



**Università degli Studi di Padova**  
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi  
Industriali  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

Tesi di Laurea

**Sistema di misurazione per  
tensioni superficiali di una trave  
in acciaio tramite strain gauge**

**Relatore:** Alessandro Sona

**Laureando:** Ludovico Ortombina

Anno Accademico 2012/2013



---

*vorrei ringraziare la mia famiglia  
e la mia fidanzata che mi sono stati vicini  
in questi anni di studio  
e che mi danno la forza di proseguire  
con l'obiettivo di migliorare e  
imparare sempre più.*

---

# Indice

## Introduzione

<b>I</b>	<b>Estensimetri</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Estensimetria</b>	<b>5</b>
	Introduzione . . . . .	5
1.1	Aspetti generali . . . . .	5
1.2	Tipologie di estensimetri . . . . .	7
1.2.1	Estensimetri meccanici . . . . .	7
1.2.2	Estensimetri ottici . . . . .	7
1.2.3	Estensimetri pneumatici . . . . .	8
1.2.4	Estensimetri acustici . . . . .	8
1.2.5	Estensimetri elettrici . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Estensimetri elettrici</b>	<b>11</b>
2.1	Principio di funzionamento . . . . .	11
2.2	Parametri . . . . .	12
2.3	Dipendenza dalla temperatura . . . . .	13
2.3.1	Risposta alla temperatura . . . . .	14
2.4	Incollaggio . . . . .	17
2.5	Scelta dell'estensimetro . . . . .	19
2.6	Stato dell'arte . . . . .	20
2.6.1	Tecnica realizzativa . . . . .	20
2.6.2	Ambiti applicativi . . . . .	22
<b>II</b>	<b>Esperienza</b>	<b>23</b>
	Introduzione . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Scelta Componenti</b>	<b>27</b>
3.1	Scelta Sbarra . . . . .	27
3.2	Scelta Estensimetro . . . . .	28

<b>4</b>	<b>Circuito di Condizionamento</b>	<b>31</b>
4.1	Amplificatore Differenziale . . . . .	31
4.2	Filtro antirumore . . . . .	33
4.3	Adattamento di scala . . . . .	35
4.4	Pcb . . . . .	36
4.5	Adc . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Programma LabVIEW</b>	<b>41</b>
5.1	Impostazione barra . . . . .	41
5.2	Analisi . . . . .	42
5.3	Impostazione scheda . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Misure</b>	<b>45</b>
6.1	Valutazione tra quarto e ponte intero . . . . .	46
6.2	Valutazione effetto filtro . . . . .	47
6.3	Valutazione numero di bit . . . . .	50
<b>7</b>	<b>Conclusione</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>56</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>58</b>

# Introduzione

Oggigiorno la tecnologia e l'ingegneria si è sviluppata notevolmente. Ciò permette la realizzazione di strutture e macchine sempre più imponenti e incredibili, fino a qualche anno fa impensabili. Questo sviluppo è stato permesso dall'invenzione di nuovi materiali, dalla conoscenza più approfondita delle caratteristiche dei materiali chiamati classici nonché da trattazioni matematiche che approssimano la realtà sempre meglio. Per ottenere questa notevole crescita, almeno per quel che riguarda la conoscenza sempre più approfondita delle caratteristiche dei materiali, hanno avuto un ruolo fondamentale gli strain gauges. Gli estensimetri sono in grado di misurare deformazioni molto piccole e ciò consente di conoscere, con ottima risoluzione, le tensioni presenti in un materiale. Questo permette sia di verificare sperimentalmente le relazioni teoriche ma anche, in caso queste siano troppo approssimate od addirittura non esistano, di misurarle direttamente. La conoscenza accurata delle tensioni presenti in un materiale o in un componente permette al progettista di valutare i limiti del materiale stesso e quanto questo può resistere.

Un valido ingegnere che lavora nel settore della progettazione di macchine, ma non solo, non può astenersi dalla conoscenza di questi sensori. Conoscenza che deve essere ad ampio spettro ovvero non è necessario sapere solo cosa si possa ottenere con gli estensimetri. Infatti gli estensimetri elettrici, i più utilizzati oggi, sono caratterizzati da elevata risoluzione e selettività a patto, almeno, che siano adeguatamente incollati e posizionati altrimenti si andrebbero a perdere queste caratteristiche e la misura sarebbe da ritenersi inaffidabile. In aggiunta, per ottenere una misura soddisfacente è necessario saper scegliere o progettare un circuito di condizionamento con ben determinate caratteristiche, in particolare elevato guadagno e buona reiezione al rumore.

In questo elaborato si è dunque cercato, nella prima parte, di presentare gli strain gauges con le loro caratteristiche e criticità nell'utilizzarsi con l'obiettivo di avere chiari i criteri con cui scegliere l'estensimetro migliore per l'applicazione d'interesse. Sono state brevemente affrontate le tecnologie utilizzate per la realizzazione degli estensimetri nonché sono stati elencati alcuni ambiti applicativi. Nella seconda parte invece è presentata un'esperienza di misurazione di tensioni superficiali in una trave attraverso estensimetri dove vengono descritte tutte le scelte e le analisi fatte. In particolare la scelta della barra, del sensore, l'intera

progettazione del circuito di acquisizione e il programma realizzato in LabVIEW. Vengono poi riportate alcune misure realizzate con il sistema appena descritto, mettendo in risalto la differenza tra un'acquisizione mediante quarto di ponte e una tramite ponte intero, l'influenza del filtro passa basso e del numero di bit.

Si è infine concluso l'elaborato con una proposta, e relativi consigli, rivolta ai titolari dei corsi in cui vengono affrontate le tematiche dei circuiti di acquisizione dati. Tale proposta consiste nell'inserire all'interno del corso un'esperienza, aperta a tutti gli studenti, che permette loro di mettersi alla prova, mettendo in pratica quanto visto in teoria.

Parte I  
Estensimetri



# Capitolo 1

## Estensimetria

### Introduzione

In questo capitolo vengono introdotti gli strain gauges. Viene dato un accenno sul loro funzionamento e poi vengono presentati brevemente i principali tipi di estensimetri.

### 1.1 Aspetti generali

L'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche. Tali strumenti hanno la capacità di rilevare le variazioni di distanza relativa fra due qualsiasi punti dell'elemento in prova lungo la loro congiungente, misurandone quindi la deformazione, pari al rapporto tra la variazione subita dai due punti considerati a causa del carico applicato e la loro distanza prima dell'applicazione del carico, definita analiticamente come

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (1.1)$$

dove  $l$  è la distanza fra i due punti prima della deformazione. Dunque conoscendo a priori le caratteristiche meccanico/fisiche del materiale, misurando le deformazioni si possono facilmente ricavare i carichi a cui il materiale è sottoposto. Inoltre, utilizzando estensimetri di giusta tipologia e applicandoli in modo oculato si possono rilevare la direzione e il verso di queste deformazioni, e di conseguenza dei carichi presenti nel materiale sotto esame.

I campi d'applicazione sono molteplici:

- testing in laboratorio su componenti meccanici o materiali;
- analisi statiche e dinamiche di componenti o sistemi meccanici già montati in sito;

- monitoraggio di componenti o sistemi strutturali;
- elemento sensore per trasduttori di grandezze meccaniche;
- altro ancora;

Le tecniche di analisi sperimentale delle tensioni sono usate a diversi stadi della vita di un prodotto; dalla progettazione alla validazione del prototipo prima della produzione, dalle prove di sicurezza e sovraccarico fino alle prove per l'analisi di rotture in servizio.

Sono stati sviluppati vari tipi di estensimetri, ognuno con caratteristiche peculiari che si adattavano a specifici campi d'applicazione. I più comuni sono così classificati:

- estensimetri meccanici;
- estensimetri acustici;
- estensimetri pneumatici;
- estensimetri ottici;
- estensimetri elettrici;

Caratteristiche e proprietà che un estensimetro deve necessariamente possedere affinché possa rendersi utilizzabile, sono i seguenti:

- la costante di taratura, o gage factor, dell'estensimetro deve essere stabile, non deve in altre parole essere sensibile alle variazioni di effetti termici od altri fattori ambientali;
- deve effettuare una stima della deformazione puntuale, locale, e non quella media, tra due punti molto vicini;
- deve essere economicamente accessibile per permetterne un impiego diffuso;

Data l'entità delle grandezze in gioco, la misura non può essere diretta, infatti la deformazione è di solito molto piccola ed è quasi impossibile riuscire a quantificare la deformazione così come anticipatamente definita, tanto è vero che la sua unità di misura è  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Gli estensimetri più comuni e diffusi sono sicuramente quelli elettrici. Per completezza però citeremo anche le altre quattro categorie analizzando brevemente il loro principio di funzionamento.

## 1.2 Tipologie di estensimetri

### 1.2.1 Estensimetri meccanici

Negli estensimetri meccanici (fig. 1.1) la base è costituita da un telaio collegato al corpo grazie a due coltelli distanti fra loro  $l_0$ , uno fisso e l'altro in grado di ruotare attorno a un asse perpendicolare alla direzione della deformazione. Applicando un carico al corpo,  $l_0$ , che corrisponde alla distanza tra i coltelli in assenza di carico, varia di  $\Delta l = l - l_0$ , e ciò provoca una piccola rotazione del secondo coltello; la variazione di distanza fra i coltelli viene generalmente amplificata mediante un sistema di leve e misurata da un indice su una scala graduata. Gli estensimetri meccanici misurano la variazione di lunghezza  $\Delta l$ , da cui si risale alla deformazione  $\epsilon$  dividendo  $\Delta l$  per la lunghezza della base  $l_0$ , che in questi estensimetri varia tra 10 e 100 mm;  $\Delta l$  può essere amplificata da 100 a 1000 volte. Mediamente gli estensimetri meccanici sono sensibili a deformazioni dell'ordine dei  $100 \mu\text{m}/\text{m}$ .



Figura 1.1: Estensimetro meccanico

### 1.2.2 Estensimetri ottici

Tra i primi ad essere realizzati, gli estensimetri ottici funzionavano riflettendo un raggio luminoso attraverso un sistema di specchi e prismi. La deformazione dell'elemento in esame disallineava il sistema ottico e il raggio veniva riflesso con angolazione via via differente. Sebbene la sensibilità di questo sistema di misura poteva essere molto alta, il suo utilizzo poneva seri problemi pratici, specie per le dimensioni del sistema ottico che lo costituiva. Appena possibile è stato sostituito con sistemi di misura più pratici, ed oggi non è più utilizzato.

Un sistema ottico in uso è invece l'estensimetro ottico laser. Si tratta di un misuratore di lunghezze che si basa sul principio dell'interferometria ottica mediante laser. Questi sistemi sono in grado di fare misurazioni di deformazioni con risoluzione del centesimo di micron. Sebbene questi sistemi permettono di fare

misure con una precisione non comparabile con nessun altro sistema, problemi di costo, dimensioni e limitazioni legate alla possibilità di realizzare in pratica l'adeguato circuito ottico, limitano le applicazioni a rari casi, in particolare alla ricerca scientifica.

Recentemente sono stati introdotti un particolare tipo di estensimetri chiamati estensimetri a fibra ottica (FBG). Questi funzionano su un principio analogo all'estensimetro ottico laser, dove però il circuito ottico è realizzato completamente all'interno di una fibra ottica, la quale viene applicata al materiale da testare. I principali vantaggi di questo sistema sono l'immunità ai disturbi, la praticità nella realizzazione dei circuiti ottici e la facilità di realizzare componenti da testare con le fibre annegate all'interno per poterne meglio analizzare e monitorare le deformazioni. Sebbene sia una tecnologia ottica, non si possono conseguire le grandi precisioni ottenibili con le tecnologie cugine. Il motivo è che questa risente fortemente delle derive termiche che si generano nella struttura delle fibre ottiche. Pertanto, al pari degli estensimetri a resistenza, necessitano di tecniche per la compensazione di tali derive.

### 1.2.3 Estensimetri pneumatici

Il principio di funzionamento di un estensimetro pneumatico è basato sullo scarico relativo dell'aria tra un orifizio fisso ed un orifizio variabile. Ingrandendo questo segnale fino a 100000 volte è possibile ricavare una variazione di distanza tra i riferimenti inferiore a 1mm. Questi estensimetri sono adatti per misure di deformazione sia statica che dinamica. Sono robusti, sensibili e affidabili ma sono scarsamente usati se non per usi di ricerca poichè il loro uso pone seri problemi di natura pratica.

### 1.2.4 Estensimetri acustici

Questo tipo di estensimetro (fig. 1.2) è costituito da un filo sottile collegato tra due riferimenti solidali al corpo a cui si vuole misurare la variazione di lunghezza. I corpi ai cui si applicano tipicamente sono delle strade o delle strutture in calcestruzzo. In questi estensimetri si va a misurare la variazione di frequenza di vibrazione della corda quando questa è sottoposta a un impulso elettromagnetico. Al variare della lunghezza e perciò dell'allungamento si aveva una frequenza di vibrazione diversa. Questa misurazione può essere effettuata con grande precisione. Le letture possono essere effettuate per un periodo di anni senza alcun timore di derive.

### 1.2.5 Estensimetri elettrici

L'estensimetro elettrico (fig. 1.3) a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico (solitamente costantana) rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico. Venne inventato da Edward E. Simmons e Arthur

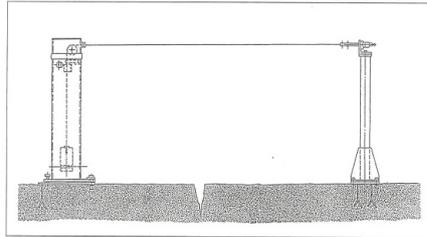


Figura 1.2: Estensimetro acustico

C. Ruge nel 1938. L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni generalmente utilizzando collanti appositi. Il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa; queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un ponte di Wheatstone o altro sistema tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate. Le dimensioni di un estensimetro possono variare da pochi micron ad alcuni centimetri. Quelli di dimensioni minori sono utilizzati per misure puntuali, cioè per conoscere il valore delle deformazioni in un punto preciso, mentre quelli di maggior lunghezza sono utili per rilevare la deformazione media relativa ad un'area più estesa. Tipicamente si possono misurare delle deformazioni con una risoluzione dell'ordine di un micrometro/metro, cioè di una parte su un milione. Per determinare le tensioni principali e le relative direzioni si usano estensimetri, denominati rosette, con 2 o 3 griglie su uno stesso supporto ma orientati in direzioni diverse. La risposta dell'estensimetro è istantanea, ciò permette di individuare sia le deformazioni statiche che le deformazioni dinamiche con frequenze che possono arrivare a diverse migliaia di Hertz. Nel tempo, per le loro ottime caratteristiche generali, gli estensimetri elettrici a resistenza hanno scalzato le altre tipologie nella maggior parte delle applicazioni, tanto che oggi, quando si parla di estensimetri, normalmente si sottintende specificamente a questa categoria.

