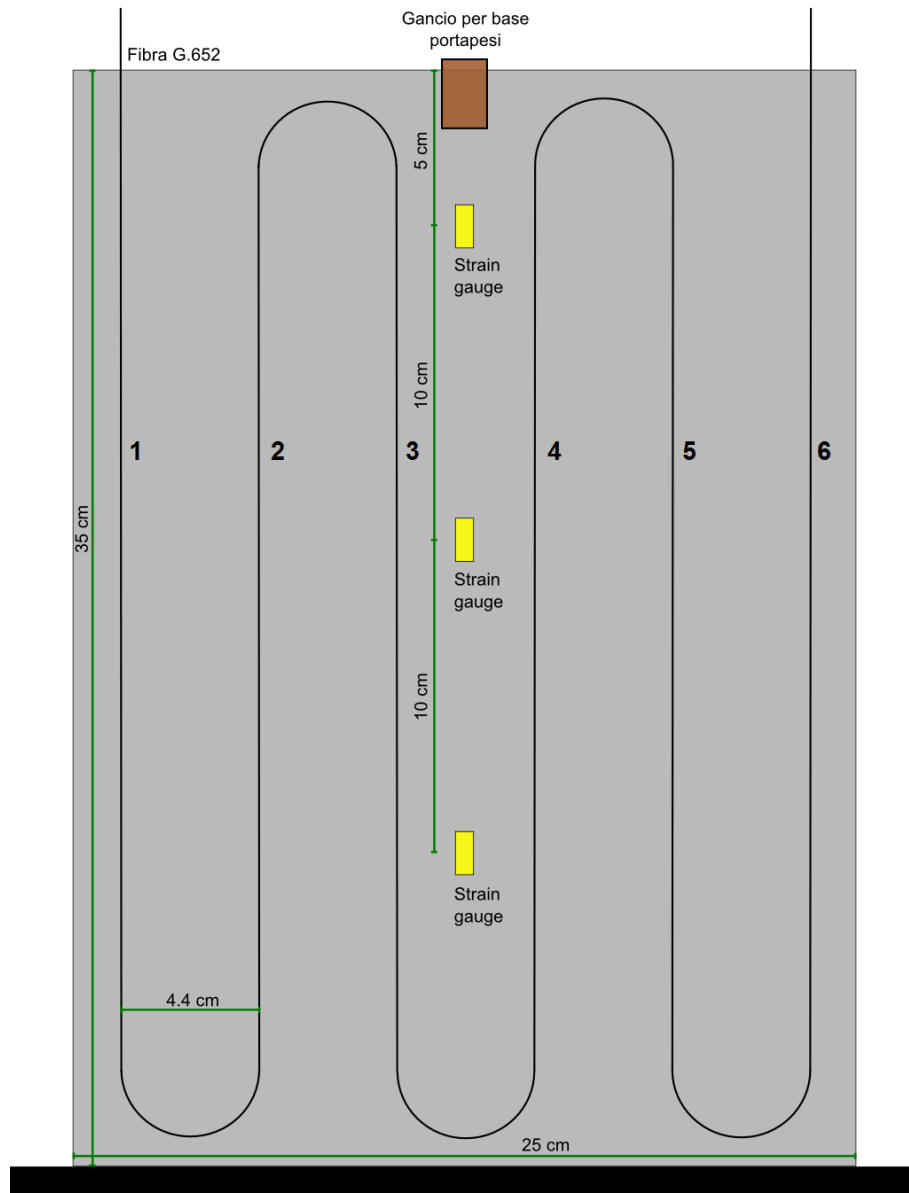


Figura 3.3: Disegno in scala reale della trave dotata di fibra e strain gauges.

Il posizionamento della fibra (e degli strain gauges) è identico nella faccia superiore e inferiore della trave di alluminio; si tratta di un tratto di fibra unico e non vi è dunque la necessità di connettere la fibra incollata sulle due facce, ma semplicemente una porzione di fibra funge da raccordo. Su tale tratto non verrà chiaramente misurata alcuna deformazione in quanto priva di senso.

Capitolo 4

Risultati sperimentali

Le misure di deformazione sono state effettuate sulla trave a sbalzo presentata nei capitoli precedenti, variando la forza F applicata mediante l'uso di diversi pesi ($F = mg$). Nel dettaglio le masse relative ai 12 pesi utilizzati sono:

i	$m(kg)$
0	0
1	0.125
2	0.250
3	0.375
4	0.510
5	0.635
6	0.760
7	0.885
8	1.020
9	1.145
10	1.270
11	1.395

Tabella 4.1: Masse di carico utilizzate.

Tra una misura e la successiva si sono lasciati trascorrere 120s, valore che si è rivelato sufficiente per l'esaurimento dei moti oscillatori e vibrazionali derivanti dall'applicazione di un carico sulla trave. Essi, se presenti, sono da considerarsi come fonte di errore.

4.1 Deformazione misurata con strain gauge e deformazione teorica

Per quanto riguarda lo strain misurato elettronicamente, è interessante confrontare l'andamento sperimentale con quello teorico. I tre grafici a seguire si pongono come obiettivo la determinazione della qualità delle misure effettuate con gli strain gauges. A tal fine, accanto alle curve strain/massa di carico viene illustrato l'errore percentuale e su ciascuna misura, calcolato come

$$e = 100 \times \left| 1 - \frac{\varepsilon_{misurato}}{\varepsilon_{teorico}} \right| \quad (4.1)$$

Si ricordi che le coppie di strain gauges sono 3, collocate rispettivamente a distanze di $x = 50\text{mm}$, $x = 150\text{mm}$ e $x = 250\text{mm}$ dal punto di applicazione del peso: per ciascuna coppia, i 2 elementi sono collocati nella medesima posizione sulle rispettive facce della trave.

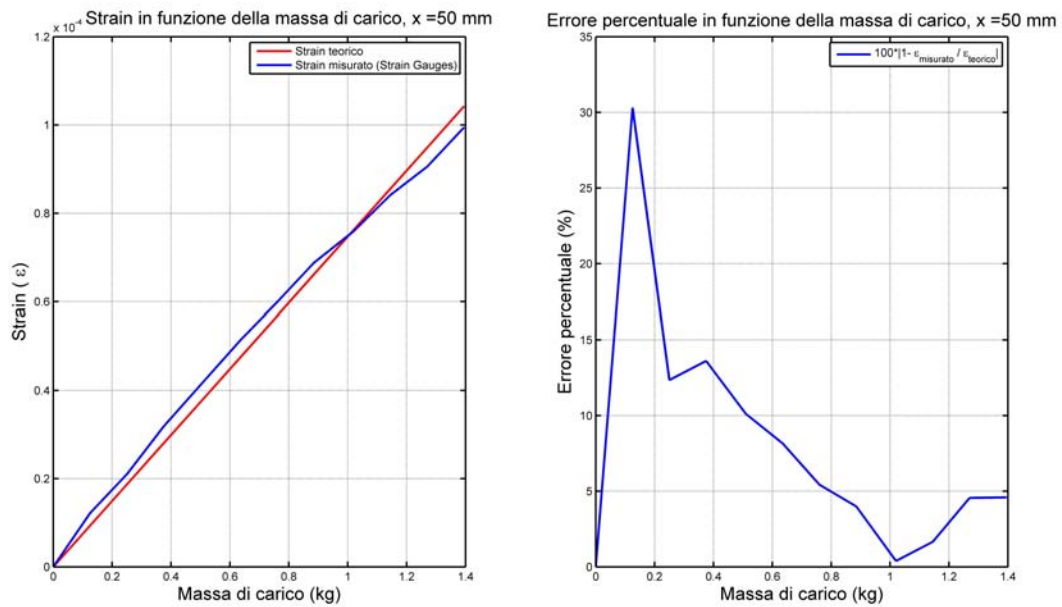


Figura 4.1: Strain misurato in funzione del peso applicato e relativo errore, $x=50\text{mm}$.

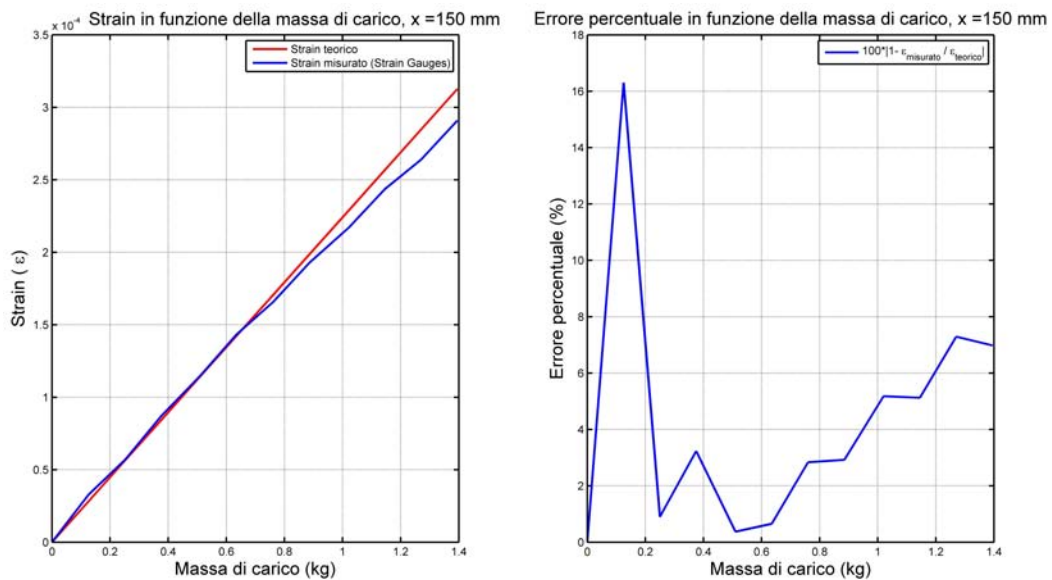


Figura 4.2: Strain misurato in funzione del peso applicato e relativo errore, $x=150\text{mm}$.

