

## **FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**Corso di laurea specialistica in Ingegneria Civile**

*DICAM*

Dipartimento di ingegneria  
civile, ambientale e dei materiali

Insegnamento di:

*MATERIALI INNOVATIVI E RIABILITAZIONE STRUTTURALE LS*

**“STRUTTURE AUTOADATTIVE”: PROVE SPERIMENTALI PER  
LA VALUTAZIONE DELLA CAPACITA' DI  
AUTOADATTAMENTO DI STRUTTURE IN SEGUITO A  
CEDIMENTI VINCOLARI**

Tesi di laurea di:  
**ANNA LISA VINCIGUERRA**

Relatore:  
Prof. Ing. **GIOVANNI PASCALE**

n°matricola: 0000364691

Correlatori:

Dr. Ing. **FILIPPO BASTIANINI**  
Prof. Ing. **FRANCESCO UBERTINI**  
**P.E. ROBERTO CARLI**



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	4
<b>1. MATERIALI “INTELLIGENTI”</b> .....	7
1.1 INTRODUZIONE .....	7
1.2 LEGHE A MEMORIA DI FORMA (SMA) .....	8
1.2.1 Proprietà e caratteristiche delle SMA .....	8
1.2.2 Comportamento meccanico dei materiali SMA .....	13
1.2.3 Effetto memoria di forma .....	21
1.2.4 Superelasticità o pseudoelasticità .....	27
1.2.5 Capacità di smorzamento .....	30
1.2.6 Comportamento termomeccanico .....	31
1.2.7 Metodi di caratterizzazione .....	34
1.2.8 Smart Materials .....	36
1.3 MATERIALI PIEZOELETRICI .....	37
1.3.1 Cenni storici e proprietà .....	37
1.3.2 Applicazione materiali piezoelettrici .....	43
1.4 MATERIALI MAGNETOSTRITTIVI .....	48
<b>2. MONITORAGGIO E STRUTTURE “INTELLIGENTI”</b> .....	54
2.1 INTRODUZIONE .....	54
2.2 MONITORAGGIO STRUTTURALE .....	55
2.3 “STRUTTURE INTELLIGENTI” .....	60
2.3.1 Definizione di “struttura intelligente” .....	60
2.3.2 Descrizione componenti che costituiscono una “struttura intelligente” .....	63
2.3.3 SHM: Applicazioni pratiche .....	68
2.4 STRUTTURE BIO-ISPIRATE .....	71
<b>3. ATTUATORI</b> .....	74
3.1 INTRODUZIONE .....	74
3.2 DEFINIZIONE DI ATTUATORE .....	74
3.3 CLASSIFICAZIONE PRINCIPALE .....	76
3.3.1 Tipologia di attuatori .....	76
3.3.2 Materiali utilizzati per la realizzazione degli attuatori .....	79

3.4 ATTUATORI A MEMORIA DI FORMA .....	82
3.5 ATTUATORE LINEARE .....	88
3.6 ATTUATORE PIEZOELETTRICO .....	90
3.7 ATTUATORI AD ELASTOMERI DIAELETTRICI .....	91
<b>4.1 SENSORI .....</b>	<b>94</b>
4.1 INTRODUZIONE .....	94
4.2 DEFINIZIONE DEI SENSORI.....	95
4.3 CLASSIFICAZIONE DEI SENSORI .....	96
4.4 SENSORI A CONTATTO MECCANICI .....	98
4.5 SENSORI A CONTATTO ELETTRICI.....	100
4.6 SENSORI SENZA CONTATTO(OTTICI) .....	102
4.7 SENSORI LASER INTERFEROMETRICI .....	105
4.8 SENSORI DI INCLINAZIONE (INCLINOMETRI).....	106
4.9 SENSORI DI DEFORMAZIONE.....	107
4.10 SENSORI A FIBRA OTTICA(FOS:Fiber Optic Sensors) .....	114
4.10.1 Tipologie di sensori a fibra ottica:.....	121
4.10.2 Sensori a reticolo di Bragg FBG (Fiber Bragg Grating).....	126
4.10.3 Sensori di Fabry Pérot .....	133
4.10.4 Sensori di Brillouin .....	135
4.11 SOFO .....	137
4.12 DIFFUSIONE RAYLEIGH .....	138
4.13 DIFFUSIONE RAMAN .....	139
4.14 MICROBENDING .....	140
4.15 SENSORI A FIBRA OTTICA DISTRIBUITI .....	141
4.16 SENSORI PIEZOELETTRICI .....	143
4.17 SMART BRICK .....	147
<b>5. PROGETTAZIONE DELLA PROVA .....</b>	<b>158</b>
5.1 INTRODUZIONE .....	158
5.2 I MATERIALI.....	158
5.2.1 Blocchi.....	158
5.2.2 Gomma Para .....	160

5.2.3 Piastre .....	167
5.2.4 Attuatori.....	171
5.3 MODELLAZIONE DELLA PROVA .....	174
5.3.1 Verifica a ribaltamento .....	183
<b>6.MESSA IN SICUREZZA DELLA PROVA .....</b>	<b>188</b>
6.1 INTRODUZIONE .....	188
6.2 ALLESTIMENTO DELLA PROVA .....	188
6.2.1 Realizzazione della struttura .....	190
6.2.2 Realizzazione della massa .....	192
6.3 MONTAGGIO DELLA STRUMENTAZIONE.....	192
6.4 ESECUZIONE DELLA PROVA .....	194
<b>7.REALIZZAZIONE DELLA PROVA.....</b>	<b>195</b>
7.1 FASI COSTRUTTIVE DELLA STRUTTURA .....	195
7.2 MONTAGGIO DELLA STRUMENTAZIONE PER IL MONITORAGGIO DURANTE LA PROVA.....	205
7.4 POSIZIONAMENTO DELL'ATTUATORE E DELLA MASSA SULLA PIASTRA SUPERIORE .....	211
7.4.1 Realizzazione del supporto per l'attuatore .....	211
7.4.2 Posizionamento del carrello e della massa .....	213
7.5 POSIZIONAMENTO DELLO SMART-BRICK.....	215
<b>8.ESECUZIONE DELLA PROVA E RISULTATI OTTENUTI .....</b>	<b>218</b>
8.1 ESECUZIONE DELLA PROVA.....	218
8.2CONFRONTO TRA ATTIVITA' SPERIMENTALE E MODELLAZIONE FATTA IN STRAUS7.....	220
8.3 CONCLUSIONI.....	231
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>232</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>235</b>

## INTRODUZIONE

Nella prima parte della tesi viene presentata una attività di ricerca, finalizzata alla definizione di :

- proprietà di “materiali intelligenti”;
- monitoraggio strutturale;
- proprietà e caratteristiche di sensori e attuatori che consentono il monitoraggio delle strutture esistenti;
- “strutture intelligenti”;

Tra i materiali disponibili negli ultimi anni, si è prestata particolare attenzione a quelli in grado di deformarsi per effetto di un campo applicato di tipo elettrico, magnetico, o di temperatura. Quelli su cui viene posta maggiore attenzione sono :

- leghe a memoria di forma: una classe di materiali metallici dalle inusuali proprietà meccaniche. Se scaldate, si contraggono e ritornano alla forma iniziale, sono cioè capaci di subire trasformazioni cristallografiche reversibili, in funzione dello stato tensionale e termico;
- materiali piezoelettrici: I polimeri elettroattivi sono particolari corpi complessi che sfruttano la caratteristica di subire grandi deformazioni e grandi spostamenti se sottoposti ad una differenza di potenziale.
- materiali magnetostrittivi: possono convertire l'energia magnetica in energia cinetica, o l'inverso ed sono utilizzati per costruire attuatori e sensori.

Sono molti gli studi effettuati ma ancora poche le applicazioni, soprattutto in campo civile, dati i costi molto alti, le elevate dimensioni necessarie per le applicazioni, un limitato recupero della deformazione impartita (inferiore all'8%), una temperatura di transizione relativamente invariabile, ecc.

Il “monitoraggio intelligente” può essere definito invece come un insieme di operazioni che permettono, con una modalità pianificata e non invasiva, di

valutare nel corso della vita di esercizio delle strutture i livelli di efficienza e di sicurezza previsti in progetto. Il monitoraggio strutturale rappresenta il più moderno ed indicato approccio per scongiurare i numerosi incidenti e disastri conseguenti:

- all'invecchiamento fisiologico dei manufatti;
- a eventi naturali (quali frane, sismi, fenomeni di subsidenza);
- a cattivi criteri di costruzione;

A lungo termine il monitoraggio strutturale, che ha bisogno di un sistema di misura preciso e solido (mediante l'uso di sensori), può diminuire la frequenza delle ispezioni visive. Questo viene realizzato mediante la disposizione sulla struttura di una rete di sensori e i dati di monitoraggio provenienti da questa possono essere letti ed elaborati in termini di gestione della struttura, perfezionando ed ottimizzando la qualità delle decisioni relative agli eventuali interventi.

I sensori e gli attuatori sono quindi, strumenti fondamentali per il controllo delle strutture. I primi sono dispositivi che trasformano una grandezza fisica che si vuole misurare in un segnale di natura diversa più facilmente misurabile e hanno il compito di percepire eventuali danni o malfunzionamenti dell'opera. I secondi, invece, sono meccanismi attraverso cui un agente agisce su un ambiente mettendo qualcosa in azione automaticamente. La tipologia varia a seconda della funzione e del grado di precisione richiesto nel controllo, come verrà illustrato nei capitoli successivi. Grazie ad attuatori e sensori si possono definire le “**strutture intelligenti**”, (smart structures,) che sono in grado di monitorare il loro stato nel tempo ed eventualmente reagire opportunamente in funzione delle sollecitazioni cui sono sottoposte. Le azioni esterne sulla struttura producono sforzi e deformazioni. Attraverso l'uso di sensori si possono monitorare le deformazioni, anche in maniera dinamica, le informazioni fornite da essi vengono inviate ad un elaboratore che in tempo reale calcola la risposta opportuna da fornire attraverso gli attuatori. La presenza degli attuatori e dei sensori però non deve modificare le

caratteristiche meccaniche della struttura e in particolare ridurre i carichi massimi.

Nella seconda parte della tesi viene effettuata una attività sperimentale che ha come fine quello di simulare il comportamento di una struttura “auto-adattiva” mediante l’utilizzo di attuatori e sensori. Una volta scelti i materiali si è modellata la struttura con un programma di calcolo in modo da avere una valutazione sperimentale di quanto si vuole realizzare. L’obiettivo è quello di stimare la capacità della struttura di auto-adattarsi in seguito ad un cedimento imposto.

La prova infatti consisterà nella:

1. imposizione di un cedimento alla base con un attuatore lineare comandato manualmente, in modo da avere una inclinazione di  $0.5^\circ$  della struttura;
2. recupero della deformazione con lo spostamento di una massa in sommità tramite un secondo attuatore, il cui movimento è comandato da un sensore posto in sommità.

# CAPITOLO1

## MATERIALI “INTELLIGENTI”

### 1.1 INTRODUZIONE

Tra i materiali multifunzionali disponibili negli ultimi anni, quelli in grado di deformarsi per effetto di un campo applicato di tipo elettrico, magnetico, o di temperatura, sono stati oggetto di un notevole interesse applicativo. I più comuni e attualmente utilizzati risultano essere i materiali piezoelettrici.

I loro analoghi magnetici, noti comunemente come magnetostrittivi, presentano caratteristiche per certi versi complementari ai primi e mostrano alcune proprietà fisiche, come un'elevata densità di energia disponibile e un tempo di vita praticamente infinito, che li rendono promettenti in diverse applicazioni tecnologiche. Per completare il quadro bisogna ricordare anche le leghe a memoria di forma, capaci di realizzare notevoli deformazioni da una transizione di fase Austenite- Martensite. Tuttavia, la loro risposta è legata alla temperatura e questo li rende molto lenti, limitandone drasticamente l'utilizzo ad applicazioni in pratica statiche. Altre leghe entrate sulla scena negli ultimi anni, a base NiMnGa, si propongono di superare tale limitazione. Esse forniscono enormi deformazioni, fino al 10% in lunghezza, in risposta a campi magnetici per la verità anch'essi abbastanza elevati. Purtroppo, a causa anche delle basse forze che queste leghe sono in grado di produrre e della degradazione delle prestazioni con la temperatura, il loro utilizzo è abbastanza limitato. Nel seguente capitolo,tra” i materiali intelligenti”,verrà posta l'attenzione su:

- Leghe a memoria di forma;
- Materiali piezoelettrici;
- Materiali magnetostrittivi;

## 1.2 LEGHE A MEMORIA DI FORMA (SMA)

### 1.2.1 Proprietà e caratteristiche delle SMA

Le leghe a memoria di forma (dall'inglese *Shape Memory Alloys*, SMA o LMF) fanno parte di una categoria di materiali metallici dalle inusuali e rare proprietà metalliche. Queste sono molto particolari perché possono essere dilatate, e se scaldate, si contraggono e ritornano alla forma iniziale, sono cioè capaci di subire trasformazioni cristallografiche reversibili, in funzione dello stato tensionale e termico (accoppiamento termo meccanico). Nel primo caso, questi materiali, una volta deformati plasticamente a una temperatura relativamente bassa, ritornano alla forma che avevano prima della trasformazione, a seguito dell'esposizione a un'elevata temperatura. Tale recupero avviene tramite il passaggio di fase tra una struttura più rigida ad alta temperatura (austenite) e una configurazione più flessibile a bassa energia e temperatura (martensite). Questa proprietà, unica nel suo genere, è sfruttata in moltissimi campi che spaziano da quello medico a quello meccanico fino a quello microelettrico. Tra gli svariati materiali caratterizzati da questa particolare proprietà, di notevole interesse sono quelli che mostrano un recupero completo della deformazione impressa, oppure un notevole sforzo sviluppato durante il ritorno alla forma originale: questi sono le leghe nickel-titanio (Ni-Ti) e quelle a base di rame (CuZnAl e CuAlNi). Oltre alla caratteristica di reversibilità termica della deformazione ("effetto a memoria di forma", SME), le SMA presentano anche altre caratteristiche, quali il comportamento superelastico ("superelasticità" o "pseudo elasticità") che ha moltiplicato le possibilità d'impiego, e la capacità di generare elevate forze in fase di recupero della forma ( si può pensare infatti alla forza esercitata dai fili quando si contraggono, arrivando addirittura a centinaia di volte il peso del materiale usato: uno spezzone di filo di diametro 0.23 mm, lungo una ventina di centimetri e pesante appena pochi grammi può sollevare di quasi 20 mm un peso di 1.25 Kg) . La prima osservazione documentata delle trasformazioni a

memoria di forma fu di Chang & Read nel 1932: essi notarono la reversibilità della trasformazione della lega Cadmio-Oro (Cd-Au) sulla base di osservazioni metallurgiche e di cambiamenti di resistività. Nel 1938 simili trasformazioni furono osservate anche nell'ottone (Cu-Zn) da Greinger e Mooradian. Nel 1962 l'effetto fu scoperto casualmente anche nella lega equiatomica Nichel-Titanio, per opera di Buehler presso il Naval Ordnance Laboratory (NOL), e fu da allora che iniziò la ricerca vera e propria con una produzione in notevoli quantità e la nascita di applicazioni pratiche mediante questa classe di materiali particolari. Oggigiorno le SMA più studiate sono quelle di Rame-Alluminio-Nickel (CuAlNi), Rame-Zinco-Alluminio (CuZnAl) e Ferro-Manganese-Silicio (FeMnSi), ma quelle che sono utilizzate maggiormente sono quelle di Nickel-Titanio, di cui in figura 1.1 sono riportate le proprietà.

Proprietà del NiTiNOL		
Density	6.45 gm/cm <sup>3</sup>	(0.23 lb/in <sup>3</sup> )
Thermal Conductivity	10 W/mK	(5.78 Btu/hr ft <sup>2</sup> F)
Specific Heat	322 j/kgK	(0.08 Btu/lb°F)
Latent Heat	24,200 J/kg	(10.4 Btu/lb)
Ultimate Tensile Strength	750-960 MPa	(110-140 ksi)
Elongation to Failure	15.5%	(15.5 %)
Yield Strength (Austenite)	560 MPa	(80 ksi)
Young's Modulus (Austenite)	75 GPa	(11 mpsi)
Yield Strength (Martensite)	100 MPa	(15 ksi)
Young's Modulus (Martensite)	28 GPa	(4 Mpsi)

Proprietà del NiTiNOL

Figura 1.1: Proprietà del NiTiNOL

Si utilizzano per la maggior parte delle applicazioni le leghe a base di Ni-Ti, (circa 90%) nonostante risultino più costose e di più difficile lavorazione; il loro uso è dovuto principalmente ai seguenti fattori:

- maggiore resistenza meccanica;
- migliore stabilità;

- migliore resistenza all'ambiente;
- disponibilita' in fili e lamine sottili;
- biocompatibilita';

In particolare l'ultima caratteristica ha avuto un ruolo fondamentale nel rendere possibile un' ampia gamma di applicazioni biomedicali. Sono riportate di seguito in figura 1.2[1] le principali caratteristiche di leghe che hanno un effetto di memoria di forma.

Lega	Composizione	Campo della temperatura di trasformazione °C	Isteresi di trasformazione (appross.) °C
Ag-Cd	44/49 at.% Cd	-190 to -50	15
Au-Cd	46.5/50 at.% Cd	30 to 100	15
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt.% Al 3/4.5 wt.% Ni	-140 to 100	35
Cu-Sn	approx. 15 at.% Sn	-120 to 30	
Cu-Zn	38.5/41.5 wt.% Zn	-180 to -10	10
Cu-Zn-X (X = Si, Sn, Al)	a few wt.% of X	-180 to 200	10
In-Ti	18/23 at.% Ti	60 to 100	4
Ni-Al	36/38 at.% Al	-180 to 100	10
Ni-Ti	49/51 at.% Ni	-50 to 110	30
Fe-Pt	approx. 25 at.% Pt	approx.-130	4
Mn-Cu	5/35 at.% Cu	-250 to 180	25
Fe-Mn-Si	32 wt.% Mn, 6 wt.% Si	-200 to 150	100

Figura1.2: Proprietà di leghe aventi un effetto di memoria di forma[2]

Un giorno nel 1959, mentre proseguiva i suoi studi sulla lega NiTi al variare delle percentuali dei due componenti per verificarne le proprietà, Buehler fece un'osservazione che fu alla base della scoperta di una interessante proprietà: le barrette di lega NiTi utilizzate per le prove sperimentali, se lasciate cadere, producevano suoni differenti a seconda della loro temperatura, il che era indicativo di differenti proprietà di smorzamento e, a livello microscopico, di differenti arrangiamenti atomici; inoltre, era possibile variare tale comportamento semplicemente riscaldando o raffreddando le barrette. Ma fu solo nel 1960, quando Buehler fu affiancato da Raymond Wiley per eseguire le prove di resistenza a fatica, che venne scoperto l'effetto di memoria di forma. Durante un meeting di Wiley con il management, al fine di mostrare i risultati

ottenuti circa la resistenza a fatica, uno dei direttori tecnici, David Muzzey, decise di valutare il comportamento di uno dei fili di NiTiNOL portati come provino, a successive flessioni e quindi a riscaldamento. Con grande stupore dei presenti, quando Muzzey riscaldò il filo deformato con la sua pipa, esso ritornò al suo stato indeformato.

Immediatamente si compresero le potenzialità di simili leghe e il loro studio è Proseguito, richiamando sempre più ricercatori e produttori tra le fila di coloro che si sono dedicati alla sperimentazione, alla modellazione del comportamento di tali materiali e all'investigazione di altre leghe. Le più interessanti e utili dal punto di vista applicativo, si sono rivelate quelle del gruppo Nickel-Titanio e qualche lega a base di Rame (Cu). Oggi le leghe a memoria di forma più studiate sono quelle di Rame-Alluminio-Nickel, Rame-Zinco-Alluminio e Ferro-Manganese-Silicio.

Proprietà	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Massima temperatura di recupero di forma	100 °C	120 °C	200 °C
Massima deformazione recuperabile	8 %	6%	5%
Isteresi	12-50 °C	10-25 °C	15-20 °C
Tensione di snervamento in fase austenitica	415 Mpa (41.5 Kg/mm <sup>2</sup> )	350 Mpa (35 Kg/mm <sup>2</sup> )	400 Mpa (40 Kg/mm <sup>2</sup> )
Tensione di snervamento in fase martensitica	70 Mpa (7 Kg/mm <sup>2</sup> )	80 Mpa (8 Kg/mm <sup>2</sup> )	130 Mpa (13 Kg/mm <sup>2</sup> )
Tensione a rottura	700 Mpa (70 Kg/mm <sup>2</sup> )	600 Mpa (60 Kg/mm <sup>2</sup> )	500-800 Mpa (50-80 Kg/mm <sup>2</sup> )
Densità (g/cm <sup>3</sup> )	6.5	7.6-8.0	7.2
Resistività (micro-ohm-cm)	80-90	8.5-9.7	11-13
Capacità termica (J/Kg °K)	837	400	373-574
Conducibilità termica (J/m*sec*°K)	18	120	30-43

Caratteristiche di alcune leghe a memoria di forma

Figura 1.3: Proprietà delle leghe Ni-Ti,Cu-Zu-Al,Cu-Al-Ni[1]

I parametri che caratterizzano le SMA e che devono essere considerati dal progettista sono:

- Fattore di accorciamento o di estensione: e' la percentuale di variazione delle lunghezza in riferimento alla fase di austenite(a caldo), rispetto a quella ottenibile accorciando o estendendo il materiale a freddo.
- Resistenza alla trazione.: è la massima forza applicabile senza provocare la rottura del materiale.
- Temperatura di memoria: è la temperatura alla quale inizia il ritorno alla forma originale(corrisponde all'inizio della fase di austenite).
- Temperatura di lavorabilità: è la temperatura alla quale la lega,estesa e manipolata,mantiene la sua forma senza ritirarsi,è minore di quella di transizione.
- Tempo di risposta: è misurato in secondi ed è l'intervallo di tempo necessario al materiale per riassumere la forma originaria,considerato da quando raggiunge la temperatura corrispondente alla fase di austenite.
- Tempo di caduta o tempo di off: anch'esso indicato in secondi,è il tempo impiegato dalla SMA a raffreddarsi,in modo da poter essere deformata di nuovo e mantenere la deformazione.
- Resistività elettrica: permette di stabilire la resistenza elettrica del pezzo di materiale considerato.

La notevole complessità del sistema metallurgico delle leghe S.M.A. ha costituito un freno alla loro diffusione nel settore industriale per molti anni. Dalla metà degli anni '80 e in particolare dal 1991 si è cominciata ad osservare una progressiva penetrazione di questi materiali in settori ad elevato valore aggiunto (aerospaziale,biomedicale) tradizionalmente più pronti ad accettare materiali innovativi, potendone assorbire più facilmente i costi relativamente alti.

Soprattutto negli ultimi anni la disponibilità di materiali con caratteristiche di qualità in costante miglioramento e costi di produzione sempre più ridotti ha reso possibile lo sviluppo di numerosi prodotti, determinando così le condizioni preliminari per la diffusione del materiale in settori tecnologici differenti; l'esistenza di sempre nuovi e numerosi sbocchi commerciali ha, a

sua volta, stimolato la ricerca, innescando un processo sinergico che rende il settore in forte evoluzione.

### 1.2.2 Comportamento meccanico dei materiali SMA

#### TRASFORMAZIONE MARTENSITICA

Le proprietà delle SMA derivano dalle trasformazioni martensitiche (transizione di fase solido-solido). Per comprendere meglio come avviene l'effetto memoria di forma, è bene conoscere la struttura cristallina delle leghe stesse. Queste, infatti, sono caratterizzate da due fasi cristalline ben distinte: austenite e martensite. La presenza di una fase o dell'altra dipende dallo sforzo sottoposto alla lega e dalla temperatura; la fase più stabile a bassa temperatura è detta *martensite*, quella stabile alle alte temperature è la *austenite* (Figura 1.4-1.5).

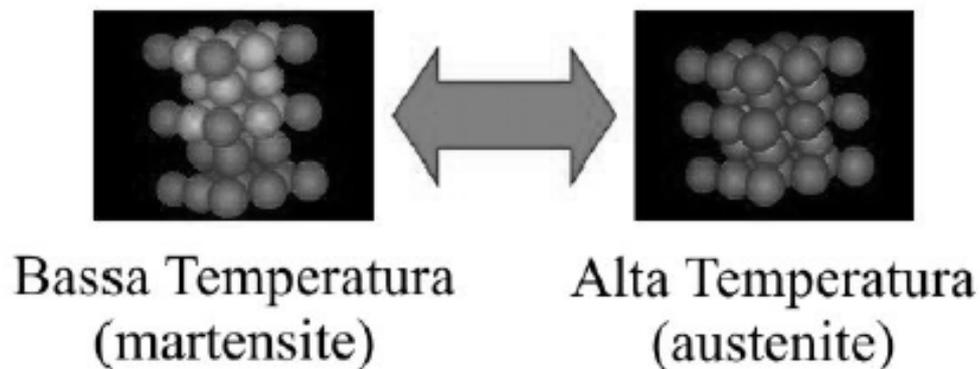


Figura 1.4: Passaggio di stato da martensite ad austenite

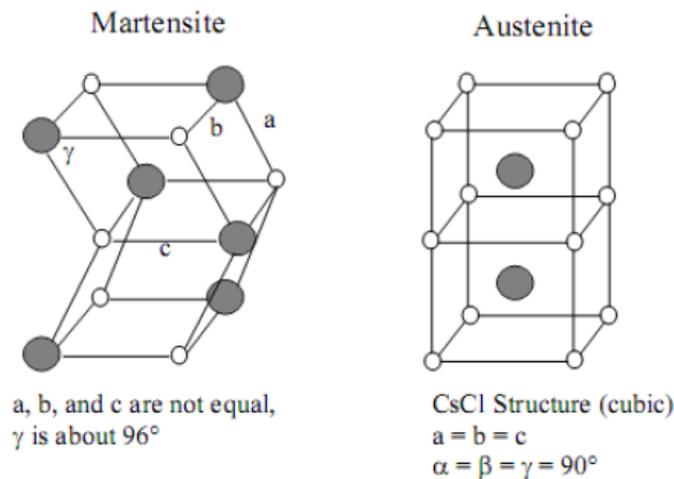


Figura 1.5: Struttura cristallina di austenite e martensite

La struttura cristallina delle due fasi è diversa: la fase austenitica è caratterizzata da una struttura cubica semplice, mentre quella martensitica mostra una più complessa struttura a minor simmetria. Quando il materiale è in fase martensitica è “morbido” e duttile, di conseguenza comodamente lavorabile, mentre quando è in fase austenitica è molto più duro e rigido. Una *trasformazione di fase* che si sviluppa da una fase austenitica a temperatura relativamente elevata a una fase a temperatura più bassa e coinvolge, con un movimento coordinato degli atomi, zone con ordini a lungo raggio, si dice *trasformazione martensitica*. Tale trasformazione è la causa del recupero di forma come risultato dell’esigenza del reticolo cristallino di “accomodarsi” allo stato di minima energia - quello martensitico appunto - per la temperatura e per lo stato di sforzo imposto. Essa non è di tipo diffusivo, ciò vuol dire che il moto degli atomi avviene in maniera cooperativa, indipendente dal tempo e con l’assenza di una variazione della composizione chimica; tale moto causa un’evidente deformazione reticolare. Metallograficamente la martensite mostra una struttura alternata di placchette “a lisca di pesce” appuntite le quali possiedono delle interfacce scorrevoli che possono essere deformate da piccoli cambi di temperatura e sforzo. A causa di ciò, e della scomparsa della

simmetria nel corso della modifica strutturale da austenite a martensite, si dice che la trasformazione è cristallograficamente reversibile e presenta una certa *isteresi*: si ha un comportamento diverso nella fase di riscaldamento e in quella di raffreddamento, in cui i percorsi non coincidono (Figura.1.6)[1] Generalmente l'isteresi viene definita come la differenza tra la temperatura alla quale il materiale è trasformato al 50% in austenite durante il riscaldamento e la temperatura alla quale il materiale è al 50% martensite durante il raffreddamento.

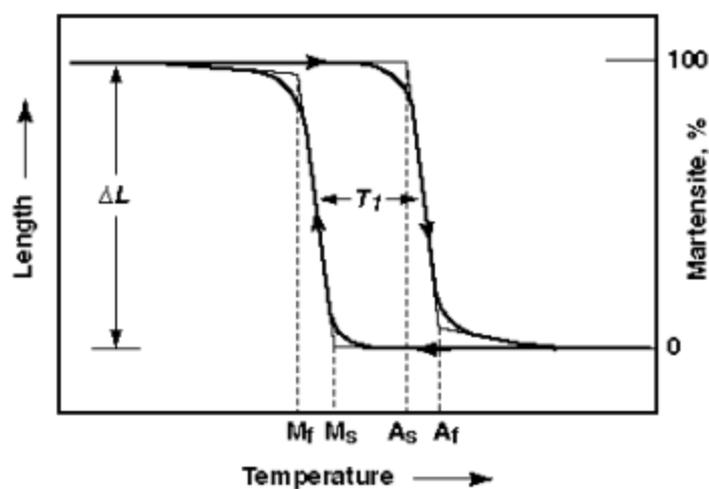


Figura1.6: Trasformazione tipica in funzione della temperatura di un campione sottoposto a carico costante durante un ciclo di raffreddamento e riscaldamento.[1]

Si ha diverso comportamento tra le fasi di riscaldamento e raffreddamento; i percorsi non coincidono. L'ampiezza dell'isteresi dipende soprattutto dal materiale: si va dai circa 400°C per la lega Fe-Ni, in cui è presente una variazione di volume del 4%, fino a 4° per la lega indio tallio con una variazione di volume del -0,004%; per le leghe NiTi la differenza sopra citata arriva anche a 20-30°C, cioè se viene progettata per trasformarsi completamente a temperatura ambiente, per tornare a martensite può dover scendere anche di qualche grado sotto lo zero. La trasformazione non decorre ad una precisa temperatura, ma entro un certo range di temperature che varia da

lega a lega; in realtà l'intervallo nel quale avviene è piuttosto limitato, però può venire esteso anche di parecchio dalle fasi iniziali e finali. La forza motrice del mutamento è da ricercare nella variazione di energia libera, la quale è nulla ad una precisa temperatura di equilibrio  $T_T$ : il passaggio dalla fase austenitica a quella martensitica (con raffreddamento) avviene solo sotto la  $T_T$  ed il processo inizia ad una temperatura di martensite start  $M_S$  (Figura.1.7-1.8). Lo stesso discorso vale nel riscaldamento: la trasformazione in austenite è presente solo sopra ad una certa temperatura, viene chiamata austenite start  $A_S$  ed arriva all'austenite finish  $A_F$ . La trasformazione martensitica, utile per l'effetto memoria di forma, non avviene solo per effetto di una variazione di temperatura, ma anche come conseguenza di uno sforzo applicato. Il 100% di martensite, si raggiungerà alla temperatura di martensite finish  $M_F$ , la quale non è intrinseca del materiale ma è dipendente dalla modalità di raffreddamento: se questo è di tipo continuativo si avrà una certa stabilizzazione termica della martensite, ossia continuando a raffreddare occorrerà una certa variazione di temperatura per far avanzare la trasformazione, abbassando così anche  $M_F$ . Affinché una lega presenti memoria di forma si avrà bisogno quindi, come già anticipato, di una metamorfosi di fase in natura.