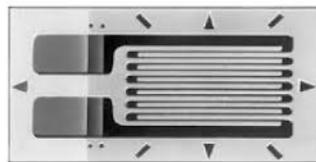


Figura 1.3: Estensimetro elettrico



## Capitolo 2

# Estensimetri elettrici

### 2.1 Principio di funzionamento

Gli estensimetri elettrici si basano sulla proprietà della resistenza elettrica la quale è direttamente proporzionale alla resistività del materiale in uso e alla lunghezza del conduttore considerato, e inversamente proporzionale all'area della sezione del conduttore stesso:

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad (2.1)$$

con  $R$  valore di resistenza elettrica,  $\rho$  resistività del materiale,  $l$  lunghezza del provino e  $A$  area della sezione esaminata. In prima battuta una variazione di  $l$  dovuta ad un allungamento del pezzo su cui è incollato l'estensimetro, provoca una variazione di resistenza misurabile con un ponte di Wheatstone e dalla quale è ricavabile l'allungamento.

Differenziando e dividendo la 2.1 per  $R$  si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}. \quad (2.2)$$

Nell'eq. 2.2 il termine  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  rappresenta la variazione di resistività relativa,  $\frac{\Delta l}{l} = \epsilon_l$  è la deformazione del conduttore in direzione longitudinale e  $\frac{\Delta A}{A}$  è la variazione relativa di sezione del conduttore stesso. Nel caso di un conduttore con sezione circolare di diametro  $d$  o con sezione quadrata di lato  $l$  si ha:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta d}{d} = 2\epsilon_t, \quad (2.3)$$

dove  $\epsilon_t$  è la deformazione del conduttore in direzione trasversale. Per un conduttore sollecitato lungo la direzione longitudinale da uno stato di tensione monoassiale la deformazione trasversale  $\epsilon_t$  è legata alla deformazione longitudinale  $\epsilon_l$  dalla relazione:

$$\epsilon_t = -\nu\epsilon_l, \quad (2.4)$$

in cui  $\nu$  è il coefficiente di Poisson del materiale. Sostituendo l'eq. 2.4 nell'eq. 2.3 si ottiene:

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\epsilon_t = -2\nu\epsilon_l. \quad (2.5)$$

Introducendo queste considerazioni nell'eq. 2.2 si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\epsilon_l. \quad (2.6)$$

Questa espressione evidenzia come la variazione di resistenza relativa  $\Delta R/R$  è legata alla deformazione  $\epsilon_l$  e alla variazione di resistività relativa  $\Delta \rho/\rho$  che a sua volta dipende dalla deformazione  $\epsilon_l$ . In questo modo si lega direttamente la variazione di resistenza  $\Delta R/R$  alla deformazione longitudinale. Se ora si immaginasse che il nostro provino, su cui è stato opportunamente incollato un tratto di conduttore, che possa subire fedelmente ogni variazione di sezione subita dal pezzo stesso, venga caricato assialmente da una forza  $N$ , esso subirà una deformazione assiale dovuta alla forza di trazione applicata. Con esso anche il conduttore incollato subirà una deformazione, che provocherà nello stesso una variazione di sezione resistente, e quindi di resistività. Se si è in grado, ora, di garantire la medesima deformazione per il pezzo ed il conduttore, si dispone allora di una legge in grado di correlare la deformazione del conduttore (uguale a quella del pezzo) alla sua variazione di resistenza. In realtà, però, si è scoperto che la sensibilità di un solo tratto di conduttore incollato al pezzo non era sufficiente per avere una sensibilità che soddisfacesse la prova. Si pensò, quindi, di mettere in serie più tratti di conduttore giungendo alla configurazione più comune degli estensimetri. Il filo di materiale conduttore è, così, disposto a serpentina, in modo da migliorare la sensibilità senza obbligare a disporre di una lunghezza iniziale di misura  $l$  eccessiva. I valori tipici di resistenza per un estensimetro a resistenza elettrica sono:  $R = 120\Omega$  oppure  $350\Omega$  con tolleranze dell'1%. Tuttavia l'estensimetro risulterà parzialmente sensibile anche alle deformazioni secondo la direzione  $y$ , a causa della presenza dei gomiti della serpentina, che, anche se per un breve tratto investono la direzione perpendicolare a quella di misura. Per ridimensionare il problema e ridurre la sensibilità trasversale, così viene chiamato questo fenomeno, si costruiscono estensimetri con i raccordi a sezione maggiore.

Oggigiorno per la realizzazione di estensimetri non si usa più la tecnica di incollare un filo disposto a serpentina su una base plastica ma si usano altre tecniche le quali permettono agevolmente la realizzazione di raccordi a sezione maggiore per ridurre la sensibilità trasversale. Per approfondimenti si rimanda alla sez. 2.6.

## 2.2 Parametri

Il principale parametro che descrive la caratteristica di un estensimetro è il fattore di taratura dell'estensimetro, più noto con il termine anglosassone di gage

factor  $G$  o ingegneristicamente  $k$  dell'estensimetro. Il fattore di taratura indica la sensibilità dell'estensimetro. Tale coefficiente è, per definizione:

$$G = k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}, \quad (2.7)$$

ossia il rapporto tra variazione di resistenza e suo valore iniziale, rapportata alla deformazione. Valori tipici della sensibilità degli estensimetri, nel caso di estensimetri metallici, sono:  $G = 2$ , con tolleranze del 1%, 2%. I materiali più comuni per la realizzazione della griglia sensibile sono la costantana (lega rame nichel), o diverse leghe nichel-cromo (nicromo V), con l'aggiunta di piccole percentuali di ferro, alluminio o molibdeno.

Un altro parametro è la dimensione della griglia sensibile. Tipicamente è più piccola della base polimerica e in fase applicativa è da tener presente infatti l'estensimetro è sensibile solo nella zona coperta dalla griglia ma per una misura soddisfacente è necessario incollare bene tutta la base plastica e, in caso di più strain gauges vicini, che non si sovrapponga con quella di altri sensori.

Ultimo parametro che caratterizza uno strain gauge è il valore della resistenza della griglia.

## 2.3 Dipendenza dalla temperatura

Gli estensimetri sono sensibili alla variazione di temperatura. Per questo motivo nell'effettuazione di una misurazione estensimetrica è molto importante considerare i seguenti fattori:

- il valore della temperatura a cui si effettua la misura;
- la variazione di temperatura durante la misurazione;

Inoltre ad elevati livelli di temperatura è importante conoscere:

- quanto tempo può resistere l'incollaggio e quali sono i possibili effetti sulla bontà della misurazione;
- quando intervengono processi di conversione nella lega componente la griglia di misurazione dell'estensimetro;
- come si comportano gli elementi di connessione (cablaggi);

Gli errori di misura introdotti da variazioni di temperatura possono essere limitati dall'utilizzo di estensimetri auto-compensanti e/o dall'uso di opportuni metodi di compensazione esterni. Per capire quanto è importante la compensazione della temperatura in una misura con estensimetri bisogna pensare che le variazioni di resistenza per effetti termici sono date da:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T, \quad (2.8)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di variazione della resistività dovuto alla temperatura. Per una materiale classico nell'utilizzo elettrico come alluminio, argento, oro, rame o tungsteno il coefficiente di variazione della resistività vale circa  $0,004/^\circ C$ . Le variazioni di resistenza per deformazioni sono, invece, date da:

$$\frac{\Delta R}{R} = G\epsilon_1, \quad (2.9)$$

con  $G$  tipicamente uguale a 2. Quindi un  $\Delta T$  di  $1^\circ C$  ha un effetto sulla misura equivalente a una deformazione di circa 2000 microstrain.

### 2.3.1 Risposta alla temperatura

Vi sono diversi fattori che possono influenzare la risposta in temperatura di un estensimetro:

- Influenza sul fattore di taratura  $G$  dell'estensimetro;
- Variazione di resistività della griglia estensimetrica;
- Dilatazione termica differenziale (estensimetro - materiale);
- Variazione della resistenza elettrica dei cavi di collegamento;

Una variazione di temperatura nell'esecuzione di una misurazione rispetto a quella di riferimento a cui si è applicato l'estensimetro e per la quale è stato determinato il fattore  $G$  introduce degli errori in quanto influisce sia sulla relazione che lega la variazione di resistività relativa  $\frac{\Delta \rho}{\rho}$  alla deformazione  $\epsilon$  e di conseguenza al valore nominale di  $G$ , che sul valore della resistenza stessa del conduttore che costituisce la griglia estensimetrica. Il primo fenomeno viene normalmente corretto mediante il coefficiente di temperatura  $\beta_k$  che permette di calcolare il fattore di taratura  $G_T$  dell'estensimetro alla temperatura  $T$  a cui viene eseguita la prova. Se questa temperatura si discosta del valore  $\Delta T$  dalla temperatura alla quale era stato definito  $G$  il valore di  $G_T$  è dato da:

$$G_T = G(1 + \beta_K \Delta T). \quad (2.10)$$

Il secondo fenomeno, cioè quello che considera la variazione di resistenza relativa  $\frac{\Delta R}{R}$  della griglia estensimetrica con la temperatura viene corretto utilizzando il coefficiente di temperatura del materiale della griglia  $\alpha$ :

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T} = \alpha \Delta T. \quad (2.11)$$

Inoltre la temperatura produce una diversa dilatazione termica tra il materiale in analisi e il materiale dell'estensimetro generando una deformazione apparente. Un aumento di temperatura provoca una deformazione del materiale pari ad  $\xi_m \Delta T$ . Se l'estensimetro fosse libero si dilaterebbe di  $\xi_e \Delta T$ , ma poiché è solidale

alla struttura (molto più rigida) dovrà subirne la stessa dilatazione. Si avrà dunque una deformazione termica differenziale che tensiona l'estensimetro pari a:

$$\epsilon_\alpha = (\xi_m - \xi_e)\Delta T. \quad (2.12)$$

Considerando le correzioni dei tre effetti definiti nelle eq. 2.10, 2.11 e 2.12 la relazione tra resistenza relativa e la deformazione longitudinale diviene:

$$\frac{\Delta R}{R} = G_T \epsilon_1 + G_T (\xi_m - \xi_e) \Delta T + \alpha \Delta T. \quad (2.13)$$

Dalla precedente formula si può ricavare la deformazione effettivamente generata dai carichi applicati al pezzo in esame:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta R/R}{G_T} - \frac{[\alpha + G_T(\xi_m - \xi_e)]\Delta T}{G_T}. \quad (2.14)$$

Moltiplicando e dividendo il secondo membro della 2.14 per  $G$  e aggiungendo e sottraendo all'interno della parentesi quadra la quantità  $G(\xi_m - \xi_e)$  si ottiene:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta R/R}{G} \frac{G}{G_T} - \frac{[\alpha + G(\xi_m - \xi_e)]\Delta T}{G} \frac{G}{G_T} + \frac{(G - G_T)(\xi_m - \xi_e)\Delta T}{G} \frac{G}{G_T}. \quad (2.15)$$

In questa relazione l'ultima frazione è trascurabile rispetto alle due precedenti e di conseguenza si ricava:

$$\epsilon_1 = \epsilon' \frac{G}{G_T} - \epsilon_a \frac{G}{G_T} = (\epsilon' - \epsilon_a) \frac{G}{G_T}. \quad (2.16)$$

dove:

$$\epsilon_a = \frac{[\alpha + G(\xi_m - \xi_e)]\Delta T}{G}, \quad (2.17)$$

è la deformazione indotta da  $\Delta T$ ,

$$\epsilon' = \frac{\Delta R/R}{G}, \quad (2.18)$$

è la deformazione misurata senza considerare l'effetto di  $\Delta T$  e  $\epsilon_1$  è la deformazione reale in direzione longitudinale.

Per non incorrere nei problemi suddetti è buona norma adottare una griglia di materiale poco sensibile alla temperatura (avente  $\alpha$  e  $\beta_k$  molto bassi) e con coefficiente di dilatazione il più possibile simile a quello del pezzo in esame. Si può notare che utilizzando come materiale sensibile dell'estensimetro la costantana anziché un materiale comunemente usato per i conduttori elettrici, come quelli elencati precedentemente, la dipendenza dalla temperatura della misura risulta notevolmente diminuita infatti questa lega ha un coefficiente di variazione della resistività 160 volte più piccolo. Risultati ancora migliori si possono ottenere

utilizzando manganina (lega rame-manganese-nichel) la quale ha un coefficiente di variazione della resistività  $\alpha$  pari a  $0.00001/^\circ C$  ovvero 400 volte inferiore a quello dei comuni materiali utilizzati come conduttori.

Un altro sistema per eliminare i problemi indotti dalle misure con temperatura variabile è quello di utilizzare un estensimetro compensatore collegato a mezzo ponte con quello di misura. In questo modo gli effetti indotti dalla temperatura sui due estensimetri sono gli stessi ma essendo collegati sullo stesso lato del ponte di Wheatstone (fig. 2.1) gli effetti si annullano. Infatti una variazione di  $\Delta T$

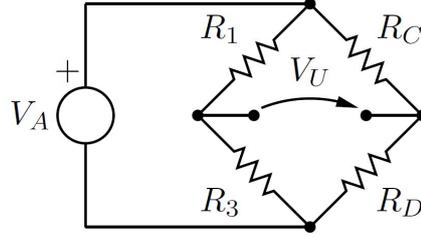


Figura 2.1: Ponte di Wheatstone in configurazione a mezzo ponte con due estensimetri di fissi, uno di misura e uno di compensazione

produce variazioni  $\Delta R_C$  e  $\Delta R_D$  uguali, mentre la deformazione  $\epsilon$  produce solo variazioni di  $R_D$ . Per verificare la compensazione dagli effetti della temperatura effettuata da una configurazione a mezzo ponte (trattando come differenziali le piccole variazioni):

$$V_U = V_A \left( \frac{R_D}{R_C + R_D} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) = V_A \left[ f(T, \epsilon) - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right], \quad (2.19)$$

con

$$f(T, \epsilon) = \frac{R_D(T, \epsilon)}{R_C(T) + R_D(T, \epsilon)}. \quad (2.20)$$

Si può calcolare quindi

$$\Delta V_U = V_A \left\{ \frac{df}{dR_D} [\Delta R_D(\epsilon) + \Delta R_D(T)] + \frac{df}{dR_C} \Delta R_C(T) \right\} = \quad (2.21)$$

$$V_A \left\{ \frac{df}{dR_D} \Delta R_D(\epsilon) + \left[ \frac{df}{dR_D} \frac{dR_D}{dT} + \frac{df}{dR_C} \frac{dR_C}{dT} \right] \Delta T \right\} = \quad (2.22)$$

$$V_A \left\{ \frac{R_C}{(R_C + R_D)^2} \Delta R_D(\epsilon) + \left[ \frac{R_C}{(R_C + R_D)^2} \frac{dR_D}{dT} - \frac{R_D}{(R_C + R_D)^2} \frac{dR_C}{dT} \right] \Delta T \right\} = \quad (2.23)$$

$$V_A \frac{R_C R_D}{(R_C + R_D)^2} \frac{\Delta R_D(\epsilon)}{R_D} + V_A \left[ \frac{R_C R_D}{(R_C + R_D)^2} \frac{1}{R_D} \frac{dR_D}{dT} - \frac{R_C R_D}{(R_C + R_D)^2} \frac{1}{R_C} \frac{dR_C}{dT} \right] \Delta T, \quad (2.24)$$

che alla temperatura di riferimento iniziale si ha  $R_D = R_C$  e  $\frac{dR_D}{dT} = \frac{dR_C}{dT}$ , quindi il termine in  $\Delta T$  è nullo. Si trova perciò

$$\Delta V_U = V_A \frac{\frac{R_C}{R_D}}{\left(1 + \frac{R_C}{R_D}\right)^2} \frac{\Delta R_D(\epsilon)}{R_D} = \frac{V_A}{4} \frac{\Delta R_D(\epsilon)}{R_D} = \frac{V_A}{4} G \frac{\Delta L}{L} = \frac{V_A}{4} G \epsilon. \quad (2.25)$$

Attualmente sono disponibili in commercio degli estensimetri autocompensati che garantiscono degli errori indotti da  $\Delta T$  inferiori all'1-2%. Nella fig. 3.1 è riportato l'andamento della deformazione apparente e del fattore di taratura  $K_T$  per un estensimetro autocompensato.