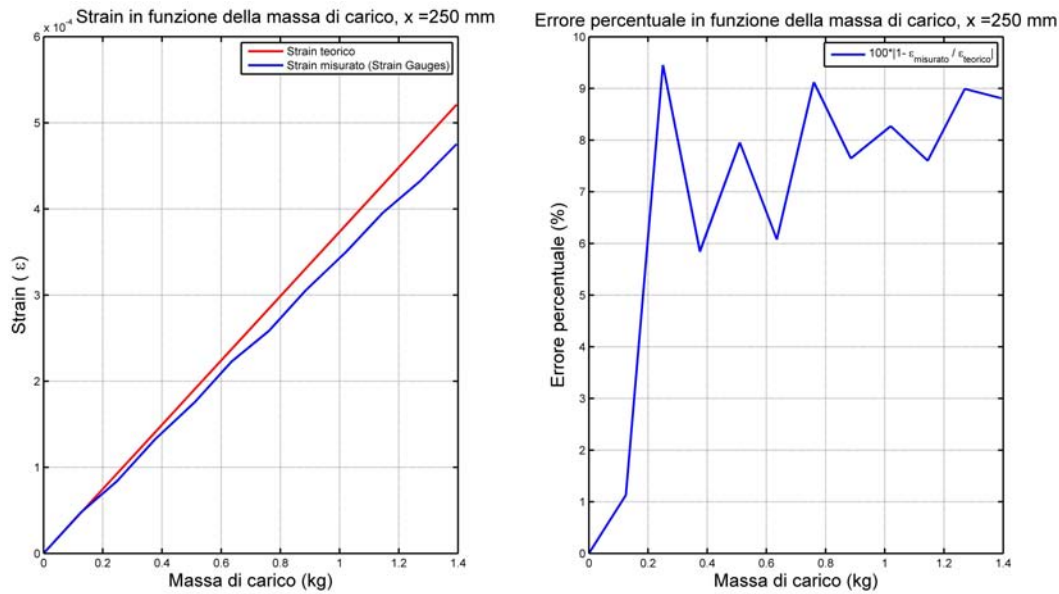


Figura 4.3: Strain misurato in funzione del peso applicato e relativo errore, $x=250\text{mm}$.

Come si può notare dalle Fig.4.1, 4.2 e 4.3 le prime misure in ciascun grafico sono quelle che generalmente si comportano peggio in termini di errore. Ciò deriva dall'entità esigua dello strain reale da misurare e come conseguenza errori in valore assoluto dell'ordine del microstrain incidono sostanzialmente sulla bontà della misura. Lo stesso fenomeno si ripercuote inoltre nel paragonare i 3 errori tra di loro: la Fig.4.1 è relativa alla posizione $x = 50\text{mm}$ dove lo strain, a parità di peso applicato, è minore che nel punto $x = 150\text{mm}$ che è a sua volta inferiore della deformazione apprezzata in $x = 250\text{mm}$. Nel primo caso infatti l'errore raggiunge il 30% nella prima misura, per poi assestarsi su valori inferiori al 10% per deformazioni derivati da pesi di massa maggiore a $m = 0.510\text{ kg}$. Nel secondo caso l'errore percentuale della prima misura non supera il 17%, e già da $m = 0.250\text{ kg}$ lo scostamento scende sotto al 2% per poi risalire fino a circa il 7%; la bontà delle misure migliora ancora nel terzo caso dove l'errore non supera mai il 9.5% oscillando tra i valori 6% – 9%. L'andamento complessivo della retta di strain misurato è in tutti e 3 i casi buono, come testimonia la vicinanza alla retta teorica, e pertanto il setup elettronico da qui in avanti è da considerarsi attendibile.

4.2 Incertezza associata alle misure con strain gauges

Si potrebbe esser a questo punto interessati all'incertezza delle misure effettuate con strain gauge, e a tal fine viene ora presentata la deviazione standard relativa a ciascuna valutazione di deformazione. Come discusso nel Cap.2, la deformazione è stimata elettronicamente attraverso la lettura della tensione di uscita V_O : per ogni peso applicato sono acquisiti 10000 campioni alla frequenza $f = 1\text{KHz}$, per una durata totale dunque di 10s. Il valore V_0 utilizzato per il calcolo dello strain è

dato banalmente dalla media algebrica dei 10000 campioni, a cui è però associata una deviazione standard. Tale deviazione standard relativa alla tensione può essere trasformata in una analoga di deformazione per mezzo della (2.8) ed è considerata come incertezza associata a ciascuna misura. Le Fig.4.4, Fig.4.5 e Fig.4.6 mostrano l'andamento della deviazione standard sia in valore assoluto sia valutata rispetto alla relativa deformazione.

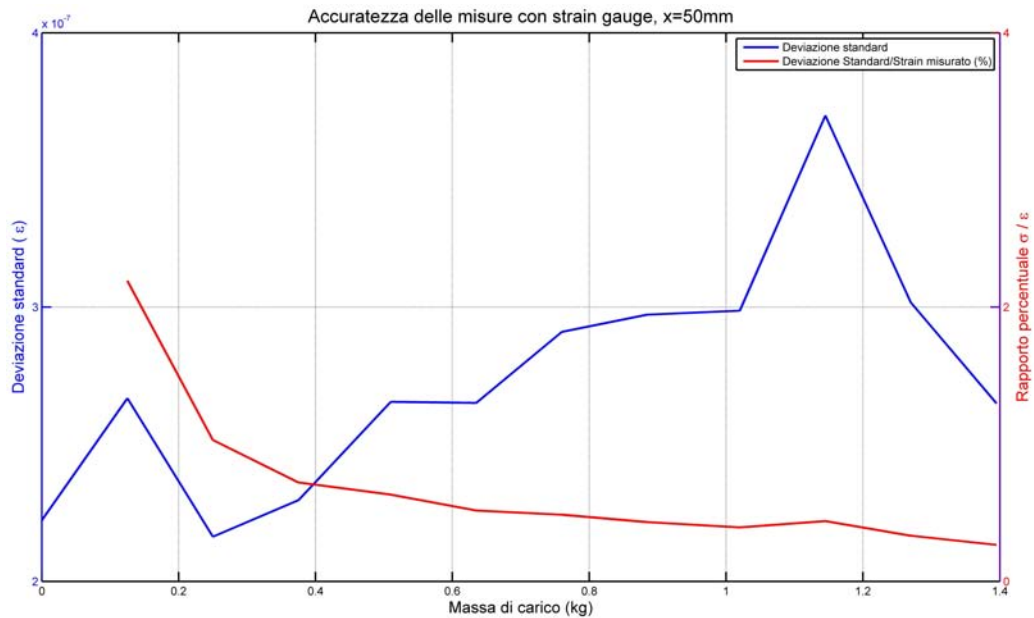


Figura 4.4: Accuratezza delle misure effettuate con strain gauges, x=50mm.

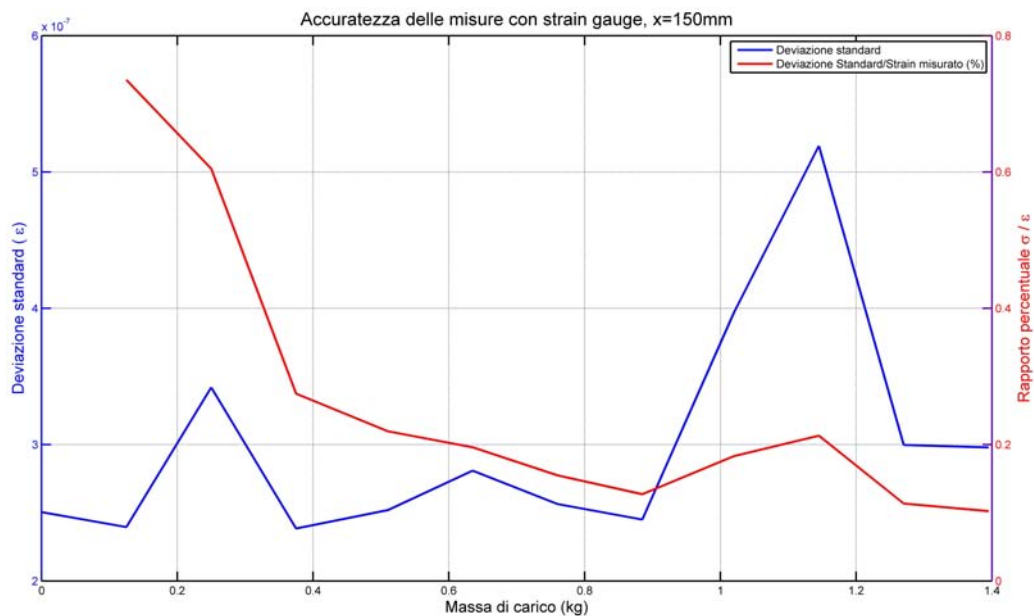


Figura 4.5: Accuratezza delle misure effettuate con strain gauges, x=150mm.