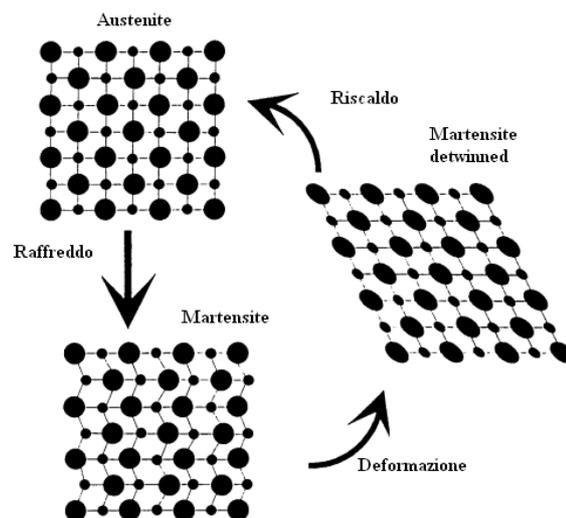


Figura1.7: Passaggio di stato[5]

In figura 1.8 si può notare la deformazione non vincolata del reticolo cristallino, la quale interessa solo delle rotazioni e traslazioni atomiche e nessuna rottura di legame. Si avrà la tendenza a passare dalla configurazione “a” a quella “d”. Nella realtà tale mutamento è negato, poiché la matrice di austenite circostante fa da vincolo alla deformazione stessa del reticolo, obbligandolo a mantenere la posizione originale del cristallo. La trasformazione martensitica introduce quindi uno stato di sforzo che porta a una deformazione locale, a livello della singola “riga molecolare” attuando due meccanismi: scorrimento (*slip*) e geminazione (*twinning*) come si può notare in figura 1.8:

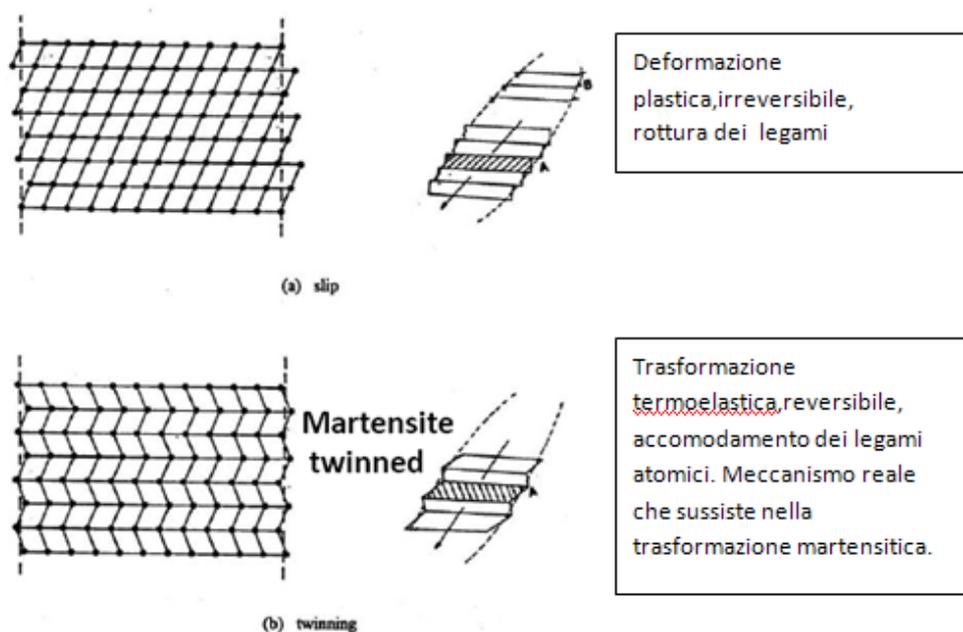


Figura 1.8: Scorrimento e geminazione

Con il meccanismo di slip si consegue una deformazione plastica a causa del moto delle dislocazioni che è quindi irreversibile, invece con la geminazione si vanno a formare delle placchette con un’orientazione cristallina diversa dalla matrice, si possiede una certa simmetria dei cristalli e, non avendo rottura dei legami atomici, ma solo “accomodamento”, la deformazione per twinning è

reversibile e appartiene al campo delle trasformazioni termoelastiche. Quest'ultima per definizione è il meccanismo per il quale una singola unità austenitica si deforma in martensitica e può essere descritto con una simmetria speculare della disposizione degli atomi attorno ad un particolare piano atomico chiamato twinning plane. Si pensi ora di applicare uno sforzo di taglio alla martensite twinned,(figura.1.9), il bordo dei geminati si metterà in moto producendo una variazione di forma notevole senza slittamento dei piani per mezzo di un meccanismo chiamato *detwinning*:

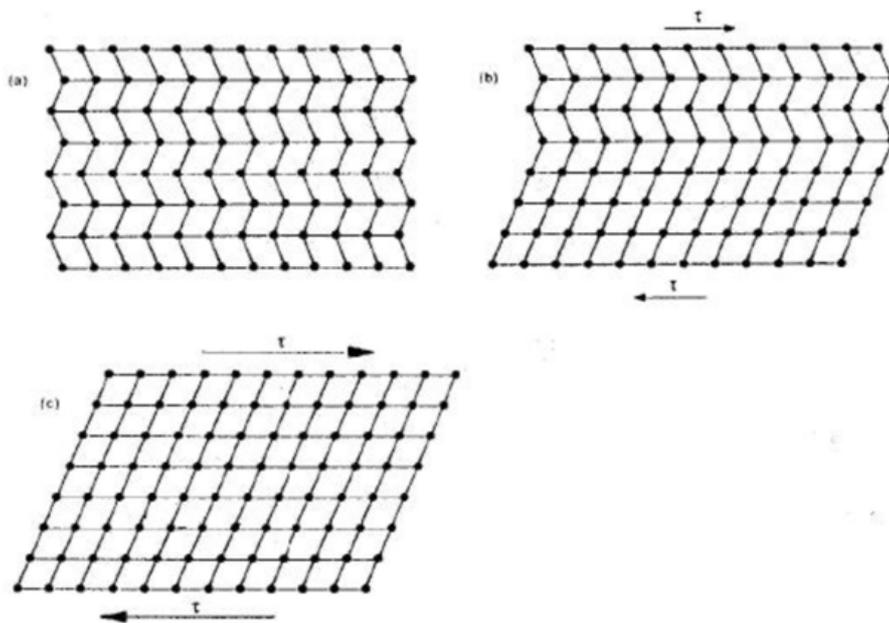


Figura1.9: Applicazione dello sforzo di taglio

Questa trasformazione può avvenire a livelli di carico bassi e a una temperatura inferiore della martensite finish  $M_F$ .

Riassunto delle transizioni di fase con le temperature esplicitate:

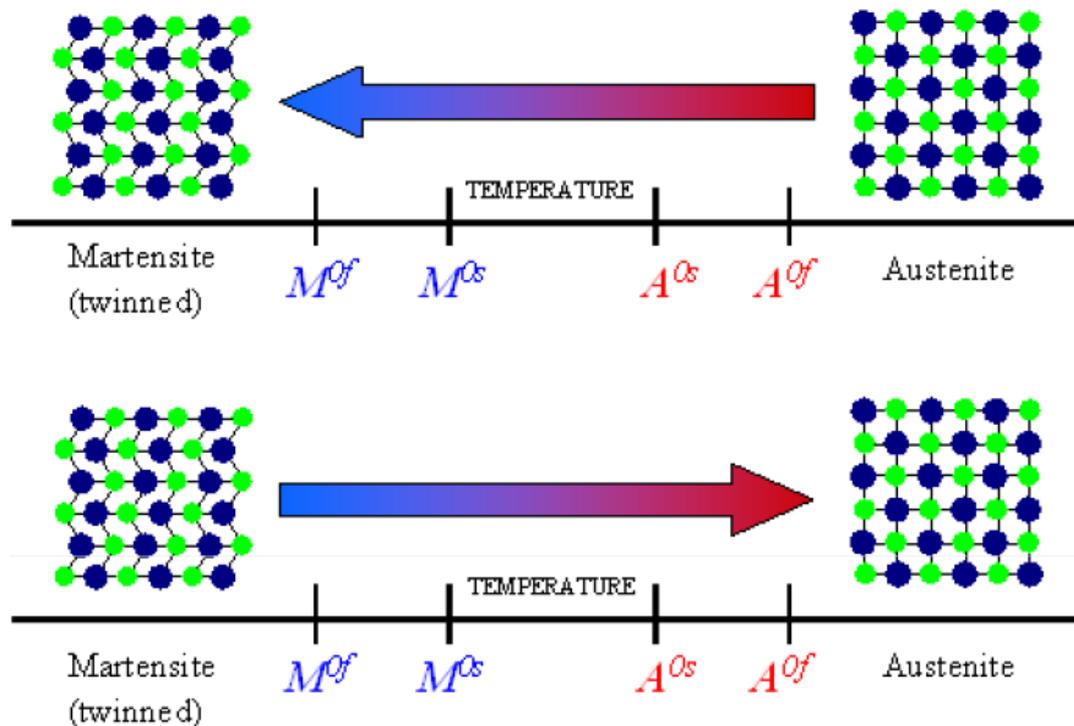


Figura 1.10: Transizioni di fase

Poiché nel corso di questo meccanismo i singoli atomi si sono spostati solo di poco dalle loro posizioni originali, quando essi, per effetto di un riscaldamento imposto, devono muoversi per ripristinare la struttura cristallina di partenza (austenite, fase presente *a elevata temperatura*) possono recuperare molto facilmente la loro configurazione iniziale, e promuovere quindi il recupero della forma macroscopica di partenza (ciò comporta anche il recupero della deformazione), che per sua natura invece è caratterizzata da una struttura cristallografica poco mobile (da cui si spiega il più alto modulo di Young del materiale e smorzamento).

La figura 1.10 si sofferma sugli effetti macroscopici, considerando delle barrette di materiale S.M.A. Se la lega S.M.A. all'atto dell'attivazione per riscaldamento non può ritornare alla forma originale (ad esempio perché limitata nella deformazione dalla presenza di vincoli), allora in essa insorge

una grande tensione di recupero; viceversa, se la lega non è in alcun modo limitata, non insorge alcuna tensione di recupero, e si parla di recupero libero.

Se si studia una curva tensione – deformazione (figura.1.11) per questo tipo di materiale, si nota che la martensite proveniente da una trasformazione austenite – martensite prima si deforma elasticamente, poi per detwinning in un campo pressoché plastico ed infine si ha la deformazione plastica per eccellenza, lo slip. Il grado di deformazione che si ottiene varia sia dal tipo di lega, come già detto, che dalla dimensione del grano iniziale; da sperimentazioni condotte si è stabilito che grani sferoidali permettono un miglior “effetto memoria” di grani appiattiti.

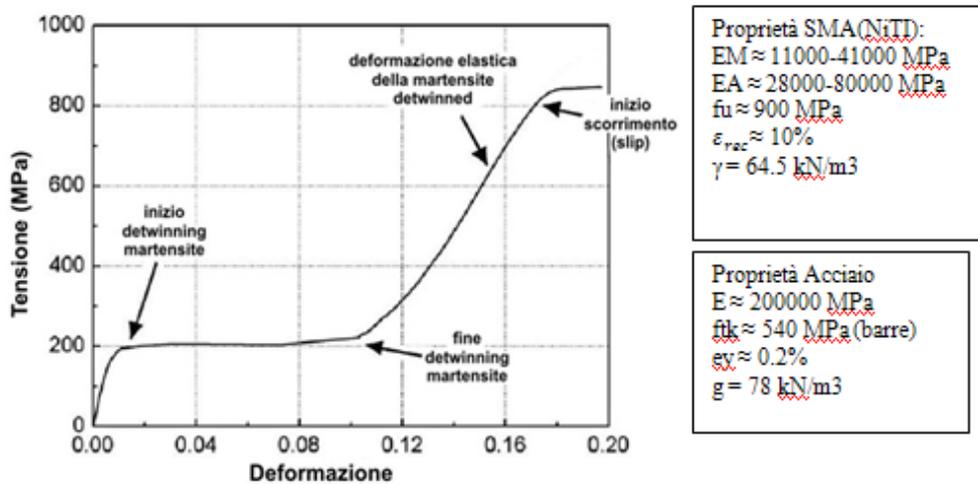


Figura 1.11: Curva tensione – deformazione

Tutti i vari tipi di configurazione martensitica che abbiamo visto in precedenza, ritornano alla stessa e ben definita fase di partenza (austenite) dopo un riscaldamento oltre  $A_F$ . La maggior parte dei metalli si deforma mediante le dislocazioni, la lega NiTi reagisce agli sforzi solamente cambiando l'orientazione della sua struttura cristallina per effetto del movimento tramite il twinning di due zone limitrofe. A causa di questo processo, si perviene ad una martensite stress-indotta alle temperature proprie della fase austenitica. Un

pezzo in NiTi quindi, si deformerà in questo modo fino a quando persisterà una componente dello sforzo lungo i piani di twinning. Oltre questo limite si otterrà una classica deformazione plastica per slip, quindi irrecuperabile e senza effetto di memoria. Supponendo che la deformazione venga bloccata in uno stadio intermedio, un generico pezzo di lega includerà molte zone con fasi diverse e se poi si procede ad un riscaldamento sopra  $A_F$ , si formerà una fase austenitica con un'orientazione identica a quella preesistente non trasformata.

### 1.2.3 Effetto memoria di forma

Quando una lega a memoria di forma si porta a bassa temperatura, mostra una configurazione martensitica con un basso limite di snervamento ed è facilmente deformabile, fornendo calore la stessa lega si trasforma in un'altra struttura cristallina molto più rigida chiamata austenite, ricordandosi quindi il suo stato iniziale. La capacità di una lega di deformarsi in una struttura programmata ad una certa temperatura, ricordando la sua forma primitiva, è data dall'*effetto memoria di forma*, shape memory effect (SME). In figura 1.12 viene riportato l'esempio di recupero della forma di un tubo in polymethacrylate.

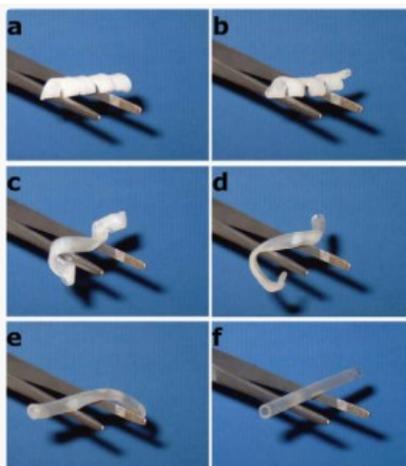
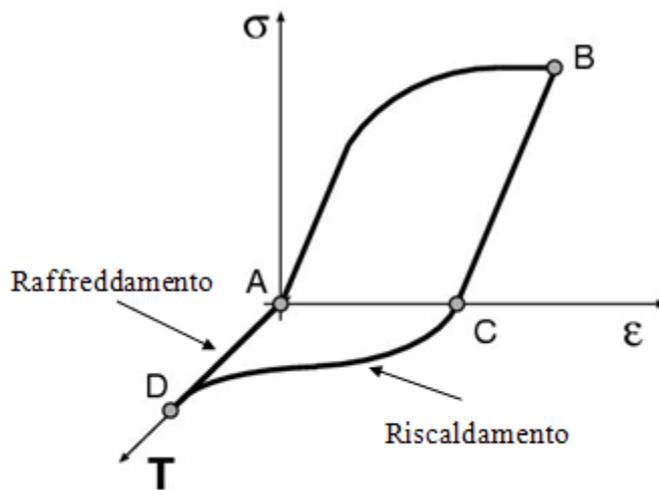


Figura 1.12: Processo di recupero della forma di un tubo in polymethacrylate. L'intero processo ha una durata di 10 s a  $50^\circ$ [3]

Lo stesso fenomeno può essere rappresentato in un grafico tridimensionale (fig.1.13) avente come assi principali tensione, deformazione e temperatura: partendo da A, si arriverà con un aumento di tensione e deformazione ad una fase martensitica B e successivamente, togliendo il carico applicato, si avrà una grande deformazione (C) la quale verrà completamente recuperata nel punto D nel quale avrò la completa assenza di tensione e deformazione ad una temperatura relativamente elevata. Per concludere il percorso, raffreddando la lega da D, in fase chiaramente austenitica, si arriverà nel punto iniziale A, recuperando tutti i parametri che si avevano prima del completo ciclo di trasformazione.



Ciclo della memoria:

A: Martensite twinned  
 B: Martensite detwinned  
 C: Scarico  
 D: Austenite

C → D recupero completo della deformazione impressa alla lega; si sviluppano forze di notevole entità utili in applicazioni pratiche

Figura1.13: Effetto memoria di forma. Al termine del percorso di carico e scarico(ABC) a temperatura costante,il materiale presenta una deformazione residua che può essere recuperata tramite un ciclo termico(CDA).[4]

Numerose leghe esibiscono proprietà “shape memory”, ma solo alcune recuperano elevate deformazioni sviluppando grandi forze (es.NiTi).

A livello molecolare:

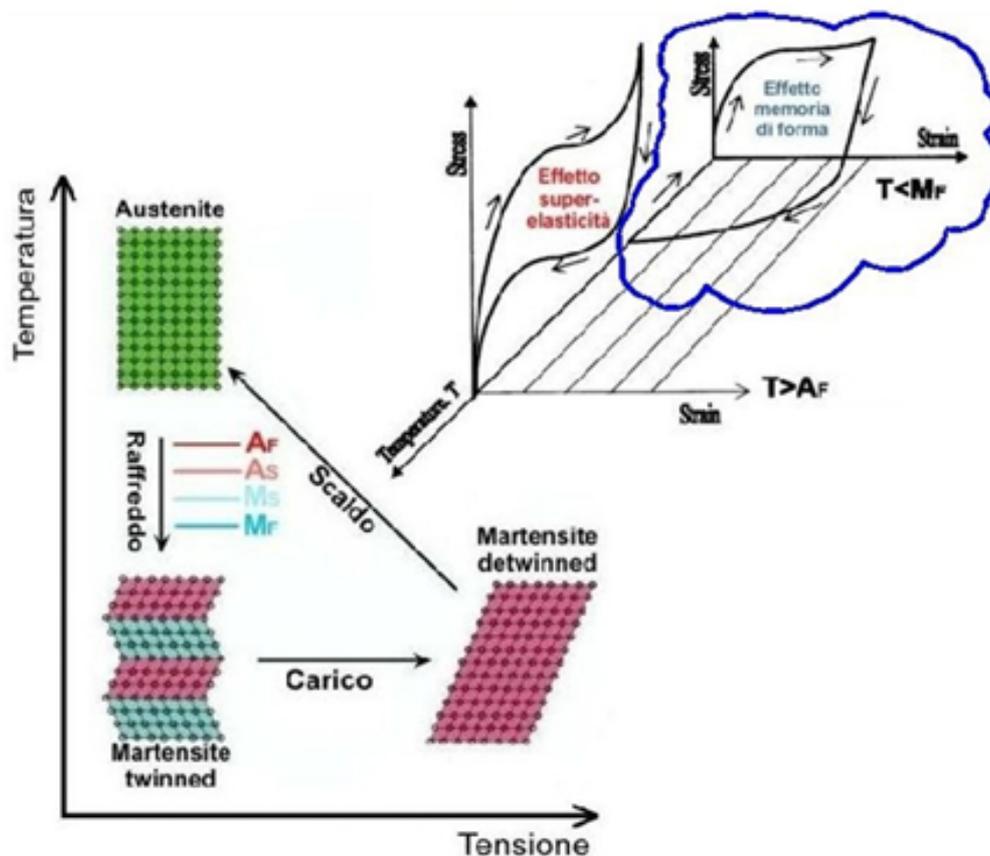


Figura 1.14: Rappresentazione delle trasformazioni al variare della temperatura

Si può notare che la fase austenitica è presente solo ad una temperatura maggiore di  $A_F$ , mentre quella martensitica sottoforma di twinned si ha solo raffreddando sotto a  $M_F$ ; alla fase detwinned si perviene unicamente caricando la martensite twinned. E' proprio grazie a quest'ultima (e non grazie alla martensite ottenuta per slip dei piani cristallini) che si ottiene l'effetto memoria di forma: tale fase, infatti, presenta una configurazione macroscopicamente diversa dall'austenite e dalla Martensite twinned. La martensite twinned è la chiave dell'effetto a memoria di forma. La struttura della martensite, in assenza di carico, dopo il raffreddamento e la trasformazione martensitica (b), si presenta come una sorta di spina di pesce avente le varie parti indipendenti A, B,C,D(figura.1.15):

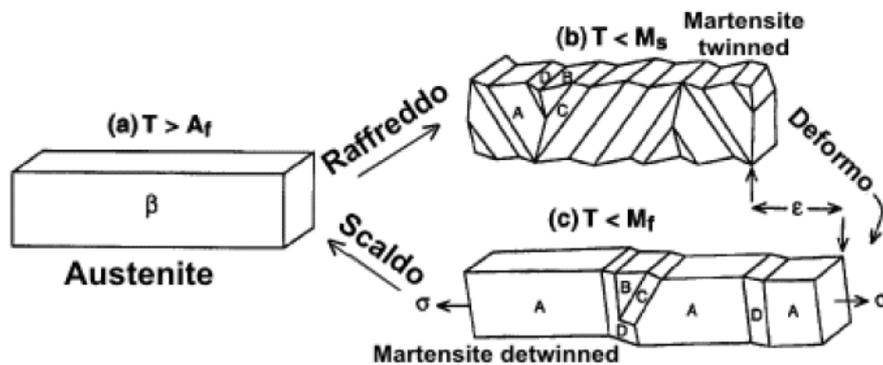


Figura 1.15: (a) cristallo in fase Beta. (b) A,B,C e D: varianti auto-accomodanti (twin-related) dopo raffreddamento e trasformazione nella fase martensitica (c) A seguito della applicazione di una sollecitazione la variante A diviene dominante. A seguito di riscaldamento, il materiale ritorna alla fase Beta e recupera la forma originaria.[1]

Applicando una tensione esterna alla fase (b) si ottiene una deformazione delle varie parti della struttura soprattutto nella direzione del carico, pervenendo alla fase (c); la parte A di quest'ultima fase sovrasta chiaramente le altre parti, ciò vuol dire che essa si è deformata più delle altre. La  $\epsilon$  totale viene poi recuperata non appena la struttura torna austenitica (a). La percentuale di forma che viene riacquistata è connessa al livello di deformazione precedentemente inserito; le leghe con grani grossolani sono provvisti di un ritorno integrale alla forma d'origine solo se la deformazione che è stata utilizzata è minore del 7,5 %; se quest'ultima è del 15% il ritorno alla forma originaria non può arrivare al 100%, si blocca al 92%. Nei materiali a grana fine invece, il ritorno alla configurazione di partenza si ferma all'87% anche con deformazioni applicate minori del 3%. Ciò è spiegabile prendendo atto che le leghe a grana fine possiedono un'ampia superficie ai bordi del grano che è una parte con un ordine reticolare molto basso e che quindi non può avere trasformazione termoelastica. I mutamenti strutturali possono avvenire anche nell'ordine dei millisecondi e sono in grado di generare degli sforzi interni molto elevati, essi incidono sul ritorno alla forma originaria; per esempio una lega TiNi50, può sviluppare uno sforzo di 700 MPa. L'effetto a memoria di forma descritto fin'ora si sviluppa mediante un meccanismo denominato "a una via" (*One Way*

*Shape Memory Effect* , O.W.S.M.E.) ovvero, dopo un primo ciclo di deformazione una generica lega a memoria di forma non tollera aggiuntivi cambiamenti di forma, anche se torna martensitica. Quando la martensite è deformata rimane in fase detwinned fino a quando non subisce un aumento di temperatura; tuttavia, se raffreddata per una seconda volta (in assenza di carico) a partire dalla fase austenitica, il materiale non riesce a mutare nuovamente forma verso la fase martensitica, esso deve necessariamente essere deformato meccanicamente per far avvenire una nuova trasformazione termoelastica (figura.1.16;1.17):

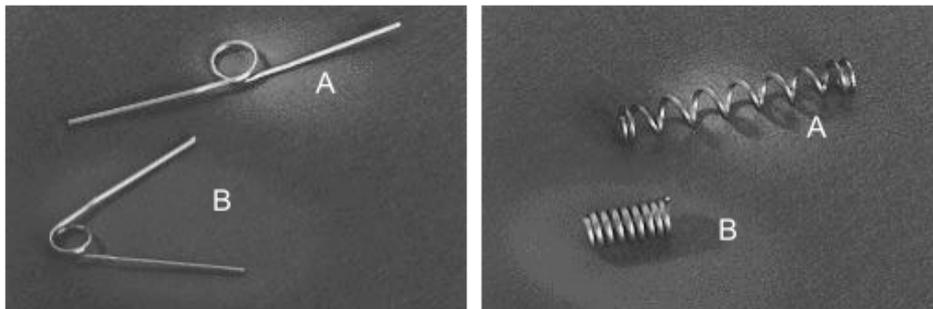


Figura1.16 : Variazione di forma di elementi in Lega a Memoria di Forma, a bassa temperatura (B) ed alta temperatura (A) [6]

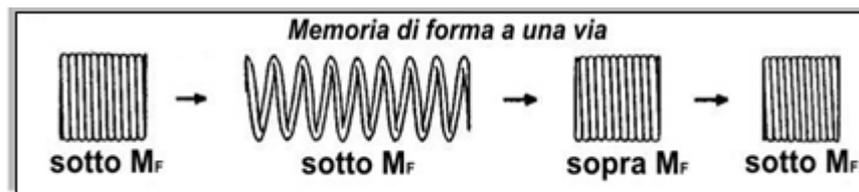


Figura1.17: Effetto di memoria a una via

E' tuttavia possibile, per alcune leghe, ottenere un meccanismo diverso che abbia l'effetto memoria di forma sia nella fase austenitica che in quella martensitica: tale meccanismo è chiamato "a due vie" (*Two Ways Shape Memory Effect* , T.W.S.M.E.).In questo caso l'effetto di memoria di forma può essere ripetuto n volte(cioè ci può far pensare di costruire delle molle attivate per effetto termico o di impiegare questi materiali come attuatori).

Quest'ultimo si sviluppa mediante un cambiamento di forma che avviene nell'intervallo di trasformazione sia per il riscaldamento che per il raffreddamento; in pratica la lega si riesce a deformare nuovamente se raffreddata una seconda volta (figura.1.18):

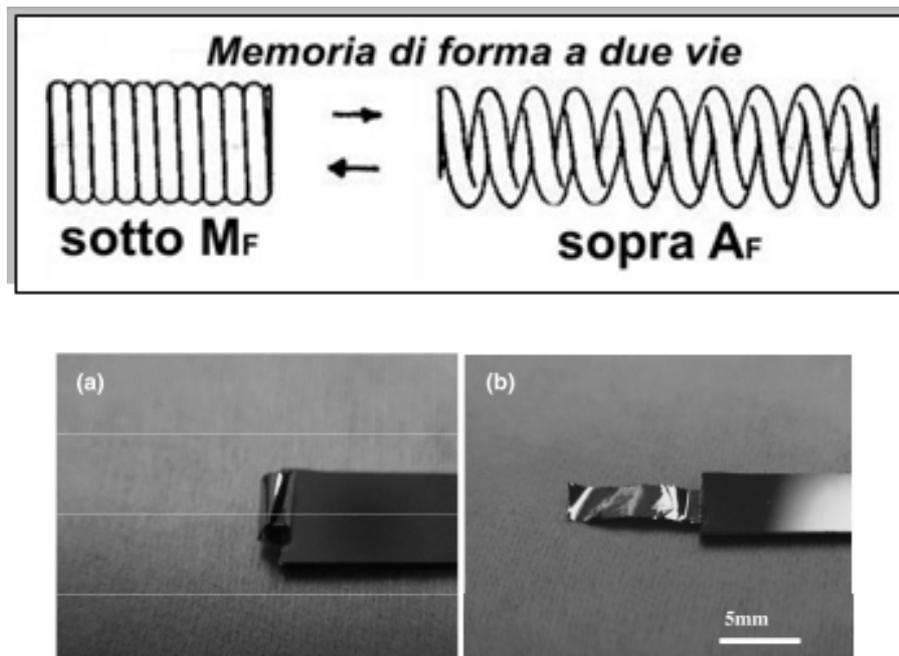


Figura 1.18: Effetto di memoria a due vie (a); Effetto di memoria a due vie di un film di NiTiCu a 20° (a) e 90° (b). [7]

Il T.W.S.M.E. non è comunque una caratteristica propria del materiale, ma è una proprietà che la lega deve acquisire attraverso adeguate elaborazioni termiche o meccaniche; con queste la lega assume due forme diverse e stabili sia ad alta che a bassa temperatura. Lavorare termicamente una lega per farle avere una memoria “a due vie” vuol dire introdurre delle concentrazioni di dislocazioni per stress nella martensite in alcune direzioni preferenziali in modo tale che la trasformazione porti ad una determinata forma; il processo termico che viene adoperato prende il nome di ciclaggio termico forzato della martensite. Il pezzo viene deformato sotto la  $M_F$  ed immobilizzato, così da non poter modificare mai il suo stato durante le ulteriori lavorazioni termiche

condotte a temperature maggiori di  $A_F$  e successivamente inferiori a  $M_F$ . Si raggiunge così un materiale che muta automaticamente forma in base alla temperatura. La grande barriera dell'effetto di memoria di forma a due vie risiede nel fatto che il numero di cicli che può completare prima di tornare a comportarsi come una lega ad una via è limitato, poiché dipende dal trattamento di ciclaggio termico forzato. C'è da aggiungere che durante la trasformazione da austenite a martensite, la percentuale di forma che viene recuperata è inversamente proporzionale al numero di cicli massimi richiesti al materiale. Si prenda come esempio la seguente tabella:

Numero Cicli	Massima deformazione reversibile (%)		
	NiTi	CuAlNi	CuZnAl
$10^2$	6	1,2	1
$10^5$	2	0,8	0,8
$10^7$	0,5	0,6	0,5

Figura 1.19: Tabella con massima deformazione recuperabile al variare del numero di cicli.

Un'altra limitazione è l'esistenza di una temperatura critica al di sopra della quale la lega perde la sua peculiarità di memoria di forma a due vie, rendendo vano così il trattamento di ciclaggio termico forzato subito.

#### 1.2.4 Superelasticità o pseudoelasticità

Oltre all'effetto memoria di forma, come accennato nell'introduzione, una lega a memoria di forma si distingue anche per un effetto superelastico. La *superelasticità* o meglio *pseudoelasticità*, è un'abilità delle SMA, che permette loro di immagazzinare e recuperare totalmente e senza fenomeni elastoplastici notevoli deformazioni (anche del 6-8%), provocate dall'applicazione di uno sforzo in gran parte costante.



Figura 1.20: Esempio di proprietà pseudo-elastiche della lega NiTi. Un occhiale realizzato in lega a memoria di forma viene severamente deformato e recupera istantaneamente la forma iniziale all'atto della rimozione della sollecitazione.

L'esempio più classico è quello in figura 1.20, un occhiale realizzato in lega NiTi viene gravemente deformato e riacquista istantaneamente la forma iniziale all'atto della rimozione della sollecitazione. Condizione necessaria per tale caratteristica è che la deformazione che induce la trasformazione martensitica deve attuarsi ad una temperatura superiore a  $M_S$ . Come già detto infatti, esiste una temperatura  $M_D$  sotto la quale si forma una martensite per deformazione meccanica; se una SMA possiede la temperatura di fine trasformazione austenitica  $A_F$  minore della temperatura  $M_D$ , si può verificare l'effetto pseudoelastico. Quindi, mediante l'impiego di uno stato di sollecitazione su una lega a memoria di forma nel range di temperatura  $A_F < T < M_D$  si ha martensite indotta da sforzo (stress-indotta). Rimuovendo il carico, si ha la riconversione da martensite ad austenite indeformata in un intervallo di temperatura che generalmente è fra i 30 ed i 50°C oltre  $A_F$ . Come per il paragrafo precedente, si può vedere la rappresentazione schematica dell'effetto superelastico nel grafico che segue (fig.1.21), in cui però si può notare chiaramente che stavolta non compare l'asse della temperatura, poiché si mantiene costante nel passaggio tra le diverse fasi.

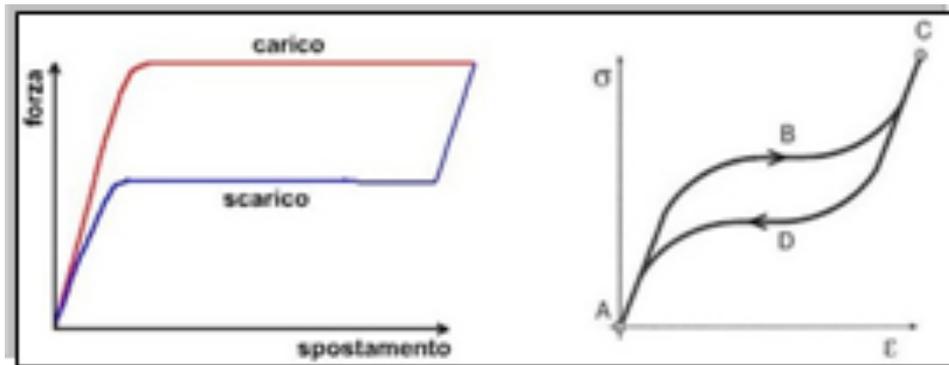


Figura 1.21: Rappresentazione schematica del comportamento di un materiale pseudo elastico.