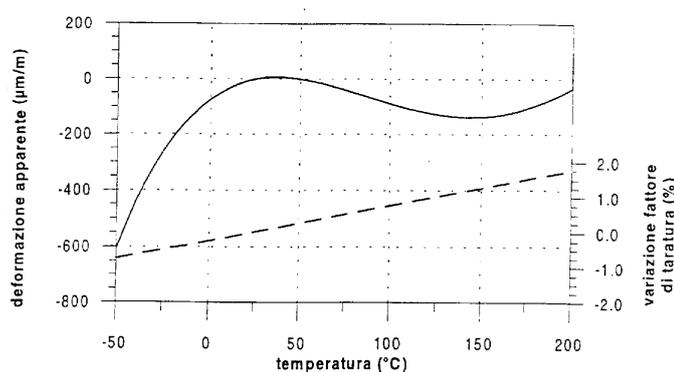


Figura 2.2: Grafico caratteristico di un estensimetro autocompensato. La curva continua indica la deformazione apparente in funzione della temperatura mentre quella tratteggiata indica la variazione percentuale del fattore di taratura.

## 2.4 Incollaggio

L'incollaggio di un estensimetro è un aspetto che riveste una notevole importanza. Dalla riuscita dell'incollaggio dipende la qualità della misura che otterremo infatti bisogna pensare che affinché l'estensimetro segua correttamente la deformazione del pezzo questo deve essere incollato in modo da poter subire la medesima deformazione. È intuitivo che un incollaggio non ottimale comporterebbe una misura priva di significato.

Va da sé che la colla utilizzata non deve essere troppo poca poichè non ci sarebbe un'adeguata adesione tra estensimetro e pezzo ma neppure eccessiva, in quanto finirebbe per creare uno strato elastico impedendo all'estensimetro di deformarsi come il pezzo provocando problemi di variazione apparente di  $G$ , di isteresi e di deriva; inoltre aumenterebbe la difficoltà da parte della griglia sensibile di dissipare il calore prodotto. In aggiunta l'estensimetro deve essere ben incollato al pezzo ma deve sussistere anche un perfetto isolamento elettrico tra griglia e la superficie su cui è incollato.

Esiste una procedura ormai ben collaudata di incollaggio degli estensimetri. Tale procedura non include solo la fase vera e propria dell'incollaggio ma anche tutta la preparazione della superficie.

La prima operazione da eseguire è la pulizia della superficie attraverso un'operazione meccanica che può avvenire con il carteggio usando carta al carburo di silicio o sabbatura con grane opportune (tipicamente 400). Questa fase non deve portare alla lucidatura della superficie; è bene che permanga una certa rugosità superficiale la quale aumenta l'azione della colla.

Successivamente è necessario sgrassare la superficie attraverso un trattamento chimico. In questa fase è importante non fare evaporare i solventi sulla superficie e non passare più volte con la stessa garza sulla zona in modo da evitare la contaminazione della superficie. Tra queste fasi e l'incollaggio vero e proprio è consigliato che non trascorri molto tempo onde evitare che la zona pulita si inquina nuovamente.

Solitamente prima dell'applicazione della colla vengono fatti dei segni sulla superficie i quali aiutano l'operatore a posizionare correttamente l'estensimetro. L'operatore con l'aiuto di un pezzo di nastro adesivo, sul quale è fissato l'estensimetro, cercherà di far combaciare i segni presenti sulla sbarra con quelli presenti sull'estensimetro. Il nastro adesivo è utile anche in fase di incollaggio infatti permette di sollevare l'estensimetro per spandere la colla e poi di riposizionarlo nella posizione voluta.

Ora è necessario scegliere la colla più adatta all'applicazione in cui sarà impiegato lo strain gauge. Infatti esistono diverse tipologie di colle che si differenziano per caratteristiche, modalità di applicazione e costo. Le colle si differenziano in tre grandi famiglie: cianoacrilati, resine epossidiche e adesivi al poliestere. I cianoacrilati sono adesivi ad azione rapida infatti polimerizzano in tempi molto brevi ma come controparte vanno utilizzati a temperatura ambiente e consentono un'adesione efficace solo per prove di breve durata. Le resine epossidiche e gli adesivi al poliestere invece vengono utilizzati per prove di lunga durata. Necessitano entrambe di un catalizzatore. Inoltre le resine epossidiche essendo anche termoindurenti, hanno bisogno di essere scaldate per indurire. Qualsiasi sia la colla che si utilizzi è necessario applicare una certa pressione su di essi per permettere un buon incollaggio.

Tipicamente il fissaggio degli estensimetri viene concluso con l'incollaggio, in prossimità dell'estensimetro, di piazzole: i fili terminali dell'estensimetro vengono saldati alle piazzole e da queste si collegano i fili che poi andranno al circuito di condizionamento. Questa operazione permette di evitare che azioni meccaniche che possono subire i fili si ripercuotano sull'estensimetro danneggiandolo. Ultima operazione da effettuare è proteggere l'estensimetro possibilmente attraverso una capsula. Particolarmente dannose possono infatti risultare le azioni di umidità e di sporcizia oltre alle già citate azioni meccaniche.

## 2.5 Scelta dell'estensimetro

Gli estensimetri possono essere usati per misurare delle grandezze fisiche a partire dalla deformazione di un elemento meccanico, in maniera diretta o indiretta. La grande precisione ottenibile dagli estensimetri consente, quando sono incollati su degli elementi meccanici sensibili, di fornire un segnale elettrico proporzionale ad una grandezza fisica quale il peso, la forza, la pressione, la coppia, l'accelerazione e di costituire così un sensore.

I sensori sono oggi parte integrante dell'automazione e dei sistemi di controllo, la cui diffusione è aumentata per l'uso sempre più generalizzato dei computer. Sia per l'analisi sperimentale delle tensioni che per la realizzazione di sensori, è importante scegliere l'estensimetro appropriato in funzione dei requisiti quali la precisione, la durata di vita in fatica, il campo di temperatura e le condizioni ambientali.

I principali parametri e criteri per la selezione di un estensimetro sono:

- Il materiale su cui incollare gli estensimetri.  
Esistono infatti estensimetri specifici per alluminio o acciaio o altri materiali. La differenza tra un tipo e l'altro è principalmente la base polimerica e il coefficiente di dilatazione termico  $\alpha_e$ ;
- Stato di tensione presente.  
Esistono molteplici tipologie di estensimetri con diverse forme. Questo è pensato per facilitare la misura delle varie componenti tensionali presenti nel materiale. Un esempio è in fig. 2.3;

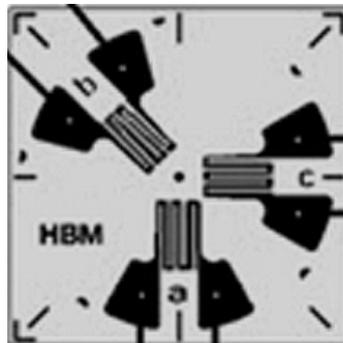


Figura 2.3: Composizione di tre estensimetri, chiamata rosetta estensimetrica, adatta per misure di tre stati tensionali

- Topologia del campo di tensione.  
Presenza di un campo tensionale omogeneo o disomogeneo, l'esistenza di variazioni discrete, la necessità del valore medio della tensione presente o il valore puntuale. Questi dati sono fondamentali nella scelta delle dimensioni dell'estensimetro. Se ad esempio si volesse misurare il valore puntuale delle

tensioni è consigliabile scegliere un estensimetro con base corta. Oppure se lo stato di tensione varia si può utilizzare un array di estensimetri per valutare la variazione continua o discreta della tensione presente;

- **Indice della frazione utile della misura rispetto alla frazione di disturbo.**  
Per esempio in presenza di una forza normale come frazione utile sovrapposta a momento torcente come disturbo. La conoscenza di questo permette il migliore posizionamento degli estensimetri. Infatti se si volesse misurare il momento flettente di asse x-x di una trave sollecitata anche da momento flettente di asse y-y, gli estensimetri vanno posizionati sulla faccia superiore e/o inferiore della trave con asse degli stessi ortogonale all'asse x della trave. In questo modo si aumenta la selettività degli estensimetri a favore della misura del momento di interesse;
- **La durata della misurazione e la temperatura a cui verrà effettuata.**  
Quest'informazione è importante per poter scegliere un estensimetro con una base di materiale opportuno che, alle temperature di esercizio, non si degradi. Inoltre la conoscenza della durata della misurazione e la temperatura di esercizio sono fondamentali per scegliere un adesivo adatto;
- **I disturbi ambientali.**  
La conoscenza dei disturbi è fondamentale per la scelta e la progettazione di un valido sistema protettivo dei sensori che altrimenti potrebbero degradarsi più velocemente e portare a misure non corrette;
- **Condizioni elettriche nel punto di misura.**  
Questo fattore non è fondamentale nella scelta degli estensimetri ma è fondamentale per un'adeguata realizzazione del circuito elettrico di acquisizione del segnale. Infatti, facendo le opportune considerazioni, è possibile scegliere la migliore configurazione di ponte di Wheatstone da utilizzare, il tipo di tensione di alimentazione del ponte e il modo di collegamento tra ponte e circuito in base a vari fattori come la distanza, la resistenza dei cavi, gli spinotti di collegamento. Inoltre, in base al circuito di condizionamento che si ha a disposizione, è necessario scegliere un estensimetro con opportuna resistenza;

## 2.6 Stato dell'arte

### 2.6.1 Tecnica realizzativa

I moderni estensimetri vengono realizzati utilizzando la tecnica della fotoincisione. Questa tecnica è molto utilizzata in vari campi della tecnologia, dalla realizzazione dei circuiti stampati (PCB) a lavorazioni metalliche particolari difficilmente ottenibili con altre tecnologie. La fotoincisione è anche una delle fasi

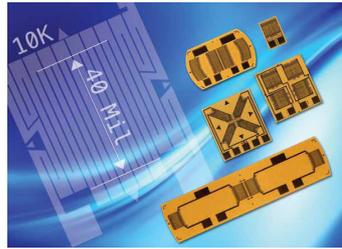


Figura 2.4: Vari modelli di estensimetri

di realizzazione dei circuiti integrati. La tecnica della fotoincisione consiste nel predisporre una matrice con il disegno dell'estensimetro. Questa matrice ha dimensioni maggiori rispetto a quelle finali dell'estensimetro e dipendono dalla tecnologia con cui la si realizza. Ora viene proiettata una luce, che può essere una luce a raggi UV, attraverso questa matrice su di una lastra ricoperta di un film fotosensibile il quale è posto su uno strato metallico depositato sopra un supporto isolante. Le dimensioni della figura proiettata sono ora quelle reali. La luce ha come effetto quello di fissare il disegno, proprio come avviene nello sviluppo delle fotografie. Un successivo lavaggio permette di visualizzare il metallo da asportare, ed infine l'immersione in un bagno acido asporta il metallo in eccesso, lasciando sullo strato isolante l'estensimetro pronto da utilizzare. Tra i principali svantaggi della fotoincisione, che la rendono conveniente solo in elevati volumi di produzione, c'è la necessità di realizzare opportune maschere e la non trascurabile quantità di materiale di scarto.

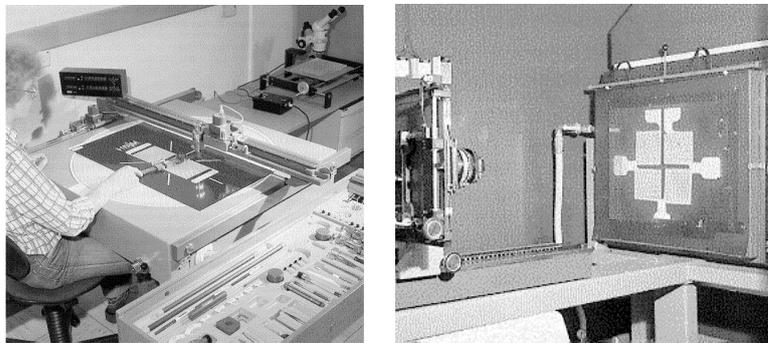


Figura 2.5: Fasi della produzione di estensimetri con la tecnica della fotoincisione

Un'altra tecnica che si sta diffondendo nella realizzazione degli estensimetri è l'inkjet printing. Il miglioramento e la diffusione di questa tecnica è legata alle esigenze di prototipazione rapida di dispositivi elettronici e sensori a basso costo, specialmente negli ambiti della ricerca e dello sviluppo. A differenza della fotoincisione questa tecnica non richiede maschere o microlavorazioni a vantaggio

dei tempi realizzativi e dei costi. Questa tecnica consiste nello stampaggio, su un supporto base, del sensore. Per la stampa si possono usare anche delle comuni stampanti a inchiostro anche se presentano delle limitazioni legate a problemi di compatibilità tra inchiostri utilizzati e testine di stampa, ai substrati utilizzati e all'assenza di feedback visivi sul processo. Esistono inchiostri sia organici che inorganici con caratteristiche diverse. Gli inchiostri per la realizzazione di estensimetri sono tipicamente inorganici, basati su metalli quali argento, oro, rame e alluminio dispersi in un solvente.