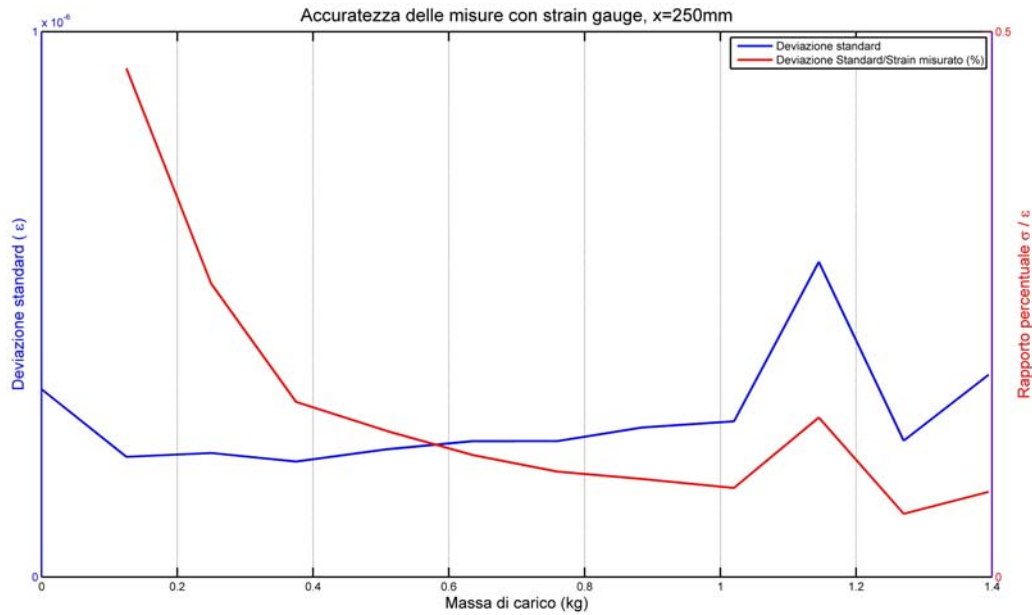


Figura 4.6: Accuratezza delle misure effettuate con strain gauges, $x=250\text{mm}$.

Come si evince dalle Fig.4.4, Fig.4.5 e Fig.4.6 non esiste una legge che governi l'andamento della deviazione standard in valore assoluto, per quanto tutte le incertezze assolute siano inferiori a $1\mu\epsilon$. Ciò deriva sostanzialmente dal fatto che ciascuna misura viene effettuata in condizioni simili ma mai perfettamente identiche a quelle delle altre misure; a supporto di tale tesi basti considerare che spostamenti d'aria provocata dall'apertura di porte/finestre o dall'impianto di condizionamento influiscono sulla misura, sono puramente aleatori e non identificabili e dunque stimabili. Ancora, i moti oscillatori infinitesimi derivanti dall'applicazione del peso si esauriscono con costanti di tempo differenti che dipendono dalla veemenza con cui viene collocata la massa inducente la deformazione, altra quantità non stimabile, così come i passi di chi si muove in prossimità del tavolo di ancoraggio della trave inducono infinitesime vibrazioni. Si sarebbe dunque tentati di aumentare i 120s che separano due misure consecutive, ciò andrebbe però a scapito dell'ipotesi di stabilità termica necessaria (discussa nel Cap.2) che potrebbe cadere con lo scorrere del tempo. Oltrepassando questi fenomeni aleatori, risulta invece comune ai tre casi l'andamento del rapporto percentuale σ/ϵ , che assume sembianze decrescenti. Il primo punto di ciascun grafico infatti ha valore infinito in quanto lo strain è nullo (misura di riferimento) per poi scendere ed assestarsi su valori che variano per le 3 coppie di gauges. Nel primo caso si giunge ad un rapporto percentuale di valore inferiore all'1%, soglia che si abbassa mediamente allo 0.2% per quanto riguarda la seconda coppia di estensimetri per diminuire ulteriormente allo 0.1% nel terzo caso.

4.3 Deformazione misurata con fibra ottica

Prima di presentare i dati raccolti mediante la fibra ottica è necessario approfondire alcuni aspetti. Il primo di essi riguarda la determinazione del punto in cui valutare lo *spostamento spettrale* al fine di stimarne la deformazione. Idealmente si

vorrebbe che tale punto coincidesse con quello in cui si trova lo strain gauge per poterne confrontare le letture, ma ciò non è chiaramente possibile per ovvi motivi fisici. Ci si deve dunque accontentare di un punto presente sul percorso lungo il quale è stata incollata la fibra che sia sufficientemente vicino all'estensimetro. La teoria di meccanica elastica viene qui in aiuto, affermando che in prima approssimazione la deformazione è costante per tutti i punti appartenenti alla stessa sezione della trave. Essendo il percorso della fibra costituito da 6 tratti rettilinei, automaticamente vengono identificati 6 punti appartenenti alla stessa sezione a cui appartiene il punto dove viene effettuata la misura con lo strain gauge. In questi punti verrà valutato lo spostamento spettrale misurato dall'OBR, e sfruttando opportunamente le caratteristiche dello strumento è possibile migliorare l'accuratezza delle misure. L'OBR consente infatti di leggere lo scostamento dello spettro del segnale retrodiffuso ogni 0.25 mm , parametro noto come *spacing*. Associando un asse Z al percorso compiuto dalla fibra, al fine di valutare lo spostamento spettrale in un generico punto z si possono tenere in considerazione anche i punti nelle vicinanze di z che lungo quest'asse lo precedono e susseguono.

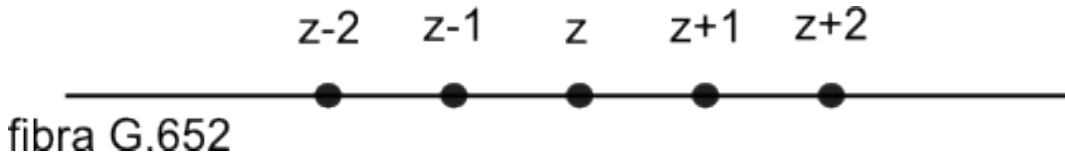


Figura 4.7: Determinazione dello spostamento spettrale lungo Z .

Si considerino ad esempio 2 punti precedenti z , chiamati $z - 1$ e $z - 2$, e 2 punti susseguenti z , identificati da $z + 1$ e $z + 2$ (Fig.4.7). I punti più lontani da z , ossia $z - 2$ e $z + 2$ distano $2 \times \text{spacing} = 0.5\text{mm}$ da z e sono dunque punti che rimangono interni alla regione attiva (8 mm) di un ipotetico strain gauge centrato in z . Questa considerazione mette in luce la bontà dei punti per le misure di interesse, dunque lo spostamento spettrale misurato da questi 5 punti equispaziati di 0.25mm e centrati in z viene identificato da $\Delta\nu(z)$ e calcolato come

$$\Delta\nu(z) = \frac{\sum_{i=-2}^2 a(z+i)\Delta\nu(z+i)}{\sum_{i=-2}^2 a(z+i)} \quad (4.2)$$

dove $a(z)$ identifica il valore di correlazione misurato dall'OBR.

Una volta chiarito come determinare lo spostamento spettrale per un generico z , rimangono da identificare le coordinate spaziali lungo l'asse Z dei 6 punti appartenenti alla stessa sezione di trave di cui si è trattato poc'anzi. A tal fine, ricordando che temperatura e deformazione hanno lo stesso effetto sullo spettro del segnale retrodiffuso, è possibile utilizzare una barra riscaldata posata sulla sezione di interesse. Si tratta di una bacchetta rivestita da un cavo elettrico avvolto a spirare, nel quale viene fatta circolare una corrente dell'ordine di 1A per indurne il surriscaldamento. L'aumento di temperatura a cui viene esposta la fibra ottica provoca, rispetto alla misura di riferimento in assenza della bacchetta, dei picchi sulla traccia visualizzata

dall'OBR; i picchi sono esattamente 12 (6 per faccia della trave a sbalzo), e coincidono con i 6 punti di interesse. Le coordinate Z di questi picchi (facendo la distinzione tra le 2 facce) sono dunque le coordinate che si stavano cercando, e ripetendo questa operazione per le 3 sezioni individuate dalla posizione delle 3 coppie di strain gauges ($x = 50, 150, 250\text{mm}$) si ottiene un totale di 36 punti, 18 per faccia.

Facendo riferimento a quanto affermato dalla teoria elastica, lo spostamento spettrale misurato dalla fibra ottica in punti appartenenti alla stessa sezione dovrebbe essere uguale per tutti i punti e di valore pari a quanto misurato con gli strain gauges. Variando dunque la massa di carico applicata alla trave ci si aspetta che l'andamento della deformazione misurata con l'OBR rispetto a quella misurata con gli estensimetri sia lineare e passante per l'origine. Tale andamento lineare inoltre dovrebbe coincidere con la bisettrice del primo quadrante.

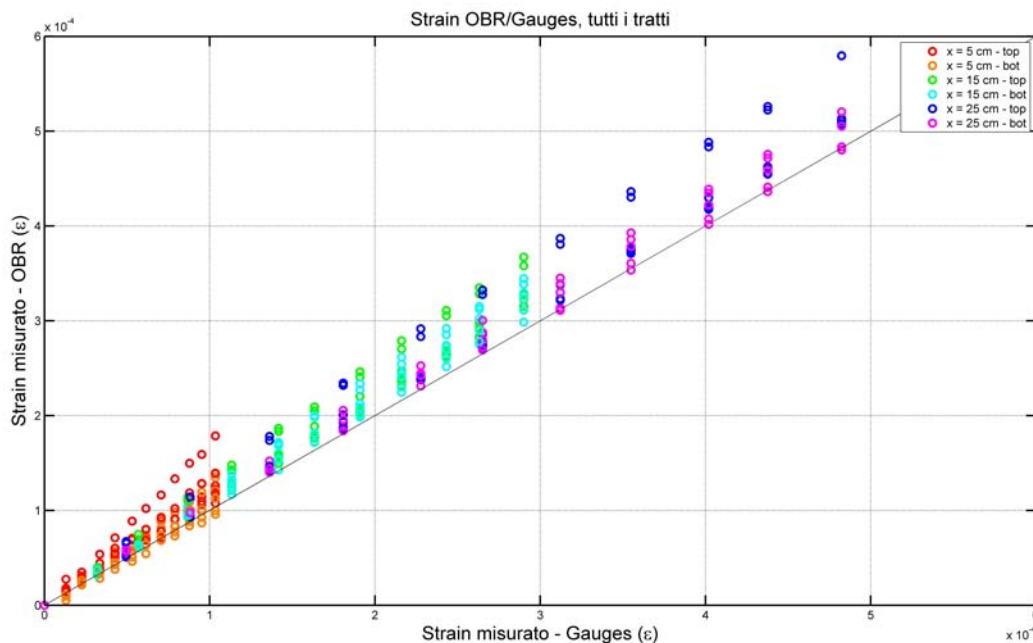


Figura 4.8: Strain misurato OBR/Gauges - Tutti i tratti.