Nel ramo di carico si può notare un punto di pseudo - snervamento che corrisponde all'inizio della trasformazione martensitica nella quale compare una regione in cui, all'aumentare della deformazione, non si ha un aumento del carico: questo plateau pseudo - elastico fa sì che il materiale si possa deformare a tensione costante anche molto severamente, senza intaccare la sua resistenza. L'ampia deformazione impressa è recuperata velocemente nella fase di scarico nella quale si nota un aggiuntivo ramo di deformazione a sforzo costante associato alla trasformazione inversa da martensite ad austenite:

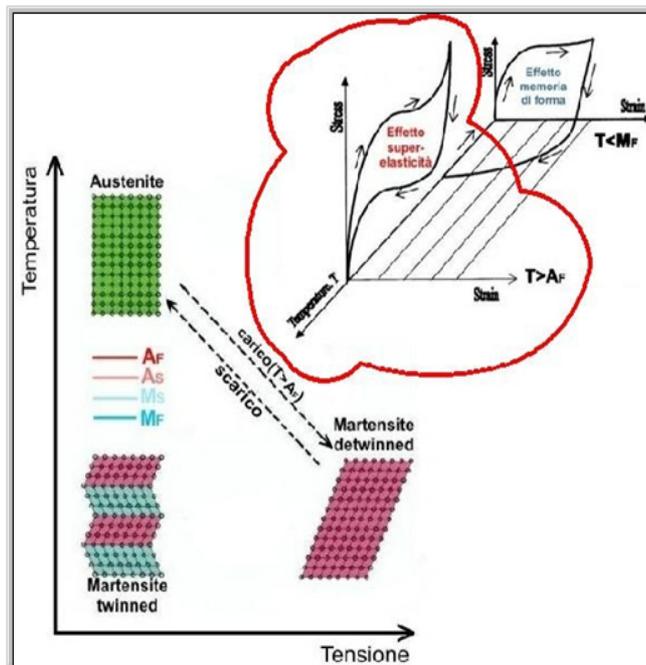


Figura 1.22: Trasformazione diretta e inversa[8]

La deformazione macroscopica viene associata a livello microscopico dal twinning e dalla nucleazione della fase martensitica.

### **1.2.5 Capacità di smorzamento**

Numerose applicazioni di SMA nell'ingegneria civile sfruttano la loro capacità di smorzamento in condizioni superelastiche per sviluppare sistemi di protezione sismica e per le strutture storiche in muratura. Queste applicazioni solitamente consistono in sistemi SMA, come tiranti o isolatori alla base, connessi alle strutture. La capacità di un materiale di trasformare parte della energia meccanica, tipicamente relativa a moti vibrazionali o a carichi impulsivi, in una forma di energia differente, generalmente energia termica per effetti dissipativi.

Un parametro diffusamente utilizzato per descrivere la capacità di smorzamento di uno specifico materiale è il fattore di perdita, definito come:

$h = DW / 2 * p * W$  dove:

W = energia applicata

DW = energia dissipata

Il fattore di perdita è tipicamente riferito a condizioni nelle quali la deformazione e lo stress applicato ritornano al valore iniziale, ossia è escluso l'intervento di fenomeni di deformazione plastica. I meccanismi che generano le elevate capacità di smorzamento delle LMF sono raggruppabili in alcune principali tipologie:

- Smorzamento per attrito interno nella fase martensitica è sostanzialmente riconducibile a movimenti di interfacce nella struttura del materiale (interfacce tra varianti martensitiche e "twin boundaries"); la capacità di smorzamento tende ad aumentare con la ampiezza di deformazione (sono state effettuate sperimentazioni fino ad ampiezze di strain di  $6 \cdot 10^{-6}$ ).
- Smorzamento per attrito interno nel corso della trasformazione. Un valore massimo dei fenomeni di attrito interno avviene durante la trasformazione, sia in fase di aumento che di diminuzione della temperatura; a temperatura

costante il fattore di perdita risulta di un valore intermedio tra quello delle due fasi, in funzione della rispettiva percentuale di presenza nella lega.

- Smorzamento per attrito interno nella fase austenitica La fase austenitica presenta, di per se, limitate capacita' di smorzamento, tuttavia un interessante comportamento agli effetti dello smorzamento si manifesta quando interviene il fenomeno di pseudoelasticita'; in queste condizioni, la dimensione del ciclo sforzo deformazione fornisce una misura della capacita' di smorzamento.

### 1.2.6 Comportamento termomeccanico

Le caratteristiche delle leghe a memoria di forma dipendono molto dall'intervallo di temperatura nel quale avviene la trasformazione.

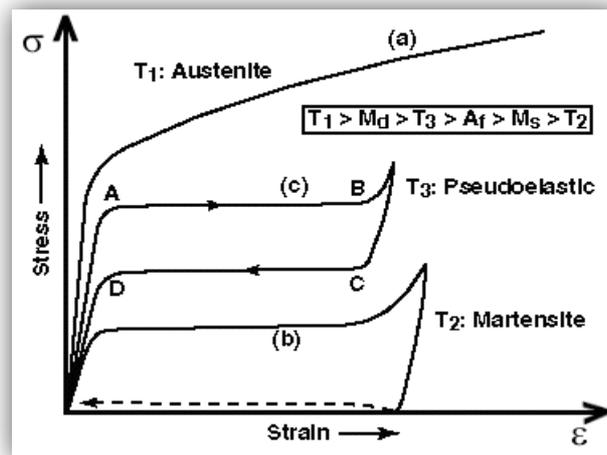


Figura 1.23: Tipiche curve stress-strain a differenti temperature relativamente alla trasformazione; (a) mostra il comportamento austenitico, (b) quello martensitico e (c) quello pseudoelastico [1]

Il comportamento di una lega NiTi sottoposta a tensione nei diversi range di temperatura: sopra, sotto e all'interno dell'intervallo di trasformazione (figura 1.23).

La martensite (b) è consistentemente deformabile anche a bassi livelli di carico e bassa temperatura, mentre l'austenite richiede carichi molto elevati. Ciò comporta un diverso modulo di rigidezza tra i materiali, evidenziato anche con l'esempio delle molle nel grafico forza  $F$  – spostamento  $\delta$  (figura 1.24). Tornando alla figura 1.23 la linea tratteggiata lungo la curva (b) indica che, dopo la somministrazione di calore e lo scarico, la lega “ricorda” la sua fase iniziale austenitica tornando all'origine.

La curva (c) è riferita al comportamento pseudoelastico, ottenuto ad una temperatura superiore a quella di trasformazione: la martensite stress-indotta mostra infatti un aumento di deformazione a tensione costante (tratto AB), ma nello scarico essa torna ad austenite in corrispondenza di uno sforzo più basso (tratto CD); tale peculiarità consente di ottenere materiali che, se messi in opera allo stato deformato, esercitano uno sforzo costante nel tempo sui punti dove vengono vincolati. Sempre per la curva (c) si osserva che il recupero della forma quindi, avviene non per fornitura di calore ma per riduzione del carico e in maniera non lineare; ciò comporta che il modulo di Young di un materiale superelastico (rubber-like) è quasi indefinibile, poiché dipende sia dalla temperatura che dalla deformazione.

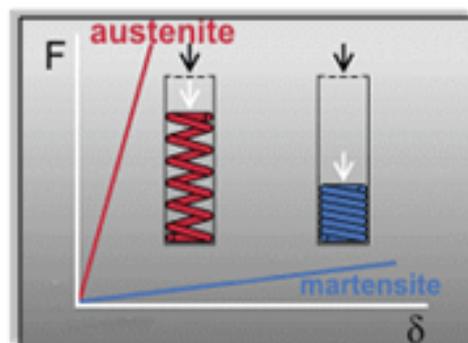


Figura1.24: Curva forza-spostamento che evidenzia i diversi moduli di rigidezza al variare del livello di carico.

Si ricorda, tuttavia, che esiste una temperatura massima  $M_D$  oltre la quale non si è capaci di dare origine a martensite tramite stress, infatti l'effetto superelastico si ha solamente per temperature comprese tra  $A_F$  e  $M_D$ ; al di fuori di tale intervallo la deformazione è elastoplastica. Per ottenere il migliore recupero di deformazione, cioè un materiale pseudo plastico quasi perfetto, bisognerebbe agire ad una temperatura molto vicina ad  $A_F$ . Dai grafici sforzo - deformazione alle varie temperature si nota che i cicli di carico sono più o meno larghi a seconda della vicinanza ad  $A_F$ . Al di sotto di  $A_F$  non si hanno più dei cicli, ma un comportamento elastoplastico tradizionale. Inoltre, al di sopra di  $M_D$  si ha la progressiva perdita di recupero fino a raggiungere ancora un comportamento tradizionale. Il plateau di trasformazione nel grafico tensione - deformazione, varia al cambiare della temperatura come mostra la figura 1.25 :

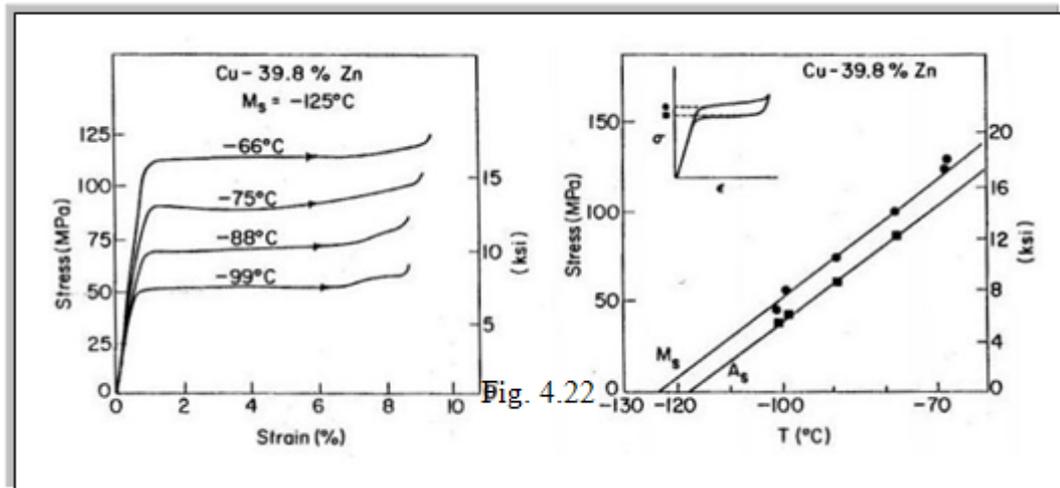


Figura 1.25: Variazione del plateau di trasformazione con la temperatura

Per temperature ancora più elevate la tensione critica per plasticizzare la lega è in concorrenza con la tensione per generare martensite (figura 1.26 ) e il recupero della deformazione superelastica diviene incompleto.

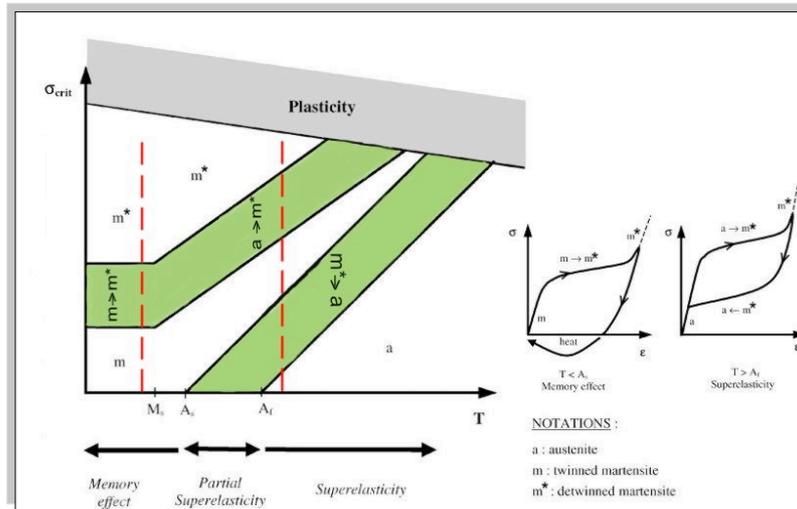


Figura 1.26: Diagramma delle fasce di trasformazione

Il cambiamento di fase avviene solo nelle zone verdi del diagramma  $\sigma - T$  chiamate fasce di trasformazione; esso segue il verso delle frecce.

### 1.2.7 Metodi di caratterizzazione

Comunemente ci sono quattro diverse metodologie salienti per delineare l'atteggiamento delle leghe a memoria di forma nel proprio intervallo di trasformazione, esse sono descritte in maniera tale da riuscire ad estrarre una sorta di classificazione per le SMA.

Per ogni metodo, ci si riferisce alla variazione di determinate proprietà con la temperatura.

#### Metodo DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Questa tecnica consente di misurare, su un campione non sottoposto a livelli tensionali, il calore assorbito o rilasciato dal campione stesso quando viene riscaldato e raffreddato nell'intervallo di trasformazione, come illustrato in figura 1.27:

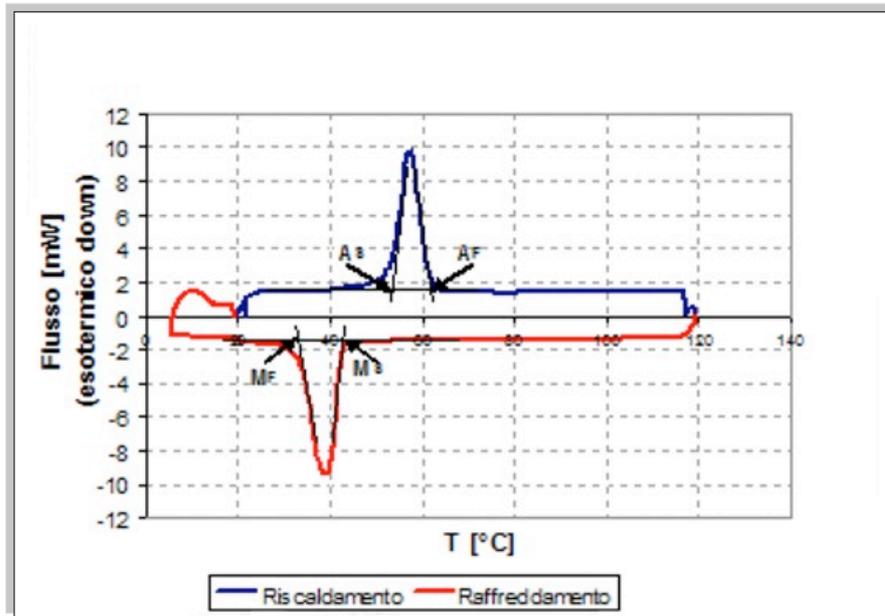


Figura 1.27: Metodo DSC

I valori massimi esotermici ed endotermici, dovuti all'assorbimento o alla emissione di energia, sono comodamente oggetto di misura ed interpretazione e, forniscono le temperature di trasformazione della lega in assenza di carico applicato.

#### Misure di resistività del campione

Durante il riscaldamento ed il raffreddamento, si evidenziano singolari diversità con picchi di resistività (anche 20%) in prossimità dell'intervallo di trasformazione. Tale metodo non sempre è efficiente nel comparare le caratteristiche di leghe diverse, e viene impiegato quasi unicamente per valutare la resistività di un solo componente.

#### Misure mediante un carico applicato

Si applica al campione di SMA un carico costante, si sottopone ad un ciclo di trasformazione e, successivamente, si misurano le deformazioni che si verificano in ambedue le direzioni del ciclo. Tale metodologia è la più efficace per esaminare il comportamento meccanico delle leghe a memoria di forma. Il risultato diretto di questo test, nel caso della misura della dilatazione del campione, è raffigurato in figura 1.27 ; si è visto che i valori ottenuti per i punti

critici della trasformazione, come  $M_S$  ed  $A_F$ , sono lievemente più grandi di quelli conseguiti col test DSC. Ciò perché nel “Differential Scanning Calorimetry” non vi è alcun carico applicato e la trasformazione non è stress-indotta. Per di più un aumento di carico conduce ad un aumento delle temperature di trasformazione. Questo test, pur essendo molto indicativo sulle caratteristiche meccaniche di una SMA, ha l’handicap di essere molto influenzato dalla procedura seguita.

### Test di trazione

Questo metodo consente di raffrontare le caratteristiche connesse al rapporto sforzo-deformazione e, va effettuato a varie temperature all’interno dell’intervallo di trasformazione. E’ da notare che è un metodo molto generico poiché si basa su approssimazioni, esso è più idoneo per esaminare una singola fase presente ad una determinata temperatura.

## **1.2.8 Smart Materials**

La definizione Smart Materials accomuna un’ampia tipologia di materiali con caratteristiche e capacità molto diversificate. In generale gli Smart Material presentano la capacità di rilevare particolari condizioni (di sollecitazione, ambientali, etc.), la capacità di modificare alcune delle proprie caratteristiche (di forma, strutturali, etc.) o entrambe tali possibilità. Allo stato attuale, la possibilità di utilizzo delle LMF nella realizzazione di Smart Materials, sembra presentare le maggiori probabilità verso alcune specifiche applicazioni:

- Accordo dell’energia mediante tensionamento attivo: dei fili in LMF sono integrati, vincolati, nel composito; se questo vibra alla frequenza di risonanza, mediante riscaldamento dei fili e’ possibile indurre uno stato di tensione nel materiale e provocare una modifica della caratteristica di risonanza.

- Controllo attivo di forma: l'azione di elementi in LMF integrati nella struttura di un materiale composito e' impiegata per generare una modifica della forma del manufatto. Un esempio tipico di questa applicazione e' il profilo alare a sezione modificabile.
- Modifica modale attiva: dei fili di LMF sono integrati nella struttura del materiale composito senza essere vincolati agli estremi. Quando in questi elementi, mediante riscaldamento, viene indotta la trasformazione di fase, la consistente variazione del modulo elastico genera una modificazione dei modi di vibrazione del manufatto.
- Miglioramento della resistenza a fatica ed agli urti (capacita' di autoriparazione): la integrazione nella struttura del materiale composito di fili superelastici precaricati ha la potenzialita' di contrastare la propagazione delle fratture; un'altra soluzione prevede la integrazione di fili martensitici stirati la cui contrazione potrebbe essere attivata mediante riscaldamento.
- Riduzione attiva delle tensioni: elementi in LMF in fase martensitica, integrati in varie possibili forme (fili, fogli sottili, fibre, etc.) possono realizzare una riduzione dello stato di tensione derivante da diverse possibili cause quali: condizioni di carico, shock termico o differenze di coefficiente di espansione termica.

La applicazione delle LMF negli Smart Materials costituisce un settore ritenuto suscettibile di notevole espansione, tuttavia allo stato attuale non esistono significativi esempi di realizzazioni di rilevanza economica.

### **1.3 MATERIALI PIEZOELETTRICI**

#### **1.3.1 Cenni storici e proprietà**

La piezoelettricità è una proprietà che esiste in molti materiali, i quali, sottoposti a forze meccaniche, sviluppano cariche elettriche sulla loro superficie (effetto piezoelettrico diretto) e, viceversa, sottoposti a un campo elettrico, esibiscono una deformazione meccanica (effetto piezoelettrico

inverso). I polimeri elettroattivi sono particolari corpi complessi che sfruttano la caratteristica di subire grandi deformazioni e grandi spostamenti se sottoposti a una differenza di potenziale (figura 1.28).

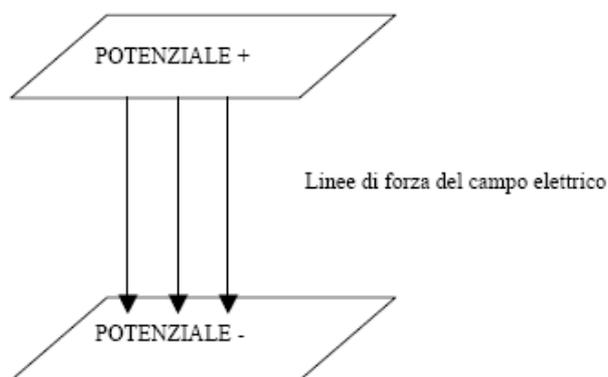


Figura 1.28: Differenza di potenziale

La prima dimostrazione sperimentale di un collegamento tra i fenomeni piezoelettrici macroscopici e la struttura cristallografica è stata pubblicata nel 1880 da Pierre e Jacques Curie, i quali misurarono la carica superficiale che compare su cristalli specificamente preparati (tormalina, quarzo e sale Rochelle), sottoposti a sforzo meccanico<sup>1-2</sup>. La prima seria applicazione della piezoelettricità è stata realizzata durante la prima guerra mondiale da Langevin, che costruì la prima sorgente ultrasonora subacquea (sonar) consistente in elementi piezoelettrici di quarzo interposti fra piastre d'acciaio. Il successo del sonar stimolò un'intensa attività di sviluppo su tutti i tipi di dispositivi piezoelettrici. Il controllo della frequenza del cristallo divenne essenziale per la crescente industria di radiodiffusione e radio comunicazione, la maggior parte delle applicazioni piezoelettriche classiche (microfoni, accelerometri, trasduttori ultrasonori, attuatori a elemento flettente, pick-up di fonografi, filtri di segnale, ecc.) furono concepite e sviluppate anche se i materiali allora disponibili spesso limitavano le prestazioni del dispositivo e, di conseguenza, il loro sfruttamento commerciale. Infatti, i monocristalli usati a quel tempo avevano basse proprietà piezoelettriche. La scoperta, durante la seconda guerra mondiale, della possibilità di indurre la piezoelettricità tramite l'applicazione di

un forte campo elettrico ad ossidi metallici sintetizzati in modo da allineare i loro domini di dipolo, ha permesso nuove applicazioni piezo-elettriche ed aperto la via ad un'intensa ricerca sui piezoceramici. Il primo piezoceramico[11] è stato il titanato di bario ( $\text{BaTiO}_3$ ), che esibisce costanti dielettriche fino a 100 volte superiori a quelle dei cristalli di taglio comune. La sua struttura cristallina è simile a quella del minerale perovskite ( $\text{CaTiO}_3$ ).

Al di sopra della temperatura di Curie ( $130\text{ }^\circ\text{C}$ ), la cella elementare è cubica e simmetrica, mentre, al di sotto della temperatura di Curie è leggermente storta e tetragonale, esibendo un momento di dipolo diverso da zero. Il titanato di bario è stato ampiamente usato subito dopo la seconda guerra mondiale per la generazione di vibrazioni acustiche ed ultrasonore e per gli attuatori, ma oggi è stato sostituito generalmente dal titanato zirconato di piombo (PZT) per le sue superiori proprietà piezoelettriche e più alte temperature di funzionamento.

Il  $\text{BaTiO}_3$  mostra una resistenza maggiore degli altri piezoceramici come i PZT alla depolarizzazione causata da sollecitazioni di compressione e questa resistenza è particolarmente forte nel materiale drogato con cobalto, soprattutto dopo un periodo d'invecchiamento.

Per questo motivo, l'uso del  $\text{BaTiO}_3$  drogato con cobalto per produrre alte potenze acustiche è continuato in alcune applicazioni nonostante la sua inferiore attività piezoelettrica.

La limitazione principale del titanato di bario, ossia le basse temperature operative, è stata superata negli anni '50 dalla scoperta degli effetti piezoelettrici nel titanato zirconato di piombo,  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ , e nel metaniobato di piombo,  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ , che sono utilizzabili almeno fino a  $250\text{ }^\circ\text{C}$ .

Si è visto come l'effetto piezoelettrico sia spiegabile a livello cristallografico con distorsioni del reticolo cristallino simili, per certi versi, ai noti meccanismi martensitici che regolano le tempre dell'acciaio, presente in natura in alcuni quarzi.

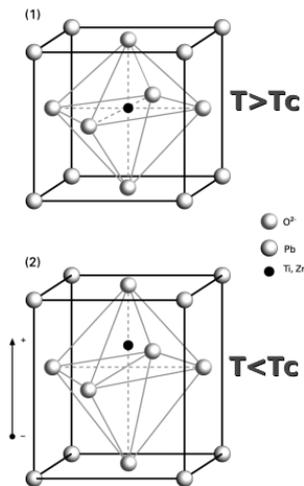


Figura 1.29: Struttura cristallina perovskite, (1) per  $T > T_c$  la cella elementare ha una struttura cubica simmetrica (cristallo non piezoelettrico), (2) per  $T < T_c$  la cella elementare ha una struttura tetragonale non simmetrica (cristallo piezoelettrico)[10]

Il reticolo dei cristalli piezoelettrici è un CFC con ai vertici atomi metallici, al centro delle facce gli atomi di ossigeno e nel centro un atomo più pesante confinato in uno spazio angusto con sopra e sotto degli spazi ottaedrici, posizioni di minore energia, ma nei quali non può spostarsi senza distorcere il reticolo.

Si tratta dunque di una struttura metastabile. Sotto l'azione del campo elettrico, l'atomo centrale supera la soglia di potenziale e si sposta in uno dei due spazi ottaedrici realizzando una configurazione di energia minore ma causando uno squilibrio nelle cariche che si estrinseca nella formazione di un dipolo elettrico. Tale comportamento è verificabile al di sotto della temperatura di Curie, dal nome dei famosi scienziati ai quali si deve la scoperta di tali proprietà. Oltre tale temperatura appunto l'effetto piezoelettrico scompare a causa della minore rigidità del reticolo dovuta alla maggiore agitazione atomica. Questa evenienza viene comunemente utilizzata per ottenere materiali piezoelettrici di elevata anisotropia.

I cristalli piezoelettrici si possono trovare in natura oppure possono essere sintetici (artificiali). E' difficile valutare esternamente la differenza fra i due tipi di materiali.

Entrambi funzionano circa allo stesso modo. Si distinguono in:

1. Quarzo: (naturale o sintetico) nessun dipolo , utilizza uno sforzo per cambiare dimensioni e separa le cariche per generare un dipolo, che genera una tensione. Questo materiale è molto stabile anche per larghi range di temperatura, ma non produce una tensione considerevole. Il quarzo è utilizzato negli orologi ed nelle radio come standard vibratorio (di frequenza). Altri cristalli piezoelettrici naturali sono la Tormalina, il Sale Rochelle,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ , Langasite,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_6$ .
2. Ferroelettrici e Piroelettrici: (sintetici) hanno un dipolo naturale, manifestano comparsa di cariche se sottoposti a riscaldamento (piroelettricità) e invertono il dipolo sotto l'applicazione di un campo elettrico d'intensità opportuna (ferroelettricità). Questi materiali generano una tensione abbastanza elevata, ma non sono abbastanza resistenti alla variazione della temperatura. Si distinguono in:
  - Piezoceramici policristallini:  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$ , PZT,  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$  ;
  - Piezopolimeri: PVDF, copolimeri di TrFE e TeFE;
  - Piezocompositi .

La ceramica piezoelettrica è quindi fatta dai materiali ferroelettrici. Un forte campo elettrico riorienta i dipoli elettrici e rende piezoelettrici anche grandi oggetti.

I materiali naturalmente piezoelettrici non avranno grani disposti con direzioni preferenziali di polarizzazione, con conseguenti ridotte capacità di deformazioni macroscopiche. I PZT artificiali, invece vengono portati oltre la loro temperatura di Curie e sottoposti, durante il raffreddamento, ad un intenso campo elettrico che ne orienta i dipoli come desiderato e provoca una polarizzazione stabile nei limiti di sollecitazione meccanica, termica o elettrica del materiale. Al termine del processo di polarizzazione il materiale è dunque

distorto nel suo reticolo e reagisce a sollecitazioni, meccaniche od elettriche, col medesimo meccanismo di spostamento di massa e di carica.

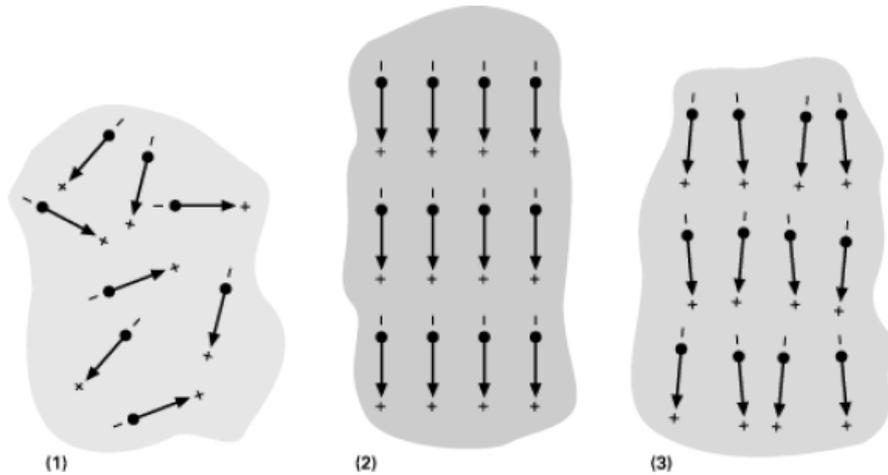


Figura1.30: Si osserva un'orientazione preferenziale a livello dei grani,nel materiale polarizzato

A livello dei grani si può osservare, nel materiale polarizzato(Figura1.30), un'orientazione preferenziale nei vari domini, quale più quale meno accentuata, e che, nel complesso, ha variato la forma del piezoelettrico allungandola lievemente nel senso della polarizzazione. Applicando un campo elettrico nel senso della polarizzazione si osserva un primo contrarsi del materiale poiché il campo contrasta la direzione di polarizzazione. Infatti, in un reticolo ordinato con tutti i dipoli equiversi, ad ogni polo positivo si affaccia un polo negativo che forza l'atomo centrale nella sommità dello spazio intercristallino. Quando il campo elettrico sopravviene, l'atomo si centra nello spazio ottaedrico con conseguente rilassamento del reticolo che tenderà a contrarsi, prima di riprendere la strizione a causa del nuovo forzamento verso la direzione opposta.

Aumentando d'intensità il campo, le deformazioni aumentano proporzionalmente fino a un valore limite del campo indicato con  $E_c$ . Oltre tale limite il materiale inizia a espandere e i dipoli prendono a cambiare direzione perché l'atomo spostato nel vuoto ottaedrico (superiore, ad esempio) viene

spinto in quello opposto variando il verso del dipolo. I PZT non sono soggetti a creep nelle applicazioni in cui sono utilizzati in funzionamento periodico alternato. Il creep nei pzt si manifesta, come l'isteresi, come effetto sulla polarizzazione residua di un campo elettrico stabile: se viene aumentata la tensione quando il piezoelettrico è già deformato, la polarizzazione residua manifesterà gli effetti di uno scorrimento viscoelastico una volta che si cambi il segno della tensione. L'effetto del creep è comunque molto ridotto, attestandosi, ai suoi valori massimi (raggiunti dopo poche ore), su deformazioni differenti dell'1% dall'ultimo movimento comandato. Oltre a fenomeni di creep, le prestazioni dei piezoelettrici nel tempo possono variare come conseguenza di processi di depolarizzazione dovuti allo stesso funzionamento del materiale. Tali danni da invecchiamento riguardano tipicamente i sensori pzt e sono trascurabili per gli attuatori, giacché ogni volta che il materiale è attuato, è sottoposto ad un campo elettrico nella direzione di polarizzazione.

### **1.3.2 Applicazione materiali piezoelettrici**

I polimeri elettroattivi sono particolari corpi complessi che sono impiegati nella costruzione di attuatori perché sfruttano la caratteristica di subire grandi deformazioni e grandi spostamenti se sottoposti a una differenza di potenziale tramite particolari elettrodi flessibili in grado di adattarsi alle deformazioni del polimero. L'interfaccia tra i due corpi richiede la definizione di opportune condizioni che possono essere determinate mediante lo sviluppo di un appropriato modello della meccanica dei polimeri polielettroliti che consideri la presenza simultanea di due tipi di microstrutture: quella indotta dalle macromolecole polimeriche e lo svilupparsi di domini di polarizzazione.