### 2.6.2 Ambiti applicativi

Attualmente gli estensimetri sono utilizzati in moltissime applicazioni. Come accenato nella parte iniziale della sez. 2.5 gli estensimetri vengono utilizzati per misure di deformazione ma anche misure di altri misurandi sfruttando le caratteristiche dei materiali su cui sono incollati. Un possibile esempio sono le celle di carico, le quali attraverso un estensimetro, stimano la forza applicata ai loro estremi oppure i torsimetri nei quali si va a misurare le tensioni principali dovute a torsione su un pezzo cilindrico in modo da poter risalire alla coppia applicata al pezzo. I campi in cui si utilizzano gli estensimetri sono i più svariati infatti si utilizzano dalle verifiche statiche di edifici, alle verifiche statiche e dinamiche di macchine come possono essere le piattaforme aeree, nella progettazione di manubri di bici. Alcuni utilizzi particolari sono, per esempio, il controllo della deformazione della forcella di una moto da gara da utilizzarsi in telemetria oppure nel monitoraggio dell'andamento di una crepa in un edificio in seguito a scosse di terremoto.



Figura 2.6: Esempi di applicazioni estensimetri

Parte II

Esperienza



## Introduzione

In questa parte dell'elaborato si descrive un'esperienza di utilizzo degli strain gauges. Si affronta tutto il percorso per ottenere una soddisfacente misura estensimetrica infatti sono presentati i criteri di scelta dell'estensimetro, delle dimensioni della barra, del materiale della stessa, della progettazione del circuito di condizionamento e, alla fine, di una possibile analisi con elaboratore. Tutte queste analisi sono state effettuate considerando sempre l'elemento economico, fattore che un buon ingegnere deve sempre avere sott'occhio.

L'esperienza consiste in una sbarra incastrata ad una estremità e all'estremo opposto viene esercitata una forza. Attraverso la lettura delle tensioni con strain gauges verrà visualizzato sull'elaboratore, attraverso un apposito applicativo, la stima della massa applicata ed anche la tensione presente. Questa è una esperienza di base dalla quale però, con opportune piccole variazioni secondo l'obiettivo che si vuole raggiungere, è possibile ottenere diverse analisi più accurate. Per esempio se la massa costante è sostituita da un carico variabile nel tempo, è possibile misurare l'andamento delle tensioni nel tempo e attraverso opportune elaborazioni ottenere il numero di cicli che la sbarra è in grado di reggere prima di arrivare a rottura. Un altro possibile esempio consisterebbe nel posizionare un opportuno attuatore (cilindro idraulico o pneumatico oppure un motore accoppiato ad un sistema vite-madrevite) tra l'incastro e il punto dove viene applicato il carico; il sistema di controllo dovrà cercare di ridurre il più possibile le oscillazioni della sbarra andando a misurarle attraverso gli strain gauges e comandando opportunamente l'attuatore.



## Capitolo 3

# Scelta Componenti

### 3.1 Scelta Sbarra

La sbarra o elemento sensibile è in acciaio. È stato scelto l'acciaio perché è un comune, se non il più comune, materiale da costruzione ed è facile da reperire sul mercato in una vasta gamma di dimensioni. Per decidere le dimensioni della sezione nonché la lunghezza della sbarra è necessario considerare le masse calibrate che si hanno a disposizione, la tensione di snervamento dell'acciaio impiegato e il coefficiente di sicurezza statico adottato. Per fare quest'analisi, visto il numero di variabili, è consigliabile l'utilizzo di una tabella, la quale semplifica il confronto tra le varie possibilità. Un esempio è riportato in tab. 3.1. L'acciaio considerato nell'esempio di tab. 3.1 è l'Fe360, del quale si riportano in tab. 3.2 le principali caratteristiche.<sup>1</sup>

Massa [Kg]	Lung [mm]	Base [mm]	Altezza [mm]	Tensioni [MPa]	Coeff. sicurezza $\nu_{st}$
1.5	350	15	3	228.82	0.93
1.5	350	15	4	128.71	1.67
1.5	400	15	3	261.51	0.82
1.5	400	15	4	165.48	1.3

Tabella 3.1: Valutazione dimensioni elemento sensibile in acciaio Fe360

<sup>1</sup>Si ricorda che la tensione dovuta a momento flettente in una sbarra rettangolare di base  $b$  e altezza  $h$  vale

$$\sigma = \frac{M_f}{J_{xx}} * y, \quad (3.1)$$

dove  $J_{xx} = \frac{b*h^3}{12}$  e  $y$  corrisponde alla distanza tra l'asse baricentro e la superficie ovvero  $h/2$ .

In questa trattazione si trascurano le componenti tensionali dovute a taglio e quelle dovute a momento flettente prodotte dalla massa stessa della sbarra poiché risultano trascurabili (inferiore al 1% rispetto a quella dovuta a momento flettente).

Modulo elastico [MPa]	Tensione di snervamento [MPa]	Tensione di rottura [MPa]
206000	215	360

Tabella 3.2: Caratteristiche acciaio Fe360

Si può ripetere l'analisi per qualsiasi tipo di materiale, variando i parametri a scelta. Nel nostro caso si è deciso di utilizzare una sbarra in Fe360 con dimensioni uguali a quelle della seconda riga della tab. 3.1, sia perchè abbiamo un buon coefficiente di sicurezza, sia perchè le dimensioni della sezione sono facilmente trovabili sul mercato. I valori riportati in tab. 3.2 sono da considerarsi medi, infatti non sono riferiti alla sbarra in esame in quanto non è stato possibile effettuare una prova di trazione per misurarli esattamente, ma sono ottenuti da tabelle relative a una generica colata di acciaio Fe360.

È importante sottolineare che nella valutazione effettuata si considera che gli estensimetri siano incollati vicino all'incastro e che la lunghezza della sbarra non sia quella effettiva ma sia la distanza tra il punto di applicazione del carico e il punto medio di incollaggio degli estensimetri. Questo comporta la presenza di una tensione maggiore nell'incastro rispetto le tensioni riportate in tab. 3.1 e un coefficiente di sicurezza più basso. Queste differenze risultano trascurabili se gli estensimetri sono posti vicino all'incastro (qualche centimetro) mentre non lo sono più se così non è. Questo necessariamente comporta una trattazione più approfondita per evitare che, a causa di un carico eccessivo, la sbarra si deformi in maniera irreversibile in prossimità dell'incastro.

## 3.2 Scelta Estensimetro

Per la scelta dell'estensimetro è necessario basarsi sulle considerazioni viste nella sez. 2.5. È da premettere che la decisione su quale estensimetro prediligere, con le relative caratteristiche, va in concordanza con la scelta della sbarra e con il sistema di condizionamento che abbiamo. Decisa la sbarra da utilizzare (sez. 3.1) è necessario decidere la configurazione di acquisizione. In questa esperienza si è deciso di utilizzare la configurazione a ponte intero. Questo comporta la necessità di disporre due estensimetri, uno in fianco all'altro, poichè entrambi devono essere sottoposti alle stesse deformazioni. Questo implica che la larghezza della base plastica degli estensimetri utilizzati sia inferiore a metà della larghezza della sbarra. La larghezza della base polimerica degli estensimetri che andremo a utilizzare sarà perciò di 5mm mentre la larghezza della griglia sarà di 3.5mm.

Lo stato di tensione presente nel nostro caso è mono assiale infatti è presente solo una tensione normale alle sezione. Dunque la tipologia di estensimetri da utilizzare sono quelli mono-griglia. Nonostante siamo in un caso monoassiale e non ci siano tensioni che disturbano, per esempio momenti torcenti, è fonamen-

tale incollare gli estensimetri esattamente paralleli all'asse della trave stessa per permettergli di avere una selettività massima nei confronti della deformazione d'interesse.

Il valore della resistenza degli estensimetri, dovendo noi progettare il circuito di acquisizione, non ha molta importanza. Scegliamo gli strain gauges da  $350\Omega$  in modo che la potenza dissipata sia minore rispetto a quella dissipata dagli estensimetri da  $120\Omega$ . Questa considerazione nasce dal fatto che l'area coperta dagli estensimetri è in proporzione al volume consistente e dunque la dissipazione del calore potrebbe risultare problematica. Gli estensimetri scelti, in seguito a queste considerazioni, sono della ditta EMEME e il loro codice è N2A-06-S125R-350.

Per la scelta del collante si è fatta un'analisi sulle condizioni ambientali in cui verrà effettuata la prova e sul costo delle varie tipologie di adesivi. Considerando che le prove si sarebbero svolte in laboratorio a temperatura ambiente, in ambiente non sporco e che il periodo di prova sarebbe durato qualche mese, si è scelto di utilizzare un cianoacrilato, in particolare l'Attak. In fase di incollaggio ci si è aiutati con un foglietto di teflon da interporre tra estensimetro e dito in fase di pressione. Il teflon, infatti, è uno dei pochi materiali che i cianoacrilati non incollano.

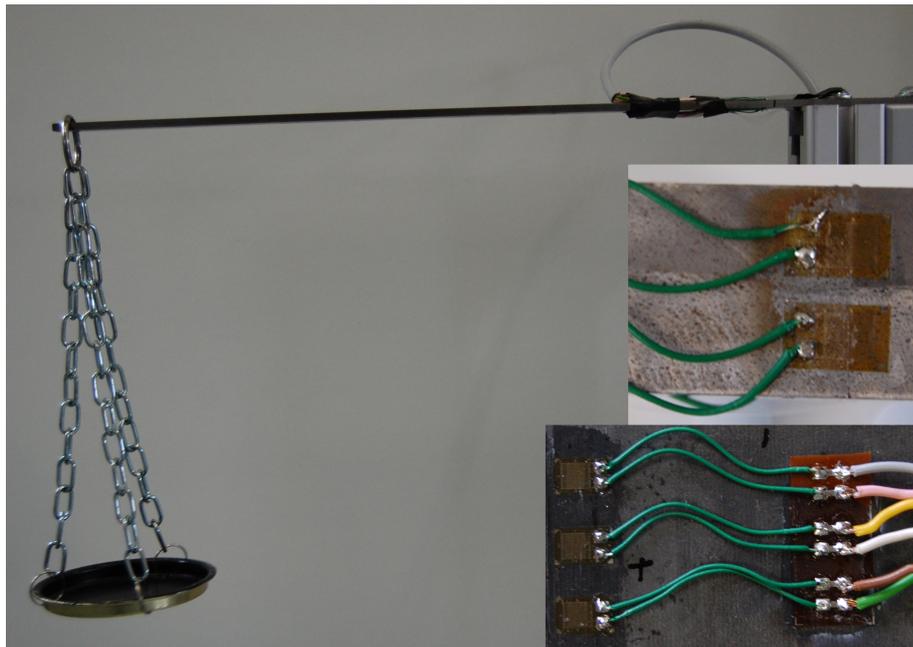


Figura 3.1: Struttura con sbarra incastrata. Nella foto in basso a sinistra sono presenti gli estensimetri che costituiscono il ponte fisso mentre nella foto sopra ci sono due dei quattro estensimetri incollati sulla sbarra



## Capitolo 4

# Circuito di Condizionamento

Il circuito di condizionamento è una parte fondamentale di una catena di misura. Ad esso sono legati i parametri come risoluzione, accuratezza, reiezione al rumore e robustezza dell'intero sistema di acquisizione. È perciò fondamentale progettarlo in maniera adeguata per ottenere una stima delle tensioni presenti sulla superficie della sbarra il più possibile accurata.

### Analisi iniziale

La prima fase da affrontare è l'analisi della situazione che ci troviamo ad affrontare. Il segnale che dobbiamo condizionare è di tipo differenziale infatti andiamo a prelevare la tensione presente sulla diagonale del ponte di Wheatstone. Questo implica il bisogno di un amplificatore differenziale al primo stadio, la cui uscita sia in single ended. Il segnale è inoltre di ampiezza molto piccola, dell'ordine dei  $\mu\text{V}$ . È perciò richiesto al circuito una notevole amplificazione, dell'ordine delle migliaia di volte. Questo fatto non permette di trascurare il rumore, infatti tutto il rumore presente a monte del blocco di amplificazione viene amplificato oltre a quello internamente generato dai singoli integrati. È perciò necessario scegliere componenti a basso livello di rumore interno.

### 4.1 Amplificatore Differenziale

Il segnale prelevato dalla diagonale del ponte di Wheatstone è di tipo differenziale. È necessario utilizzare, nel primo stadio di amplificazione, un amplificatore operativo del tipo per strumentazione. Un amplificatore di questo tipo ha il vantaggio di presentare un'elevata ed uguale impedenza d'ingresso su entrambi i canali. Inoltre permette elevati guadagni con una bassa distorsione. Inoltre il componente deve essere a basso rumore interno e con un alto CMRR.<sup>1</sup> Si è

---

<sup>1</sup> Si ricorda che CMRR sta per common-mode rejection ratio dove in dB vale  $CMRR_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c}$  dove  $A_d$  è l'amplificazione di modo differenziale e  $A_c$  è quella di modo comune.

deciso di utilizzare l'AD623 della Analog Devices. Questo integrato è un amplificatore differenziale in grado di amplificare fino a 1001 volte e tale valore è fissato attraverso solo una resistenza esterna. Vale infatti

$$V_o = \left(1 + \frac{100k\Omega}{R_g}\right) V_d \quad (4.1)$$

cove  $V_d$  è la tensione differenziale,  $V_o$  è la tensione di uscita e  $R_g$  è la resistenza che regola il guadagno. Il datasheet del componente consiglia resistenze con una tolleranza inferiore o al massimo del 1% per ottenere un'amplificazione stabile. La scelta del valore della resistenza però è influenzato anche dalle caratteristiche del segnale di ingresso e dell'alimentazione. Infatti il datasheet presenta la tab 4.1 che mette in funzione il valore massimo di amplificazione con il valore di tensione comune, di tensione differenziale del segnale di ingresso e la tensione di alimentazione.