La Fig.4.8 mostra la deformazione apprezzata con la fibra su entrambe le facce della trave (top e bottom), 36 punti totali per ogni massa di carico applicata (12 masse, totale 432 punti). Il grafico evidenzia la presenza di linearità, tuttavia le linearità sono multiple e pur passando per l'origine si differenziano per coefficienti angolari diversi. In corrispondenza della stessa ascissa infatti si presentano valori differenti di ordinata, e ciò induce a pensare che la deformazione letta dalla fibra non sia costante per una data sezione di trave.

Per far luce sulle problematiche evidenziate dalla Fig.4.8 sono stati isolati i comportamenti dei 6 tratti di fibra; le Fig.4.9-4.14 ripropongono pertanto l'andamento della deformazione misurata con l'OBR rispetto a quella misurata con gli strain gauges valutata su un singolo tratto di fibra, considerando sempre entrambe le facce della trave.

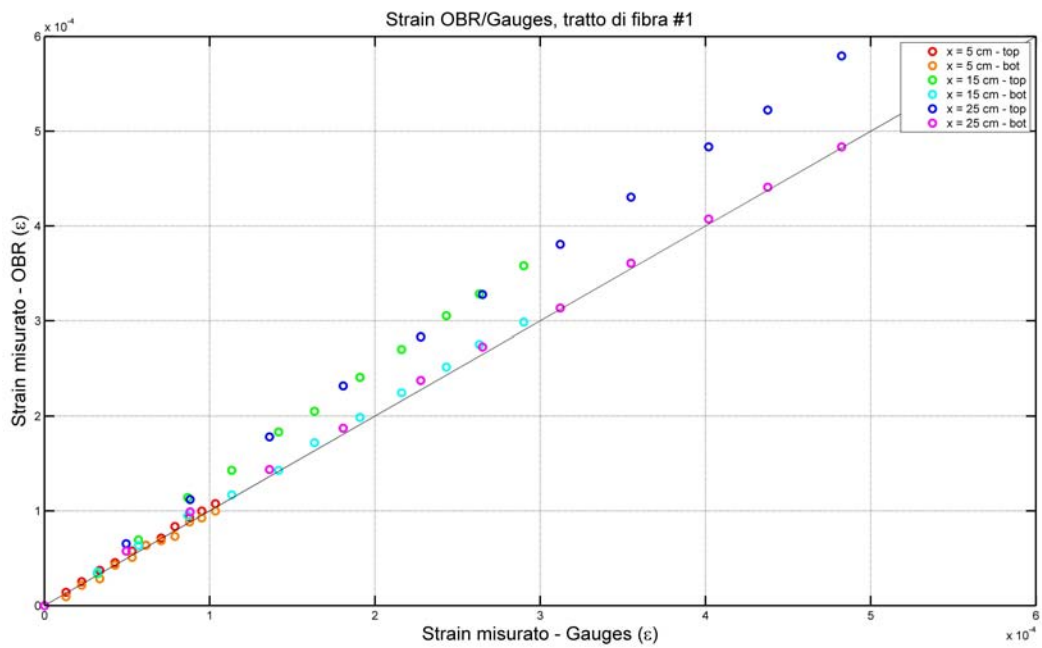


Figura 4.9: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #1.

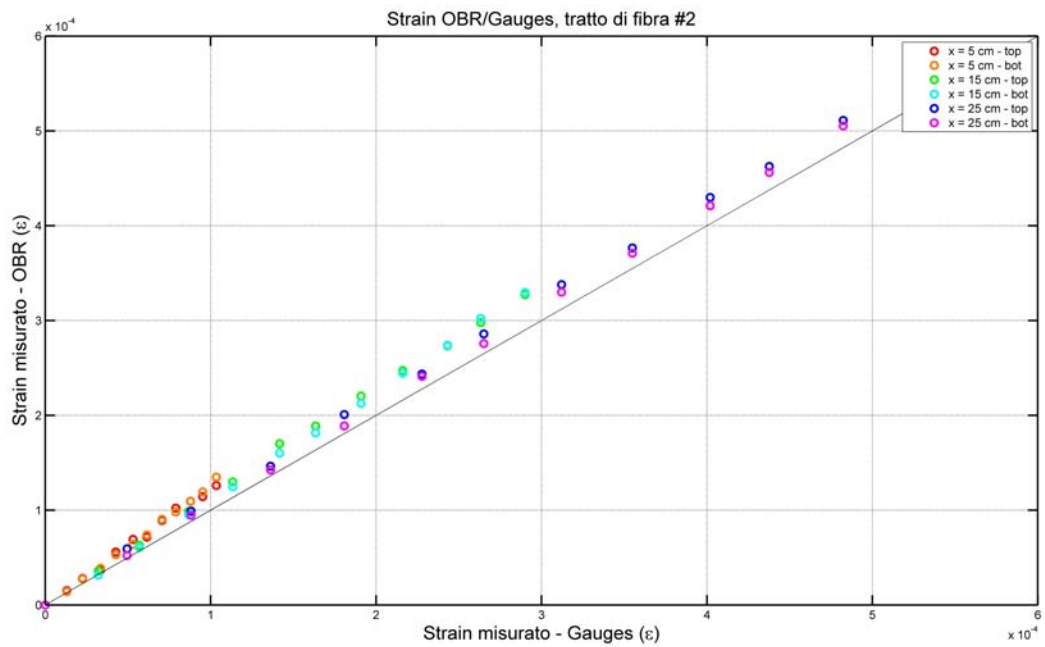


Figura 4.10: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #2.

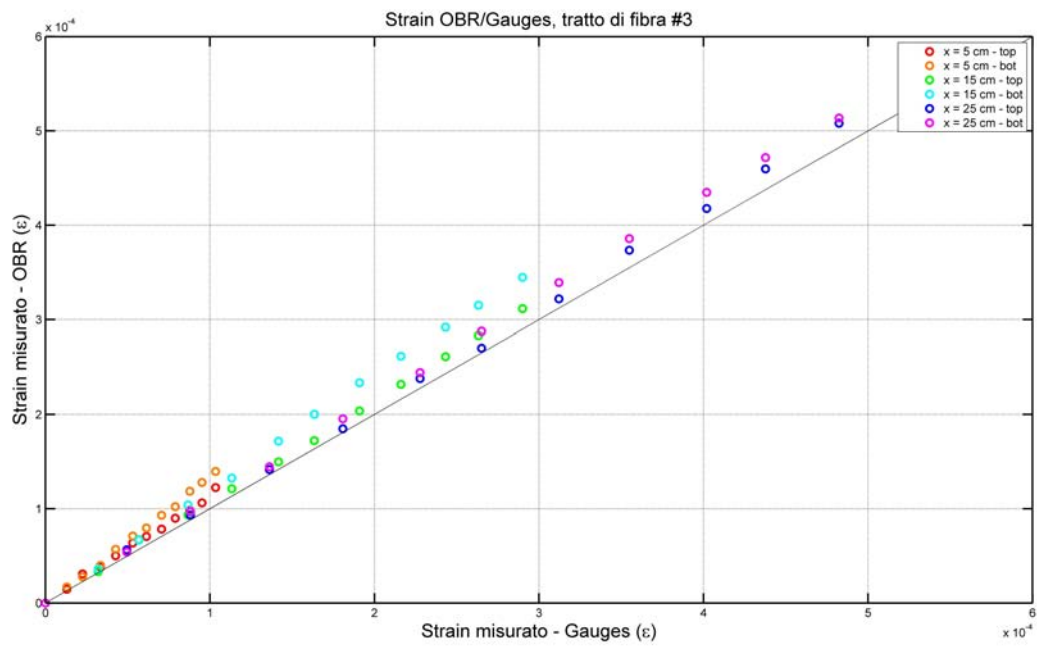


Figura 4.11: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #3.