Ceramica piezoelettrica: due comportamenti tipici:

- Se si applica una pressione o una forza ad un campione di ceramica piezoelettrica, questo genererà una tensione. Questo effetto è usato nei microfoni, nei sonar e nell'apparecchiatura medica per ultrasuoni.

- Quando viene invece applicata una tensione alla ceramica piezoelettrica, questa si espande e si contrae, deformandosi. Inoltre comincia a vibrare o a esercitare pressione su qualunque cosa stia toccando.

*Vantaggi dei piezoceramici:*

- elevata efficienza di trasformazione elettro-meccanica;
- buona lavorabilità;
- ampio range di forme ottenibili;
- produzione in serie.

*Limiti operativi:*

Depolarizzazione:

- forti campi elettrici in direzione opposta al campo polarizzante
- forti campi elettrici alternati
- forti stress meccanici
- temperature superiori al punto di Curie.

Temperatura di Curie:

temperatura alla quale si verifica una transizione di fase nella struttura cristallina tale da determinare la perdita delle proprietà piezoelettriche.

Invecchiamento:

decadimento delle proprietà piezoelettriche col tempo, man mano che ci si allontana dal momento in cui è avvenuta la polarizzazione.

Piroelettricità:

variazione dello stato polarizzato interno con la temperatura.

I materiali utilizzati si distinguono in base alla temperatura di Curie, ai coefficienti piezoelettrici e alle possibili applicazioni :

Quarzo (SiO<sub>2</sub>)

T<sub>c</sub> = 573 °C

E' molto stabile con la temperatura però presenta bassi coefficienti elettromeccanici e piezoelettrici.

Applicazioni: accelerometri e risonatori ( $Q_m=106$ ).

#### Niobato di Litio (LiNbO<sub>3</sub>)

$T_c = 1140\text{ °C}$

Ha ottime proprietà piezoelettriche a Temperatura ambiente ma non a alta temperatura.

Ha ottime proprietà elettro-ottiche.

Applicazioni: filtri SAW.

#### Titanato di Bario (BaTiO<sub>3</sub>) $T_c = 130\text{ °C}$

Struttura cristallina perovskite. Grande resistenza a depolarizzazione

Applicazioni: alte potenze acustiche (drogato con ioni CO<sub>3</sub><sup>+</sup>)

#### Titanato di Piombo (PbTiO<sub>3</sub>) $T_c = 490\text{ °C}$

Struttura cristallina perovskite; molto fragile;

basso coefficiente  $k_p$ .

Applicazioni: sonde miniaturizzate.

#### Metaniobato di Piombo (PbNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) $T_c = 570\text{ °C}$

basso  $Q_m$  (larga banda), bassa impedenza acustica.

Applicazioni: sonde per controlli non distruttivi, apparati di diagnostica medica, idrofoni per basse profondità.

#### Classificazione dei PZT

##### ➤ Hard PZT (PZT ad alta potenza)

Bassa isteresi, alti  $Q_m$ , resistono ad alti carichi meccanici ed elettrici, invecchiano più lentamente.

Applicazioni: generatori e trasduttori ad elevata tensione elettrica o ad elevata potenza.

➤ Soft PZT (PZT ad alta sensibilità)

Grandi costanti dielettriche ma facile depolarizzazione e autoriscaldamento.

Applicazioni: sensori e trasduttori ad alta impedenza.

Produzione dei PZT:

- ✓ Miscelazione
- ✓ Calcinazione (fino al 75% della T di sinterizzazione)
- ✓ Macinazione della polvere
- ✓ Spruzzatura e miscelazione con un legante
- ✓ Formatura e pressatura
- ✓ Prima combustione a 750 °C per eliminare il legante
- ✓ Sinterizzazione ad elevate T (1250-1350 °C)
- ✓ Taglio, lucidatura, lappatura
- ✓ Applicazione degli elettrodi (sputtering)
- ✓ Polarizzazione (campi elettrici di alcuni MV/m a 100-150 °C)

Vantaggi:

- aumentata sensibilità
- aumentata larghezza della banda di frequenza
- minore impedenza acustica  $Z=\rho v$  (migliore efficienza)
- progettazione su misura per l'applicazione desiderata

Sensori: sfruttano l'effetto piezogeneratore

Attuatori: sfruttano l'effetto piezomotore

CAMPO	APPLICAZIONE
Automobilistico	Sensore di air bag, atomizzatori di combustibile (iniettori piezo), sensori di knocking, filtri radio, ecc.
Computer	Drive dell'hard disk, tastiera, stampanti a getto d'inchiostro, ecc.
Beni di consumo	Accendini del grill, umidificatori, rivelatori di fumo, pulitori di gioielli e lenti a contatto,
Industriale	Accelerometri, rivelatori di inquinamento, flussimetri, rivelatori di bolle d'aria nei tubi, sensori di impatto, indicatori di livello, equipaggiamento di microposizionamento, sensori di pressione, controlli non distruttivi, pulitori ad ultrasuoni, sgrassatori ad ultrasuoni, rettificatrici ad ultrasuoni, saldatori ad ultrasuoni, ecc.
Medico	Equipaggiamenti ecografici, pulitori dentali, nebulizzatori, terapie ad ultrasuoni, ecc.
Militare	Balistica, sonar, sistemi guida, ecc.
Telecomunicazioni, ottica e acustica	Microfoni, altoparlanti, tweeter, risonatori, filtri, microscopia a scansione, videocamere, ecc.

Figura 1.31: Applicazione nei vari campi

I materiali piezoelettrici ceramici hanno tutti gli svantaggi dei materiali ceramici: scarsa resistenza a frattura e a flessione, difficoltà nel realizzare forme curve, ecc. I polimeri piezoelettrici, invece, superano queste ultime limitazioni ma, di solito, hanno lo svantaggio di presentare bassi coefficienti piezoelettrici, limitata stabilità termica e processi di fabbricazione piuttosto complicati per materiali che abbiano una elevata qualità.

In un progetto europeo del V programma quadro, appena concluso, di nome **DURASMART** (*Durable cellular polymer films with giant electromechanical response for smart transducer applications*), a cui hanno partecipato numerose università e multinazionali europee, si è tentato un approccio innovativo consistente nello sviluppo di polimeri cellulari espansi con elevato effetto piezoelettrico e buona stabilità termica a lungo termine.

Tali materiali hanno un'ampia gamma di applicazioni nelle quali i classici trasduttori piezoelettrici (ceramici e polimerici) non potrebbero essere utilizzati. Una prima applicazione potrebbe essere quella della

riduzione/cancellazione del rumore: con tali materiali flessibili si potrebbero realizzare altoparlanti piatti e pannelli fonoassorbenti attivi. Ricoprendo un ambiente con questi ultimi e controllando elettricamente la risposta meccanica del materiale si potrebbe limitare il livello di rumore che penetra nell'ambiente stesso dall'esterno (si pensi, ad esempio, all'azzeramento del rumore prodotto dai motori di un aeromobile all'interno della zona passeggeri dell'aeroplano). Altre applicazioni potrebbero riguardare lo sviluppo di tastiere per telefoni cellulari, di sensori non invasivi per la diagnostica medica e di sensori di pressione, forza ed accelerazione avanzate sia per l'industria automobilistica che per sistemi di sorveglianza, sistemi per monitoraggio di processi industriali e la diagnostica di sistemi elettrici ed elettronici.

#### **1.4 MATERIALI MAGNETOSTRITTIVI**

La magnetostrizione è un fenomeno riscontrabile solo nei materiali ferromagnetici come l'oro, il nichel, il cobalto e le loro leghe. I principi della magnetostrizione sono basati su alcune proprietà magneto-meccaniche di questi materiali; tali materiali posti in un campo magnetico, subiscono microscopiche distorsioni della struttura molecolare che causano una variazione della loro dimensione[13].

Le ragioni fisiche di tale fenomeno sono da ricondursi all'esistenza di un elevato numero di magneti microscopici che lo compongono. In assenza di un campo magnetico esterno, le particelle mostrano la tendenza ad allinearsi parallelamente in una determinata area. In una data area, infatti, i magneti elementari sono orientati in un'unica direzione. Ponendo una barra di materiale ferromagnetico in un campo magnetico orientato parallelamente alla direzione longitudinale della barra stessa, si verificano delle variazioni di lunghezza della barra, come mostrato in figura 1.32.

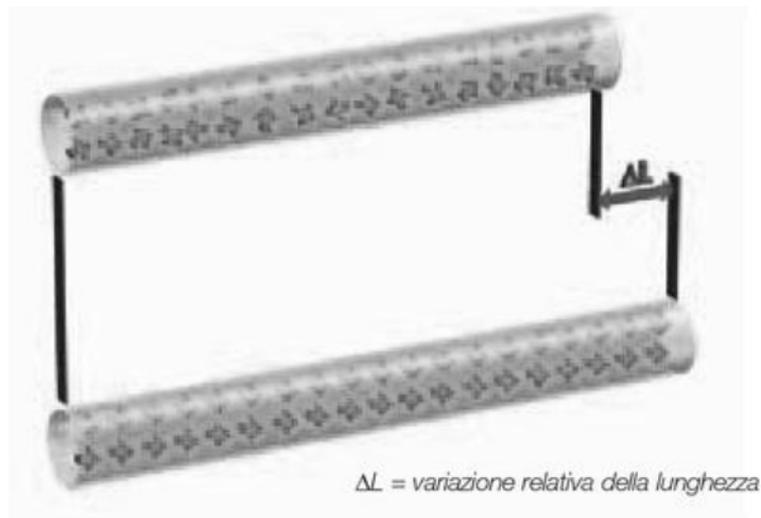


Figura 1.32: L'effetto magnetostrittivo  $\Delta L$  è dovuto all'orientamento delle micro aree sottoposte all'influenza del campo magnetico esterno parallelo alla barra[12]

L'effetto magnetostrittivo, come interazione di parametri magnetici e meccanici di materiali ferromagnetici, può essere ottimizzato selezionando e variando speciali leghe metalliche e controllando con precisione l'influenza del campo magnetico esterno.

I materiali magnetostrittivi possono convertire l'energia magnetica in energia cinetica, o l'inverso ed sono utilizzati per costruire attuatori e sensori. Questa proprietà può essere misurata dal coefficiente magnetostrittivo,  $L$ , che è il cambiamento frazionario di lunghezza, poiché la magnetizzazione del materiale aumenta da zero al valore di saturazione. I materiali magnetostrittivi, presentano caratteristiche per certi versi complementari ai materiali piezoelettrici e mostrano alcune proprietà fisiche, come un'elevata densità di energia disponibile e un tempo di vita praticamente infinito, che li rendono promettenti in diverse applicazioni tecnologiche. Essi sono costituiti da una lega di FeTb, oppure ZnTb, e sono stati sviluppati alla fine degli anni '60 nei laboratori della marina USA proprio come possibile alternativa ai piezoelettrici. Nell'ultimo decennio, si è assistito alla presentazione di una grande quantità di studi in cui essi sono stati proposti e utilizzati come elementi attivi in diverse applicazioni quali, ad esempio, attuatori per micro

posizionamento (robotica, meccanica di precisione), nel controllo attivo delle vibrazioni in avionica (equipaggiamenti elettronici installati a bordo degli aeromobili e preposti al pilotaggio) e nella produzione di ultrasuoni. La loro integrazione con tecnologie in fibra ottica per la misura di deformazioni permetterebbe anche la realizzazione di array di sensori di campo magnetico per applicazioni in ambienti elettromagneticamente ostili, o più semplicemente per la realizzazione di sensori di forza e posizione. Inoltre, anche se i materiali magnetostrittivi vengono in genere impiegati sfruttando la deformazione in risposta al campo magnetico, essi possono produrre un campo magnetico mediante l'impiego di una sorgente primaria di energia meccanica (effetto Villari). Utilizzare tale effetto, permetterebbe lo sfruttamento di una sorgente di energia meccanica tempo variante per produrre flusso magnetico, e quindi energia, in una bobina. Di conseguenza, un siffatto dispositivo sarebbe in grado di convertire energia meccanica in energia elettrica, trovando applicazione laddove è più difficile disporre di sorgenti d'energia convenzionali oppure dove delle vibrazioni meccaniche indesiderate possono essere utilmente convertite in energia elettrica. C'è da aggiungere, però, che tutti i materiali che rispondono con una deformazione elastica a un campo applicato, manifestano un comportamento isteretico che peggiora le prestazioni di un eventuale sistema di controllo. A tale scopo, negli ultimi anni, molti gruppi di ricerca hanno posto enfasi notevole al problema del controllo di attuatori/sensori che impiegano materiali magnetostrittivi. Uno dei problemi da affrontare, nel loro controllo, consiste, infatti, nel modellare e compensare adeguatamente l'isteresi che emerge dal legame complessivo I/O del dispositivo in esame. Le variabili meccaniche (carico e deformazione) e magnetiche (campo e induzione) se, da una parte permettono una notevole versatilità nelle applicazioni, dall'altra rendono la modellizzazione dei dispositivi magnetostrittivi abbastanza complessa, perché, di fatto, bisogna tener conto di due ingressi e due uscite, che cambiano secondo le applicazioni. La conoscenza delle caratteristiche magnetoelastiche ed elastomeccaniche, assieme ai modelli d'isteresi sviluppati, permette di effettuare la compensazione delle non linearità e dell'isteresi e di

realizzare algoritmi di controllo in grado di operare in “realtime” e tenendo conto di eventuali variazioni dello stress meccanico applicato al dispositivo. Nella letteratura scientifica recente si trovano modelli lineari sia per i piezoelettrici sia per i magnetostrittivi, dove si effettuano analisi elettromagnetiche per includere, ad esempio, l'effetto delle correnti parassite. L'ipotesi di accoppiamento magnetomeccanico lineare permette una semplice comprensione del fenomeno di conversione e la creazione di semplici circuiti elettrici equivalenti, analoghi a doppi bipoli lineari, dove si può effettuare una prima ottimizzazione dell'interfaccia con il circuito elettrico esterno. D'altra parte la modellizzazione lineare ha anche degli svantaggi perché bisogna ipotizzare piccole variazioni delle variabili meccaniche dal momento che si trascura sia la saturazione magnetica del materiale sia la dipendenza dal carico meccanico applicato dei coefficienti di accoppiamento. Una modellazione non lineare e con isteresi mostra invece l'influenza di questi e altri parametri sul meccanismo di conversione dell'energia. Ad esempio, un bias magnetico applicato al materiale o un carico meccanico costante (pre-stress) influenzano sensibilmente la potenza convertita. Inoltre, è evidente che la potenza convertita cresce con la frequenza delle vibrazioni meccaniche ma questo meccanismo può non essere sufficiente a frequenze di qualche decina di Hz. In tal caso, s'include un risonatore meccanico, nella forma di un sistema massa-molla o un cantilever. In realtà questa soluzione permette di massimizzare la potenza convertita a una sola frequenza e non è utile quando si utilizzano vibrazioni in un ampio intervallo di frequenze. Una soluzione abbastanza semplice consiste nell'inserimento di un condensatore, nel circuito elettrico a valle del dispositivo, la cui capacità possa essere variata in modo da poter adattare la risonanza alla frequenza delle vibrazioni. In figura 1.33 è mostrato lo schema di principio del dispositivo: la barra di materiale magnetostrittivo è sottoposta alle vibrazioni indotte da una sorgente meccanica e l'avvolgimento è chiuso sul carico resistivo da alimentare e sul condensatore. Il generatore di corrente simula l'effetto di bias magnetico di un magnete permanente. Viene riportata anche la potenza convertita rispetto alla frequenza delle vibrazioni e

al variare del bias magnetico. Si noti che la risonanza indotta dal condensatore dipende dal bias applicato.

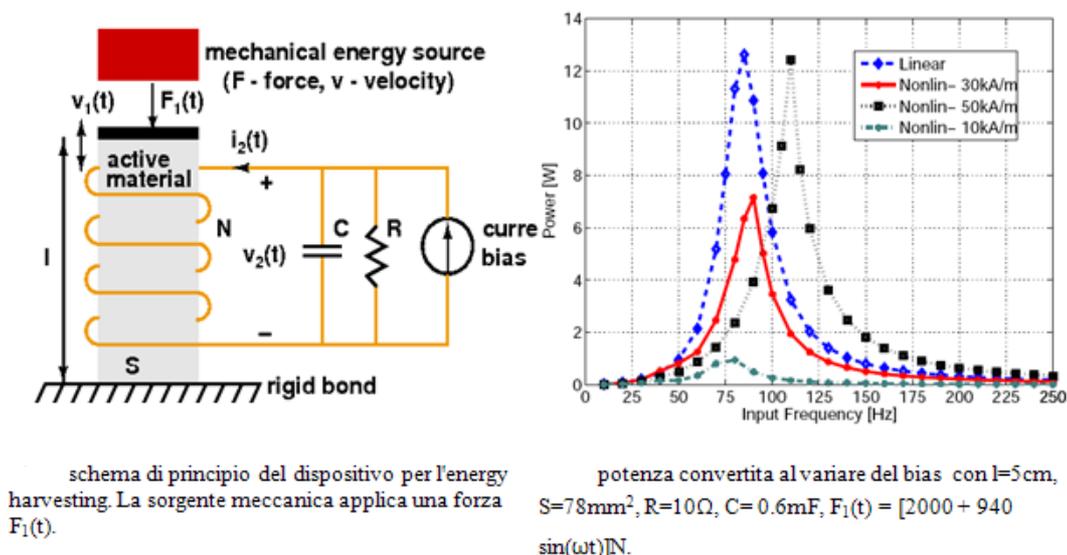


Figura 1.33: Schema di funzionamento di un dispositivo magnetostrittivo

E' possibile considerare anche l'applicazione delle proprietà magnetiche agli FRP che sono considerati magneticamente inerti. Con lo sviluppo del concetto di compositi polimerici multifunzionali (Curtis 1996), i ricercatori hanno studiato infatti, la possibilità di aggiungere funzionalità magnetiche. Ottenere FRP con proprietà magnetiche controllabili consentirebbe molte applicazioni. Noor (2000) suggerisce la possibilità di generare una deformazione strutturale dovuta alla applicazione di un campo magnetico, per utilizzare sensori in grado di reagire ad un campo elettromagnetico.

Altre applicazioni invece prevedono la produzione di energia nella struttura in movimento.

Le soluzioni più adottate sono:

- introdurre fili metallici all'interno delle strutture FRP per generare il campo magnetico. I laminati in questo caso potrebbero fungere anche da induttivo riscaldatore in un campo magnetico esterno e quindi

contribuire ad una autorigenerazione funzionale. È necessario in questo caso, però modificare la struttura del composito per consentire l'inserimento dei fili e delle particelle, mantenendo inalterate le proprietà strutturali;

- si utilizzano fibre cave di vetro, all'interno delle quali si inseriscono sospensioni di materiali magnetici che devono avere idonee proprietà fisiche, come mostrato in figura 1.34;

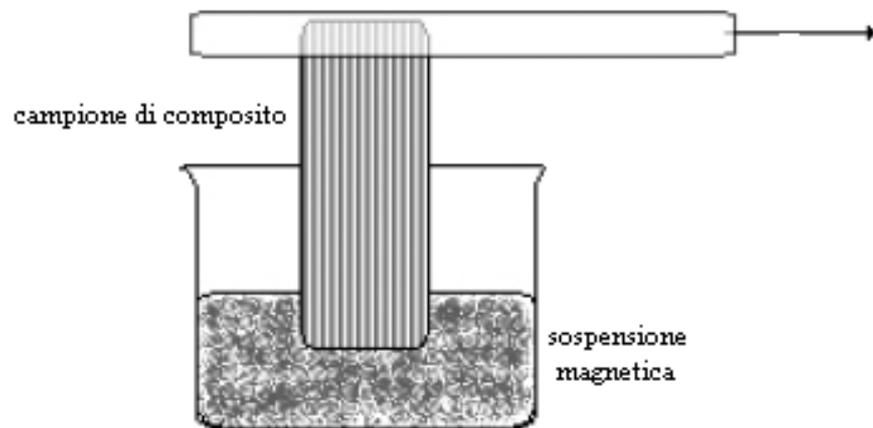


Figura 1.34: Introduzione di fibre cave di vetro in cui si inseriscono sospensioni di materiali magnetici

I materiali magnetostrittivi, come il Terfenol-D si allungano quando esposti ad un campo magnetico. Questi materiali generano basse deformazioni e forze moderate su una vasta gamma di frequenze. I problemi di questi materiali risiede nelle elevate dimensioni necessarie per le applicazioni.

## **Capitolo2:**

### **MONITORAGGIO E STRUTTURE “INTELLIGENTI”**

#### **2.1 INTRODUZIONE**

Si presenta spesso la necessità di monitorare strutture di varia tipologia che, per loro natura, non devono variare nel tempo la loro posizione nello spazio, le dimensioni e la forma, oppure, in condizioni normali, devono presentare variazioni entro limiti prefissati in base alle caratteristiche di progetto e alla tecnologia costruttiva. Nascono pertanto una serie di metodologie che permettono oggi di affrontare con ottimi risultati tutto ciò che riguarda la valutazione e il controllo temporale di strutture, parti di esse e l'insieme struttura-terreno di fondazione. Tutti i collassi strutturali sono, infatti, preceduti da deformazioni e movimenti con andamenti caratteristici in funzione del tempo ed, in tal senso il monitoraggio si prefigge l'obiettivo di raccogliere dati temporali a costi relativamente bassi e con frequenza di misura variabile e programmabile in funzione della specifica applicazione e con una precisione adeguata allo scopo[17].

Il monitoraggio strutturale rappresenta il più moderno e indicato approccio per evitare i numerosi incidenti e disastri conseguenti:

- all'invecchiamento fisiologico dei manufatti;
- a eventi naturali (quali frane, sismi, fenomeni di subsidenza);
- a cattivi criteri di costruzione;

La necessità di monitorare edifici e opere infrastrutturali in genere, sta diventando sempre più importante. Il monitoraggio consente la misurazione, periodica o continua, del comportamento degli elementi la cui integrità è vitale per la sicurezza delle strutture civili.

In una situazione in cui non sono disponibili le risorse economiche per la messa in sicurezza degli edifici, o nella quale per motivi di tutela del patrimonio storico-artistico non sono possibili i massicci interventi necessari alla messa in sicurezza dei monumenti, si rende necessario, sempre più spesso,

utilizzare l'unico approccio scientifico che garantisce la salvaguardia della pubblica incolumità.

## **2.2 MONITORAGGIO STRUTTURALE**

Sempre più importante diventa al giorno d'oggi la stima dei livelli di funzionalità ed efficienza delle strutture.

Attualmente, un'ampia fetta del patrimonio edilizio pubblico e privato si trova in condizioni di scarsa conservazione e manutenzione, ed è caratterizzato da una non idoneità statica, derivante dalla forte diminuzione dei coefficienti di sicurezza. Il bisogno oggettivo di un controllo migliore delle strutture è quindi dovuto agli odierni casi di precarietà edilizie rilevati sempre più spesso nelle opere civili. Tale controllo viene applicato mediante un processo di monitoraggio e, per le nuove strutture, è da attuare sia durante l'esecuzione dell'opera che nell'arco della vita utile.. Queste operazioni permettono, con una modalità pianificata e non invasiva, di valutare nel corso del tempo di esercizio delle strutture i livelli di efficienza e di sicurezza previsti in progetto. Una soluzione innovativa non invasiva e tecnologicamente avanzata, è rappresentata dai sensori in fibra ottica i quali, forniscono un quadro integrale e preciso sullo stato di salute della struttura e sulla conservazione dei propri materiali. Il monitoraggio continuo e durevole delle strutture si sta imponendo con successo come uno dei mezzi gestionali indispensabili per assicurare la sicurezza in esercizio e per permettere un coordinamento efficace ed un'organizzazione economica valida degli interventi di manutenzione.

A lungo termine il monitoraggio strutturale, che ha bisogno di un sistema di misura preciso e solido (mediante l'uso di sensori), può diminuire la frequenza delle ispezioni visive; può essere un'efficace spalla ai sopralluoghi rafforzandone la loro attendibilità e infine può abbattere gli oneri d'ispezione orientandola nella direzione in cui è delimitato il danno. I dati di monitoraggio provenienti dalla rete di sensori interna alla struttura, possono essere letti ed elaborati in termini di gestione della struttura, perfezionando e ottimizzando la

qualità delle decisioni relative agli eventuali interventi. Il monitoraggio può segnalare rapidamente e in tempo utile un malfunzionamento strutturale fornendo informazioni affidabili.

Gli edifici antichi spesso presentano fessure di dimensioni ragguardevoli, di cui raramente si conosce l'origine e di cui è necessario prevedere l'evoluzione. La questione fondamentale cui rispondere, è se la lesione si è stabilizzata o se sta continuamente aumentando le sue dimensioni, segno che la causa del cedimento strutturale manifestatosi con la fessura è ancora presente. A causa dei movimenti molto lenti della fessura, che si rendono evidenti nel corso di anni e si sommano a effetti stagionali e climatici, non è facile dare una risposta chiara al quesito. Un sistema di monitoraggio a elevata risoluzione e in grado di fornire una misura continua è sicuramente di grande aiuto per fornire una valutazione corretta in tempi accettabili. I fenomeni molto lenti nel tempo, che quindi provocano una variazione molto piccola delle dimensioni della fessura durante il periodo di osservazione, possono essere misurati con accuratezza ed eventualmene correlati con eventi e situazioni ambientali particolari.

I sensori a fibra ottica FBG possono essere installati direttamente sulla fessura – in questo caso agiscono come *fessurimetro* - con la stessa tecnica di vincolo proposta per gli affreschi, oppure applicati a trasduttori, costituiti essenzialmente da barrette metalliche di opportune dimensioni, che a loro volta vengono fissati sulla struttura con tasselli. Considerando che le misure vengono effettuate in “continuo” data la lentezza dei fenomeni da indagare, si possono ottenere risoluzioni della misura migliori di  $0,1 \mu\text{m}$  ( $10^{-7}$  m). E' evidente che adottando questo tipo di tecnologia si possono mettere in evidenza informazioni che con altri strumenti di misura (ad es. il distanziometro, che ha una risoluzione di  $10 \mu\text{m}$ ) resterebbero nascoste.

Un aspetto importante riguarda l'accessibilità alle fessure, che spesso sono localizzate a grandi altezze come mostrato in figura 2.1:



*Fessura sulla parete esterna di una chiesa parrocchiale: l'accesso alla zona richiede l'ausilio di ponteggi o mezzi di sollevamento.*

Figura2.1: Esempio di struttura danneggiata[28]

L'utilizzo di sensori FBG permette di posizionare l'unità elettronica di controllo in una posizione facilmente accessibile, anche a notevole distanza dalla fessura, evitando l'impiego ripetuto di mezzi di sollevamento o protezione per chi effettua le misure. Lo stesso tipo di tecnica può essere applicato per il monitoraggio di stabilità di strutture verticali, ad esempio pareti o colonne: lo spostamento dalla verticale – in questo caso la funzione svolta è di ***misuratore di fuori piombo*** - può essere misurato con trasduttori che impiegano sensori FBG per leggere sia le deformazioni, sia lo spostamento dalla verticale di una massa nota, produce sul braccio che sostiene la massa stessa. Dimensionando opportunamente la massa e il braccio di sostegno si può tarare la sensibilità del trasduttore. La misura della variazione d'inclinazione tra un piano di riferimento e un piano soggetto a movimenti - la funzione svolta è di ***inclinometro*** relativo – si effettua fissando il sensore FBG all'asta verticale di un profilato metallico ad L, la cui base presa come riferimento viene fissata ad

esempio al pavimento, mentre la parte verticale è vincolata alla parete che è sottoposta all'inclinazione progressiva. La misura della deformazione dell'asta verticale viene convertita in inclinazione. I sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg (FBG) sono una realtà promettente nel vasto campo dei sensori ottici. La diffusione di sistemi di misura commerciali permette di valutare appieno concrete applicazioni di questa tecnologia innovativa. Grazie alla loro versatilità d'impiego e alle loro caratteristiche tecniche possono essere impiegati nella diagnostica strutturale di beni architettonici e artistici, con evidenti vantaggi, rispetto agli strumenti tradizionali, dal punto di vista della semplicità d'installazione, del trasferimento dei dati, della precisione delle misure, della bassa intrusività. I sensori FBG offrono quindi l'opportunità di ridurre il costo del monitoraggio, riducendo la necessità di intervento del personale in loco e delle relative attrezzature di supporto e ottimizzando i tempi di osservazione dei fenomeni. La maggiore qualità dei dati raccolti consente di individuare con maggior precisione e rapidità gli interventi necessari al consolidamento delle strutture e la loro efficacia. L'impiego di sensori FBG rappresenta quindi un indubbio salto di qualità nel monitoraggio strutturale. La capacità di analisi e di monitoraggio del comportamento di strutture, anche molto estese, che presentano elementi di criticità importanti è ritenuta, dagli stessi progettisti, una problematica di sempre maggiore importanza. Normalmente, nelle applicazioni civili, le caratteristiche strutturali sono un parametro di progetto ed eventuali incertezze sono tenute sotto controllo per mezzo di fattori di sicurezza. La valutazione quantitativa dei parametri di progetto viene comunemente eseguita effettuando, al momento del collaudo, delle prove di carico; in seguito la struttura viene controllata, durante l'esercizio, mediante ispezioni periodiche. Lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi di monitoraggio strutturale offre l'opportunità di valutare con continuità ed in tempo reale le caratteristiche strutturali e la loro degradazione durante il tempo di vita della struttura stessa. Alcuni importanti risultati che si possono ottenere implementando dei sistemi di monitoraggio strutturale sono l'aumento del livello di sicurezza, dovuto essenzialmente ad un monitoraggio continuo nel

tempo al posto di una semplice stima dell'evoluzione dei danni, e la riduzione dei costi di manutenzione, dovuta all'ottimizzazione degli interventi. Si possono avere anche dei miglioramenti a livello di progettazione e modellizzazione, sfruttando la maggiore conoscenza del comportamento delle strutture in opera. Molte applicazioni, attualmente, si occupano del controllo del comportamento delle strutture, al fine di valutare la degradazione delle prestazioni: in questa direzione, la nuova frontiera è rappresentata dai sensori in fibra ottica. Infatti, oltre che nel campo delle telecomunicazioni, le fibre ottiche sono usate da tempo anche nella realizzazione di sensori per le loro proprietà di minima invasività, elevata sensibilità, sostanziale immunità alle interferenze elettromagnetiche, elevato grado di integrabilità con le strutture da controllare, resistenza alla corrosione e facilità di multiplexing. L'utilizzo di sensori in fibra ottica, permanentemente connessi alle strutture da monitorare, consente la realizzazione delle cosiddette 'strutture intelligenti', strutture capaci in pratica di fornire informazioni sul loro stato e sulla loro integrità. Le fibre ottiche consentono, pertanto, di verificare l'affidabilità di una struttura durante la sua vita operativa, rappresentando un sistema di monitoraggio permanente, in grado anche di generare allarmi nel caso si verificano condizioni critiche. Negli ultimi anni è stata rivolta particolare attenzione a sensori in fibra ottica di tipo innovativo come, ad esempio, i reticoli di Bragg integrati nelle fibre stesse, che consentono di eseguire misure puntuali. Essi sono semplici dal punto di vista costruttivo e, essendo incisi sulla fibra ottica, si prestano ad una facile integrazione con le strutture da controllare, contrariamente ad altri tipi di sensori in fibra che richiedono l'aggiunta di specchi o strutture interferometri che esterne. Tuttavia, i sensori di Bragg non si prestano a misure spazialmente distribuite su grandi distanze. Oltre ai sensori che effettuano misure puntuali, è molto forte l'interesse verso sensori a carattere distribuito in grado di lavorare anche su grandi distanze.

## 2.3 “STRUTTURE INTELLIGENTI”

### 2.3.1 Definizione di “struttura intelligente”

Con lo sviluppo della tecnologia e l'introduzione dell'elettronica negli oggetti di uso quotidiano, si è diffusa l'abitudine di attribuire l'aggettivo “intelligente” a molte attività, processi e perfino agli oggetti stessi. Oggigiorno si possono trovare in letteratura riferimenti ad un intero edificio cosiddetto “intelligente”.