$V_{CM}$	$V_{DIFF}$	REF Pin	Supply Voltages	Max Gain	$R_g$ al 1%
0 V	$\pm 10$ mV	2.5 V	+5 V	118	866 $\Omega$
0 V	$\pm 100$ mV	2.5 V	+5 V	11.8	9.31 k $\Omega$
0 V	$\pm 10$ mV	0 V	$\pm 5V$	490	205 $\Omega$
0 V	$\pm 100$ mV	0 V	$\pm 5V$	49	2.1 k $\Omega$
0 V	$\pm 1$ V	0 V	$\pm 5V$	4.9	26.1 k $\Omega$
2.5 V	$\pm 10$ mV	2.5 V	+5 V	242	422 $\Omega$
2.5 V	$\pm 100$ mV	2.5 V	+5 V	24.2	4.32 k $\Omega$
2.5 V	$\pm 1$ V	2.5 V	+5 V	2.42	71.5 k $\Omega$
1.5 V	$\pm 10$ mV	1.5 V	+3 V	142	715 $\Omega$
1.5 V	$\pm 100$ mV	1.5 V	+3 V	14.2	7.68 k $\Omega$
0 V	$\pm 10$ mV	1.5 V	+3 V	118	866 $\Omega$
0 V	$\pm 100$ mV	1.5 V	+3 V	11.8	9.31 k $\Omega$

Tabella 4.1: Valutazione  $R_g$  in funzione delle tensioni di modo comune e differenziale e di altri parametri del circuito

Si è scelto di alimentare l'amplificatore con una tensione duale di  $\pm 5$  V per ottenere una buona dinamica dell'uscita e non rischiare che il segnale vada in clipping sulle alimentazioni. Questa scelta ci porta a una conseguenza importante. Il segnale differenziale di ingresso deve essere con una tensione di modo comune pari a 0V. Per ottenere questa condizione siamo obbligati ad alimentare il ponte di Wheatstone con una tensione anch'essa duale e simmetrica. Per comodità andiamo ad alimentare il ponte con una tensione pari a  $\pm 5$  V poiché abbiamo già a disposizione questa tensione nel circuito. Altra diretta conseguenza dell'alimentazione duale a  $\pm 5$  V è che la tensione su pin REF deve essere pari a zero. Il pin REF serve essenzialmente ad azzerare la tensione di uscita

quando la tensione differenziale di ingresso è nulla. È una sorta di offset. Nella realizzazione pratica si è potuto notare che il collegamento diretto di questo pin alla massa del circuito non comportava una tensione di uscita nulla. Per questo si è deciso di inserire sul pin REF un partitore di tensione realizzato con una resistenza da  $150\Omega$  e un trimmer da  $100k\Omega$ , con la prima collegata a massa e il secondo collegato a  $-5\text{ V}$ . In questo modo si è riusciti a creare una piccola tensione da applicare al pin REF tale da annullare  $V_o$  con gli ingressi in cortocircuito. In base alle considerazioni fatte e in accordo con la terza riga della tabella, infatti la tensione differenziale nel nostro caso è inferiore a  $\pm 10\text{ mV}$ , abbiamo scelto un valore di  $R_g$  pari a  $400\Omega$  che ci permette di avere un'amplificazione di primo stadio pari a 251.

Nell'esperienza si è voluto mettere in evidenza la differenza tra un sistema di acquisizione a ponte intero, più performante con una risoluzione e un'accuratezza migliore, con un sistema a quarto di ponte. Si è perciò creato un sistema di misura con quattro estensimetri incollati sull'elemento sensibile e tre incollati su una piastra ad elevato spessore tale per cui la deformazione sia pressochè nulla. Quest'ultimi estensimetri hanno il compito di realizzare i tre rami fissi della configurazione a quarto di ponte. Con l'utilizzo di un doppio deviatore si sono collegati gli estensimetri in modo che a deviatore diseccitato sui terminali comuni dello stesso si avesse la configurazione a ponte intero mentre eccitando la bobina del deviatore, sui terminali comuni del deviatore, si avesse la configurazione a quarto di ponte. In fig. 4.2 è presente lo schema elettrico dell'intero circuito compreso il primo stadio di amplificazione.

Per compensare il comportamento dello schema a quarto di ponte rispetto lo schema a ponte intero è stato inserito in parallelo all'estensimetro comune, ma solo nella configurazione a quarto di ponte una resistenza fissa dal valore di  $120k\Omega$  con in serie un trimmer da  $50k\Omega$ . La resistenza inserita in parallelo ha valore molto maggiore rispetto la resistenza dell'estensimetro tale da permettere il bilanciamento del ponte ma da risultare ininfluenza nella fase di misurazione. Si è inserito il ramo in parallelo all'estensimetro comune alle due configurazioni poichè, tra i quattro del quarto di ponte, era quello che presentava la resistenza maggiore, perciò facilmente riducibile attraverso un ramo in parallelo.

Per comandare il deviatore è utilizzato un bjt npn dove la base, attraverso una resistenza da un  $1k\Omega$ , è collegata al NI-DAQ 6008 sul pin P0.0, il collettore a massa e l'emettitore alla bobina del deviatore. In parallelo alla bobina è inserito un diodo di free wheeling per evitare di danneggiare il bjt in fase di apertura dello stesso.

## 4.2 Filtro antirumore

Come visto in fase di analisi iniziale, un sistema d'acquisizione di un segnale estensimetrico può soffrire la presenza di rumore. Per ridurre questo problema è necessario utilizzare componenti a basso rumore interno ma può essere utile

inserire un filtro di tipo passa basso nella catena di acquisizione. Si è scelto di utilizzare un filtro passa basso attivo di tipo Salley-Key. Lo schema di tale filtro è riportato in fig. 4.2 insieme al resto del circuito mentre in fig. 4.1 è riportato il diagramma di Bode della sua funzione di trasferimento, in modulo e fase. Il filtro oltre ad andare ad agire sul rumore va a modificare anche la risposta dinamica del sistema infatti, tramite la nota relazione che lega la banda passante del sistema con il tempo di salita, riducendo la banda del sistema va ad aumentare il tempo di salita perciò quello che otterremo sarà un sistema più lento nel tempo <sup>2</sup>.

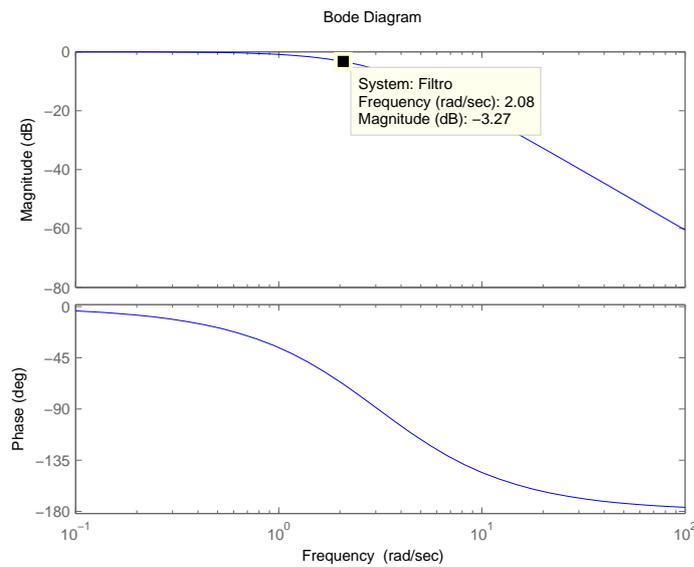


Figura 4.1: Diagramma di bode, del modulo e fase, della funzione di trasferimento del filtro.

Abbiamo perciò due aspetti uno in contrasto con l'altro. Si vorrebbe infatti una banda molto piccola per ridurre il più possibile il rumore nel sistema ed un tempo di salita ridotto per avere un sistema pronto e veloce. In questa esperienza l'informazione sta nella parte continua del segnale poichè l'obiettivo è conoscere la tensione presente sulla superficie della barra con un carico costante applicato perciò il filtro deve permettere alla componente continua di passare indisturbata, cosa sempre vera in un filtro passa basso accoppiato in dc. Perciò la scelta della banda passante del sistema, in questo caso, è strettamente legata al tempo di salita che si vuole ottenere dal sistema. In questa applicazione non si è voluto

<sup>2</sup> Si ricorda che l'equazione che lega tempo di salita con banda passante è

$$t_s * B_3 = K, \quad (4.2)$$

dove K è una costante che vale circa 0,35.

avere un sistema veloce ma si è prediletto soprattutto limitare il rumore. Per questo si è scelta una piccola banda passante, capace di limitare anche i disturbi a 50Hz. In fig. 4.1 è riportato un punto con ampiezza rispetto al valore di centro banda minore di 3dB. L'ascissa di tale punto, ovvero la pulsazione, corrisponde alla larghezza di banda. Dal grafico si può leggere che la pulsazione di tale punto è di circa 2rad/s che corrisponde a una larghezza di banda di 0.3Hz. La banda passante del sistema è un fattore da tenerne conto nel caso in cui si volesse utilizzare la scheda di acquisizione per altri scopi. I valori di resistenze e condensatori sono stati scelti opportunamente per evitare fenomeni di risonanza non desiderati. È reso possibile, attraverso un doppio deviatore, attivare o disattivare il filtro. Anche in questo caso il doppio deviatore è comandato attraverso un bjt npn, la cui base, attraverso una resistenza da 1 k $\Omega$ , è collegata al pin P0.1 del NI-DAQ 6008.

### 4.3 Adattamento di scala

La scheda di acquisizione è completata con una serie di amplificatori operazionali il cui compito è quello di implementare l'adattamento di scala verso l'ADC, ovvero di amplificare/ridurre il segnale e sommare un offset tale per cui l'output range del circuito di condizionamento sia simile all'input range dell'ADC. Questa parte è implementata attraverso un amplificatore operazionale in configurazione invertente. Al morsetto invertente sono collegati sia il deviatore, che attiva il filtro, attraverso un opportuno trimmer per regolare l'amplificazione ed un altro amplificatore operazionale in configurazione di inseguitore, il quale attraverso un trimmer impartisce la tensione di offset.

L'input range dell'adc è di  $\pm 10$  V. È perciò necessario che l'operazionale di uscita sia in grado di generare una tensione simile all'input range dell'adc. Nella scelta dell'integrato è stato preso in considerazione anche il fatto che erano necessario tre amplificatori operazionali. Per questo si è scelto di utilizzare LF347, il quale contiene 4 AO e ha la possibilità di essere alimentato con una tensione duale di  $\pm 18$  V. Non essendo rail to rail, è necessario alimentarlo con una tensione di circa 0,7V maggiore di quella necessaria in uscita. Dunque è stato scelto di alimentarlo con una tensione duale pari a  $\pm 12$  V poichè rispetta le specifiche richieste per il buon funzionamento ed inoltre perchè è un valore comune negli alimentatori fissi. È inoltre facilmente ottenibile con delle batterie, fattore interessante se si decidesse di fare un sistema portatile.

Il circuito di alimentazione è completo per il funzionamento. Presenta però quattro diversi valori di tensione, le quali tipicamente risultano poco comode infatti con un comune generatore si è in grado solo di ottenere una tensione o al più una tensione duale. Si è perciò deciso di ottenere le due tensioni più basse, i  $\pm 5$  V, con due opportuni integrati. Gli integrati scelti sono il 7805, per la tensione positiva, e il 7905, per quella negativa. Questi integrati hanno anche il vantaggio, collegati ad opportuni condensatori, di generare una tensione per-

fettamente stabile e questo è fondamentale visto che la stima delle deformazioni sulla superficie della barra, come indicato dalle eq. 6.1 e 6.2 nel materiale è direttamente proporzionale alla tensione di alimentazione del ponte.

## 4.4 Pcb

L'intero circuito elettrico è riportato in fig. 4.2. Nelle fig. 4.3 sono invece riportate le immagini del circuito stampato<sup>3</sup>. È importante realizzare una buona pcb poichè essa riduce la sensibilità del circuito ai disturbi elettromagnetici e migliora le connessioni tra i componenti.

## 4.5 Adc

Il cuore di ogni sistema di acquisizione è l'adc. In questa esperienza è stato utilizzato il DAQ NI-6008USB. Questa scheda della National Instruments è un sistema di acquisizione e condizionamento di segnali molto versatile e a basso costo. In particolare sono disponibili

- 8 canali di ingresso analogici (AI);
- 2 canali di uscita analogici (AO);
- 12 canali digitali di ingresso/uscita (DIO);
- 1 contatore a 32 bit;

La massima frequenza di campionamento a cui può lavorare il dispositivo è di 10kS/s, valore il quale non è molto elevato pensando che alcuni adc arrivano fino ad alcuni gigasample al secondo. Nonostante questo il grande vantaggio di utilizzare questi dispositivi è la possibilità di impostarne la configurazione e quindi di gestire l'acquisizione o la generazione dati tramite un computer grazie al software LabVIEW. In fig. 4.4 è riportata l'immagine della scheda.

Gli ingressi analogici possono essere configurati in modo da effettuare sia misure differenziali che riferite a massa. In ogni caso la massima tensione applicabile al singolo canale rispetto massa del dispositivo è di  $\pm 10$  V, che porta ad una tensione massima misurabile, in modalità differenziale, pari a  $\pm 20$  V.

Il convertitore analogico-digitale interno è del tipo ad approssimazioni successive. Se la misura è effettuata in modalità differenziale la parola digitale in uscita è a 12 bit, mentre per misure riferite a massa la codifica è a 11bit.

La scheda DAQ NI-6008 mette a disposizione 12 linee digitali con logica TTL che possono essere separatamente configurate sia come ingressi sia come uscite. Sono presenti inoltre tre terminali di alimentazione GND, 2.5V e 5V dove il pin

---

<sup>3</sup>Si ricorda che la sigla PCB sta per printed circuit board.