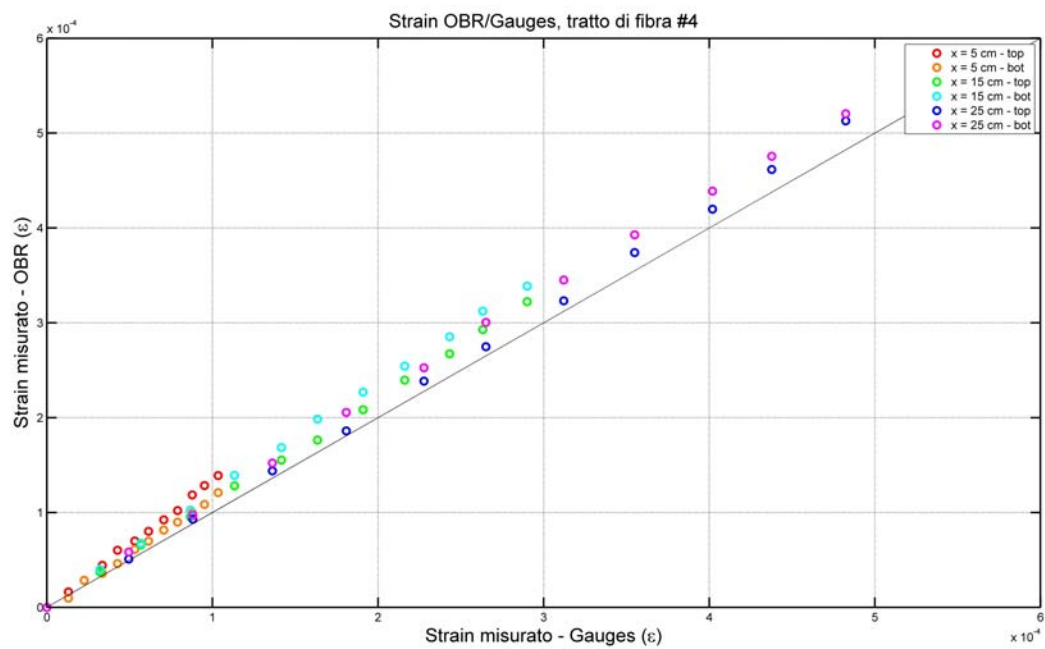


Figura 4.12: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #4.

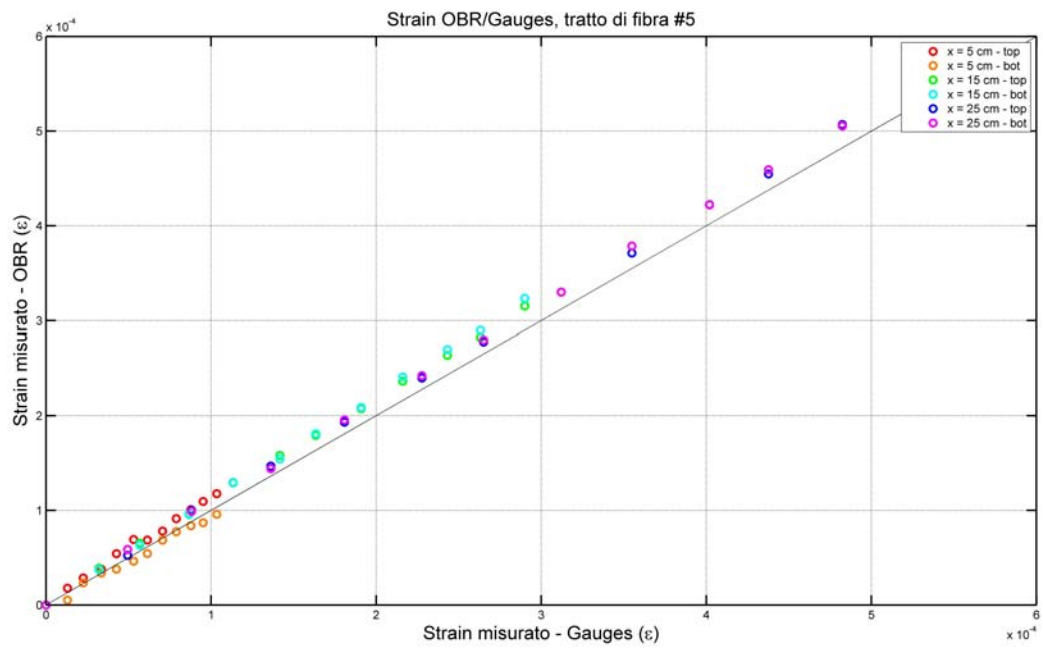


Figura 4.13: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #5.

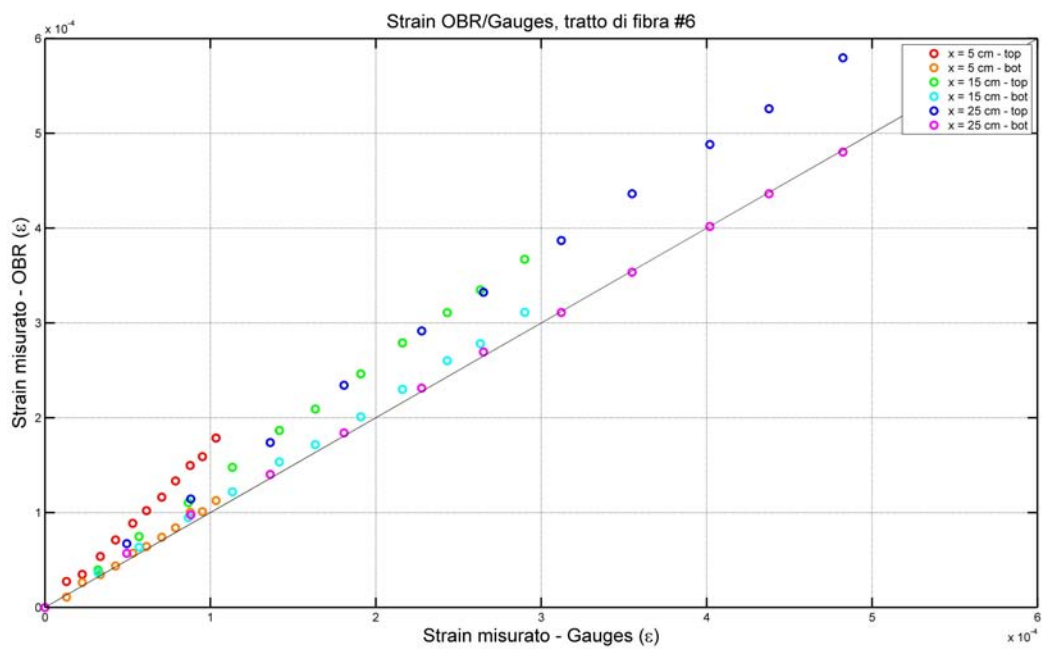


Figura 4.14: Strain misurato OBR/Gauges - Tratto #6.

Questi 6 grafici evidenziano che la deformazione misurata dalla fibra ottica non è costante per punti appartenenti alla stessa sezione della trave, e con qualche difficoltà si nota una simmetria: gli andamenti del tratto 1 sono molto simili a quelli del tratto 6, quelli del 2 sono pressoché identici a quelli del 5 e ugualmente accade per i tratti centrali 3 e 4. Questa simmetria rispetto all'asse centrale della trave indica che la barra di interesse si flette centralmente più di quanto non accada ai lati: il motivo va individuato nel fatto che la forza peso inducente la deformazione viene applicata nel punto a fine trave che sta esattamente al centro della trave stessa, ossia sull'asse di simmetria.

4.4 Calibrazione del sensore

Un altro aspetto che viene messo in luce dalle Fig.4.9-4.14 è la non uguaglianza del modulo dello strain misurato, nel medesimo punto ma su facce diverse della trave. La deformazione indotta dovrebbe avere infatti segno opposto per le due facce, in quanto quella superiore è soggetta ad espansione a differenza di quella inferiore che si comprime, ma uguale valore assoluto. Ciò non accade a causa della molteplicità di fenomeni fisici che provocano la variazione spettrale apprezzata dall'OBR:

- la prima causa è di natura puramente *meccanica*, ossia la deformazione di cui se ne è prefissa la stima. Tale deformazione induce spostamenti spettrali di segno discorde tra le due facce, a causa dell'ormai noto fenomeno di estensione/compressione della trave;
- fenomeni legati alla temperatura, che invece sono concordi in segno:
 - il primo aspetto è legato al fatto che variazioni di temperatura inducono dilatazioni nell'alluminio, nella fibra ottica e nell'araldite che funge da elemento collante tra i due. L'attenzione va però posta sul fatto che i coefficienti di dilatazione per questi 3 materiali sono diversi, rispettivamente $24\mu\epsilon/^\circ C$ per l'alluminio, $80\mu\epsilon/^\circ C$ per l'araldite e $0.5\mu\epsilon/^\circ C$ per la fibra;
 - il secondo aspetto risiede nella leggera variazione dell'indice di rifrazione della fibra al variare della temperatura, che causa l'alterazione delle proprietà spettrali del segnale retrodiffuso.

Lo spostamento spettrale rilevato dall'OBR in un determinato punto della trave avente coordinate (x, y) è dunque dato dalla somma di 2 componenti, ed è diverso per ciascuna faccia della trave. Per i punti appartenenti alla superficie superiore si ha

$$\Delta\nu(x, y)_{top} = c_1\Delta\nu_\epsilon(x, y) + c_2\Delta\nu_T(x, y) \quad (4.3)$$

dove con $\Delta\nu_\epsilon(x, y)$ si intende indicare lo spostamento spettrale indotto dalla deformazione e con $\Delta\nu_T(x, y)$ quello indotto dalla temperatura, mentre per la superficie inferiore si ottiene

$$\Delta\nu(x, y)_{bottom} = -c_1\Delta\nu_\epsilon(x, y) + c_2\Delta\nu_T(x, y). \quad (4.4)$$

Considerando dunque la semidifferenza tra la (4.3) e la (4.4) si ottiene uno spostamento spettrale relativo al punto (x, y) privo degli effetti termici indesiderati che ha inoltre il significato di valor medio tra le quantità lette sulle due superfici, come mostra

$$\frac{1}{2}(\Delta\nu(x, y)_{top} - \Delta\nu(x, y)_{bottom}) = c_1 \Delta\nu_\varepsilon(x, y). \quad (4.5)$$

Dai fatti posti in evidenza deriva la necessità di effettuare un'operazione di calibrazione della fibra che sostanzialmente consiste nella determinazione del coefficiente c_1 . Tale calibrazione è stata effettuata rispetto ai dati raccolti con gli strain gauges, avendone in precedenza mostrato l'affidabilità. I tratti di fibra più prossimi agli strain gauges, che quindi dovrebbero apprezzare deformazioni il più possibili uguali a quelle rilevate dagli estensimetri, sono rispettivamente il 3 e il 4, ossia i centrali. Questa operazione è stata effettuata dunque considerando solo i due tratti indicati, il cui valore sarà semplicemente mediato in quanto i tratti in oggetto sono equidistanti dagli estensimetri.