Il termine “edificio intelligente” è stato usato per la prima volta negli USA all'inizio degli anni '80; la definizione che diede l'Intelligent Building Institution di Washington è la seguente: *“An intelligent building is one which integrates various system to effectively manage resources in a coordinated mode to maximise technical performances, investment and operating cost savings, flexibility”* (“ Un edificio intelligente è un sistema che integra varie modalità per gestire efficacemente le risorse in modo coordinato per massimizzare le prestazioni tecniche, investimenti e risparmi sui costi operativi, flessibilità ”)[14].

Una definizione più recente e più articolata è quella del CIB Working Group : *“An intelligent building is a dynamic and responsive architecture that provides every occupant with productive, cost effective and environmentally approved conditions through a continuous interaction among its four basic elements : Places (fabric, structure, facilities) Processes (automation, control, systems): People (services, users) and Management (maintenance, performance) and the interrelation between them”*. Il concetto di edificio intelligente è dunque più ampio di quello che si riferisce a un edificio capace di rispondere in maniera autonoma ad input di base quali l'intrusione, l'innalzamento o abbassamento di temperatura in uno o più ambienti, la presenza di gas nocivi, imposizione di cedimenti o flessione nel piano. Le possibilità offerte da un mercato che produce elaboratori elettronici sempre più piccoli e potenti e sensori/trasduttori integrati capaci di comunicare con i sistemi computerizzati, fanno intravedere la possibilità di giungere ad un edificio che più che “intelligente” sia piuttosto “consapevole” dei suoi rapporti energetici con il mondo esterno.

L'edificio “*energy conscious*” potrebbe essere dotato al suo interno dei più svariati sensori di grandezze fisiche senza eccessive complicazioni di impianto o enormi masse di fili da gestire.

Una “struttura intelligente” è capace di auto controllarsi e di reagire alle sollecitazioni(ambientali o antropiche): i sensori percepiscono cosa sta accadendo alla struttura e quest’ultima reagisce alle azioni mediante l’uso di attuatori che la riportano alle condizioni di esercizio.

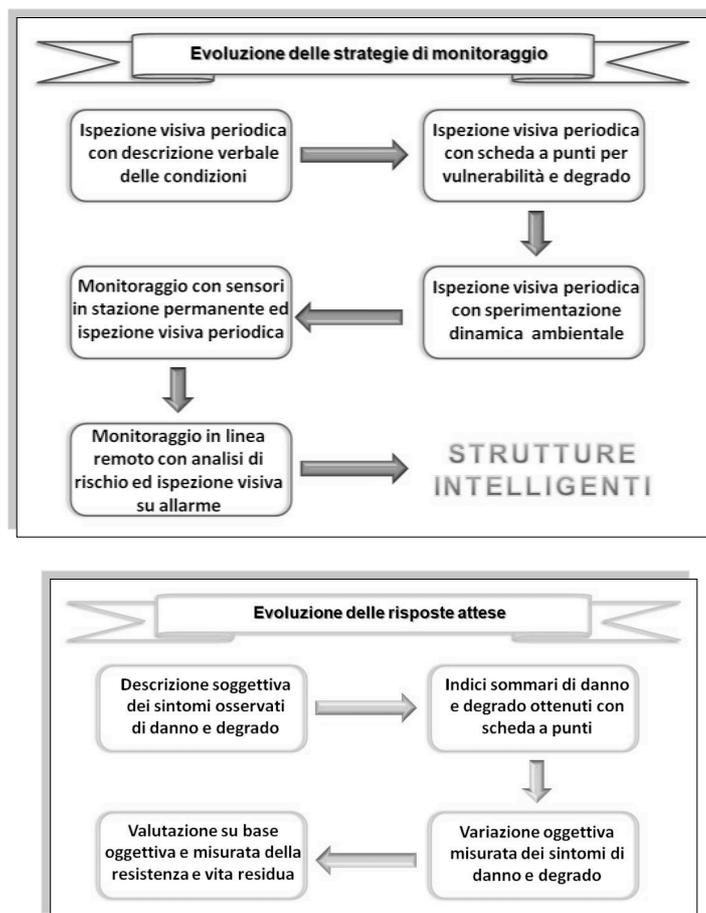


Figura2.2: Schematizzazione strategia di monitoraggio e risposte attese

Gli obiettivi di una ricerca sull'edificio intelligente potrebbero essere così sintetizzati:

- identificare e fornire all'elaboratore destinato a gestire la serie più idonea di dati di base sulla posizione topografica dell' edificio i dati istantanei delle grandezze meteorologiche esterne e di qualità dell'aria;
- definire il comportamento termico dell'edificio in regime vario, tramite la creazione di un modello matematico dell'edificio che possa essere utilizzato in tempo reale per ricavare la risposta dell'edificio alle sollecitazioni esterne. Per essere utile ed efficace questo modello deve essere costruito in base alla conoscenza approfondita delle caratteristiche termofisiche dei componenti di base.
- individuare il comportamento degli occupanti dell'edificio e le loro abitudini non escludendo la possibilità di autoapprendimento da parte del sistema;
- identificare gli algoritmi che possano consentire all'unità centrale, in correlazione con i dati posseduti, di determinare le migliori condizioni per gli occupanti;
- tenere conto delle necessità di comunicare all'utente le situazioni anomale o di allarme mediante sistemi remoti basati, ad esempio, sulla rete di comunicazione GSM (dal semplice SMS al collegamento audio e video)

Da quanto esposto sopra è evidente che alla progettazione ed alla gestione di un edificio intelligente concorrono numerose discipline appartenenti non solo all'ingegneria ed all'architettura, ma anche ad altri campi che vanno dalla meteorologia, all'informatica, dalla psicologia all'economia, solo per citare i più rilevanti.

E' necessario, peraltro sottolineare che qualsiasi studio si voglia condurre sulle interazioni tra l'edificio e l'ambiente circostante, tra la risposta dell'involucro alle variazioni delle condizioni esterne, tra la risposta degli occupanti al

comportamento dell'edificio, non si può prescindere dalla conoscenza precisa e puntuale dei dati sperimentali necessari per condurre una analisi che sarà tanto più precisa ed affidabile quanto più piccola sarà la scala alla quale i dati saranno stati ottenuti.

### **2.3.2 Descrizione componenti che costituiscono una “struttura intelligente”**

In generale, una struttura intelligente ha la capacità di rispondere in maniera differente in funzione di ciò che accade intorno, sia per quanto riguarda l'ambiente esterno (carichi) che per quello interno (danni e collassi locali). Scendendo più nel dettaglio, una struttura intelligente incorpora, mediante gli attuatori, materiali intelligenti in grado di cambiare le proprie caratteristiche (come modulo di Young, viscosità, ecc.) quando soggetti ad un campo esterno (come quello elettrico, magnetico o termico). Sono molte le tipologie di attuatori e sensori che cominciano a diffondersi nel campo delle costruzioni, come i materiali **piezoelettrici**, le **leghe a memoria di forma**, gli elettrostrittivi (ovvero che si deformano sotto l'azione di un campo elettrico), i **magnetostrittivi** (si deformano sotto l'azione di un campo magnetico), fluidi **elettroreologici** e **fibre ottiche**. Questi materiali possono essere integrati con la struttura senza dar luogo a nessun cambiamento significativo al sistema o alla rigidità strutturale. Tra questi i piezoelettrici sono i più diffusi. Si distingue tra:

- Un materiale piezoelettrico, che è soggetto a deformazioni quando viene applicato un campo elettrico nelle sue vicinanze. La deformazione dà luogo a un potenziale e quindi il materiale può essere usato sia come attuttore che come sensore. Sotto l'effetto del campo applicato, questi materiali generano deformazioni molto basse, ma possono coprire un'ampia gamma di frequenze di attuazione. La tipologia più diffusa è la piezoceramica (in particolare il **PZT**) e si trova nella forma di fogli sottili.

- Tra i materiali intelligenti, le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloys* – SMA) risultano particolarmente interessanti come attuatori grazie alla possibilità di ottenere elevate forze e spostamenti. Questi metalli subiscono una trasformazione di fase a specifiche temperature. In particolare, quando si deformano plasticamente a basse temperature, queste leghe ritornano alla loro condizione indeformata non appena la temperatura si discosta da quella alla quale avviene la trasformazione. Tale processo è ripetibile più volte. Il materiale più diffuso è il **Nitinol** (leghe in nickel e titanio) ed è disponibile nella forma di cavi di vari diametri. Il riscaldamento può essere ottenuto sia internamente (usando resistenze elettriche) che esternamente (fornendo calore).
- I materiali **elettrostrittivi** sopportano allungamenti in presenza di campi elettrici mostrando una capacità di deformazione leggermente migliore rispetto ai piezoelettrici, ma sono sensibili alla temperatura. La maggior parte delle applicazioni che fanno ricorso a questi materiali sono destinate ad ambiente sottomarino. I materiali **magnetostrittivi** come il Terfenol-D si allungano quando esposti ad un campo magnetico. Questi materiali generano basse deformazioni e forze moderate su una vasta gamma di frequenze. Il problema di questi materiali risiede nelle elevate dimensioni necessarie per le applicazioni.
- I fluidi **elettroreologici** e quelli **magnetoreologici** operano mediante sospensione di piccole particelle nel fluido e nel cambiamento delle loro caratteristiche (viscosità e rigidità) rispettivamente sotto campo elettrico e campo magnetico. Questi fluidi sono usati in particolar modo per realizzare gli smorzatori.

Una struttura intelligente incorpora una distribuzione di attuatori e sensori, così come integratori e circuiti elettronici. Vi sono vari tipi di struttura:

- **Strutture adattive:** sono quelle che presentano degli attuatori in modo da alterare le caratteristiche nella maniera prescritta. Possono non

presentare sensori. Esempi tipici sono le ali degli aerei con i deflettori e gli alettoni, ed i rotori con i servo-deflettori.

- **Strutture sensoriali:** sono quelle che presentano una distribuzione di sensori in modo da monitorare le caratteristiche della struttura (monitoraggio di stato). I sensori possono anche rilevare deformazioni, spostamenti, accelerazioni, temperatura, proprietà elettromagnetica e livello di danno.
- **Strutture controllate:** sono un misto di strutture adattive e sensoriali. Queste presentano sia attuatori che sensori e hanno un sistema di controllo della risposta per controllare attivamente le caratteristiche della struttura.
- **Strutture attive:** sono una sottocategoria delle strutture controllate. Gli attuatori integrati ed i sensori hanno capacità portante (funzioni strutturali).
- **Strutture intelligenti:** sono una sottocategoria delle strutture attive. Queste presentano, integrato aggiuntivamente, un sistema di controllo di tipo logico ed una serie di dispositivi elettronici.

I fattori chiave per la realizzazione di strutture intelligenti tecnologicamente avanzate sono:

- Structural Health Monitoring (SHM): sistema ispirato al nostro sistema nervoso che è in grado di diagnosticare in maniera automatica lo stato di salute della struttura monitorata, mediante l'impiego di una rete di sensori con la capacità di produrre mappe di deformazioni, distribuzioni termiche, rilevamenti di vibrazioni, fessurazioni e di localizzare danni più o meno gravi.
- Controllo adattivo: il cervello del materiale con la capacità di confrontare e interpretare i dati raccolti dai sensori e di conseguenza decidere come agire sulla rete di attuatori che possono modificare le caratteristiche statiche di ogni elemento strutturale.

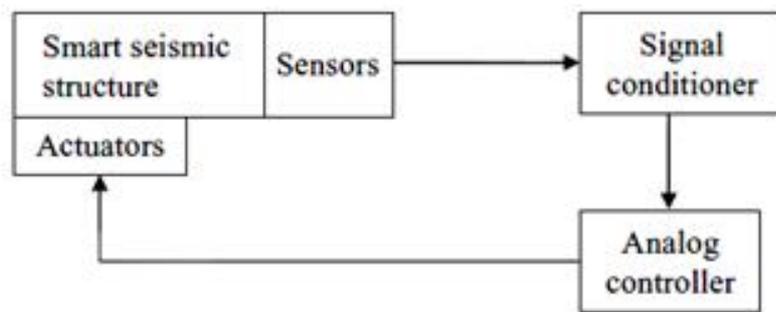
- Materiali avanzati: materiali tecnologici compatibili sia con la rete sensoriale che quella di attuazione; materiali con la capacità di modificare con la temperatura la propria forma geometrica (per esempio le leghe a memoria di forma).
- Nuovi sensori integrabili: le nuove classi di sensori, in particolare quelli in fibra ottica, si fondono alla struttura senza introdurre in alcun modo sollecitazioni parassite o ulteriori sforzi interni.

In sostanza per ottenere un sistema di monitoraggio permanente ed intelligente occorre disporre di *sensori* installati nella struttura che rilevano i vari fenomeni fisici, di una *centralina di acquisizione dati* o sistema di rivelazione per recepire i dati dei sensori, inviarli a centraline periferiche che eventualmente amplificano il segnale di trasmissione e lo mandano infine ad un'*unità centrale* la quale serve per la raccolta definitiva, il controllo e la lavorazione dei rilevamenti. Quest'ultima è in grado quindi di interpretare i vari segnali dei sensori per l'individuazione della posizione e dell'entità del danno.

Per concludere, un sistema di monitoraggio di salute strutturale (SHM), riesce quindi a rilevare un danneggiamento, localizzarlo, definirne la gravità e le eventuali conseguenze.

Le *smart structures* possono essere impiegate nelle costruzioni per ottenere quello che viene definito "*isolamento sismico intelligente*". In alcune situazioni catastrofiche (come il terremoto di Northridge) si è visto che il *base isolation*, per quanto efficace possa essere, soffre i moti impulsivi generati da sismi con epicentro vicino (*near-fault*); questo ha fatto sì che si adottassero misure più restrittive nelle normative in modo da cautelarsi nei confronti di questi eventi (si vedano le modifiche all'*Uniform Building Code* comparando la versione del 1994 con quella del 1997). I requisiti più severi hanno fatto sì che aumentasse il costo dell'isolamento sismico, richiedendo maggiori spostamenti e la necessità di dispositivi di smorzamento supplementari. Si registra un

incremento di accelerazioni ai piani alti, che può comportare problemi al contenuto. Se anche la struttura riesce a superare il sisma indenne, infatti, le apparecchiature possono essere danneggiate al punto da rendere inservibile l'opera, quale può essere un ospedale. Ad esempio, alcune delle strutture isolate sismicamente durante l'evento di Northridge divennero non operative non per i danni strutturali, ma per l'allagamento causato dalla rottura delle tubazioni interne. Le ricerche attuali, quindi, tendono ad un maggiore controllo della risposta, che possa unire una diminuzione del taglio alla base con basse accelerazioni di piano . In realtà i sistemi a controllo attivo della risposta sono già esistenti, ma comportano un notevole consumo di energia e la necessità di impiegare costosi sistemi di continuità in caso di black-out. L'isolamento sismico intelligente, nato proprio dalle ricerche suddette, cerca di unire i benefici del controllo passivo (isolamento sismico) con quelli del controllo attivo, quindi mantenendo basse le richieste di energia. Sono riportati gli schemi di funzionamento di questi dispositivi. Si può avere sistema con controllo analogico(a), oppure un sistema con controllo digitale(b). Nel primo caso i sensori posti sulla struttura rilevano le condizioni ambientali, dopodiché viene emesso un segnale ricevuto dal controllore analogico, il quale invia i dati all'attuatore che a sua volta modifica le caratteristiche del sistema per ottenere la migliore risposta possibile. Nel secondo schema il segnale viene prima convertito da analogico a digitale, poi viene ricevuto dal controllore, di tipo digitale, successivamente riconvertito in analogico e poi inviato agli attuatori.



(a)

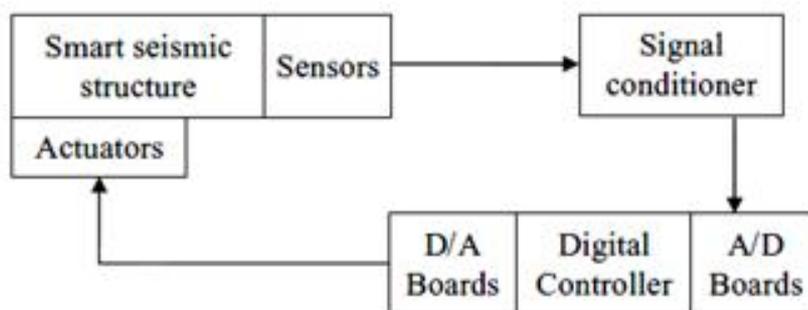


Figura2.3: Schema di funzionamento dei dissipatori intelligenti[18]

### 2.3.3 SHM: Applicazioni pratiche

Alcuni casi pratici di monitoraggio intelligente in ambito civile, di cui si discuterà più approfonditamente nei capitoli successivi, si possono trovare nei ponti, negli edifici, nelle dighe, nelle gallerie e nelle tubazioni.

Il ponte di Siggenthal in Svizzera per esempio, in figura 2.4, è un ponte ad arco in calcestruzzo lungo 217 m, costruito sul fiume Limmat; all'interno di esso, annegati nel calcestruzzo, sono stati installati 58 sensori di deformazione, 2 inclinometri e 8 sensori di temperatura. Il sistema di monitoraggio installato ha lo scopo di controllare le deformazioni locali del calcestruzzo, misurare le curvature locali nel piano verticale e rilevare gli spostamenti verticali dell'arco portante.



Figura2.4: Ponte di Siggenthal in Svizzera con sensori annegati nel calcestruzzo[19]

Un altro esempio di Structural Health Monitoring tutto italiano applicato ad un vecchio edificio è quello del duomo di Como (fig.2.5) :



Figura2.5: Duomo di Como

Tale struttura storica è la prima cattedrale d'Europa dotata di un sistema di monitoraggio permanente costituito da 28 sensori a fibra ottica installati 16

punti critici, piazzati nel sottotetto, sulla facciata e tra le colonne principali. La precisione nella misura degli spostamenti, nonostante i 1000 metri di cavi ottici, è circa 2 micrometri, mentre quella sulle temperature è dell'ordine di 0.1°C. I cavi si dirigono tutti verso una centrale di acquisizione fornita di un demodulatore opto-elettronico e di un pc che controlla l'acquisizione dei dati e li trasmette ad un database esterno dove i progettisti possono accedere.

Per quanto concerne le gallerie, una parte di metropolitana a Milano è monitorata con 60 sensori posti a 13m sotto il piano campagna al fine di verificare le deformazioni di paratie appoggiate al rivestimento esterno del tunnel. Tali sensori sono stati collegati ai ferri di armatura delle paratie e della galleria prima del getto del cls e fanno capo ad un'unica centralina di misura.

I sensori a fibra ottica possono monitorare anche lunghe condotte idrauliche: in Indonesia per esempio una tubazione lunga più di 100Km è stata provvista di sensori di vibrazioni al fine di controllarne l'integrità in seguito a smottamenti, scavi e moti della crosta terrestre.

Un esempio invece di SHM per dighe, è quello della diga di Luzzone in Svizzera (figura2.6), la quale è monitorata mediante sensori in fibra ottica per controllare l'apertura delle fessure fra i conci di cls a breve ed a lungo termine.



Figura2.6: Diga di Luzzone in Svizzera

## **2.4 STRUTTURE BIO-ISPIRATE**

Il rapporto tra natura e ingegneria civile è sempre stato visto in termini di contrapposizione: le strutture devono resistere agli elementi della natura e i nuovi materiali sono concepiti per superare i limiti e raggiungere nuovi confini. Negli ultimi anni, un nuovo modo di concepire le strutture e i significativi progressi tecnologici hanno portato a vedere in maniera diversa il rapporto fra natura e ingegneria: l'interazione tra esseri viventi e ambiente può essere fonte di ispirazione[20].

L'ingegneria strutturale del futuro utilizzerà nuovi materiali capaci di svolgere una molteplicità di funzioni e applicherà nuovi concetti strutturali ispirati dall'osservazione degli esseri viventi. Questa nuova generazione di strutture sarà in grado di "percepire" l'ambiente esterno e le sollecitazioni da esso provenienti e di adattarsi a esse modificando la propria configurazione. Queste strutture saranno anche in grado di percepire se stesse, di effettuare sofisticate funzioni di auto-diagnosi e di auto-riparazione in maniera automatica. Si avrà inoltre la possibilità di operare un monitoraggio continuo ed in tempo reale, e di conoscere istante per istante quale sia lo stato di danno delle strutture e le eventuali necessità di intervento.

La consapevolezza dell'ambiente circostante e le sue condizioni sempre mutevoli, l'auto-consapevolezza, la capacità di adattarsi, reagire e apprendere potrà essere realizzata nelle strutture. I materiali e le strutture potranno essere pensati e progettati per soddisfare questi obiettivi rendendo le strutture non più passive, ma attive[21]. Le strutture bio-ispirate avranno una pelle, un sistema nervoso, un cervello e uno scheletro. La pelle fungerà da interfaccia con l'ambiente: i sensori raccoglieranno informazioni sulla temperatura e la pressione. I dati raccolti saranno trasferiti al cervello che li analizzerà e controllerà la reazione attiva che sarà ottenuta con una modifica dello scheletro.

Questa visione delle strutture è destinata a cambiare radicalmente la maniera di concepire le strutture civili nel futuro prossimo: sensori, attuatori, sistemi intelligenti non sono più elementi aggiunti ad una struttura passiva progettata

secondo i criteri tradizionali, ma sono parte integrante della progettazione della nuova struttura, ridefinendo la concezione strutturale, i metodi di calcolo, e i dettagli costruttivi.

Un esempio di architettura bio-ispirata è in Malaysia, teatro paradisiaco per le torri sostenibili Putrajaya progettate dallo studio italiano di architettura Manfredi Nicoletti in collaborazione con Hijjas Kasturi Associates.



Figura2.7: Esempio di struttura bio-ispirata in Malaysia,le tetti Putrajaya



Figura2.8: Complesso realizzato dall'architetto Manfredi

Otto elementi architettonici bioispirati. Stile ed eleganza per un'architettura contemporanea di impatto e memorabile. Dopo le incredibili Petrona's Twin Towers, la Malaysia ci stupisce con un nuovo complesso architettonico progettato, da uno studio italiano. E' lo studio Manfredi Nicoletti, autore di questo bellissimo progetto e di molti altri.

## **Capitolo3:**

### **ATTUATORI**

#### **3.1 INTRODUZIONE**

Con l'obiettivo di realizzare strutture attive, in grado cioè di adattarsi a diverse situazioni, si pone l'esigenza come già presentato nel capitolo precedente di un monitoraggio “intelligente”, che non si limiti a fornire informazioni, ma arrivi anche a fornire allarmi e intraprendere azioni. Una rete di sensori continuamente capta informazioni di vario tipo dalla struttura e le invia a un sistema che le elabora, le confronta con modelli precedentemente definiti e fornisce l'input per le azioni da intraprendere. Il passo successivo è legato agli **attuatori** di cui si parlerà di seguito, che reagendo alle informazioni ricevute dal sistema, svolgono azioni analoghe a quelle che l'apparato nervoso e muscolare svolgono negli organismi viventi, adattando la struttura a situazioni contingenti e variabili. A questo fine in alcune applicazioni strutturali vengono impiegati elementi esterni applicati alla struttura, con funzionamento meccanico o oleodinamico. L'impiego di materiali innovativi inoltre, indirizza oggi la ricerca verso l'impiego di sistemi meno invasivi. Gli attuatori più utilizzati sono quelli elettrostatici, elettromagnetici, idraulici.

#### **3.2 DEFINIZIONE DI ATTUATORE**

Un attuttore è un meccanismo attraverso cui un agente agisce su un ambiente mettendo qualcosa in azione automaticamente.

L'agente può essere o un agente intelligente artificiale o un qualsiasi altro essere autonomo (umano, animale).

In senso lato, un attuttore è talvolta definito come un qualsiasi dispositivo che converte dell'energia da una forma ad un'altra, in modo che questa agisca nell'ambiente fisico al posto dell'uomo.

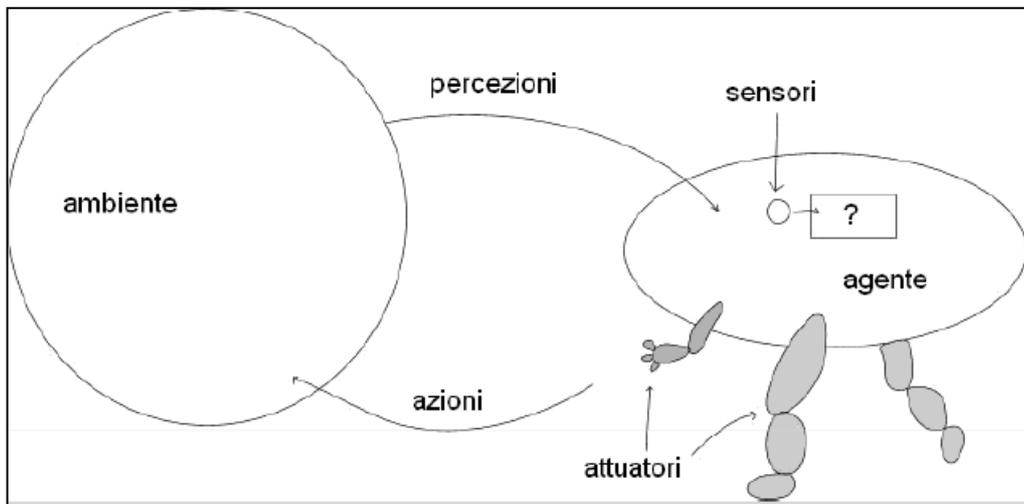


Figura3.1: Schematizzazione dell'interazione attuatori-sensori-ambiente esterno

Un robot ad esempio è visto come un agente che interagisce con il mondo circostante. Per fare ciò il robot si serve di due tipi di dispositivi: *i sensori* e gli *attuatori*. I sensori sono quei dispositivi che permettono al robot di percepire l'ambiente in cui è immerso, mentre gli attuatori gli permettono di agire sull'ambiente stesso. Nella figura 3.2 viene illustrato quanto è stato appena detto:

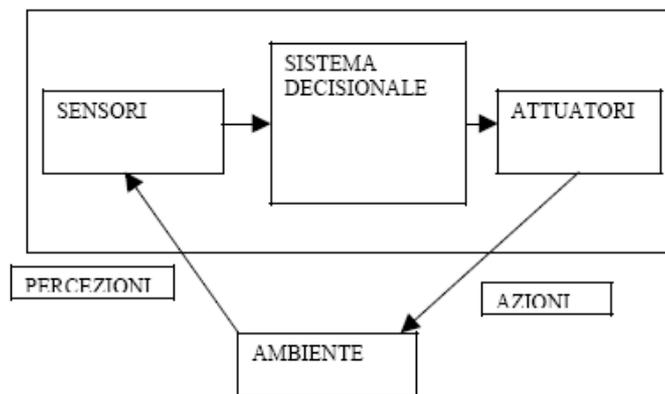


Figura3.2:Schema di interazione

Vengono classificati più frequentemente in base al tipo di energia utilizzata: idraulica, pneumatica, elettrica, meccanica, termica, etc...

### 3.3 CLASSIFICAZIONE PRINCIPALE

#### 3.3.1 Tipologia di attuatori

I principali e più utilizzati sono i microattuatori: elettrostatici, elettromagnetici, idraulici.

- **Elettrici**

Gli attuatori elettrici trovano utilizzo nell'automazione civile ed industriale, il loro principio di funzionamento è molto semplice, permettono il comando di un relè attraverso un input solitamente elettrico, possono essere gestiti in configurazione singola o multipla, tale gestione può avvenire tramite protocolli BUS o Wi-Fi, per la gestione singola si provvede a gestire ogni attuatore attraverso l'utilizzo del protocollo BUS che prevede un collegamento fisico tra tutti i componenti dell'impianto, mentre per la configurazione Wi-Fi vengono abolite le connessioni fisiche, ma la gestione viene fatta esclusivamente senza fili permettendo una flessibilità estrema dell'impianto.

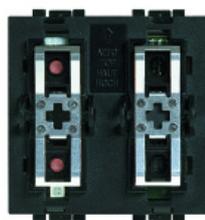


Figura3.3: attuatore elettrico a 2 relè

- **Elettromagnetici**

Gli attuatori elettromagnetici sono i più diffusi poiché offrono grandi vantaggi: permettono il controllo della forza e della velocità sia in corrente che in

tensione, hanno una risposta veloce, una bassa impedenza d'ingresso, un basso rumore e il loro assemblaggio non pone particolari problemi.

Il loro principio di funzionamento si basa sulla forza di Lorentz.

I problemi legati all'uso di questo dispositivo sono soprattutto relativi alla sua realizzabilità. L'intensità del campo magnetico generato è proporzionale al numero di spire che costituiscono l'avvolgimento e alla corrente circolante.

Le dimensioni molto ridotte dei cavi elettrici fanno sì che a parità di tensione, aumentando il numero di spire, si diminuisce la corrente circolante; nella maggior parte dei casi si è deciso quindi di utilizzare una bobina costituita da una singola spirale. Un altro inconveniente è la dissipazione di energia, che avviene nelle spire durante il mantenimento di una forza ad un valore costante.

Questi tipi di attuatori (con un diametro di 1,5 mm) sono in grado di generare una coppia di 1,2 N·m.

L'attuazione magnetica soffre di alcuni inconvenienti:

- ✓ Richiede il fissaggio di magneti permanenti agli specchi con conseguente degrado della qualità meccanica degli stessi e rischio di inquinamento nella fase di incollaggio;
- ✓ Risente dell'influenza dei campi magnetici esterni, provocando un disturbo che si manifesta come rumore di spostamento degli specchi con conseguente riduzione della sensibilità del rivelatore;

Una tecnica di attuazione alternativa è quella elettrostatica.

- **Elettrostatici**

I microattuatori elettrostatici sono semplici da realizzare e con essi si possono ottenere elevate velocità di rotazione. Un attuatore elettrostatico è costituito da una sequenza di elettrodi polarizzati alternativamente. Le applicazioni vanno dagli interruttori elettromeccanici e relays, agli interruttori ottici, display, valvole, ad attuatori per il controllo di flusso. Sono costituiti da due piatti piani paralleli il cui principio di funzionamento si basa direttamente sul principio della forza di Coulomb. Queste forze che definiscono un'attrazione fra due

corpi aventi cariche opposte, tendono a riallineare i piatti dopo che tra di essi è avvenuto uno spostamento relativo.

I vantaggi di questa tecnica di attuazione sono:

- ✓ Assenza dei magneti sugli specchi: migliore pulizia e migliore qualità meccanica dello specchio;
- ✓ Attuazione Elettrica invece che magnetica: forte riduzione dell'influenza dei campi elettrici esterni: le sospensioni sono poste in camere da vuoto metalliche che fanno anche da gabbia di Faraday;

Svantaggi:

- ✓ Risposta non lineare nella tensione;
- ✓ Influenza delle cariche elettriche che possono depositarsi sulla massa;

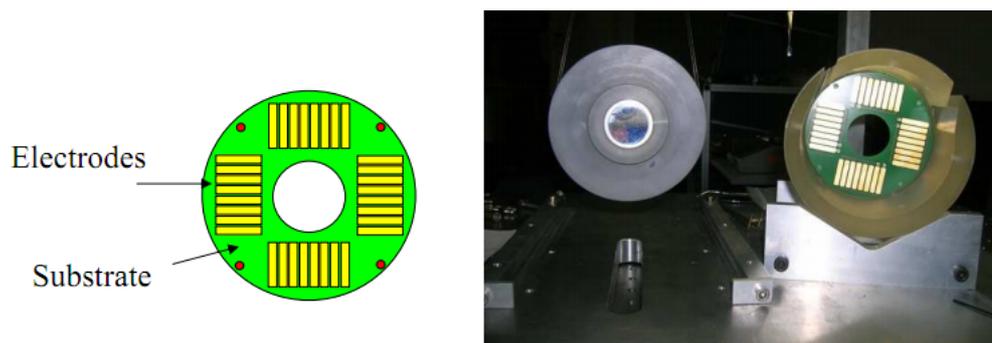


Figura3.4: Attuatore elettrostatico

- **Idraulici**

Gli attuatori idraulici riescono a generare una forza maggiore (a parità di volume) rispetto agli altri attuatori.