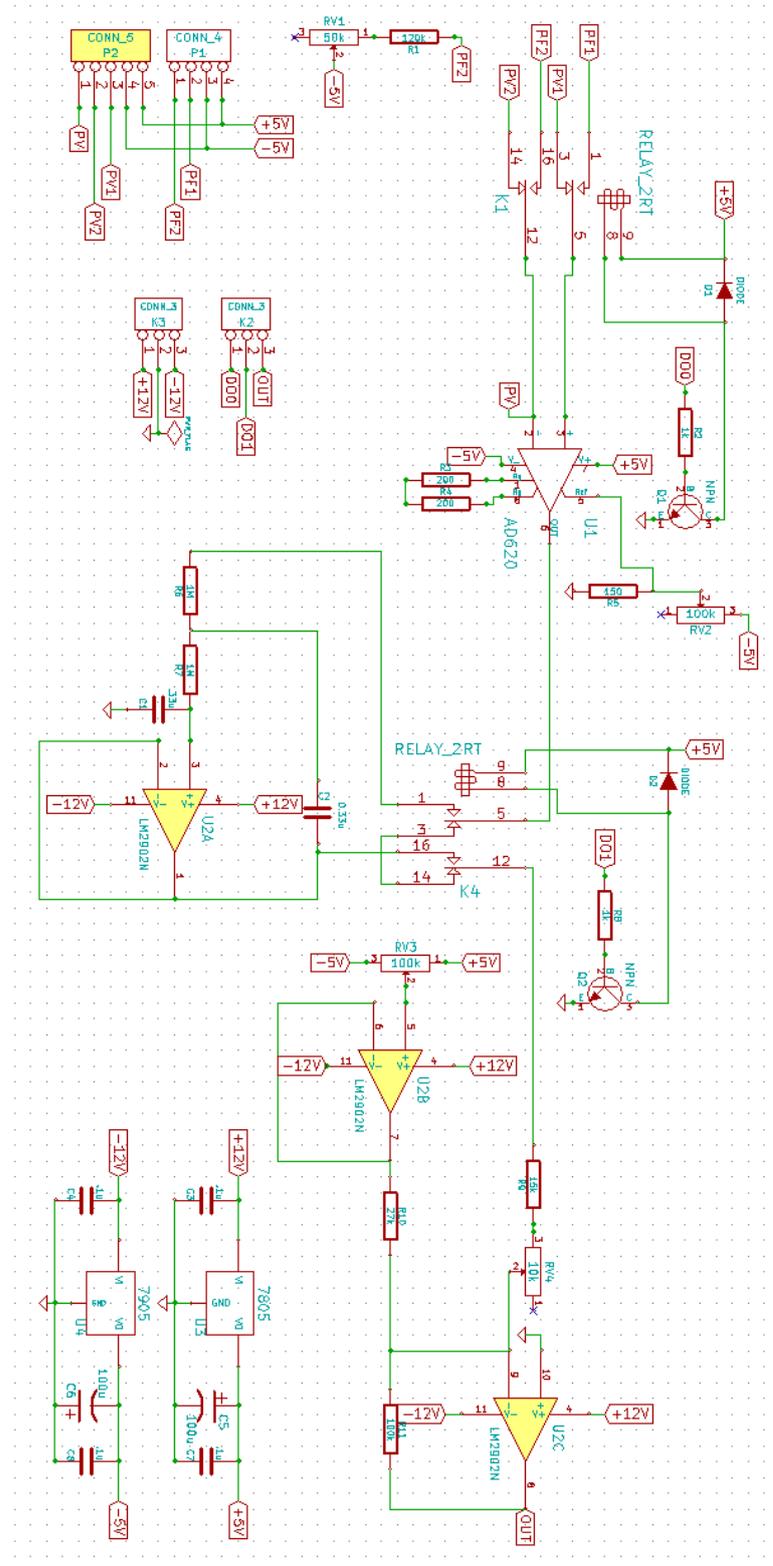


Figura 4.2: Schema elettrico completo della scheda. L'etichette PF rappresentano i collegamenti alla diagonale del ponte fisso. L'etichette con PV1 e PV2 rappresentano i collegamenti con le diagonali del ponte intero mentre PV è il terminale non connesso all'alimentazione dell'estensimetro comune ai due ponti.

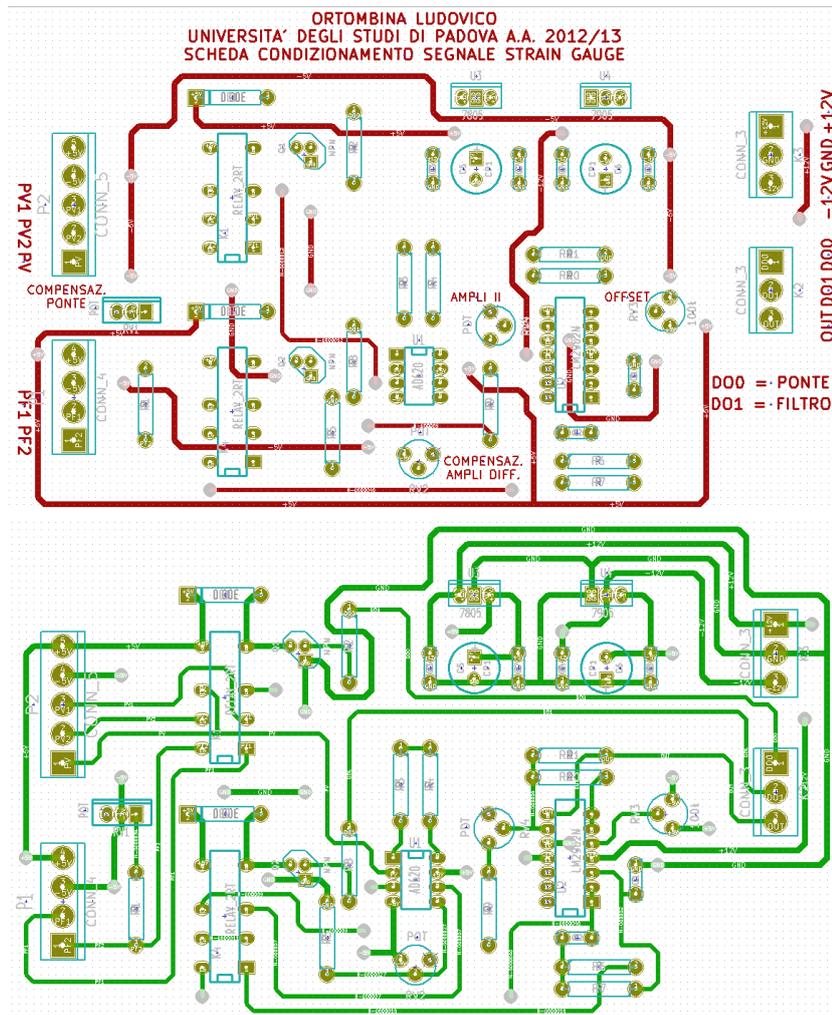


Figura 4.3: In alto è presente il lato superiore della pcb, sotto è presente il lato inferiore della pcb



Figura 4.4: Vista frontale DAQ NI-6008USB

---

2.5V può venire utilizzato come tensione di riferimento mentre il pin 5V lo si può usare anche per alimentare piccoli carichi (corrente massima erogabile 200mA).

Nella nostra applicazione usiamo solo in parte le potenzialità di questa scheda di acquisizione infatti andremo a campionare a 10S/s, utilizzeremo solo un ingresso analogico, ovvero il segnale condizionato dalla scheda, e solo due uscite di digitali che andranno a comandare i due doppi deviatori.



## Capitolo 5

# Programma LabVIEW

Il programma che analizza i dati e imposta le caratteristiche della scheda DAQ NI-6008 è creato in ambiente LabVIEW. È composto da tre schede le quali si rivolgono a due figure separate. La prima e la seconda scheda sono rivolte alla persona che effettua la prova e che analizza i dati. Infatti la prima scheda è quella che permette l'inserimento dei dati relativi alla barra come il modulo elastico del materiale o il coefficiente  $G$  degli estensimetri utilizzati. La seconda scheda invece visualizza i dati raccolti e permette di comandare tramite appositi pulsanti i due doppi deviatori. La terza scheda è invece rivolta al tecnico di laboratorio o al progettista dell'intero sistema di condizionamento. In questa scheda infatti sono presenti i campi caratteristici della scheda come la resistenza del primo stadio di amplificazione o la tensione di alimentazione del ponte. Questi sono parametri caratteristici della scheda che l'utilizzatore non deve modificare pena l'invalidazione delle misure ottenute.

### 5.1 Impostazione barra

La prima scheda che si trova nell'applicativo è intitolata: "Impostazioni barra". Questa scheda permette di inserire le informazioni relative alla barra utilizzata e alle caratteristiche degli estensimetri impiegati. In figura 5.1 è riportata la scheda compilata con dei possibili valori corrispondenti a quelli corretti per l'esperienza illustrata. Sono richiesti il modulo elastico del materiale con cui è fatta la barra, le dimensioni della sezione della barra, la distanza tra il punto di applicazione del carico e la posizione degli estensimetri e come ultimo valore il gauge factor degli estensimetri utilizzati. Si vuol precisare che la distanza tra il punto di applicazione della forza e il punto di incollaggio dell'estensimetro è misurata tra i riferimenti ortogonali all'asse della barra posti sull'estensimetro e il punto di applicazione del carico.



Figura 5.1: Scheda di impostazione valori relativi alla barra e agli estensimetri impiegati

## 5.2 Analisi

La seconda scheda presente nell'applicativo permette l'analisi dei dati raccolti. In fig. 5.2 è riportata la scheda di analisi nella quale i dati rappresentati sono stati ottenuti attraverso un potenziometro collegato tra 0V e 5V. Questa scheda si compone di tre zone. Quella a sinistra, nella quale sono presenti i pulsanti e il selettore del numero di bit, quella centrale dove sono presenti due grafici e quella a destra dove sono presenti tre indicatori numerici.

I pulsanti presenti nella zona a destra permettono all'operatore di scegliere se utilizzare la configurazione a ponte intero, che è quella normalmente attivata poichè permette prestazioni migliori e su questa la scheda è tarata, o a quarto di ponte e se attivare o meno il filtro passa basso. Il pulsante reset compie l'operazione di tara ovvero azzerare la misura di peso che si sta compiendo. Questo è l'equivalente di togliere alla misura assoluta la tara ovvero il peso del piattello. Questa operazione va a coinvolgere solo l'indicatore che indica la massa applicata. L'ultimo selettore a disposizione dell'utente è chiamato N° bit e permette all'utilizzatore di decidere con quanti bit effettuare la misurazione. Il numero di bit selezionabile va da 1 a 11 bit, valore massimo per il DAQ-NI 6008USB.

La seconda zona presenta invece due grafici. In alto a destra in ognuno dei due è presente la relativa legenda. Essi riportano in ascissa il tempo e in ordinata la tensione misurata dagli estensimetri. Entrambi i grafici hanno diviso l'asse delle ascisse in 100 colonne e campionando a 10Hz, come avviene nell'esperienza, viene visualizzato il segnale prelevato dai sensori nell'intervallo  $[t-10s; t]$  dove  $t$  è l'istante attuale. Si è impostata la frequenza di campionamento a 10Hz per permettere di visualizzare i gradini che compie il segnale digitalizzato. Il grafico superiore ha valori di ordinata compresi tra 0 e 200Mpa. È stato scelto come valore massimo 200MPa poichè, come detto nella sez. 3.1, la tensione massima non è presente in corrispondenza degli estensimetri ma sull'incastro. Dunque,

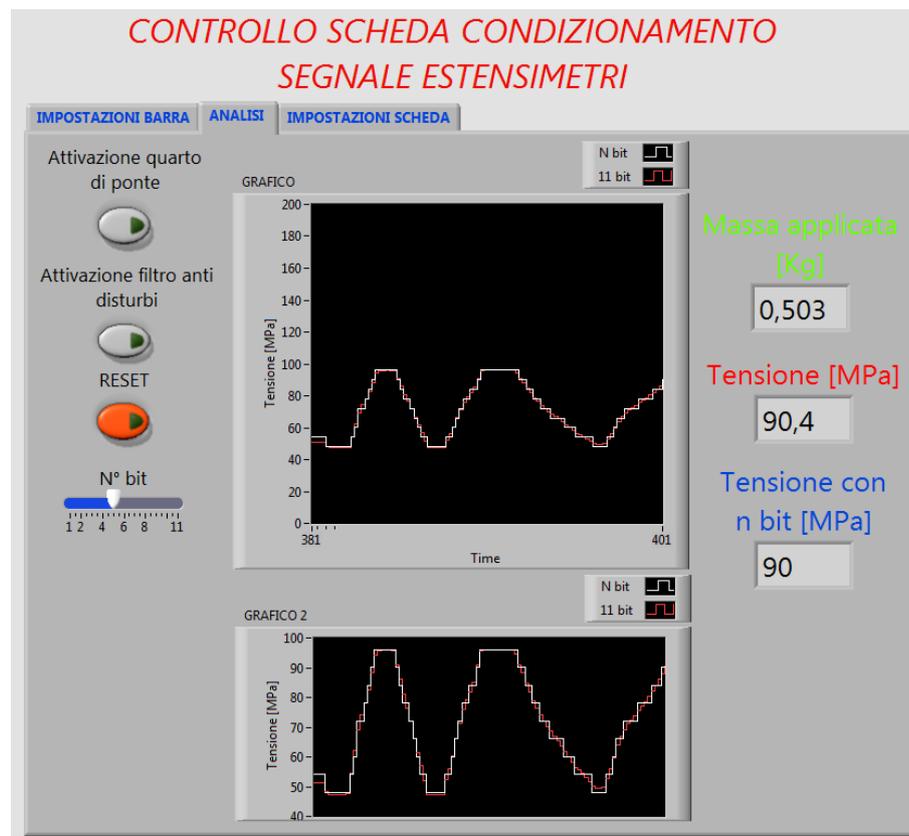


Figura 5.2: Scheda di analisi dati

onde evitare che la sbarra si deformi in maniera irreversibile, si considera come tensione massima in prossimità degli estensimetri un valore pari a 200MPa, in modo da considerare un aumento di 15MPa nell'incastro. È consigliabile, in ogni caso, non arrivare mai a tensioni misurate prossime a quelle di fondo scala. Il grafico inferiore ha in ordinata un intervallo più piccolo, limitato a 50Mpa. Questo permette di avere un ingrandimento della fascia più bassa di tensioni, poiché sarà la zona maggiormente interessata dalle nostre misure. In entrambi i grafici sono riportate due tracce. Una corrisponde al segnale quantizzato dall'adc con il massimo valore di bit mentre l'altra traccia corrisponde al segnale quantizzato a n bit anziché a 11bit <sup>1</sup>.

La terza zona composta da tre indicatori numerici ha un duplice scopo. Il primo è quello di permettere all'utilizzatore di capire se la misura che sta effettuando ha senso mentre il secondo è il risultato della misura. Si ricorda a proposito che l'obiettivo dell'esperienza è quello di misurare le tensioni presenti

<sup>1</sup> Il segnale in uscita dall'adc è uno solo e corrisponde al segnale quantizzato a 11bit. Il segnale a n bit è calcolato, attraverso un opportuno algoritmo, dal programma stesso a partire dal segnale presente sull'uscita dell'adc.

sulla superficie della barra. Il primo scopo è implementato dal primo indicatore infatti permette all'utilizzatore, il quale applica un carico noto, di verificare se il sistema è ben costruito e tarato. L'operatore infatti può confrontare il valore restituito dal programma con il valore noto del carico applicato e da ciò trae le opportune conclusioni. Gli altri due indicatori visualizzano, invece, il risultato della misura ovvero una tensione.

### 5.3 Impostazione scheda

La terza scheda che si trova nell'applicativo è intitolata: "Impostazioni scheda". In questa scheda vanno indicate le caratteristiche del sistema di acquisizione, necessarie per poter estrarre la corretta informazione dal segnale elettrico digitalizzato dall'adc. Se il sistema fosse acquistato questi valori sarebbero indicati sulla confezione oppure sarebbero memorizzati nell'applicativo di cui ogni scheda è corredata. In un laboratorio di ricerca, solitamente, spetta al tecnico ricavarli ed indicarli all'utilizzatore. In fig. 5.3 è riportata la scheda compilata con i valori corrispondenti alla scheda analizzata. Sono chiesti la tensione di alimentazione



The image shows a software interface window titled "CONTROLLO SCHEDA CONDIZIONAMENTO SEGNALE ESTENSIMETRI". At the top, there are three tabs: "IMPOSTAZIONI BARRA", "ANALISI", and "IMPOSTAZIONI SCHEDA", with the last one being active. Below the tabs, there are four input fields arranged in a 2x2 grid. Each field has a label and a numerical value. The values are: 10,1719 for "Tensione alimentazione ponte [V]", 399,94 for "Valore resistenza dello stadio differenziale [ohm]", 10 for "Tensione offset [V]", and 4 for "Amplificazione secondo stadio".