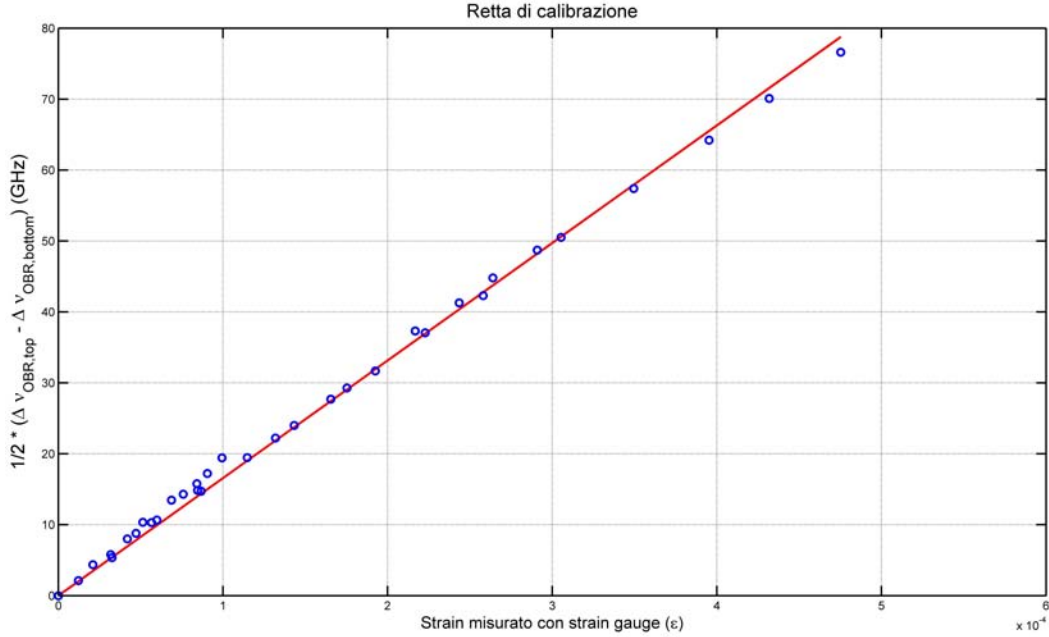


Figura 4.15: Curva di calibrazione.

La retta di calibrazione in Fig.4.15 è stata ottenuta mediante fit lineare ai minimi quadrati (LSQ fitting), metodo che porge un valore di c_1 pari a

$$c_1 = 0.166GHz/\mu\varepsilon. \quad (4.6)$$

Per determinare l'incertezza associata alla stima di c_1 si consideri che

$$\Delta\nu_i = c_1 \varepsilon_i \quad (4.7)$$

dunque è possibile scrivere

$$\overline{\Delta\nu} = \begin{bmatrix} \Delta\nu_1 \\ \Delta\nu_2 \\ \vdots \\ \Delta\nu_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} c_1 = F\bar{c} \quad (4.8)$$

dove gli ε_i identificano le deformazioni misurate con gli strain gauges. Definendo

$$\rho^2 = \|\overline{\Delta\nu} - F\bar{c}\|^2 \quad (4.9)$$

è possibile dimostrare che la varianza associata allo shift spettrale è

$$\sigma_{\Delta\nu}^2 = \frac{\rho^2}{N-2} \quad (4.10)$$

dove N denota il numero di punti su cui è stato eseguito il fit, in questo caso $N = 36$ (12 masse di carico \times 3 punti di lettura della deformazione). La matrice di covarianza associata ai parametri \bar{c} è data da

$$K_{\bar{c}} = \sigma_{\Delta\nu}^2 (F^T F)^{-1} \quad (4.11)$$

che in questo semplice caso ha dimensione 1 e dunque coincide con la varianza $\sigma_{c_1}^2$ cercata. La deviazione standard σ_{c_1} calcolata è pari a

$$\sigma_{c_1} = 0.999 \times 10^{-3} GH z / \mu\varepsilon \quad (4.12)$$

che risulta pari allo 0.6% del coefficiente c_1 , a testimonianza della bontà della stima di tale parametro.

4.5 Deformazione lungo la fibra

Dopo aver stimato il fattore correttivo c_1 è possibile ottenere la deformazione in un generico punto z lungo la fibra

$$\varepsilon(z) = -\frac{\lambda}{cK_\varepsilon} \Delta\nu(z) = \epsilon \Delta\nu(z) \quad (4.13)$$

dove:

- $\lambda = 1550nm$ rappresenta la lunghezza centrale di emissione;
- c è la velocità della luce ($c = 3 \times 10^8 m/s$);
- $K_\varepsilon = 0.780$ è il coefficiente presentato nella (3.1).

Sostituendo i valori presentati nella (4.13) si ottiene

$$\varepsilon(z) = (-6.67\mu\varepsilon / GH z) \Delta\nu \quad (4.14)$$

In Fig.4.16 viene presentata la figura di strain lungo la fibra incollata alla trave di alluminio, una traccia per ogni massa di carico applicata.

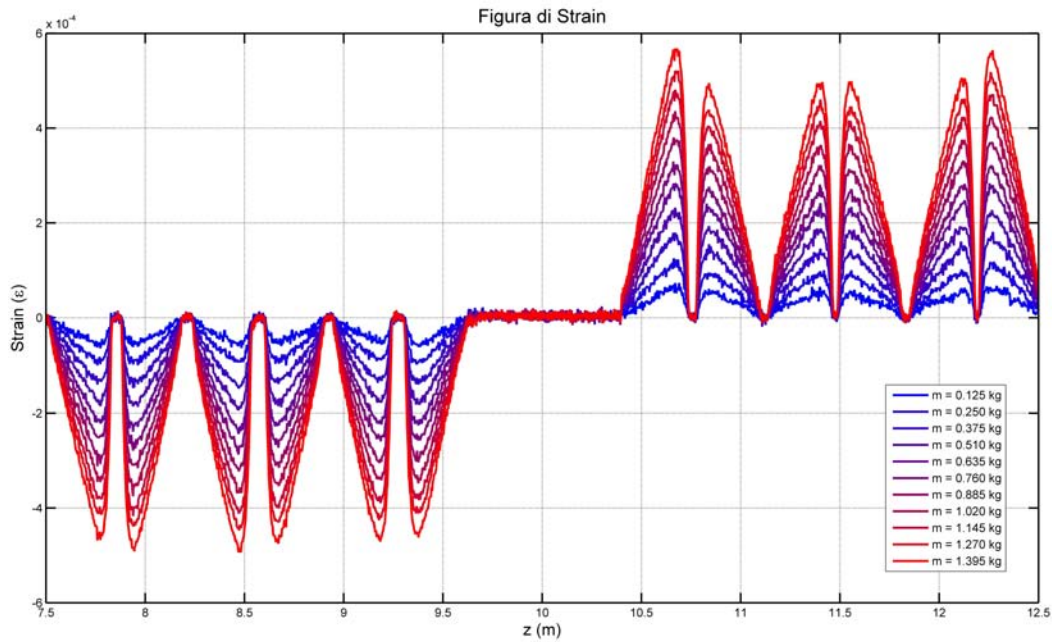


Figura 4.16: Figura di strain lungo la fibra.

Gli zeri di strain compresi tra 2 massimi consecutivi sono il risultato del fatto che le curve della fibra non sono state incollate alla trave, per motivi di praticità operativa. Escludendo questi punti, individuati da una pendenza decisamente elevata, si può apprezzare la variazione dello strain nei 12 tratti rettilinei di fibra incollata alla trave. I primi 6, aventi ordinate sempre negative, sono relativi alla superficie inferiore soggetta a compressione, a differenza dei secondi 6 relativi alla superficie superiore che estendendosi presentano valori di strain positivo. Tra queste due sezioni si nota il tratto di circa 60 cm che funge da raccordo tra le due facce, caratterizzato dalla presenza di solo rumore in quanto la deformazione lungo il raccordo è priva di senso fisico.

4.6 Mappe di deformazione

Interepolando linearmente la deformazione misurata dai tratti di fibra è possibile ottenere delle mappe strain. La trave è collocata nel piano XY , e dunque le figure che seguono assumono il significato di una vista dall'alto. I colori rappresentano l'entità della deformazione misurata, dai più freddi per valori minimi di strain ai più caldi per deformazioni più marcate, per l'applicazione di una massa di carico costante e pari a $m = 1.020\text{kg}$ (massa #8 in Tab.4.1).