Si distinguono in tre tipi: a pistone, a camera elastica, a turbina.

- Il tipo a pistone ha lo svantaggio di introdurre attriti ed ha la necessità di essere sigillato.
- Gli attuatori elastici sono formati da un tubo cilindrico al cui interno sono ricavate tre camere parallele e le cui pressioni vengono controllate

separatamente. Una differente pressione nelle camere fa sì che il tubo si incurvi verso la camera a minore pressione. Questo tipo di attuatore idraulico non soffre dei problemi dovuti all'attrito.

- Gli attuatori del tipo a microturbine infine sono molto facili da realizzare ma hanno un'efficienza ridotta e riscontrano a causa dell'attrito.

### **3.3.2 Materiali utilizzati per la realizzazione degli attuatori**

Da tempo i fisici stanno studiando materiali in grado di adattarsi, cioè materiali in grado di deformarsi creando forze in piccoli dispositivi detti attuatori. Questo tipo di studio è nato dall'esigenza di trovare materiali poco ingombranti in grado di sostituire leve o martinetti idraulici. I materiali più studiati per queste applicazioni sono le ceramiche piezoelettriche, le leghe che conservano memoria di forma, e i polimeri. Tutti questi materiali purtroppo soffrono dello stesso difetto: sono fragili.

Tra i “materiali intelligenti”, utilizzati nella realizzazione di nuovi attuatori vi sono quindi:

- 1) Le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloys – SMA*) che permettono di ottenere elevate forze e spostamenti. Quando si deformano plasticamente a basse temperature, queste leghe ritornano alla loro configurazione originaria non appena la temperatura si discosta da quella alla quale avviene la trasformazione. Le leghe a memoria di forma (SMA) sono state recentemente utilizzate nelle strutture civili per le loro caratteristiche sia di effetto memoria di forma che di superelasticità. In molti casi possono essere utilizzate come attuatori, anche inglobati nelle strutture.

La capacità delle SMA di ricordare e recuperare la forma originale quando riscaldate permette loro di fornire forze di ripristino strutturale

e di indurre la richiusura delle fessure nelle strutture danneggiate. Grazie alle loro caratteristiche termo-meccaniche, le leghe a memoria di forma possono recuperare deformazioni significativamente grandi o sviluppare intense tensioni di ripristino. Il recupero della forma può avvenire quando il materiale è riscaldato oltre una temperatura critica (effetto memoria di forma) o semplicemente quando il carico applicato viene rimosso (superelasticità).

Se un vincolo ostacola il recupero della forma, gli elementi SMA sviluppano forze di reazione. Il materiale SMA più comune, una lega nichel-titanio conosciuta come Nitinol, è ancora abbastanza costoso, e quindi il suo utilizzo nelle applicazioni d'ingegneria civile è generalmente limitato. Si può ovviare in parte a questo inconveniente, poiché sono state sviluppate leghe a memoria di forma meno costose, come le leghe di rame. Più recentemente, sono stati fatti alcuni tentativi di includere elementi di SMA direttamente all'interno delle strutture, basati sul concetto dei compositi ibridi. Gli elementi SMA superelastici riducono l'inflessione residua e forniscono capacità di richiusura delle fessure quando viene rimosso il carico. In alternativa, le tensioni di recupero associate all'effetto memoria di forma possono essere usate per fornire un pretensionamento e per creare travi composite la cui rigidità e resistenza possa variare con la temperatura. In particolare, l'attuazione dei fili di SMA permette di controllare l'inflessione delle travi. Nel caso di carichi eccezionali, che causino fessurazione in una trave rinforzata in calcestruzzo, le tensioni di recupero sviluppate dai fili di SMA vincolati possono essere sfruttate per la richiusura delle fessure e la riduzione dell'inflessione residua della trave. Poiché, la tensione di recupero si sviluppa durante il riscaldamento dei fili di SMA, per poi diminuire durante il raffreddamento, gli attuatori forniscono solo un temporaneo auto-ripristino, che dovrebbe essere fatto seguire da un intervento esterno permanente, come un rinforzo con polimeri in fibre di carbonio (CFRP).

- 2) I materiali **elettrostrittivi** sopportano allungamenti in presenza di campi elettrici mostrando una capacità di deformazione leggermente migliore rispetto ai piezoelettrici, ma sono sensibili alla temperatura. I polimeri elettroattivi sono particolari corpi complessi che vengono impiegati nella costruzione di attuatori perché sfruttano la caratteristica di subire grandi deformazioni e grandi spostamenti se sottoposti ad una differenza di potenziale tramite particolari elettrodi flessibili in grado di adattarsi alle deformazioni del polimero. La maggior parte delle applicazioni che fanno ricorso a questi materiali sono destinate ad ambiente sottomarino. Nell'intento di imitare i meccanismi della natura, i polimeri elettroattivi (EAP) hanno recentemente suscitato un certo interesse. Essi sono capaci di deformazioni rilevanti in confronto ad altri materiali elettro-attivi, come le ceramiche piezoelettriche. Questa capacità li sta rendendo molto promettenti come attuatori per la loro similarità operativa con i muscoli biologici. L'applicazione di questi materiali come attuatori nelle strutture civili non è ancora stata studiata, ma potrebbe essere un settore molto interessante in:
- in **controlli intelligenti** come per esempio la navigazione, l'operazione di evitare gli ostacoli, eccetera;
  - nell'ambito **sensoriale**;
  - nell'ambito della **mobilità** come per esempio per svolgere le funzioni di camminare, guidare, volare, nuotare, eccetera;
- 3) I materiali **magnetostrittivi** come il Terfenol-D si allungano quando esposti ad un campo magnetico. Questi materiali generano basse deformazioni e forze moderate su una vasta gamma di frequenze. Il problema di questi materiali risiede nelle elevate dimensioni necessarie per le applicazioni.
- 4) I fluidi **elettroreologici** e quelli **magnetoreologici** operano mediante sospensione di piccole particelle nel fluido e nel cambiamento delle loro caratteristiche (viscosità e rigidità) rispettivamente sotto campo elettrico e

campo magnetico. Questi fluidi sono usati in particolar modo per realizzare gli smorzatori.

### 3.4 ATTUATORI A MEMORIA DI FORMA

Le leghe a memoria di forma (SMA) possono essere utilizzate in ambito civile come sensori, attuatori, dispositivi di smorzamento e di dissipazione dell'energia sismica.

Sono in grado di dare origine a movimenti lineari ed angolari, sviluppando forze elevate e recuperando notevoli deformazioni in maniera stabile per un numero elevatissimo di attuazioni (maggiore di 500000).

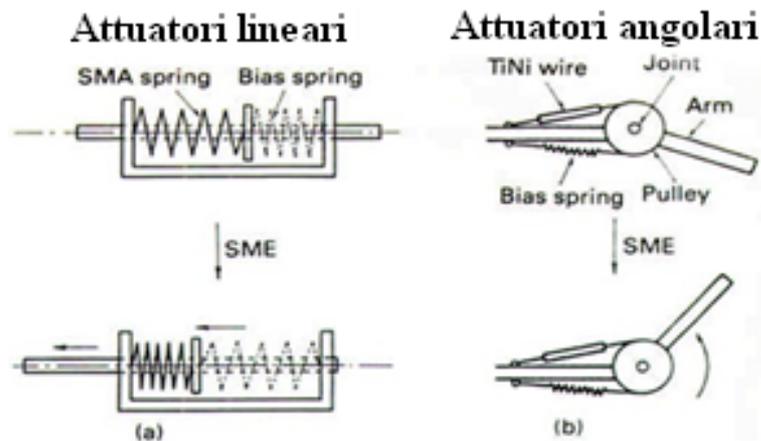


Figura3.5: Attuatori lineari e angolari

Il loro funzionamento si basa sulla trasformazione martensitica reversibile che alcune leghe metalliche esibiscono se sottoposte a una variazione di temperatura, ad esempio attraverso il passaggio di corrente elettrica (effetto Joule).

Un attuttore SMA è capace quindi di muoversi ed azionare altri dispositivi in relazione ad uno stimolo ricevuto, sfruttando l'effetto a memoria di forma (e non quello superelastico).

Le applicazioni dell'effetto del recupero di forma, possono essere suddivise in tre categorie, a seconda del tipo di utilizzo richiesto:

- Recupero libero (free recovery): il processo di recupero della forma avviene senza vincoli, il generico elemento SMA si deforma mentre si trova in fase martensitica. Al materiale è richiesto che in seguito al riscaldamento ritorni alla sua forma iniziale.
- Recupero vincolato (constrained recovery): è il caso in cui il recupero di forma sia impedito da un vincolo non cedevole; in questo caso il tentativo di ripristinare la forma viene convertito in uno sforzo che può essere utilmente impiegato.
- Recupero parzialmente vincolato (restrained recovery): è il caso in cui il vincolo cede secondo una qualche legge allo sforzo sviluppato dal materiale nel corso del recupero di forma, rendendo ripetibile l'applicazione del sistema. Questa tipologia di recupero è utilizzata per realizzare attuatori.

Per quanto riguarda il recupero libero, le applicazioni dominanti sono nel settore dei "gadgets" e nello sviluppo di minuti congegni che ricordino una qualche forma prestabilita, solitamente tramite un semplice riscaldamento a temperature di poco superiori a quella ambiente.

Più interessante è il caso in cui il recupero di forma venga impedito da un vincolo, infatti è stato proprio questo uno dei primi campi dove i materiali a memoria di forma sono stati adoperati con buoni risultati sia tecnici che commerciali.

Gli SMA possono essere elettrici o termici:

- i primi sono "attivati" direttamente dalla corrente elettrica che, variando le temperature, ne consente il moto;
- i secondi sono mossi in funzione della temperatura dell'ambiente in cui vengono applicati.

La schematizzazione più conosciuta nel campo degli attuatori è quella dove una molla a memoria di forma viene fatta lavorare in contrasto ad una normale molla di acciaio:

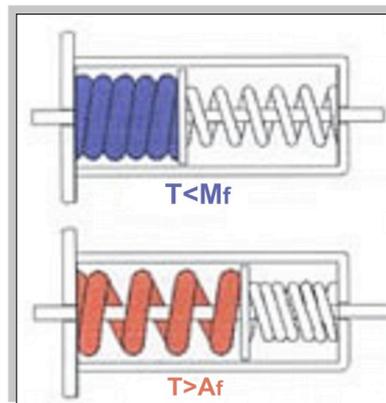


Figura3.6: Comportamento della molla a variare della temperatura

A bassa temperatura il materiale ha un modulo per cui la molla di acciaio ha più forza, mantenendo la molla SMA nella posizione compressa; facendo salire la temperatura fino al punto di trasformazione avviene il meccanismo contrario, realizzando così un moto del cursore all'estremità opposta.

Una volta raffreddata la molla SMA, si ripresenta la configurazione iniziale e l'intero processo di attuazione può riavere inizio.

Sulla base di questo semplice schema costruttivo, sono state ingegnerizzate diverse soluzioni in grado di creare sistemi automatici, piccoli, compatti, silenziosi e senza presenza di motori per il controllo di diversi parametri dipendenti dalla temperatura, ma con lo svantaggio dell'alto costo del materiale. Generalmente gli attuatori a memoria di forma sono contraddistinti da un'elevata densità di energia, sono semplici, leggeri e silenziosi: per qualche applicazione, i vantaggi nei confronti delle tecniche concorrenti riducono di dieci volte sia il peso che il consumo energetico del dispositivo.

Alcune applicazioni riescono perfino ad usare la capacità del materiale di comportarsi come sensore termico ed attuatore, estendendo ulteriormente quindi i privilegi di tali leghe.

Nello specifico, i principali *vantaggi* nell'utilizzo di attuatori SMA sono:

- ✓ Elevata miniaturizzazione, ottima capacità di integrazione, alte forze sviluppate.
- ✓ Ottima operatività in condizioni gravose.
- ✓ Annullamento delle emissioni elettromagnetiche.
- ✓ Movimento lineare ed angolare diretto, senza l'ausilio di componenti meccanici basati sull'attrito (ingranaggi meccanici o riduttori): si esclude quindi lo sviluppo di polveri ed il funzionamento risulta avvenire senza vibrazioni, rumori e scintille.
- ✓ Diminuzione dei costi associati.
- ✓ Riduzione del numero complessivo di pezzi per un dispositivo, semplicità dei meccanismi.
- ✓ Capacità di immagazzinare grandi quantità di energia (da 5 a 40 volte quella immagazzinabile dagli acciai).
- ✓ Capacità di recuperare grandi deformazioni.
- ✓ Sviluppo diretto dell'azione attuativa specifica richiesta, senza bisogno di elementi di trasmissione e collegamento.
- ✓ Impiego con sostanze infiammabili.
- ✓ Elevato rapporto potenza/peso o potenza/volume: il massimo rapporto potenza/peso ricavabili per una lega a memoria di forma ( $\sim 100$  W/kg), lo si ha per pesi piccoli (inferiori a 100 g).

Per quanto riguarda invece gli *svantaggi* degli attuatori SMA è possibile elencare i seguenti punti:

- La deformazione percentuale recuperata nella trasformazione martensitica è inversamente proporzionale al numero di cicli di lavoro compiuti dal materiale.
- Esiste una temperatura massima oltre la quale l'effetto a memoria di forma cessa di esistere.

- Bassa efficienza energetica: essa viene a dipendere dalla configurazione e dal tipo di deformazione subita; attuatori filiformi si comportano meglio in quanto operano in condizioni di sollecitazione uniforme.
- Peggior sfruttamento del materiale qualora si operi in configurazioni di stress non uniforme.
- Limitata banda passante di attuazione: durante una diminuzione repentina della temperatura della lega, è difficile smaltire il calore nell'ambiente.
- Deterioramento a fatica: per raggiungere un numero elevato di cicli di attuazione, occorre operare su livelli di deformazione e sollecitazione ridotti.

Nel ramo prettamente civile le SMA hanno dei problemi soprattutto di costi in relazione alle dimensioni necessarie, esse sono utilizzate principalmente in sismica come diagonali di controvento o smorzatori (per l'elevata capacità dissipativa) e negli edifici.

Un esempio concreto di applicazione SMA negli edifici storici, riguarda la Basilica superiore di Assisi (figura 3.7), danneggiata durante il terremoto del 1997; i danni hanno interessato il collegamento tra il timpano e le travi di copertura. Sono stati inseriti quindi dei dispositivi SMA in grado di garantire il comportamento scatolare e limitare la forza massima d'interazione.

Anche il campanile di San Giorgio in Trignano (figura 3.8), a causa dello stesso sisma, ha riportato significative fessurazioni negli elementi portanti e nei tamponamenti; sono stati quindi inseriti dei cavi SMA ancorati alla fondazione, per fornire precompressione. Un altro esempio di utilizzo delle SMA per migliorare la dissipazione energetica riguarda i treni ad alta velocità italiani (figura 3.9): si è riusciti a ridurre le vibrazioni mediante l'ausilio di alcuni materiali compositi (fabbricati con SMA accoppiate alle fibre); come conseguenza si è ottenuto lo smorzamento dei tremolii degli archetti per limitare i distacchi.



Figura3.7: Dispositivi SMA applicati alla Basilica di Assisi

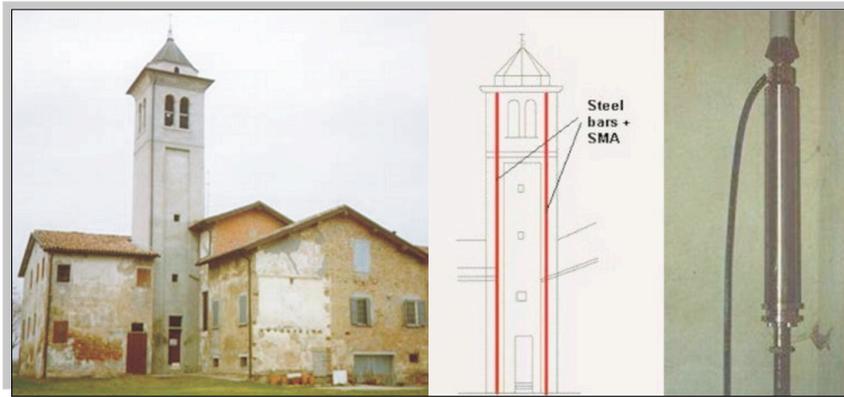


Figura3.8: Campanile di San Giorgio in Trignano, inserimento di SMA ancorati alla fondazione

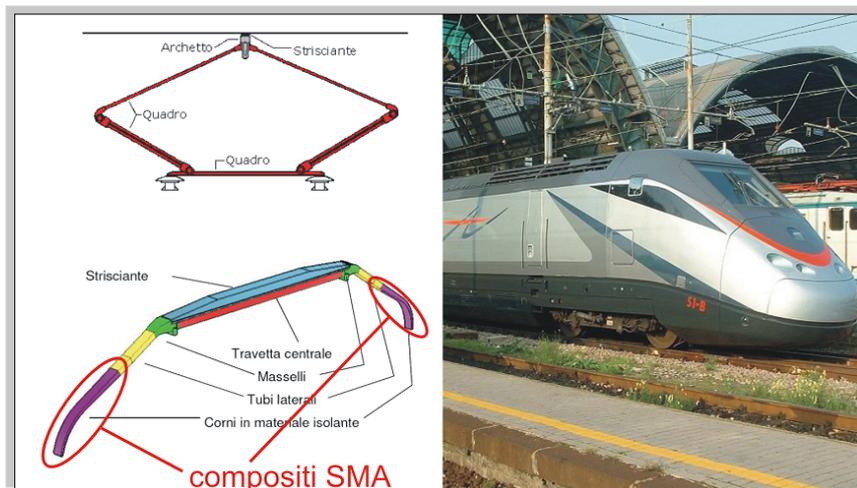


Figura3.9: Applicazione SMA su treni ad alta velocità

Come ultimo esempio, ma non di certo in termini di importanza e di innovazione, si vuole segnalare un sistema intelligente nel quale degli attuatori SMA, sottoforma di cavi o fili, sono inseriti all'interno di travi di calcestruzzo. I cavi vengono scaldati elettricamente per richiudere delle fessure, formatesi dopo un ciclo di carico sulla trave.

Per le leghe a memoria di forma il settore maggiormente sviluppato è quello biomedico, in cui queste assumono rilevante importanza sia dal punto di vista storico che economico. Si può pensare ad applicazioni come:

- ✓ stent per la dilatazione di vasi sanguigni soggetti a stenosi: lo stent è raffreddato e portato in forma compressa in modo da ridurre le dimensioni e renderne possibile l'inserimento in posizione mediante catetere; una volta rilasciato, per effetto della temperatura corporea, lo stent si espande applicando in modo progressivo una forza radiale sulla parete del vaso
- ✓ filtri per emboli per la prevenzione dell'embolia polmonare (Simon Nitinol Filter): il filtro viene inserito mediante un catetere mentre viene mantenuto a bassa temperatura, una volta posizionato nella vena cava, esposto alla temperatura corporea si espande assumendo la conformazione a filtro
- ✓ ancoraggi per sutura (Mitek): sono utilizzati per il collegamento di tendini e legamenti al tessuto osseo mediante un ancoraggio che si espande dopo essere stato inserito in un foro praticato nell'osso; sono stati utilizzati per la prima volta nel 1989 ed attualmente sono disponibili in 25 varianti per diverse applicazioni.

### **3.5 ATTUATORE LINEARE**

Generalmente l'attuatore lineare è composto da un **motore elettrico** attaccato a una sfera o a una vite Acme con il dado montato in un tubo telescopico. Sostituisce spesso i cilindri idraulici e pneumatici. La sua funzione principale è quella di indicare lo spostamento di altri elementi di un complesso,

superandone la resistenza che si oppone al moto. Quindi, gli attuatori sono organi che attuano un lavoro meccanico, realizzando la traslazione o la rotazione di un apposito organo. Questo lavoro può essere eseguito a spese di energia chimica, energia elettrica energia termica e di fluido in pressione negli attuatori a fluido. Vi sono attuatori che effettuano **spostamenti, o rotazioni**, di estensione limitata e che sono adatti a fare moti alternativi: questi attuatori sono costituiti dai vari tipi di cilindri. Vi sono poi dispositivi in grado di attuare rotazioni continue e così si hanno dei motori rotativi.

Oggi gli attuatori vengono utilizzati in impianti di automazione dei processi di qualsiasi genere, per salvaguardare le persone da situazioni pericolose, realizzare funzioni di comando a distanza o semplificare lavori manuali altrimenti noiosi e difficili.

In molte applicazioni gli attuatori offrono diversi vantaggi rispetto ai sistemi idraulici e meccanici; sono autonomi, robusti e durevoli, e questo li rende ideali ovunque per sollevare, abbassare, spingere, tirare, ruotare o posizionare un carico.

Grazie alle loro dimensioni compatte gli attuatori si possono montare in spazi ristretti.

Gli attuatori sono provvisti di guarnizioni e totalmente sigillati per essere protetti in ambienti umidi, sporchi ed oleosi e sono ideali per l'uso su impianti esterni. Gli attuatori a stelo hanno tubi estensibili in acciaio inossidabile o alluminio resistente alla corrosione.



Figura3.10 : Attuatore lineare LA27C

### 3.6 ATTUATORE PIEZOELETTRICO

L'attuatore piezoelettrico è un dispositivo realizzato mediante una cassa in acciaio inossidabile che funge da elemento elastico, deformato elasticamente mediante tre ceramiche in PZT multistrato a basso voltaggio. Si è ottenuto, così, un dispositivo a tre gradi di libertà: una traslazione lungo l'asse di espansione dei piezoelettrici e due rotazioni intorno agli assi contenuti in un piano perpendicolare al suddetto asse.

Sulla superficie superiore sono stati realizzati 6 fori filettati, tre per il fissaggio di uno specchio o di un qualunque dispositivo che si intende traslare e tre in corrispondenza delle tre cave, ottenute mediante fresature a disco, dove vengono fissati i piezoelettrici. Quest'ultime tre filettature, permettono di ottenere un precarico mediante l'utilizzo di grani i quali applicano una compressione sui ceramiche attraverso un blocchetto di acciaio super rapido (HSS) con la stessa sezione dei piezoelettrici sottostanti. Quest'ultimi, a loro volta, sono stati incollati sulla cassa. Inoltre si può osservare un foro centrale cieco in cui sono alloggiati tutti i cavi elettrici che arrivano ai piezoelettrici (figura 3.11).

Tali cavi sono poi fatti passare attraverso altri tre fori effettuati nel tappo inferiore bloccati diametralmente attraverso dei grani.

Questo tipo di soluzione è stata adottata non per poter sfruttare tutti i 3 gradi di libertà, bensì per poter compensare espansioni non uniformi dei PZT.

Al fine di compensare tali rotazioni, è stato realizzato un opportuno circuito elettrico il quale permette di variare singolarmente la tensione di alimentazione su ogni singolo piezoelettrico.

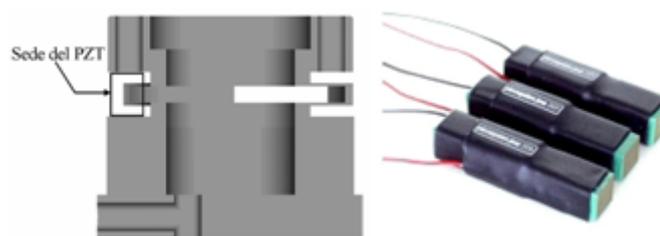


Figura3.11: Attuatore piezoelettrico

Ogni piezoelettrico (Physik Instrumente modello PL033.20, dimensioni 3x3x2 mm), quindi, è chiuso su una resistenza variabile fra 100 e 110 k $\Omega$ , pertanto la sua corsa, direttamente proporzionale alla tensione applicata può essere variata di circa il 10%, margine sufficiente per eguagliare le tre corse e quindi impostare la rettilineità della corsa complessiva dell'attuatore.

È bene puntualizzare, inoltre, che in questo modo è possibile compensare altri eventuali effetti come lavorazioni imperfette della cassa o posizionamento impreciso dei singoli ceramici.

In Fig.3.12 sono riportati alcuni particolari dell'attuatore. E' visibile il ceramico in PZT, nella parte inferiore con i cavi elettrici saldati e nella parte superiore con incollato il blocchetto in acciaio super rapido. Sono visibili i collegamenti elettrici per l'applicazione della tensione di alimentazione ai piezoelettrici: in particolare è messo in evidenza l'unico ceramico collegato, mentre per gli altri due le saldature devono ancora essere effettuate.

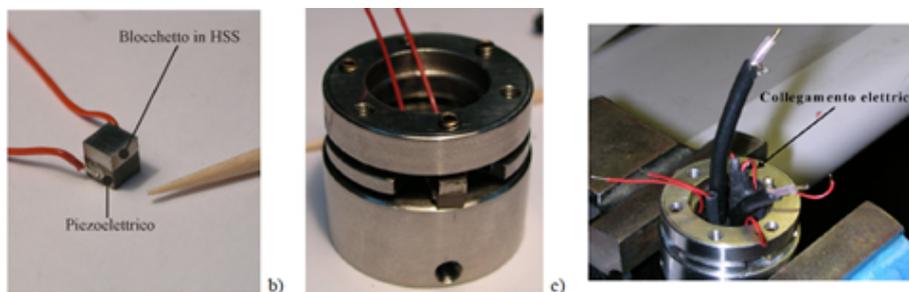


Figura3.12: Particolari di un attuatore piezoelettrico

### 3.7 ATTUATORI AD ELASTOMERI DIAELETTRICI

Grazie al peso ridotto, all'elevata densità di potenza e ai costi contenuti, gli attuatori ad elastomeri dielettrici (ED) stanno generando grande interesse.

Gli Elastomeri Dielettrici (ED) appartengono a una più ampia classe di materiali intelligenti nota come Polimeri Elettroattivi (PEA) e possono essere utilizzati per la creazione di attuatori lineari.

Gli attuatori a ED sono caratterizzati da un basso peso, da un'elevata densità di potenza e da un costo contenuto, risultando una soluzione efficace quando siano necessari grandi spostamenti ed un peso limitato del sistema di attuazione oppure qualora le tecnologie tradizionali non risultino applicabili per motivi di compatibilità con l'ambiente di utilizzo. Ad esempio, gli attuatori a ED possono essere proficuamente utilizzati all'interno di macchinari di risonanza magnetica ove la presenza di materiali ferrosi, presenti negli attuatori elettromeccanici tradizionali, non risulta possibile.

Gli ED vengono usualmente utilizzati sotto forma di membrane (film) formate da molteplici strati di materiale elastomerico. Tali elastomeri sono dielettrici dal punto di vista elettrico, iperelastici ed incomprimibili dal punto di vista meccanico ed isotropi sia dal punto di vista elettrico che dal punto di vista meccanico. Per essere utilizzati come materiali attivi, le membrane di ED devono essere pretensionate e poi ricoperte su entrambe le superfici con un sottile strato di materiale conduttivo (elettrodo cedevole).

L'applicazione di una tensione,  $V$ , tra gli elettrodi genera nell'ED un campo elettrico, agente nella direzione dello spessore del film che interagendo con l'ED stesso ne induce la riduzione dello spessore e la conseguente espansione in area. Lo spessore dei film, prima del pretensionamento e prima della applicazione del campo elettrico, è usualmente nel campo dei 50-100 $\mu$ m, il campo elettrico può raggiungere valori massimi fino a 200 MV/m e le deformazioni indotte sono dell'ordine del 100%.

Un semplice attuatore a ED è ottenibile accoppiando direttamente un film di ED ad un carico esterno.

L'attivazione del film ne produce un'espansione in area e la deformazione dell'ED nella direzione del carico esterno, può essere utilizzata per produrre lavoro utile. Nel tentativo di sfruttare al meglio le caratteristiche del film e/o di ottenere particolari caratteristiche di forza dell'attuatore stesso, gli ED vengono

usualmente accoppiati a dispositivi di supporto (DDS) formati da uno o più meccanismi cedevoli.

Sono state proposte diverse soluzioni riguardo a possibili geometrie per il DDS.

Tali soluzioni sono classificabili in:

- *Dispositivi di supporto semplici.*

I DDS semplici sono formati da un unico meccanismo cedevole ed il film di ED è collegato (mediante incollaggio) ad ogni membro del meccanismo. Ne consegue che i campi degli spostamenti di DDS ed ED sono vincolati ad essere congruenti in ogni configurazione dell'attuatore. In queste condizioni, la geometria del DDS può essere scelta in maniera tale da ottenere uno stato di deformazione uniforme per il film di ED.

- *Dispositivi di supporto composti.*

I DDS composti sono formati da due (o più) meccanismi cedevoli accoppiati. Il primo meccanismo si occupa dei compiti sopracitati mentre i restanti sono utilizzati per modificare la rigidità dell'attuatore, che dipende fortemente dalle proprietà elastiche del primo meccanismo e dell'ED stesso. In particolare i DDS composti possono essere progettati per ottenere attuatori a forza quasi-costante in grado di operare in modo monodirezionale o bidirezionale.

Viene presentata una soluzione innovativa per il progetto di un DDS composto, che permette di ottenere un attuatore a forza quasi-costante all'interno di un certo intervallo di corsa utile.

In particolare un meccanismo cedevole di forma romboidale, viene accoppiato ad un meccanismo cedevole formato da due manovellismi di spinta.

## **Capitolo4:**

### **I SENSORI**

#### **4.1 INTRODUZIONE**

I sensori sono i principali strumenti di misura utilizzati per il monitoraggio strutturale e in particolare per il monitoraggio “intelligente”. L'accoppiamento di funzioni di monitoraggio e di attuazione permette lo sviluppo di strutture intelligenti, che sono in grado di reagire agli stimoli esterni come organismi viventi. Tali strutture possono rilevare condizioni strutturali critiche ed autonomamente intraprendere azioni in grado di incrementare il livello di sicurezza o fornire un ripristino temporaneo o permanente. I sensori a fibra ottica (FOS) vengono attualmente utilizzati correntemente nel monitoraggio strutturale, in quanto presentano diversi aspetti vantaggiosi, quali le dimensioni ridotte, la buona risoluzione, la buona accuratezza, l'immunità alle interferenze elettromagnetiche, l'ampio intervallo di temperatura di esercizio, l'alta durabilità e la stabilità a lungo termine [23]. Queste peculiarità permettono di effettuare acquisizioni in posizioni problematiche o irraggiungibili con sensori tradizionali. I FOS consentono sia acquisizioni localizzate che distribuite. Il monitoraggio localizzato può essere eseguito efficacemente per mezzo di sensori Fiber Bragg grating.(FBG). I sensori FBG sono attualmente utilizzati su larga scala per la buona risoluzione, la fedeltà di segnale e i costi contenuti. Possono essere installati su diversi materiali, inclusi quelli usati nelle strutture civili. Le applicazioni più promettenti consistono nell'inclusione del sensore all'interno degli elementi strutturali, allo scopo di ottenere elementi auto-monitoranti. Applicazioni interessanti in questo campo riguardano, per esempio, l'utilizzo di sensori integrati in compositi polimerici o posti all'interfaccia tra travi di cemento armato e rinforzi flessionali in FRP [24]. Questi sistemi dovrebbero essere capaci di rilevare cambiamenti nel comportamento strutturale o condizioni strutturali critiche, dovute, per esempio, ad assestamenti o subsidenza, e intraprendere azioni in modo

autonomo. L'output dei sensori può fornire informazioni in continuo e lanciare l'allarme quando vengano superate soglie prefissate, ma l'obiettivo dovrebbe essere quello di realizzare un controllo attivo. In questo caso, la struttura reagirà in modo simile a quello di un organismo vivente soggetto ad uno stimolo esterno. Le azioni che ne conseguono possono avere lo scopo di adattare la struttura o le sue parti alla nuova situazione attraverso un auto-riposizionamento, oppure di realizzare un ripristino temporaneo.