Label	Value
Tensione alimentazione ponte [V]	10,1719
Valore resistenza dello stadio differenziale [ohm]	399,94
Tensione offset [V]	10
Amplificazione secondo stadio	4

Figura 5.3: Scheda di inserimento valori relativi al circuito di acquisizione

del ponte e la tensione di offset del sistema di condizionamento, il valore della resistenza dell'amplificatore di primo stadio e l'amplificazione del secondo stadio.

## Capitolo 6

# Misure

Ogni sistema di misura ha come scopo principale quello di fornire stime del misurando, chiamate comunemente misure. In questo paragrafo sono presentate alcune misure effettuate con il sistema di acquisizione descritto nelle sezioni precedenti mettendo in evidenza alcune caratteristiche tipiche di un sistema digitale.

Per facilitare l'operatore nell'applicazione del carico si è pensato di utilizzare un piattello collegato alla sbarra attraverso tre catenelle. Ovviamente per compiere le misurazioni è necessario realizzare l'operazione di taratura mediante il pulsante di reset. La fig. 6.1 rappresenta la schermata che ci troveremo davanti dopo aver effettuato questa operazione.

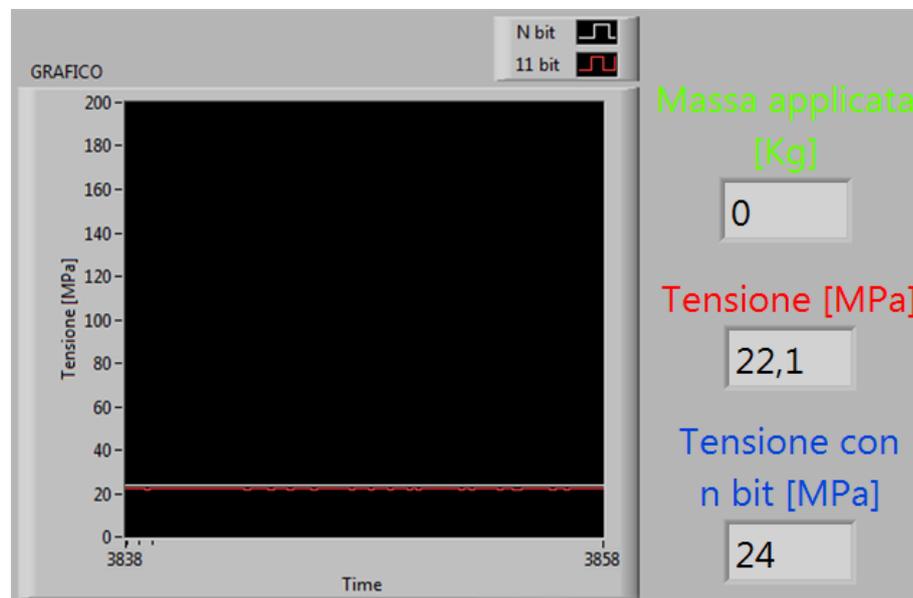


Figura 6.1: Schermata applicativo dopo operazione di tara

## 6.1 Valutazione tra quarto e ponte intero

Le prime misure riportate sono effettuate con un carico di 300g, in modalità ponte intero e a quarto di ponte. Tutte le misure realizzate sono state effettuate con un numero di bit pari a 11 e 5 bit. Si riporta di seguito le relazioni che legano la tensione di uscita con la variazione di resistenza nelle due diverse configurazioni:

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \frac{V_{cc}}{2}, \quad (6.1)$$

valida per il quarto di ponte mentre

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} V_{cc}, \quad (6.2)$$

valida per il ponte intero.

Si può facilmente capire che la sensibilità del sistema che utilizza un solo estensimetro è circa quattro volte inferiore, com'era facile aspettarsi, oltre ad avere un andamento non lineare. Queste due relazioni fanno capire il perché si sia deciso di utilizzare principalmente e di tarare la scheda sulla configurazione che utilizza quattro strain gauges. È da precisare che passando da una configurazione all'altra, attraverso il pin P0.0 del DAQ-NI6008 si commuta da una modalità fisica all'altra ma, la catena di amplificazione rimane inalterata. Ciò comporta l'invariabilità dell'amplificazione del circuito. Dunque l'ulteriore amplificazione richiesta dalla configurazione a quarto di ponte per ottenere la medesima escursione in tensione, a parità di sollecitazione, ottenuta con il ponte intero è generata dall'applicativo software. Questo fattore ha come immediata conseguenza la diminuzione della risoluzione del sistema di un fattore quattro. In fig. 6.2 sono riportate due misure effettuate nelle diverse configurazioni. Come

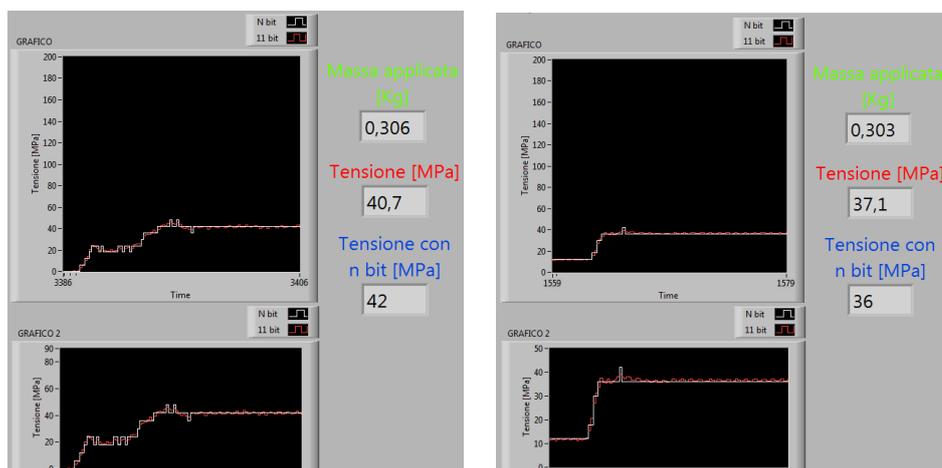


Figura 6.2: Misure effettuate con quarto di ponte e ponte intero

si può notare entrambe le misure hanno due risultati compatibili infatti la differenza tra l'una e l'altra è di soli 3 grammi. La grande differenza, che non si può notare in figura, è che le stime realizzate con il primo sistema avevano una bassa precisione, oltre che più bassa risoluzione, infatti l'indicazione sullo schermo variava su un grande intervallo che di estremi, approssimativamente, aveva 250 e 350 grammi rispettivamente. È da notare che il valore centrale dell'intervallo era proprio il valore atteso. Questa degradazione di misura si potrà quantificare nell'incertezza di tipo A se si realizzano più misure. Nella seconda misura invece questi problemi erano limitati infatti le stime avevano una dispersione attorno al valore vero decisamente minore infatti l'intervallo di variazione era limitato a  $\pm 7$  grammi intorno al valore centrale.

L'andamento iniziale della curva non è indicativa poichè dipende soprattutto da come il carico è stato applicato, fattore che non interessa in questa particolare valutazione.

La differenza di alcuni MPa nelle misure di tensione effettuate nelle due configurazioni è dovuto principalmente a un offset presente nella configurazione a quarto di ponte. Questo offset è dovuto essenzialmente al fatto che il sistema è tarato per ottenere il massimo delle prestazioni dal ponte intero. È un offset presente in tutte le misure effettuate con il quarto di ponte perciò facilmente correggibile in fase di analisi dati. Tutte le successive misure verranno eseguite utilizzando tutti e quattro gli estensimetri inseriti nel circuito di misura.

## 6.2 Valutazione effetto filtro

In questa sezione si analizza come il filtro passa basso influenzi una misura, sia dal punto di vista del rumore che dal tempo di salita. Il primo aspetto che viene riportato è il comportamento del sistema, con o senza filtro inserito, nei confronti del rumore. La fig. 6.3 riporta la misura d'interesse. La figura è un ingrandimento del segnale proveniente dall'uscita dell'adc, dove in corrispondenza del puntino blu è stato attivato il filtro. Infatti da tale puntino in poi si può notare che l'ampiezza picco-picco del segnale quantizzato cala e si limita a una variazione di un solo bit rispetto a prima dove l'ampiezza del rumore coinvolgeva cinque livelli di quantizzazione. Di seguito è riportata la formula che lega l'ampiezza del rumore e il numero di bit persi dal sistema

$$B_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{V_{r,pp}}{Q} \right), \quad (6.3)$$

dove  $B_1$  corrisponde al numero di bit persi,  $V_{r,pp}$  all'ampiezza picco-picco del rumore e  $Q$  è il quanto definito come  $Q = \frac{R}{2^B}$ . Dall'eq. 6.3 si possono calcolare il numero di bit persi nei due casi e si ottiene che nel caso senza filtro i bit non utilizzati sono 2.32 mentre nel caso con filtro attivo abbiamo la perdita di un solo bit. Questo fatto si ripercuote direttamente sulla risoluzione di misura

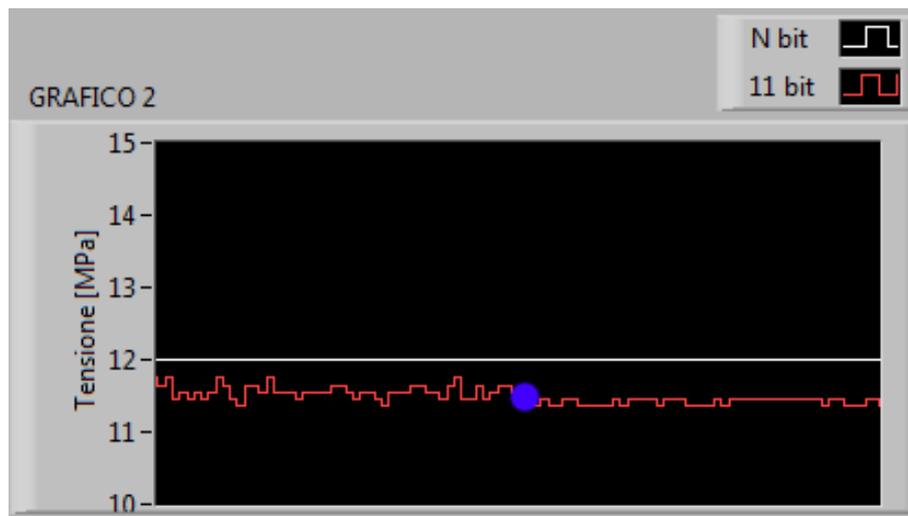


Figura 6.3: Azione filtro contro il rumore

migliorandola e sul range dinamico aumentandolo infatti i due sono legati dall'equazione  $DR \simeq 6.02B_e$  dove  $B_e$  sono i bit effettivi e si calcolano sottraendo dal numero totale di bit, nel nostro caso undici, il numero di bit persi.

Altro effetto comportato dall'inserimento del filtro è l'aumento del tempo di salita del segnale e la diminuzione delle oscillazioni presenti sulla rilevazione. Questo è ben visibile nelle fig. 6.4. Le successive misure sono state ottenute applicando al sistema un carico con un andamento il più simile possibile a un gradino ideale. Per cercare di realizzare un andamento a gradino è stato preso il sistema scarico, senza nessuna massa applicata, caricato sul piattello 300g e successivamente lasciato cadere sulla barra da un'altezza di 1cm. Queste operazioni simulano con buona approssimazione l'applicazione di un carico con andamento a gradino.

La prima figura, effettuata senza il filtro inserito nella catena di acquisizione, presenta un tempo di salita molto basso ma un'elevata oscillazione che solo dopo 50s diviene impercettibile ovvero limitata nella banda di errore dovuto all'errore di quantizzazione dell'adc. In figura il tempo di salita apparirebbe uguale a zero ma questo, banalmente, non è né vero né realizzabile. Nel caso in oggetto questo è dovuto al fatto che la frequenza di campionamento è di soli 10Hz perciò tutta la dinamica compresa tra un istante di campionamento e il successivo, che corrisponde a 0.1s, è trascurata. Il campionamento a una bassa velocità si capisce anche dal fatto che i gradini sono di ampiezza diversa e questo è sintomo di velocità di acquisizione insufficiente. Il risultato ottenuto è in accordo con quanto aspettato perché il sistema ha una grande larghezza di banda, limitata solo da effetti parassiti e dal circuito di track and hold del DAQ-NI 6008USB. Il sistema grazie alla sua alta velocità ci riporta fedelmente, istante per istante, la tensione presente sulla superficie della barra. Questo elemento è un fattore positivo in

un'applicazione dove sono richiesti bassi tempi di risposta. Un esempio può essere il sistema dotato di attuatore controllato in modo tale da ridurre al massimo le oscillazioni. In un sistema di quel tipo l'inserimento di un filtro con le caratteristiche di quello utilizzato in questo caso sarebbe deleterio se non addirittura controproducente. L'inserimento del filtro risulta invece come un fattore negativo nel caso in cui l'obiettivo della misurazione è il valore del carico infatti devo aspettare alcuni secondi per avere un risultato stabile. In questo caso i secondi da aspettare sono qualche decina. La seconda figura è completamente diversa