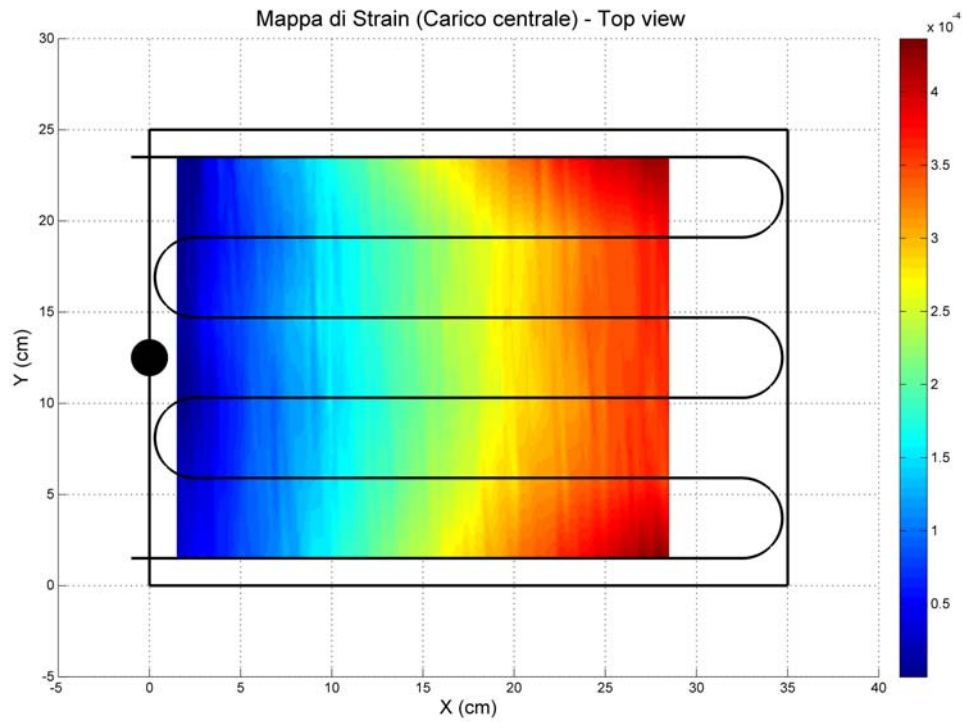


Figura 4.17: Mappa di strain (Carico centrale) - Top view.

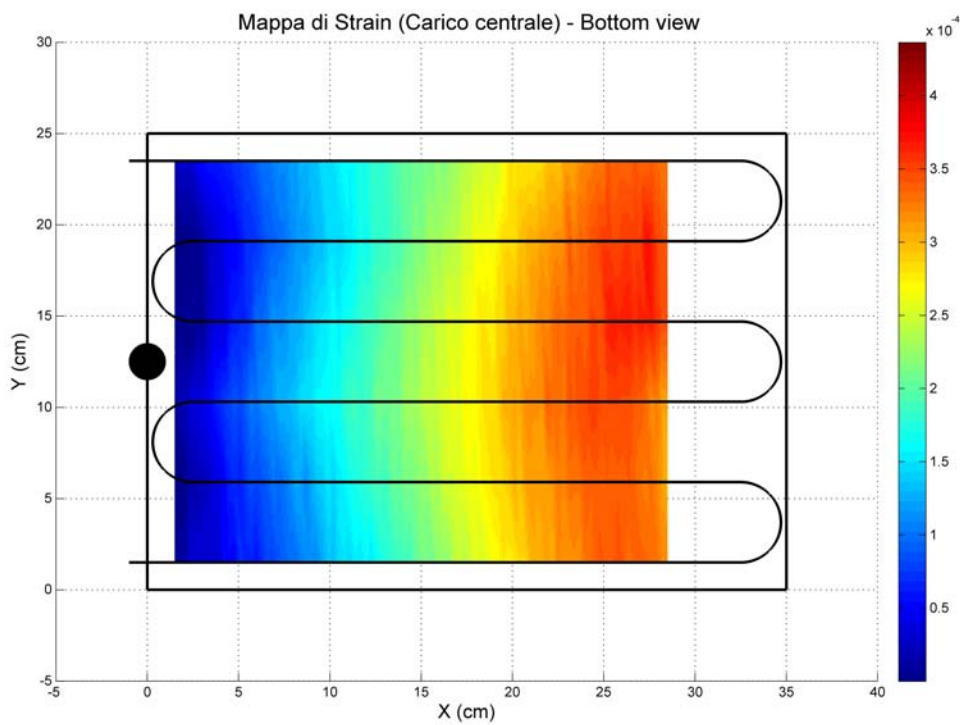


Figura 4.18: Mappa di strain (Carico centrale) - Bottom view.

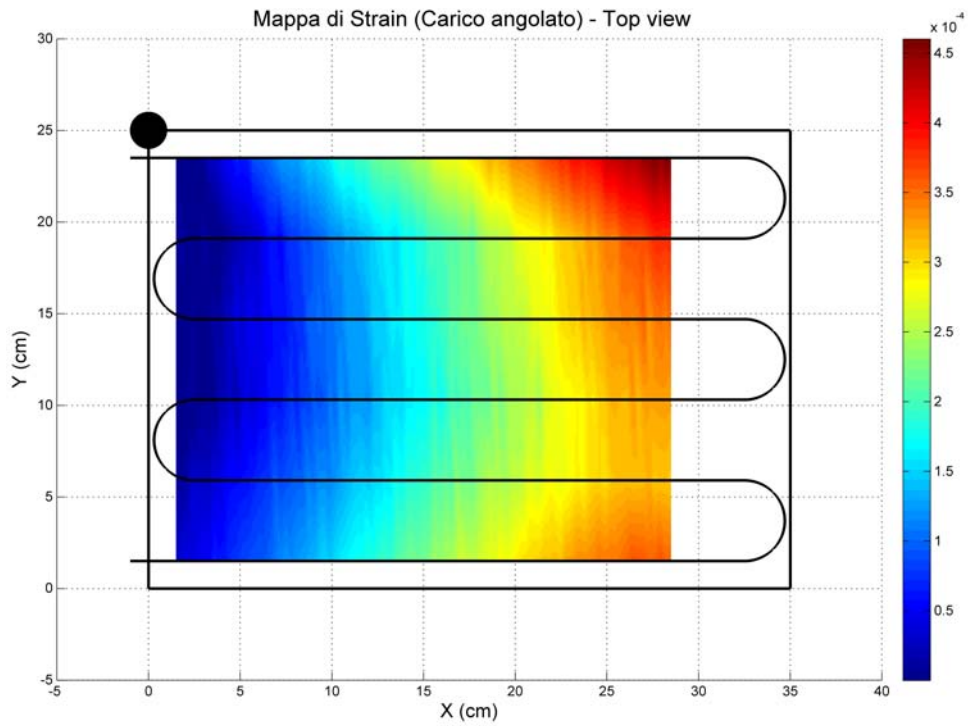


Figura 4.19: Mappa di strain (Carico angolato) - Top view.

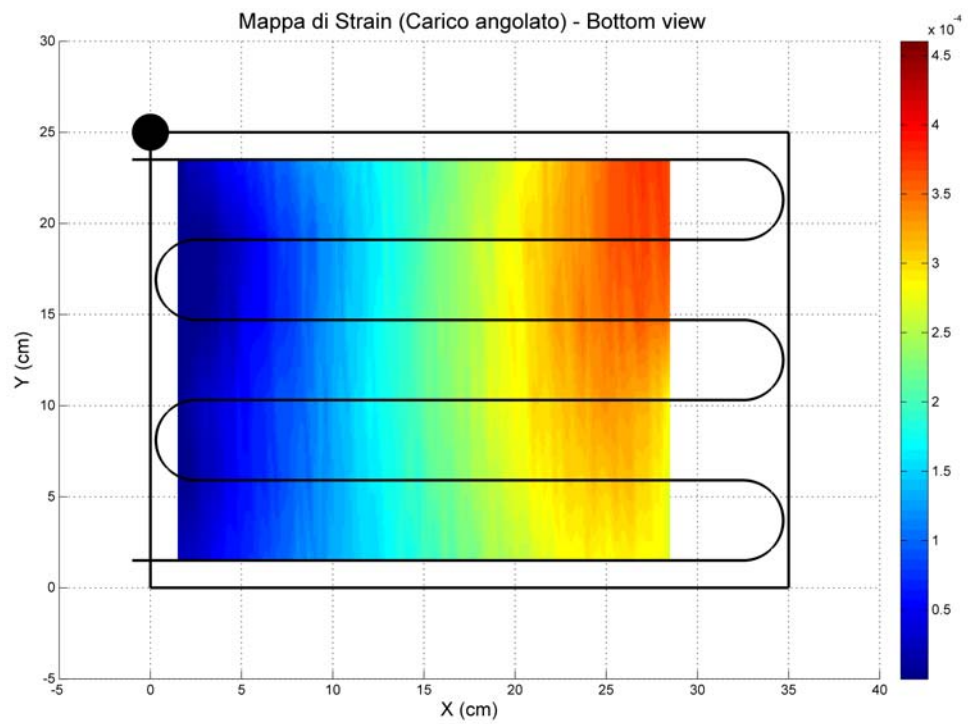


Figura 4.20: Mappa di strain (Carico angolato) - Bottom view.