## 4.2 DEFINIZIONE DEI SENSORI

Comunemente con il termine  **sensore**  si definisce un dispositivo che trasforma una grandezza fisica che si vuole misurare in un segnale di natura diversa (tipicamente elettrico) più facilmente misurabile o memorizzabile. I sensori hanno il compito di percepire eventuali danni o malfunzionamenti dell'opera. Sono dispositivi che in un sistema di controllo, sono capaci di rilevare il valore di una grandezza fisica. In ambito *strettamente metrologico*, il termine *sensore* è riferito solamente al componente, che fisicamente effettua la trasformazione della grandezza d'ingresso in un segnale di altra natura. I dispositivi in commercio spesso integrano al loro interno anche alimentatori stabilizzati, amplificatori di segnale, dispositivi di comunicazione remota. In quest'ultimo caso si preferisce definirli trasduttori (Ad esempio in commercio esistono dei *trasduttori di pressione* in cui l'elemento sensore è costituito da una membrana su cui è stato applicato un ponte estensimetrico; all'interno dello stesso dispositivo, un amplificatore porta il debole segnale del ponte ai valori di 5-10 V del segnale d'uscita finale del trasduttore).

A seconda del tipo e dell'utilizzo, i sensori possono:

- dare una lettura direttamente nell'unità ingegneristica d'interesse;
- essere collegati ad uno *strumento indicatore* (chiamato comunemente display) che provvede a leggere il segnale e tradurlo in una comoda lettura nell'unità ingegneristica.

- essere collegati ad uno *strumento registratore* che provvede a memorizzare il segnale per una sua successiva elaborazione (il più delle volte, quest'ultimo opera una *conversione analogico-digitale* che traduce il segnale in dati digitali, che vengono immediatamente memorizzati nello strumento stesso o su un *computer* collegato in remoto).

### 4.3 CLASSIFICAZIONE DEI SENSORI

I sensori possono essere classificati in base al loro principio di funzionamento oppure al tipo di segnale in uscita, ma più comunemente vengono classificati in base al tipo di grandezza fisica che misurano. Si distinguono in base a:

- ✓ *Principio fisico*: sensori ottici, meccanici, pneumatici ed elettrici.
- ✓ *Grandezza da misurare*: sensori di lunghezza, di temperatura, di pressione, di vibrazione, di deformazione e di corrosione.
- ✓ *Settore di destinazione*: sensori chimici, robotici o meccanici, agricoli, manifatturieri e civili.
- ✓ Un altro tipo di classificazione è riferito al fatto che i sensori possono avere o meno la necessità di una potenza esterna per poter funzionare, si riconoscono quindi sensori *attivi e passivi*.

I primi non richiedono potenza dall'esterno per fornire il segnale in uscita derivante dall'applicazione della variabile di processo, essi però presentano in output un basso valore di energia che deve essere opportunamente amplificato.

Esempi di applicazioni attive sono gli effetti piezoelettrici, fotoelettrici e termoelettrici.

I sensori passivi invece richiedono un'alimentazione esterna, esempi sono gli effetti piezoresistivi, fotoconduttivi e termoresistivi.

- ✓ Il modo di operare di un sensore è strettamente legato alla grandezza fisica che esso deve misurare, di conseguenza un altro tipo di classificazione può essere basata sulle forme di energia esistenti in natura e sui principi fisici che realizzano la conversione da una forma ad un'altra.

Una grandezza importante da definire è la *sensibilità*: rappresenta l'efficienza di trasduzione del sensore ed è normalmente espressa come il rapporto tra la variazione del valore fornito dallo strumento (V) e la variazione della grandezza da misurare (G), per variazioni arbitrariamente piccole.

$$r = \frac{\text{segnale di uscita}}{\text{segnale di ingresso}}$$

$$r = \frac{U_{Output}}{U_{Input}}$$

La detectivity “*d*” invece rappresenta l'abilità del trasduttore nel rivelare il segnale in ingresso (limitata dal rumore da esso prodotto) ed è espresso come reciproco dell'unità di misura dell'ingresso:

$$d = \frac{SNR \text{ di uscita}}{\text{segnale di ingresso}}$$

$$\left[ \frac{1}{U_{Input}} = U_{Input}^{-1} = \frac{1}{m.s.r.} \right]$$

Il minimo segnale rilevabile “m.s.r.” è definito come il segnale di ingresso che produce un SNR di uscita unitario infatti, in assenza di segnale in ingresso, il trasduttore produce in uscita una data potenza di rumore; di conseguenza il minimo segnale rilevabile è quello che per essere rilevato deve avere una potenza almeno uguale a quella di rumore.

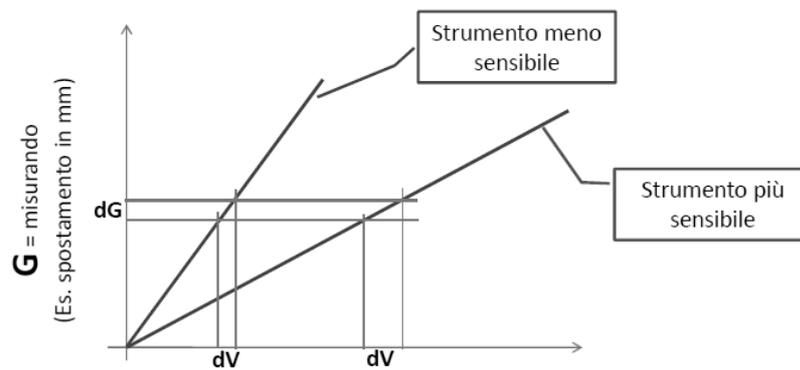


Figura 4.1: Sensibilità dello strumento

$V$  = Valore fornito dallo strumento (Es. Volts)

Possono essere ulteriormente classificati come :

-SENSORI A CONTATTO : meccanici, elettrici

-SENSORI SENZA CONTATTO: ottici

#### 4.4 SENSORI A CONTATTO MECCANICI

- Comparatore

Il comparatore è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare. Lo strumento basa il suo funzionamento sulla lettura dello spostamento di un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una

guida tubolare. L'estremità dell'asta (detta tastatore o palpatore) è a contatto della superficie dell'oggetto sottoposto a misura. Una molla spinge costantemente l'asta verso l'esterno del corpo del comparatore, assicurando che il tastatore sia perennemente in contatto con l'oggetto di misura. Quando la superficie si sposta nella direzione dell'asse dell'asta (avvicinandosi o allontanandosi), anche quest'ultima si muove. Un sistema di lettura amplifica e visualizza questo spostamento rendendo disponibile la misura. I comparatori normalmente vengono realizzati con corse utili comprese tra 1 e 100 mm, mentre la risoluzione è normalmente centesimale (0,01 mm), anche se vengono realizzati comparatori di precisione bimillesimali (risoluzione 0,002 mm).

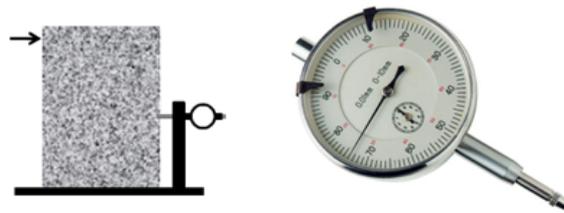


Figura4.2: Comparatore

- Deformomentro

Misura la distanza relativa tra due punti relativamente vicini. E' costituito da una barra di invar (lega metallica composta principalmente di ferro (64%) e nicel (36%), con tracce di carbonio e cromo) alle cui estremità sono fissate due punte coniche, una delle quali è fissa, mentre l'altra può ruotare mentre un comparatore misura lo spostamento della punta mobile.

Sull'oggetto da misurare vengono fissate due piastrine metalliche con cavità coniche, all'interno delle quali vengono appoggiate le punte dello strumento.



Figura 4.3: Deformometro

#### 4.5 SENSORI A CONTATTO ELETTRICI

- LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

Il trasduttore è realizzato mediante un tubo composto da tre avvolgimenti disposti con assi paralleli e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile, normalmente caratterizzato da un'alta permeabilità magnetica. L'avvolgimento centrale è detto primario e gli altri due secondari: quello primario è collegato ad un generatore di tensione AC, ai capi dei secondari invece si misura la tensione d'uscita. Un oscillatore elettronico eccita l'avvolgimento primario con una corrente alternata a frequenza costante. Conseguentemente in quelli secondari vengono indotte correnti alternate con ampiezze dipendenti dalle rispettive posizioni.

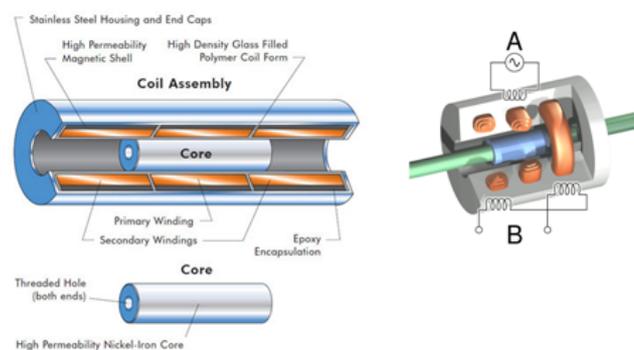


Figura4.4: Sezione di un LVDT. La tensione è applicata all'avvolgimento primario A, causando una corrente indotta nell'avvolgimento secondario B.

Quando il nucleo è al centro, le tensioni indotte sugli avvolgimenti secondari sono uguali e sfasate di 180°, di modo che il segnale di tensione misurato tra le due sia nullo. Uno spostamento del nucleo provoca un aumento di tensione in uno dei due e una diminuzione nell'altro. La differenza è proporzionale allo spostamento.

- Sensore estensimetrico

Su una lamina metallica sono fissati due estensimetri elettrici che misurano la deformazione longitudinale all'intradosso e all'estradosso. In campo elastico lineare la deformazione è proporzionale allo spostamento dell'estremità della lamina.

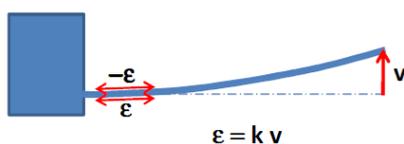


Figura4. 5:Sensore estensimetrico

- Deformometro induttivo

E' analogo a un deformometro meccanico, ma il sistema di misura è elettrico.

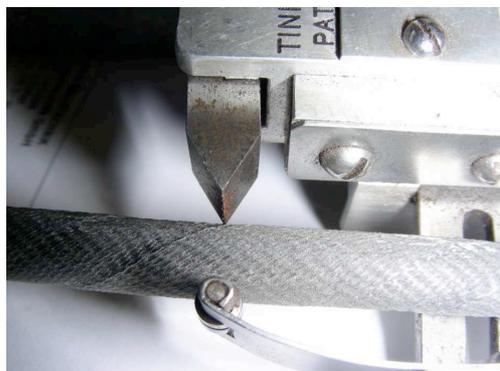


Figura4.6: Deformometro induttivo

## 4.6 SENSORI SENZA CONTATTO(OTTICI)

Il metodo di misura consiste nel confrontare immagini successive della superficie esterna del campione mentre si deforma. Sul campione vengono materializzati dei riferimenti e il confronto tra immagini successive permette di calcolare gli spostamenti relativi.



Figura4.7: Sensore ottico

- Laser



Figura4.8: Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. (Amplificazione di Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazione) Il laser è un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente, monocromatica e, con alcune eccezioni, concentrata in un raggio rettilineo estremamente collimato. Inoltre la luminosità (brillanza) delle sorgenti laser è elevatissima a paragone di quella delle sorgenti luminose tradizionali. Queste tre proprietà (coerenza, monocromaticità e alta brillantezza) sono alla base del vasto ventaglio di applicazioni che i dispositivi laser hanno avuto e continuano ad avere nei campi più disparati: l'elevatissima brillantezza, data dal concentrare una grande potenza in un'area molto piccola, permette ai laser il taglio, l'incisione e la

saldatura di metalli; la monocromaticità e coerenza li rende ottimi strumenti di misura di distanze, spostamenti e velocità anche piccolissimi, dell'ordine del millesimo di millimetro; sempre la monocromaticità li rende adatti a trasportare informazioni nelle fibre ottiche e per distanze lunghissime.

Proprietà:

- Coerenza: mentre nell'emissione spontanea ogni fotone viene emesso in maniera casuale rispetto agli altri, nell'emissione stimolata ogni fotone ha la stessa fase del fotone che ha indotto l'emissione.
  - Direzionalità: l'angolo solido di un fascio laser è estremamente piccolo
  - Monocromaticità: intervallo di frequenze molto stretto.
  - Alta brillantezza: è una conseguenza della direzionalità; la quantità di energia emessa per unità di angolo solido è elevatissima.
- 
- Sensori laser a triangolazione

Un diodo laser proietta un raggio laser sulla superficie dell'oggetto e la luce viene riflessa. Un filtro riceve parte della luce riflessa, che viene visualizzata su un elemento sensibile (PSD, CMOS, CCD). La posizione del raggio sull'elemento sensibile dipende dalla distanza dell'oggetto. La misura viene effettuata rilevando l'angolo con cui il ricevitore vede lo spot laser. La geometria di misura è come in figura (a). Il misuratore laser a triangolazione è il più utilizzato per effettuare misure di precisione in campi da pochi millimetri fino a dieci metri. A seconda dell'applicazione si possono adottare strumenti che utilizzano un ricevitore di tipo PSD (Position Sensor Detector) oppure di tipo CCD (Charge Coupled Device). I sensori PSD consentono delle buone precisioni di misura con frequenze molto basse (10..100Hz), mentre i sensori CCD forniscono ottime precisioni con frequenza elevata (>1000Hz). I misuratori equipaggiati con sensori PSD non sono quindi adatti ad applicazioni dinamiche, e cioè con materiale in movimento. In questo caso, oltre alla

risoluzione verticale ( $dz$ ), occorre prestare attenzione alla risoluzione longitudinale ( $dx$ ). In altre parole, è importante rendersi conto di quale risulti essere la cadenza di misura nel senso di avanzamento del materiale. Deve essere inoltre valutata attentamente la superficie del materiale da misurare. Su superfici irregolari o semplicemente ondulate, può essere necessario filtrare il segnale effettuando delle medie su un certo numero di misure. Per misure su materiali in movimento sono decisamente preferibili i misuratori equipaggiati con sensore CCD. Questo tipo di sensore è infatti praticamente indipendente dalle caratteristiche superficiali del materiale, e permette una frequenza di lettura molto più alta, consentendo di eseguire agevolmente medie sulle misure acquisite. Una superficie particolarmente riflettente (effetto specchio) potrebbe richiedere una leggera inclinazione dello strumento rispetto alla perpendicolare per aumentare il segnale al ricevitore. I misuratori equipaggiati con sensori CCD sono generalmente dotati di autoregolazione della potenza emessa in funzione del livello del segnale di ritorno, in modo da impedire l'eventuale saturazione (blooming) del sensore CCD. La risoluzione peggiora all'aumentare della distanza dall'oggetto e dell'intervallo di misura.

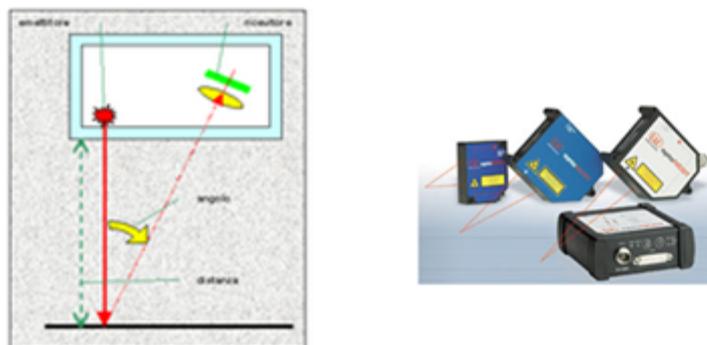


Figura4.9: Sensori laser a triangolazione

## 4.7 SENSORI LASER INTERFEROMETRICI

### Misuratori di distanza

Sono misuratori di distanza con una portata da 0.05 a 100 m.

Valori tipici a 50 m: - Accuratezza 3 mm

- Sensibilità 0.5 mm

Utilizzano l'interferenza della luce per valutare la differenza tra il percorso ottico da misurare e un altro di riferimento, di lunghezza nota.

Misurano la distanza orizzontale e verticale e di inclinazione.

I misuratori di distanza e di spostamento vengono montati su un supporto stabile e arrivano a una distanza di 100 m su superfici normali o 30 m su superfici poco riflettenti.

Accuratezza: 3 mm

Risoluzione: 0,1 mm

Riproducibilità a lungo termine: < 0,5 mm



Figura4.10: Misuratore a distanza

## 4.8 SENSORI DI INCLINAZIONE (INCLINOMETRI)

Sono apparecchiature elettroniche finalizzate al controllo della deviazione laterale di un tubo interrato o della rotazione di un manufatto, di un edificio o di un ammasso roccioso. Essi sono impiegati, in funzione dei modelli, nel monitoraggio dei movimenti franosi, dei versanti instabili, dei muri di sostegno e più in generale nei controlli strutturali. Gli inclinometri sono disponibili in diverse tipologie e configurazioni, sostanzialmente suddivisibili in due macrocategorie: gli Inclinometri da perforo e quelli di superficie.

Si distinguono:

- Inclinometro a pendolo

Elemento trasduttore: potenziometro magneto-resistivo con cursore e pendolo in olio siliconico.

### Caratteristiche tecniche:

- Linearità: + 1% del campo di misura.
- Risoluzione: Migliore di + 0.01°.
- Tempo di risposta: 0.3 secondi max.
- Smorzamento in olio siliconico (200 CS).
- Alimentazione: 12 Vcc, 10mA (30 mA con uscita 4/20mA).
- Uscita: 0-1 Vcc. (da 0 al 100 % del campo di misura) o 4/20 mA.
- Coefficiente di temperatura: + 250 ppm / °C max.
- Temperatura d'impiego: da - 10 °C a + 50 °C.



Figura4.11: Inclinometro a pensolo

- Inclinometro a bolla

Strumento che consente la misurazione del grado di inclinazione possibile attraverso la bolla come verifica della differenza sulla scala tra la posizione iniziale ( $0^\circ$ ) e la posizione finale.



Figura4.12: Inclinometro a bolla

## 4.9 SENSORI DI DEFORMAZIONE

- Misure locali: estensimetri
- Misure su base definita: deformometri
- Misure di linea: Brillouen
- Misure di superficie: fotoelasticita, Digital Image Correlation, ..

Per un materiale in stato elastico lineare dalla misura dello stato di deformazione si può risalire allo stato di tensione se si conoscono le costanti elastiche ( $E$ ,  $\nu$ ,  $G$  se il materiale è isotropo).

- Estensimetri elettrici a resistenza

In generale l'estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche (es. applicazione di carichi o variazioni di temperatura). 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 situ;
- monitoraggio di componenti o sistemi strutturali;
- elemento sensore per trasduttori di grandezze meccaniche;

Sono stati sviluppati vari tipi di estensimetri, ognuno con caratteristiche peculiari che si adattavano a specifici campi d'applicazione. Di seguito se ne accennerà alcune tipologie, concentrandosi su quelle che hanno più spazio nelle attuali applicazioni. Nel tempo date le 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 s'intende questa categoria.

L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di filo metallico applicata su di un supporto di materiale plastico. L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le

deformazioni generalmente utilizzando collanti istantanei come il cianoacrilato. 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 tali variazioni si può risalire all'entità della deformazione. 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. L'estensimetro fornisce una misura della deformazione media in un tratto pari alla sua lunghezza utile.

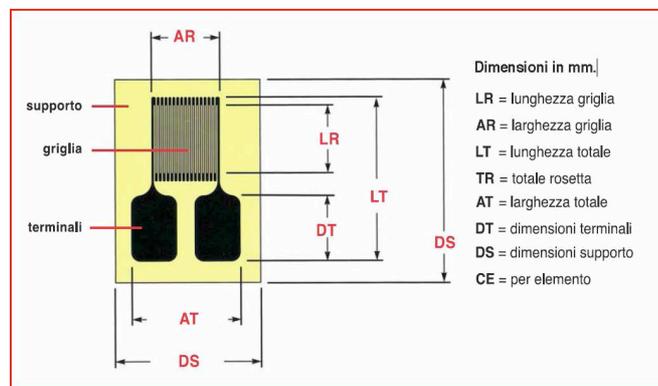
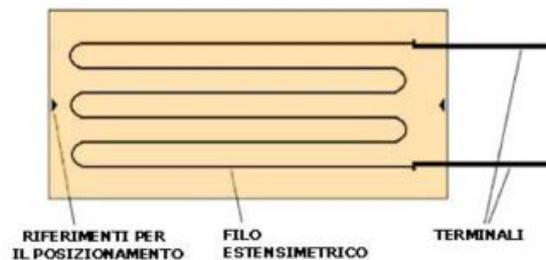


Figura4.13: Estensimetri elettrici a resistenza

Sottoponendo a trazione un conduttore filiforme si osserva sperimentalmente che la sua resistenza elettrica aumenta proporzionalmente alla trazione esercitata.

Se la deformazione non è eccessiva, la relazione tra variazione di resistenza e deformazione è lineare e reversibile.

Resistenza di un conduttore filiforme:

$\rho$  = resistività del materiale,

$l$  = lunghezza del conduttore,

$A$  = area della sezione trasversale.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

Differenziando:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

Dove il primo termine rappresenta la variazione relativa di resistenza dovuta alla deformazione, il secondo la dilatazione longitudinale e il terzo la variazione relativa di sezione.

$\epsilon_t$  = dilatazione trasversale.

$$\epsilon_t = - \nu \epsilon$$

$\nu$  = coefficiente di Poisson del materiale.

nel caso di conduttore a sezione rettangolare.

Sostituendo :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \longrightarrow \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\epsilon$$

La variazione relativa di resistenza è legata alla deformazione e alla variazione relativa di resistività, che a sua volta dipende dallo stato di deformazione.

Gli estensimetri sono ottenuti mediante fotoincisione di una griglia di materiale conduttore sostenuta da un supporto in materiale sintetico.

I tratti trasversali della griglia hanno sezione maggiore e quindi minore resistenza elettrica, influenzando meno la misura.

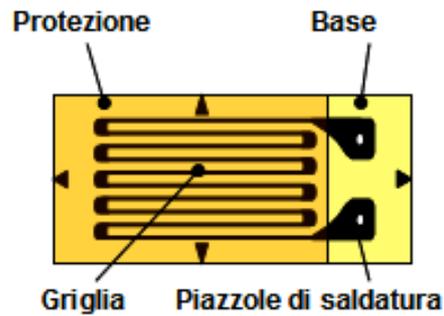


Figura4.14: Resistenza di un conduttore filiforme

Il fattore di taratura è il rapporto tra la variazione relativa di resistenza e la deformazione; viene determinato sperimentalmente e fornito dal produttore.

$$K = \frac{dR/R}{\epsilon} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} + 1 + 2\nu$$

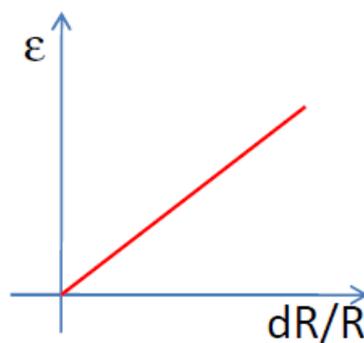


Figura4.15: Fattore di taratura K

Per come è definito, K rappresenta anche la sensibilità.

$$\frac{dp/\rho}{\varepsilon} = \text{effetto piezoresistivo} \quad 1 + 2\nu = \text{effetto geometrico}$$

### **Componenti degli estensimetri:**

- Griglia: La lunghezza della griglia definisce la base di misura dell'estensimetro (di solito da 0.2 a 150 mm).

La base di misura deve essere corta se si vogliono misure puntuali, lunga per deformazioni medie o materiali disomogenei.

Su calcestruzzo si hanno generalmente 30 mm o più, in funzione delle dimensioni dell'aggregato, per mediare l'effetto dei singoli costituenti.

- Supporto: Deve rendere solidale la griglia con la superficie della struttura, mantenendo l'isolamento elettrico.

Deve essere il più possibile sottile, in modo che la griglia sia soggetta alla stessa deformazione della struttura e che lo smaltimento per trasmissione del calore generato nella griglia non sia ostacolato.

Il materiale attualmente più usato per la costruzione del supporto è la resina poliammidica, assai resistente e adatta per temperature fino a 200° C.

- Terminali/piazzole: I terminali permettono di collegare elettricamente l'estensimetro ai cavi del circuito di misura mediante saldatura.

- Adesivo: L'adesivo esercita un ruolo estremamente importante nelle misure estensimetriche, in quanto ha il compito di rendere l'estensimetro solidale con la struttura.

- Cianoacrilato: veloce e resistente; decadimento delle prestazioni nel tempo.

- Adesivo epossidico bi-componente: caratteristiche superiori, ma installazione più complessa.
- Protettivo: Può essere necessario per proteggere l'estensimetro da urti e agenti ambientali. Il tipo di protettivo più semplice è costituito da resine siliconiche.

Se l'estensimetro viene applicato su un materiale a basso modulo elastico si può verificare quello che prende il nome di effetto rinforzante.

Può essere necessario per proteggere l'estensimetro da urti e agenti ambientali. L'insieme estensimetro-adesivo limita la deformazione del materiale in esame; ciò si verifica, ad esempio, per i materiali compositi, nei quali l'estensimetro viene applicato sul rivestimento in resina epossidica, che presenta un modulo elastico piuttosto basso (figura4.16).

Un estensimetro misura la deformazione indipendentemente dalla sua causa. Se si vuole depurare la misura dalle deformazioni termiche, bisogna applicare un altro estensimetro uguale (estensimetro compensatore) in una parte scarica della struttura, oppure in un campione dello stesso materiale, non sollecitato. Per differenza si ricava la deformazione pura (figura 4.17).



Figura4.16: Applicazione estensimetro su di un tessuto di carbonio

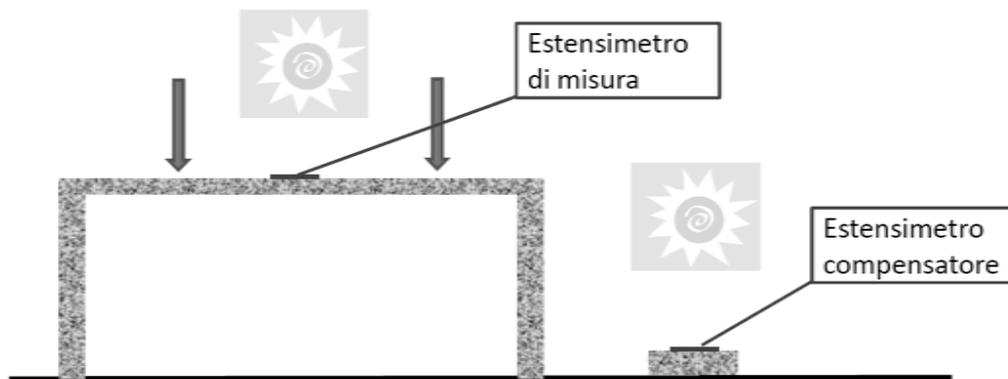


Figura 4.17

#### 4.10 SENSORI A FIBRA OTTICA (FOS: Fiber Optic Sensors)

I sensori a fibra ottica tradizionalmente utilizzati per il monitoraggio strutturale sono in grado di misurare deformazioni e temperatura con una buona accuratezza, ma forniscono informazioni ristrette a determinati punti della fibra e sono direzionali [27]. I sensori a fibra ottica di nuova generazione sono in grado di fornire informazioni più diffuse sfruttando il fenomeno della retrodiffusione della luce. La retrodiffusione si basa sul monitoraggio della parte riflessa di un segnale che si propaga attraverso un sistema ottico al fine di ottenere informazioni sulla posizione dei punti che causano la riflessione. Una luce laser a impulsi viene accoppiata ad una fibra ottica attraverso un accoppiatore direzionale. Quando l'impulso si propaga attraverso la fibra, la luce viene riflessa a causa di cambiamenti nella densità e composizione della fibra ottica. Poiché la velocità di propagazione della luce nelle fibre ottiche è nota, la distanza percorsa può essere determinata dal tempo di ritorno della luce retrodiffusa. Eventuali meccanismi di attenuazione del segnale dovuti a disomogeneità o difetti lungo la fibra possono essere quindi identificati.

La luce retrodiffusa è costituita da diverse componenti spettrali a causa dei diversi meccanismi di interazione tra l'impulso di luce e la fibra ottica (Güemes et al. 2010). Tra le componenti spettrali, sono note le componenti Rayleigh,

Brillouin e Raman. La lunghezza d'onda della componente Brillouin è correlata alla temperatura e alla deformazione locale della fibra.

I nuovi sensori a fibra ottica sfruttano questa importante caratteristica.

Le fibre ottiche sono componenti molto conosciuti, soprattutto grazie al loro impiego nel campo delle telecomunicazioni.

Molto meno noto è il loro impiego nel campo della sensoristica: infatti utilizzando componenti in fibra ottica è possibile realizzare sensori di temperatura, di deformazione, di accelerazione ecc.. Sebbene l'impiego di questi sensori non sia ancora molto diffuso a livello industriale, i vantaggi che presentano (alta risoluzione, immunità al rumore elettromagnetico, durata ecc.) e l'avanzato livello d'industrializzazione degli strumenti disponibili commercialmente, li rendono una valida e promettente alternativa ai sensori tradizionali di tipo elettrico ed elettromeccanico.

I sensori a fibra ottica sono di vario tipo, a seconda del principio fisico che sfruttano per trasdurre la grandezza da misurare in segnale ottico decodificabile.

Continuamente vengono condotte ricerche per il monitoraggio di fessure e zone interessate da importanti fenomeni di corrosione, per sviluppare nuovi test e nuove tecniche di misura per studiare i fenomeni di fatica e meglio comprendere i meccanismi coinvolti.

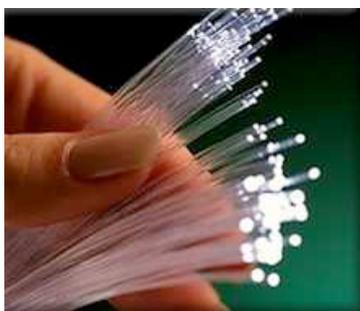


Figura4.18: Sensori a fibra ottica

Il monitoraggio “intelligente” è la nuova frontiera delle prove non distruttive e i sensori a fibra ottica sono molto promettenti per controlli in tempo reale.

In particolare possono essere usati per caratterizzare gli stati di tensione e deformazione dei materiali testati vicino l’apice della cricca o misurare eventuali fenomeni di chiusura della cricca stessa. I sensori in fibra ottica rispetto ai sensori tradizionali presentano diversi vantaggi.

Questi, infatti, sono flessibili, elettricamente e chimicamente passivi e immuni da interferenze elettromagnetiche, inoltre sono piccoli e trasparenti e per questo non recano disturbo alla struttura.

Hanno una bassa attenuazione del segnale, buona resistenza agli agenti atmosferici e poco sensibili alle variazioni di temperatura.

Possiedono un’elevata risoluzione, accuratezza, sensibilità e stabilità; la possibilità di misurare una grande varietà di grandezze fisiche (deformazioni, spostamenti, rotazioni, accelerazioni, temperature, vibrazioni, velocità e livello dei liquidi, umidità, tensioni, forze, ...). Sono inoltre poco costosi e possono essere disposti con facilità anche in punti complicati.

I difetti sono dati dalla fragilità al piegamento per i sensori a fibra nuda, il costo elevato (ma in diminuzione), in alcuni casi difficoltà di applicazione in quanto il jacket polimerico può pregiudicare l’aderenza con l’adesivo ed infine l’impossibilità di essere riutilizzati.

I sensori in fibra ottica possono venire inglobati all’interno del materiale da monitorare o incollati sulla sua superficie.

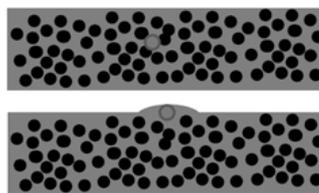


Figura4.19: Esempio di sensori a fibra ottica inglobati all’interno del materiale

In questa maniera è possibile ottenere un monitoraggio in situ in tempo reale dello stato di deformazione di una struttura.

Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno un campo elettromagnetico di frequenza sufficientemente alta (in genere in prossimità dell'infrarosso) con perdite estremamente limitate.

Sono filamenti di materiali vetrosi o polimerici, realizzati in modo da poter condurre la luce. Sono disponibili sotto forma di cavi con un diametro di 125 micrometri e una singola fibra pesa circa 60 g/km, compresa la guaina che la ricopre. Ogni singola fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o *core*, ed un mantello o *cladding* attorno ad esso realizzati in silice oppure in polimeri plastici.