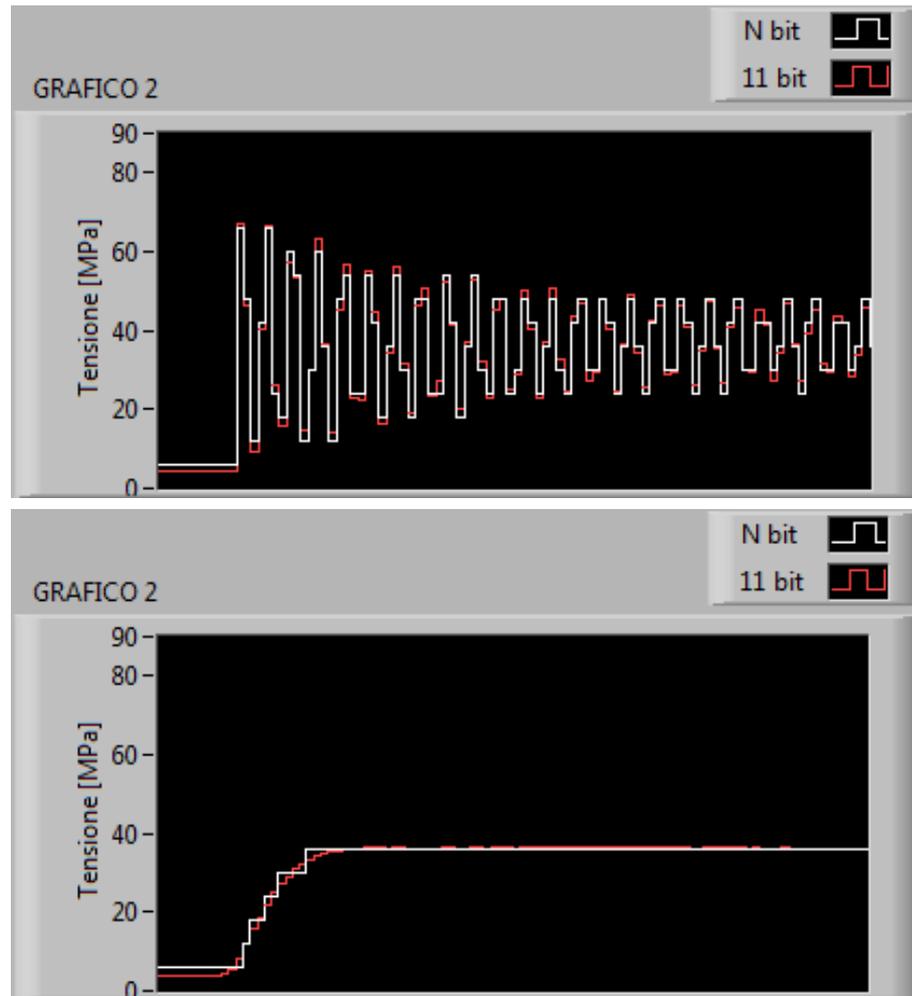


Figura 6.4: Misure effettuate con un carico applicato a gradino. Nella figura superiore non è attivo il filtro mentre in quella inferiore è attivo

dalla prima e apparentemente potrebbe far pensare che non sia stata ottenuta con l'applicazione dello stesso carico. Invece rispetto alla prima è semplicemente

stato inserito, nella catena di acquisizione, il filtro passa basso. La cosa che colpisce immediatamente è l'assenza di oscillazioni, l'aumento notevole del tempo di salita e la diminuzione notevole del tempo che impiega il segnale a entrare nella fascia di ampiezza  $Q$  intorno al valore di uscita. L'assenza di oscillazioni in uscita è dovuta principalmente all'azione simil-integrativa operata dal filtro infatti la transcaratteristica del filtro impiegato è molto simile a quella di un circuito integratore. La principale differenza consiste nella pendenza del tratto obliquo che è di 40 dB/dec anziché 20 dB/dec. L'oscillazione della barra rispetto alla posizione di equilibrio è del tipo ad andamento sinusoidale esponenzialmente smorzato. Perciò l'integrale della sola parte oscillante intorno alla posizione stabile è nullo. Il filtro, operando una operazione simile a quella integrale, annulla l'oscillazione alla sua uscita rendendola costante in breve tempo.

Il tempo di salita è notevolmente cresciuto ma questo era di facile previsione visto che la banda passante del filtro utilizzato è di soli 0.3Hz. Una misura di questo tipo è maggiormente indicata in un sistema il cui obiettivo è la misura del carico applicato infatti è necessario aspettare poco più del sistema di salita per ottenere una stima del misurando stabile.

### 6.3 Valutazione numero di bit

L'ultimo aspetto che vogliamo analizzare di questo sistema di misura è l'influenza del numero di bit. Il numero di bit è un parametro di grande importanza nei sistemi di acquisizione dati infatti da esso dipende la risoluzione.

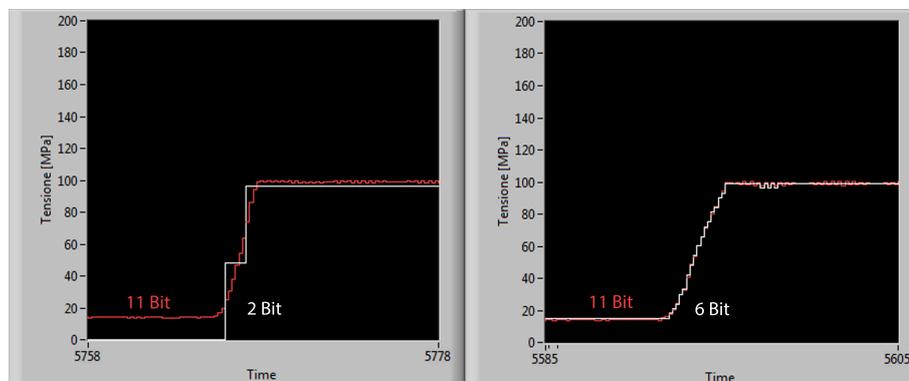


Figura 6.5: Andamento al variare del numero di bit

In fig. 6.5 sono riportate due tracce ottenute variando il numero di bit. L'entità del carico in queste misure passa da 300g a 900g per ottenere una maggiore escursione della grandezza d'uscita.

Guardando la traccia che si riferisce ad un'acquisizione con soli 2 bit si vede che i gradini sono ad ampiezza costante e non come nella sez. 6.2 dove i gradini erano ad ampiezza variabile. Questo è indice di un basso numero

di bit. Si può anche vedere che la risoluzione del sistema è molto scarsa infatti l'intero range d'ingresso è suddiviso in soli quattro possibili livelli/codici di uscita (tre di questi sono presenti in figura). La situazione migliora nel caso in cui si hanno a disposizione 6 bit. Infatti ora i livelli di quantizzazione passano da 4 a 64. In figura non è visibile molta differenza tra la curva ottenuta con 6 bit e quella ottenuta con il massimo ovvero con 11 bit. Questo è imputabile alla bassa frequenza di campionamento che è limitata a soli 10Hz. Si capisce che è inopportuna poichè il segnale rappresentato corrispondente a una quantizzazione a 6 bit ha alcuni gradini di ampiezza diversa, sintomo appunto di bassa frequenza. La qualità della misura non è aumentata quanto voluto infatti abbiamo fatto crescere il numero di livelli di quantizzazione però ci siamo imbattuti in un altro difetto del sistema che limita, anche fortemente, la bontà della nostra misura. Questo elemento porta ad una conclusione: in fase progettuale di un sistema di acquisizione è fondamentale scegliere se si vuole ottenere un sistema real-time, ovvero molto veloce, e/o risoluto. Tipicamente le due caratteristiche vanno in contrasto poichè per ottenere una stima di un misurando a tanti bit occorre del tempo e di conseguenza il sistema è tipicamente più lento di un sistema a pochi bit.

L'ultima misura effettuata, e che non riguarda la valutazione del numero di bit, è stata effettuata con un carico di 1800g. L'obiettivo era di sollecitare il sistema verso il suo fondo scala e di calcolare l'errore di misura. La fig. 6.6 riporta la rilevazione effettuata. La stima, come si può vedere, è buona infatti

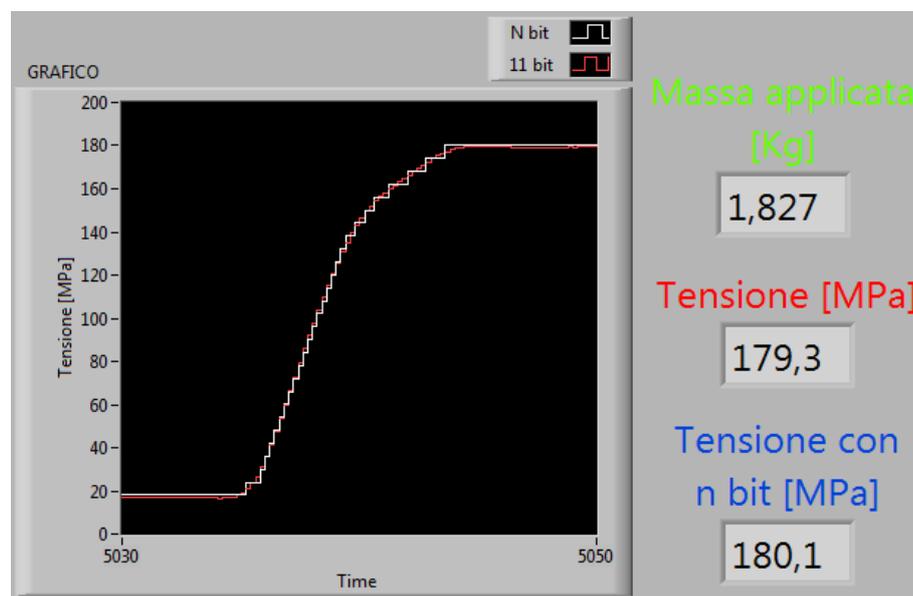


Figura 6.6: Misura effettuata a fondo scala

presenta un errore di solo 1.5% rispetto il valore atteso. Lo scopo della misura era verificare se il sistema era in grado di ottenere buone stime su tutti i livelli

del range di ingresso disponibili. La prova si può considerare andata a buon fine infatti l'errore commesso con 300g, considerato un valore di inizio scala, è di solo l'1% mentre l'errore a fondo scala è dell'1.5%.

Per quel che riguarda il valore percentuale dell'errore è da considerarsi accettabile infatti nella catena di misura sono presenti componenti nonché parametri conosciuti con incertezze ben maggiori come le resistenze e i condensatori che presentano una tolleranza del 10%, il valore del modulo elastico e l'amplificazione del secondo stadio.

## Capitolo 7

# Conclusione

L'esperienza si può definire conclusa con successo. Essa ha riportato valori coerenti con quelli aspettati e con errori modesti. Inoltre la fase di misure conclusiva è da ritenersi soddisfacente infatti, oltre a validare il lavoro di progettazione fatto mette in risalto alcuni aspetti importanti, soprattutto nella sez. 6.2.

Come detto nell'introduzione dell'esperienza, quest'elaborato può essere considerato come un punto di partenza per altri progetti. Progetti che possono essere altri lavori di tesi ma anche esperienze da proporre agli studenti durante i corsi di studio. In questo modo si può venire incontro alle richieste di molti studenti i quali si lamentano che gli argomenti visti in classe non vedono mai una realizzazione pratica. In particolare si potrebbe pensare ad un'esperienza articolata su più turni di laboratorio, dove viene fornita a ogni gruppo, composto non al più di tre persone per motivi organizzativi e pratici, una dispensa che spieghi cosa sono gli estensimetri, cosa servono e le caratteristiche. La dispensa potrebbe essere la prima parte di quest'elaborato, magari tagliata delle parti di non interesse diretto come può essere la parte dell'incollaggio se agli studenti viene fornita la barra con gli estensimetri già applicati. L'obiettivo dell'esperienza, considerando di rivolgersi a studenti di un corso di misure elettroniche, potrebbe essere quello di realizzare il circuito di condizionamento e poi di acquisire le misure sull'elaboratore. Sarebbe interessante lasciare campo aperto agli studenti ovvero di dare loro la possibilità di progettare, scegliere i componenti da un catalogo e poi fornirglieli in modo che possano testare le loro capacità e valutare la bontà delle loro scelte. Il lasciar scegliere loro i componenti è fattibile poiché molti sono, tipicamente, disponibili in laboratorio come resistenze, capacità e dunque da comprare resterebbero solo pochi integrati. Bisogna, in ogni caso, far loro presente che un ingegnere deve sempre aver sott'occhio il fattore economico e non può fare scelte a prescindere da ciò. Una volta realizzato il sistema di acquisizione si può, attraverso un applicativo fornitogli o realizzato da loro, interfacciare il pc al sistema di acquisizione e analizzare i dati sull'elaboratore. L'esperienza può essere ampliata o ridotta a secondo delle sedute di laboratorio che si hanno a disposizione.

Un'esperienza di tesi interessante ma probabilmente complessa consiste nel realizzare una struttura dove incastrare la sbarra nella quale, però, l'incastro è sostituito da un apposito meccanismo in grado di ruotare tramite un motore. Al tesista spetta il compito di realizzare l'applicativo che controlla il motore. Tale programma avrà l'obiettivo di mantenere il più costante possibile la posizione dell'estremo della barra al variare dei carichi applicati dall'esterno andando a ruotare l'incastro. Questa tesi sarebbe un buon amalgamo tra i concetti di misure per l'elettronica e di controlli automatici.

# Bibliografia

- [1] M. Bertocco and A. Sona, *Introduzione alle misure elettroniche*. online: [www.lulu.com](http://www.lulu.com), 2nd ed., 2012.
- [2] R. C. Jaeger and T. N. Blalock, *Microelettronica*. McGraw-Hill, 3rd ed., 2009. ISBN 978-88-386-6504-2.
- [3] B. Ando', S. Baglio, and G. Lepiscopio, "Prototipazione rapida di sensori: tecnologie, materiali e applicazioni," *TuttoMisure*.
- [4] E. Bonussi, "Estensimetri ed estensimetria." documentazione online. <http://archimedes.ing.unibs.it/>.
- [5] M. Quaresimin and N. D. Rossi, "Introduzione all'estensimetria applicata alla misura di deformazioni e carichi." documentazione online.
- [6] S. Cova, "Estensimetri o strain gauge." documentazione online. <http://home.dei.polimi.it/>.



# Elenco delle tabelle

3.1	Valutazione sbarra di Fe360 . . . . .	27
3.2	Caratteristiche acciaio Fe360 . . . . .	28
4.1	Valutazione $R_g$ in funzione delle tensioni presenti . . . . .	32



# Elenco delle figure

1.1	Estensimetro meccanico . . . . .	7
1.2	Estensimetro acustico . . . . .	9
1.3	Estensimetro elettrico . . . . .	9
2.1	Ponte di Wheatstone in configurazione a mezzo ponte . . . . .	16
2.2	Grafico caratteristico di un estensimetro compensato . . . . .	17
2.3	Rosetta estensimetrica . . . . .	19
2.4	Vari modelli di estensimetri . . . . .	21
2.5	Fotoincisione . . . . .	21
2.6	Applicazioni estensimetri . . . . .	22
3.1	Struttura con estensimetri . . . . .	29
4.1	Diagramma di bode della funzione di trasferimento del filtro . . . . .	34
4.2	Schema elettrico . . . . .	37
4.3	PCB . . . . .	38
4.4	Vista frontale DAQ NI-6008USB . . . . .	38
5.1	Scheda di impostazione valori barra . . . . .	42
5.2	Scheda di analisi dati . . . . .	43
5.3	Scheda di inserimento valori relativi al circuito di acquisizione . . . . .	44
6.1	Schermata applicativo dopo operazione di tara . . . . .	45
6.2	Misure effettuate con quarto di ponte e ponte intero . . . . .	46
6.3	Azione filtro contro il rumore . . . . .	48
6.4	Misure effettuate con carico applicato a gradino, con e senza filtro . . . . .	49
6.5	Andamento al variare del numero di bit . . . . .	50
6.6	Misura effettuata a fondo scala . . . . .	51