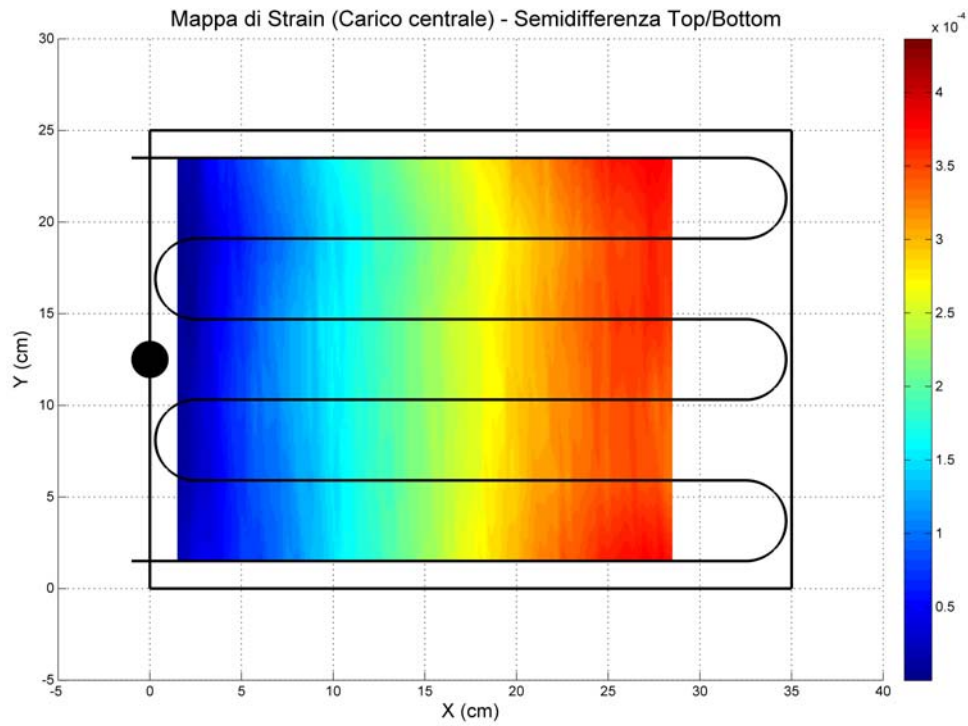


Figura 4.21: Mappa di strain (Carico centrale) - Semidifferenza Top/Bottom.

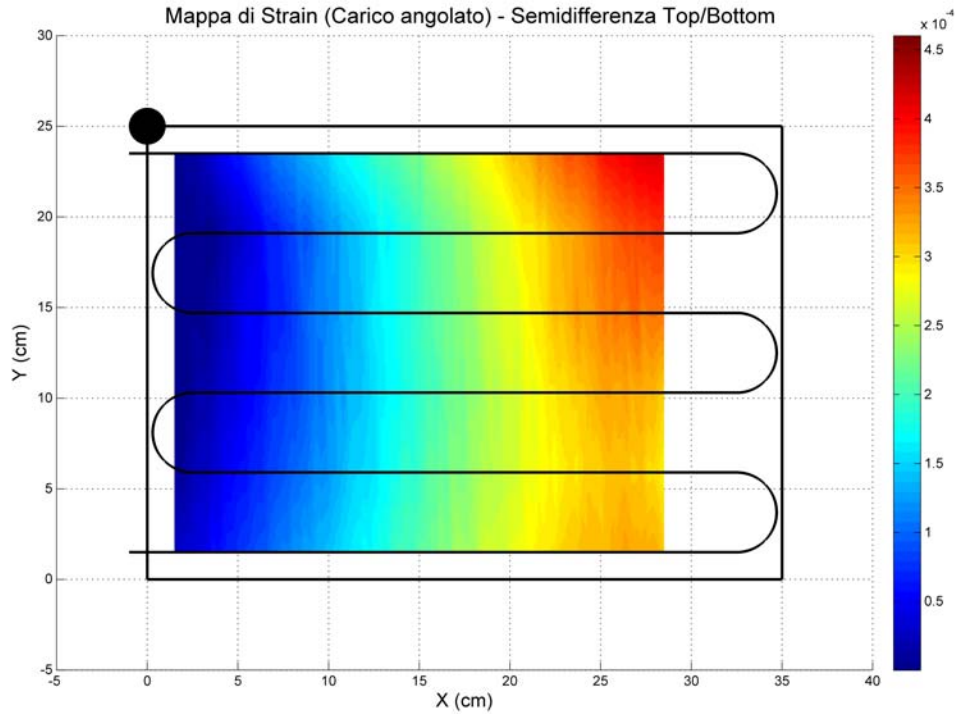


Figura 4.22: Mappa di strain (Carico angolato) - Semidifferenza Top/Bottom.

In Fig.4.17 e Fig.4.18 viene mostrata la mappa di deformazione per una massa di carico collocata centralmente rispetto all'asse di simmetria della trave, identificata dal punto nero. Come afferma la teoria, la deformazione è minima per sezioni prossime al punto di applicazione della forza peso ($x = 0cm$) e cresce man mano che ci si avvicina al punto di ancoraggio al tavolo ($x = 35cm$). Teoricamente ci si aspetterebbero inoltre aree di uno stesso colore lungo la sezione trasversale della trave, in realtà come discusso in precedenza la barra di interesse si flette leggermente al centro. Da qui la differenza di comportamento, in quanto nella Fig.4.17 viene evidenziato uno strain maggiore ai lati della trave a differenza di quanto avviene in Fig.4.18 dove la deformazione massima è apprezzata a centro trave.

Il setup sperimentale cambia in Fig.4.19 e 4.20, dove il carico è stato collocato in un angolo della trave, precisamente nel punto avente coordinate $(x, y) = (0, 25)cm$. Come è lecito attendersi, il lato della trave adiacente al punto di applicazione della forza peso è quello maggiormente sollecitato e dunque presenta una deformazione maggiore rispetto all'altro lato che invece è libero. Tale deformazione è inoltre maggiore in modulo rispetto a quanto accadeva con il carico applicato centralmente; si ricordi che lo strain rilevato è uniassiale, misurato lungo l'asse x , dunque la deformazione presentata relativa al carico angolato manca delle componenti di taglio (*shear strain*) che si generano applicando una forza peso lontano dall'asse di simmetria della trave.

Le Fig.4.20 e Fig.4.21 concludono la trattazione delle mappe di strain; esse sono state ottenute operando la semidifferenza tra gli spostamenti spettrali rilevati sulle due facce della trave, come indicato dalla (4.5), rispettivamente nelle configurazioni con carico centrale e angolato. La deformazione risultante ottenuta dalla (4.13) ha pertanto il significato di comportamento medio delle superfici della trave.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio effettuato ha messo in luce l'attitudine della fibra ottica ad essere utilizzata come elemento sensore, nello specifico per misure di deformazione meccanica. La qualità chiave che accresce l'interesse verso questo tipo di tecnica non risiede tanto nella fedeltà dello strain letto con la fibra rispetto al valore teorico, ma bensì nella capacità di effettuare misure distribuite. Misurare lo strain tramite tradizionali estensimetri richiede il posizionamento di almeno uno strain gauge (o una coppia) per ogni punto di interesse, al quale va aggiunto il relativo circuito di amplificazione. Per ottenere una mappa di deformazione simile a quelle presentate nelle Fig.4.17-4.22 sarebbero necessari decine di strain gauges e canali di acquisizione, con ingombri complessivi difficilmente sostenibili e decisamente poco pratici. La fibra è dunque il candidato perfetto per questo tipo di rilevazioni, consentendo con una sola scansione di acquisire lo scostamento spettrale del segnale retrodiffuso. La posizione e il numero dei sensori puntiformi di cui si accennava nel Cap.3, ossia i punti di lettura del campo di deformazione, può essere variato in un secondo momento. Una volta acquisita tramite l'OBR la traccia dello spostamento spettrale del segnale retrodiffuso è possibile, in fase di post processing, modificare parametri quali *spacing* o *gauge length* per ottenere analisi differenti.

Sviluppi futuri potrebbero prevedere la disposizione in maniera differente della fibra, una volta noto il coefficiente di calibrazione. Disponendo ad esempio la fibra non più con tratti rettilinei paralleli all'asse di simmetria della trave ma bensì a 45° su entrambe le facce, con i tratti sulle due facce perpendicolari tra loro, si sarebbe in grado di monitorare la deformazione in tutte le direzioni, tramite semplice teoria vettoriale, ed in tutti i punti, tramite interpolazione lineare.

Possibili applicazioni della presente tecnica di rivelazione della deformazione sono ad esempio il monitoraggio della stabilità di infrastrutture come ponti e arcate, nonché di strutture edilizie di notevoli dimensioni quali grattacieli e torri. Tale tecnica non presenta infatti particolari controindicazioni all'applicazione su decine o centinaia di metri di fibra, se non qualche accorgimento relativo al numero di punti di misura e alla potenza del segnale d'ingresso che deve generare un segnale retrodiffuso di sufficiente potenza.

Altre possibili applicazioni si trovano nel campo dell'aerodinamica, si pensi ad esempio alla deformazione subita dall'ala di un aereo soggetta al carico indotto dal flusso

aerodinamico. Incollando opportunamente la fibra ottica all'interno dell'ala si sarebbe sicuri di non alterarne il comportamento aerodinamico e meccanico, dato l'esiguo peso della fibra, consentendo la creazione di una mappa di deformazione relativa all'ala.

Attualmente non si ha notizia di sensori in fibra ottica per misure di deformazione meccanica reperibili commercialmente, sebbene in letteratura si trovino numerosi documenti a riguardo. Questo studio sperimentale si auspica di aver aggiunto una minima parte allo stato attuale dell'arte in materia di sensoristica in fibra ottica al fine di favorirne futuri sviluppi ed una più massiccia diffusione.

Bibliografia

J. J. Vlassak, *Solid Mechanics*, School of engineering and Applied Sciences, Harvard University. 2007;

M. Gedeon, *Cantilever Beams*, Brush Wellman's Alloy Technical Service Department, Issue No. 20 - August 2010;

Strain gauge datasheet, <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0077/0900766b80077de6.pdf>;

L. Palmieri, L. Schenato, *Distributed Optical Fiber Sensing Based on Rayleigh Scattering*, The Open Optics Journal, 2013, 7, (Suppl-1,M7) 104-127.

OBR 4600 User Manual, Luna Technologies.

L. Palmieri, *Notes about linear least square fitting*, 5 June 2013.