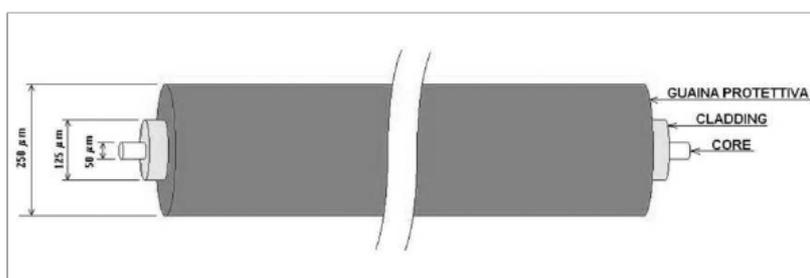


Figura4.20: Sezione di un sensore a fibra ottica

I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso, il cladding deve avere un indice di rifrazione minore (tipicamente vale 1,475) rispetto al core (vale circa 1,5). Come ulteriore caratteristica il mantello (*buffer*) deve avere uno spessore maggiore della lunghezza di smorzamento dell'onda evanescente, caratteristica della luce trasmessa in modo da catturare la luce che non viene riflessa nel core.

All'esterno della fibra vi è una guaina protettiva polimerica detta *jacket* che serve a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione ed evitare il contatto fra la fibra e l'ambiente esterno.

I diversi tipi di fibre si distinguono per diametro del core, indici di rifrazione, caratteristiche del materiale, profilo di transizione dell'indice di rifrazione e

drogaggio (aggiunta di piccole quantità di altri materiali per modificare le caratteristiche ottiche).

Se un raggio luminoso si propaga in un mezzo trasparente come il vetro, ed incontra un altro mezzo ugualmente trasparente, con un indice di rifrazione minore, come l'aria, viene in parte riflesso ed in parte rifratto.

La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare(figura 4.21): la luce che entra nel core ad un certo angolo (angolo limite) si propaga mediante una serie di riflessioni sulla superficie di separazione fra i due materiali del core e del cladding.

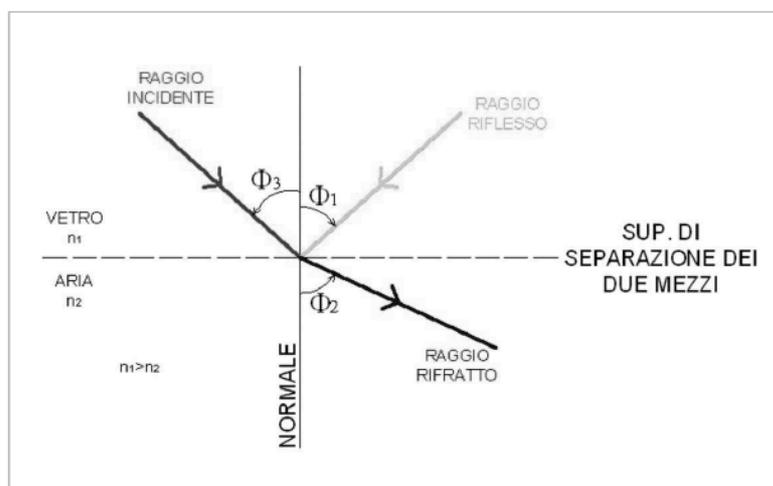


Figura4.21: Rappresentazione dell'angolo di incidenza

All'aumentare dell'angolo d'incidenza  $\Phi_3$ , anche l'angolo di rifrazione  $\Phi_2$  cresce, ma più velocemente, fino a quando il primo raggiunge il valore ,detto angolo limite ed il secondo arriva a  $90^\circ$ , non dando più luogo a rifrazione.

Nelle fibre ottiche avviene un fenomeno di riflessione totale interna, tutta la luce viene riflessa e rimane nel nucleo, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente, in pratica finché la fibra non compie curve troppo brusche.

L'angolo limite vale:

$$\Phi_{\text{lim}} = \arcsen \frac{1.475}{1.5} = 79.52^\circ$$

Se l'angolo d'incidenza non è inferiore a questo valore, il raggio luminoso rimane all'interno del nucleo.

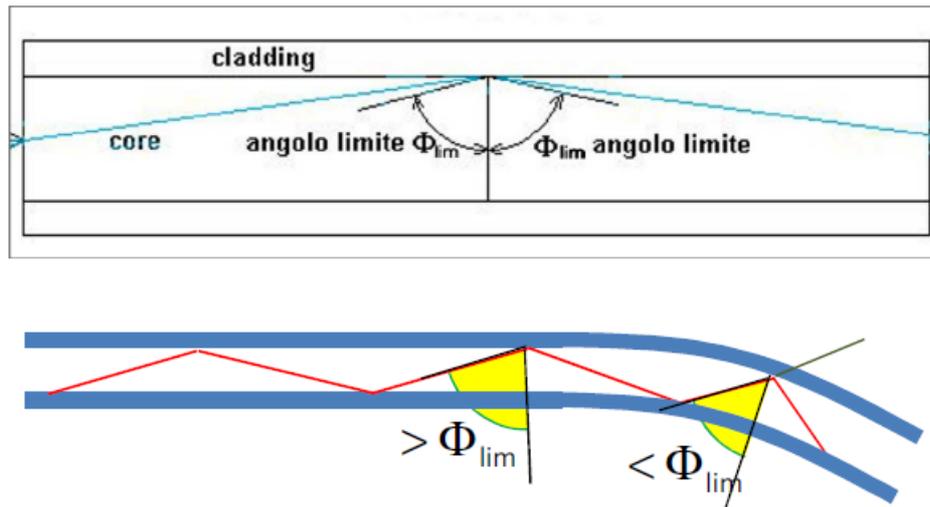


Figura4.22: Variazione dell'angolo di incidenza

Se la fibra viene curvata, l'angolo di incidenza diminuisce e può diventare minore del valore limite, pregiudicando la trasmissione del segnale luminoso. All'interno di una fibra ottica il segnale può propagarsi in modo rettilineo oppure essere riflesso un numero molto elevato di volte. Il modo di propagazione rettilineo si dice di *ordine zero*. Le fibre *monomodali* consentono la propagazione di luce secondo un solo modo ed hanno un diametro del core compreso tra 8  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . Quelle *multimodali* consentono la propagazione di più modi e hanno un diametro del core di 50  $\mu\text{m}$  o 62.5  $\mu\text{m}$ . Il cladding ha tipicamente un diametro di 125  $\mu\text{m}$ (figura 4.23).

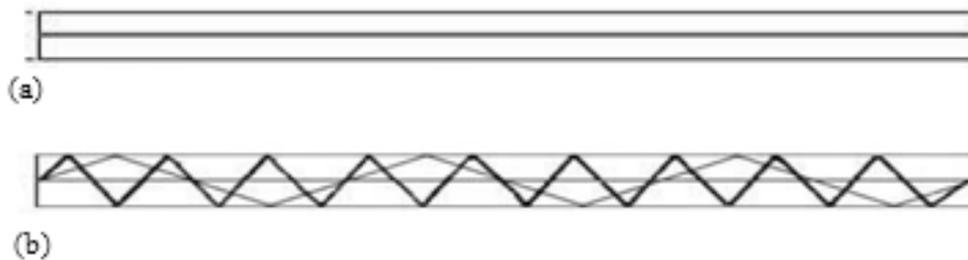


Figura4.23: Propagazione del segnale all'interno della fibra in modo rettilineo (a) e in diversi modi (b) ;

Nel percorrere una fibra ottica, il raggio luminoso subisce una attenuazione, all'aumentare della lunghezza d'onda l'attenuazione diminuisce e si possono raggiungere distanze maggiori.

Le fibre comunemente utilizzate per realizzare i sensori sono di solito monomodali, con lunghezza d'onda intorno a 1550 nm.

Le distorsioni nella fibra ottica portano a:

- Dispersione modale: fenomeno dovuto al fatto che il raggio luminoso non viaggia all'interno della fibra secondo un cammino prefissato, ma secondo un numero finito di modi (derivanti dalla legge di Snell). Vi saranno modi attraverso i quali il raggio arriva più velocemente a destinazione, altri che invece lo fanno arrivare più tardi (nel primo caso limite il raggio percorre la fibra ottica completamente dritto; nel secondo caso limite il raggio entra nella fibra con angolo uguale all'angolo limite di accettazione, e deve quindi eseguire un numero molto alto di riflessioni. Ovviamente, un percorso del tutto dritto è più veloce di un percorso a zig-zag). A causa di questo, la forma del segnale originario viene dilatata nel tempo, e se la frequenza è troppo alta può arrivare a confondersi con l'impulso seguente (interferenza intersimbolica), impedendo dunque di leggere il segnale originario. Per ovviare a questo inconveniente, si possono utilizzare fibre multimodali

*graded index* (nelle quali l'indice di rifrazione varia con continuità del centro del core fino al cladding) o fibre monomodali.

- Dispersione cromatica: fenomeno dovuto al fatto che la luce pura che viene trasmessa si compone in realtà di fasci di luce di colore diverso, con lunghezza d'onda e velocità di attraversamento diverse. Si ha lo stesso problema visto sopra: può capitare che il fascio luminoso di colore rosso (il più veloce) si confonda con il fascio luminoso di colore violetto (il più lento) dell'impulso inviato precedentemente, rendendo impossibile la decodifica del segnale originario. Per risolvere questo problema si utilizzano led monocromatici per trasmettere la luce.

Come generatore di luce si può utilizzare un led o un laser.

Quest'ultimo è preferibile perchè è caratterizzato da uno spettro di frequenze molto più stretto e conseguentemente presenta una minore dispersione cromatica.

#### **4.10.1 Tipologie di sensori a fibra ottica:**

- Sensori locali
  - ✓ sono contenuti nella fibra ottica;
  - ✓ lunghezza compresa tra i 5 mm e qualche centimetro;
  - ✓ i più diffusi sono i sensori Fabry Perot ed i reticoli di Bragg;
- Sensori distribuiti
  - ✓ la fibra ottica non subisce alcun trattamento;
  - ✓ l'unità di lettura può eseguire la lettura in qualunque punto della fibra;
  - ✓ la risoluzione non è elevata, ma la fibra può essere lunga anche centinaia di metri;
  - ✓ i più utilizzati nel monitoraggio strutturale sono i Brillouen;

- Sensori estrinseci
  - ✓ sono quelli in cui la fibra ottica e' un componente interno di un trasduttore di spostamento assoluto o relativo;
  - ✓ i più diffusi sono gli interferometri a bassa coerenza;

Attualmente, sono in commercio svariati tipi di sensori a fibra ottica idonei al monitoraggio strutturale, essi sono stati sviluppati soprattutto negli ultimi vent'anni in ambito accademico ed industriale.

In base alla *lunghezza* si distinguono:

- Sensori corti: in genere hanno una lunghezza compresa tra i 5 mm e qualche centimetro e vengono utilizzati per controllare materiali moderatamente regolari come ad esempio le malte sciolte o consistenti. Essi rilevano deformazioni minori all'1‰, ciò permette di costruire sensori con una sezione trasversale ristretta. Risultano molto utili nella riabilitazione strutturale per monitorare gli strati sottili di vecchi materiali. I sensori corti più diffusi in ambito civile e descritti dettagliatamente in seguito sono i sensori Fabry Péroet ed i reticoli di Bragg (FBG).
- Sensori standard: hanno una lunghezza compresa tra 25cm e 6 metri e sono in grado di misurare deformazioni fino al 5‰, sia in trazione che in compressione. Vengono utilizzati in gran parte delle applicazioni civili per il monitoraggio strutturale poiché sono basati sul principio dell'accoppiamento locale (fibra di riferimento e fibra di misura) e possono essere direttamente annegati nel calcestruzzo, nella malta o collocati sulle superfici delle strutture. Qualora vengano predisposti sul calcestruzzo fresco, possono controllare le deformazioni durante la fase di maturazione. Tali sensori sono molto resistenti, hanno una sezione trasversale massima nei punti di ancoraggio di 1.5cm , la loro parte attiva ha un diametro di circa 8mm e possono venire installati velocemente.

- Sensori lunghi: sono dotati di una lunghezza attiva che può arrivare anche ad una cinquantina di metri. Basati sul principio dell'accoppiamento locale, sono difficili da produrre. Essi risultano particolarmente adeguati per il monitoraggio di fondazioni, dighe e paratie. I sensori lunghi più utilizzati sono: Brillouin, Raman, Rayleigh, Microbending, Sofo.

Nella maggior parte dei casi vengono impiegati più sensori standard in serie (funzionamento multiplex) in sostituzione dei sensori lunghi poiché non risulta semplice concretizzare l'autonomia meccanica della fibra di misura rispetto a quella di riferimento.

Un'altra categoria di classificazione dei FOS può essere fatta in base al *posizionamento* del sensore rispetto alla fibra, si possono così ottenere:

- Sensori intrinseci: prendono posto all'interno della fibra. Tale tipologia è costituita dai sensori Brillouin, Raman, Rayleigh, Kerr, Blackbody, Macrobending, Microbending, Interferometric.
- Sensori estrinseci: prendono posto all'esterno della fibra e sono: reticoli, fluorescence, doppler shift, photoelastic, evanescent field, etalon e pyrometers.

Vi è inoltre un'ulteriore classificazione dei FOS in base alla *tipologia* delle proprie *reti di comunicazione*:

- Sensori singoli: sono posizionati solo nei punti specifici in cui si ha bisogno di ottenere le informazioni necessarie. Come illustrato in figura, essi permettono una misura puntuale dei parametri d'interesse. Ciò costituisce una difficoltà quando si vuole monitorare una grandezza ad elevata risoluzione su lunghe distanze. In tal caso, infatti, sono necessari migliaia di sensori che devono essere interrogati in serie

mediante complicate reti di multiplexing, con un conseguente aumento dei costi e della complessità del monitoraggio.

- Sensori quasi distribuiti: sono in grado di misurare i parametri di interesse in alcuni punti specificatamente trattati di una singola fibra, come mostrato in figura 4.27 .

I sensori di questo tipo che hanno raggiunto un avanzato livello tecnologico sono quelli a reticolo di Bragg (FBG) (Figura 4.24).

- Sensori distribuiti: hanno la capacità di effettuare misure con continuità spaziale su tutta la lunghezza della struttura di interesse .La fibra percorre tutto lo sviluppo lineare dell'opera monitorata ed è percorsa costantemente da un segnale. Possono svilupparsi quindi anche per diversi chilometri, verificando che non si formino eccessive incrinature, dilatazioni e compressioni.

Questi hanno un costo sensibilmente minore dei sensori puntuali , riescono a trovare il punto critico del sistema con una precisione nell'ordine del cm su svariati km di fibra e inoltre colgono variazioni di temperatura di mezzo grado centigrado. I più conosciuti sono basati sullo scattering di Brillouin, di Raman e di Rayleigh (figura 4.24).

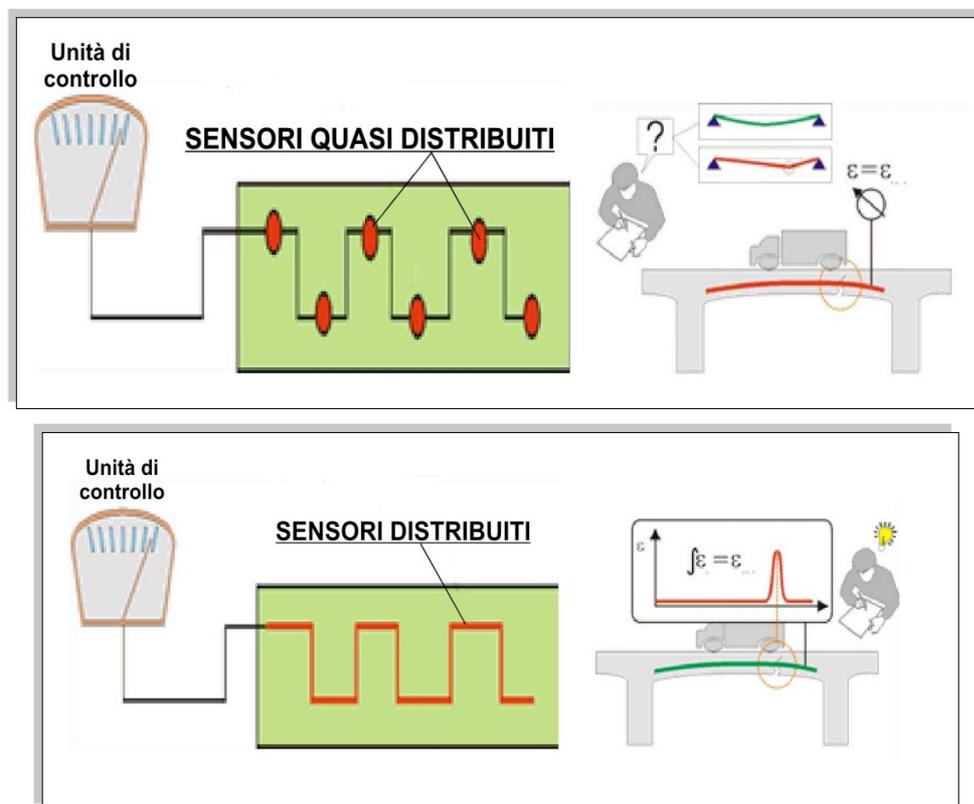


Figura4.24: Sensori quasi distribuiti e distribuiti

In ambito puramente strutturale è possibile classificare i FOS in base ai *parametri misurati* come riassunto dalla seguente tabella:

Sistema di misura	Parametri misurati
<i>Bragg gratings (FBG)</i>	Deformazione, spostamento, temperatura, pressione.
<i>Fabry Pérot</i>	Deformazione, temperatura, pressione.
<i>Microbending</i>	Temperatura, deformazione, pressione.
<i>Sofo<sup>®</sup></i>	Spostamento, deformazione, inclinazione.
<i>Raman</i>	Temperatura distribuita.
<i>Brillouin</i>	Temperatura e deformazione distribuite.

Figura4.25: Tabella riassuntiva dei parametri misurati dai diversi sensori

Si passa ora alla descrizione dettagliata di ogni tipo di sensore elencato precedentemente nelle diverse classificazioni.

#### 4.10.2 Sensori a reticolo di Bragg FBG (Fiber Bragg Grating)

Il sensore FBG è praticamente uno strain gage ottico ottenuto fotoincidendo nel core della fibra ottica un reticolo di materiale caratterizzato da un indice di rifrazione differente.

La modulazione dell'indice di rifrazione del nucleo è dovuta a tecniche interferometriche: la porzione del core che si trasforma in reticolo, viene dapprima resa fotosensibile tramite un opportuno drogaggio (in genere con atomi di germanio) e successivamente, esposta ad un fascio di radiazioni ultraviolette spazialmente modulato in intensità che riesce a modificare localmente “ $n$ ” in maniera proporzionale all'energia incidente. Altre tecniche d'incisione prevedono la scrittura del reticolo impiegando raggi UV di sorgente coerente diretti sul core della fibra mediante tecniche oleografiche o maschere di fase. Il risultato di questo processo è quello di ottenere una periodica variazione dell'indice di rifrazione del core della fibra nella direzione longitudinale. La conseguenza finale è che al passaggio di un fascio luminoso a banda larga lungo la fibra, il reticolo così fotoinciso riflette.

Il reticolo di Bragg è un reticolo di diffrazione realizzato su un piccolissimo segmento del nucleo della fibra ottica (5 ÷ 10 mm). E' ottenuto modulando in maniera periodica l'indice di rifrazione.

Una radiazione UV, di solito proveniente da un laser, viene fatta passare attraverso una maschera di fase posta sulla fibra ottica.

Se della luce bianca viene iniettata nella fibra contenente un reticolo, una lunghezza d'onda caratteristica del reticolo viene completamente riflessa, mentre tutte le altre lunghezze d'onda della fibra attraversano il reticolo.

$\lambda_{\text{Bragg}}$  = lunghezza d'onda di Bragg

$\Lambda$  = passo del reticolo

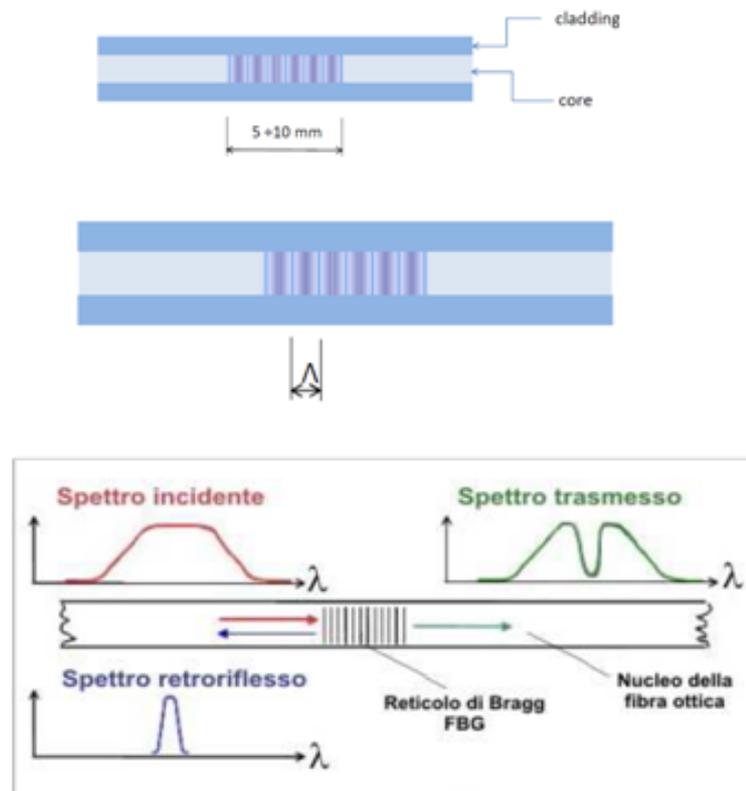


Figura4.26: Rappresentazione del reticolo di Bragg e della modulazione del segnale

La componente spettrale di luce che viene riflessa è quella con lunghezza d'onda:  $\lambda = 2n\Lambda$ .

I sensori vengono resi solidali alla struttura mediante incollaggio esterno o inserimento all'interno. Ogni cambiamento di periodo del reticolo, dovuto alla deformazione del materiale sul quale è applicato, causa uno spostamento del picco di Bragg. La variazione di lunghezza d'onda può essere dovuta a deformazione meccanica o a variazioni termiche.

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = \Delta\lambda_{\text{BraggM}} + \Delta\lambda_{\text{BraggT}}$$

Se la variazione di temperatura e la deformazione avvengono simultaneamente, è necessario utilizzare un reticolo di riferimento libero che misuri la

temperatura, e utilizzare questa misura per correggere quella ottenuta dai reticoli accoppiati meccanicamente alla struttura.

Risoluzione:

- 1  $\mu\text{m}$  per misure di deformazione;
- 0,1  $^{\circ}\text{C}$  per misure di temperatura.

Le parti che compongono il sistema di misura che utilizza i sensori FBG sono essenzialmente (figura 4.27):

- la fibra ottica con i sensori FBG;
- il cavo in fibra ottica di collegamento tra i sensori e l'elettronica di controllo;
- l'elettronica di controllo;
- un PC connesso con l'elettronica di controllo tramite un cavo locale, rete locale, Internet, o modem GSM;

Una volta installati i sensori FBG funzionano per anni senza subire danni causati dall'invecchiamento dei materiali, dalla corrosione, dall'azione degli agenti atmosferici cui sono soggetti i sensori elettro-meccanici tradizionali. Questa caratteristica risulta particolarmente importante nei casi in cui si renda necessario un monitoraggio di lunga durata o permanente di strutture da proteggere per il loro alto valore artistico, architettonico, industriale o civile. Le misure effettuate in periodi diversi sono sempre coerenti e correlate fra di loro e non è necessario una sostituzione periodica dei sensori. Possono essere installati a distanza di una decina di Km dall'elettronica di controllo: questa caratteristica è legata alla bassissima attenuazione che i segnali ottici subiscono durante la loro propagazione lungo la fibra ottica. In alcuni casi la fibra viene applicata senza alcuna protezione( figura 4.28).

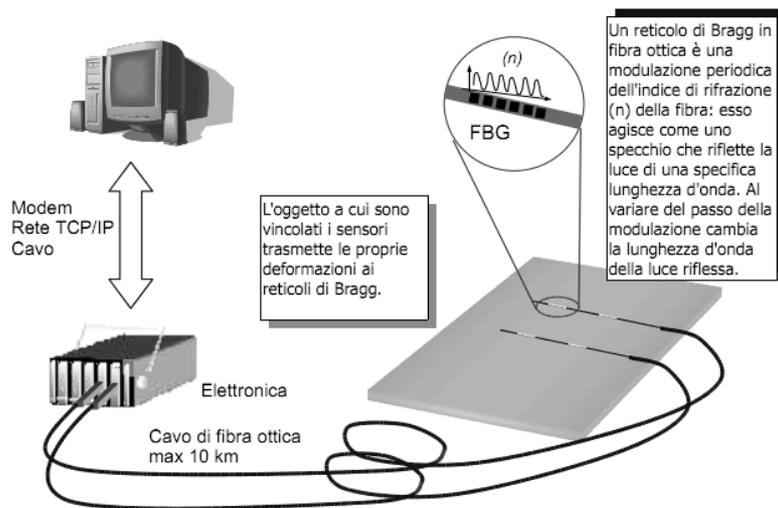


Figura4.27: Componenti di un sistema che utilizza i sensori FBG

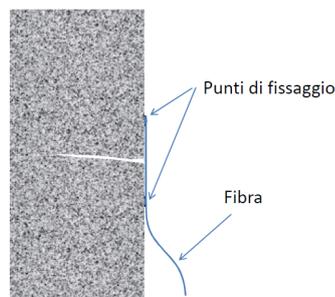


Figura 4.28: Applicazione di una fibra

Una caratteristica peculiare dei sensori FBG è il multiplexing: molti reticoli possono, infatti, essere “scritti” nella stessa fibra in posizioni differenti ed essere impostati per riflettere lunghezze d'onda diverse, questo consente di avere a disposizione più sensori con minor ingombro utilizzando un solo strumento di interrogazione.

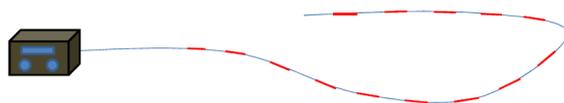


Figura 4.29: Multiplexing

Ciò permette la misura in punti diversi di una singola fibra, realizzando così una misura “quasi-distribuita”.

- Elenco dei vantaggi nell'utilizzo di FBG:

Dunque ricapitolando i vantaggi dei sensori a fibra ottica basati su reticoli di Bragg, rispetto ai sensori tradizionali elettrici o meccanici, sono:

➤ Alta risoluzione, dinamica e accuratezza:

I sensori basati su reticoli di Bragg offrono, infatti, un'alta risoluzione, cioè la capacità di rilevare una variazione molto piccola della grandezza da misurare. Questa è pari a una parte per milione ( $10^{-6}$ ) della lunghezza d'onda della luce utilizzata da questi sensori (si ricorda che i sensori a fibra ottica FBG codificano le misure sotto forma di variazioni di lunghezza d'onda della luce). Offrono inoltre un'alta dinamica. La dinamica, cioè la capacità di misurare una grandezza fisica in un suo ampio intervallo di variazione con una determinata risoluzione, è legata soprattutto alla struttura della fibra ottica ed è pari ad almeno 10.000 parti per milione della lunghezza d'onda della luce utilizzata da questi sensori.

I sensori basati su reticoli di Bragg offrono un'alta accuratezza. L'accuratezza, cioè il massimo scostamento tra il valore misurato e il valore reale della grandezza fisica misurata, è espressa in percentuale del massimo valore misurabile (fondoscala). Per i sensori a FBG tale valore è pari a circa 2 parti per milione della lunghezza d'onda della luce utilizzata da questi sensori, che in percentuale corrisponde al 0,02 % del fondo scala. In base a quanto precedentemente affermato, i sensori FBG permettono di effettuare la misura assoluta di deformazioni con una accuratezza di circa  $2 \times 10^{-6}$ .

➤ Immunità al rumore elettromagnetico:

Gli FBG sono intrinsecamente immuni al rumore elettromagnetico: questa caratteristica è dovuta al materiale con cui sono realizzate le fibre ottiche, il vetro. Questo è un materiale dielettrico, allora i campi elettromagnetici non possono ovviamente indurre correnti elettriche in esso, come invece succede in presenza di cavi in rame. Inoltre i campi elettromagnetici non possono modificare la luce che attraversa la fibra ottica. Pertanto i sensori a fibra ottica FBG possono attraversare o essere posti in ambienti con forte rumore elettromagnetico, dovuto ad esempio a macchinari elettrici, linee elettriche, antenne ecc.

➤ Stabilità nel tempo:

I sensori a fibra ottica FBG sono caratterizzati da una alta stabilità nel tempo: questa caratteristica è legata al materiale che costituisce la fibra ottica, il vetro, che non “invecchia” mai. Una volta installati i sensori FBG funzionano per anni senza patire le consuete derive dovute all'invecchiamento dei materiali, alla corrosione, all'azione degli agenti atmosferici a cui sono soggetti i sensori elettro-meccanici tradizionali. Questa caratteristica risulta particolarmente importante nei casi in cui si renda necessario un monitoraggio di lunga durata o permanente di strutture da proteggere per il loro alto valore artistico, architettonico, industriale o civile. Le misure effettuate in periodi diversi sono sempre coerenti e correlate fra di loro e non è necessario una sostituzione periodica dei sensori non sono più affidabili.

➤ Installazione a grande distanza:

I sensori a fibra ottica FBG possono essere installati a distanze dell'ordine della decina di Km dall'elettronica di controllo: questa caratteristica è legata alla bassissima attenuazione che i

segnali ottici subiscono durante la loro propagazione lungo la fibra ottica. Quindi anche strutture di grandi dimensioni, quali ponti, stabilimenti industriali, torri, campanili, chiese ecc. possono essere controllati da un unico sistema centralizzato, a cui fanno capo i sensori installati anche a grande distanza.

➤ Bassa intrusività:

I sensori FBG sono costituiti essenzialmente da una fibra ottica, le cui dimensioni esterne sono molto contenute (diametro della fibra ottica= 250 micron): questa caratteristica può venire sfruttata appieno quando sia necessario posizionare i sensori in spazi molto ristretti o sia necessario evitare di sovraccaricare struttura molto delicate con il peso del sensore. Si pensi ad esempio alla necessità di installare sensori di deformazione (estensimetri) su un affresco o una tela antica.

➤ Trasferimento dati via rete e/o wireless:

L'elettronica di controllo è predisposta per l'interfacciamento con il Personal Computer di controllo tramite scheda di rete: in questo modo da qualsiasi postazione connessa alla stessa rete, ad esempio INTERNET o una rete locale, è possibile impostare le misure, controllare in tempo reale il funzionamento dei sensori, scaricare i dati acquisiti.

I sensori in fibra ottica basati sul principio dei reticoli di Bragg sono i più interessanti nell'ambito del monitoraggio strutturale.

La fibra ottica però è molto fragile, per questo, nelle applicazioni dell'ingegneria civile gli FBG vengono in molti casi protetti con tubi metallici o altri sistemi. Un campo innovativo di applicazione dei sensori a fibra ottica FBG è la conservazione dei beni architettonici e artistici. La durata nel tempo di edifici antichi, sia che siano essi stessi il patrimonio artistico da proteggere, sia che costituiscano il "supporto" di altre opere d'arte, non può prescindere da

una accurata diagnosi della loro stabilità e dei dissesti che si manifestano sotto forma di lesioni alla struttura. Gli interventi di consolidamento strutturale devono, infatti, basarsi sull'esatta comprensione delle cause e della dinamica del dissesto: questo compito è facilitato dall'installazione di un sistema di monitoraggio che, tramite sensori installati in punti opportuni, permette di rilevare la dinamica del quadro fessurativo. L'analisi degli incrementi e dei decrementi dell'ampiezza delle fessure, correlata agli effetti climatici, ambientali e di carico, consente di correlare le possibili cause ai risultati delle misure. In modo analogo possono essere misurati altri parametri, quali la planarità o la perpendicolarità tra due superfici, l'effetto di cause ambientali quali il traffico stradale o l'effetto di carichi dinamici prodotti, ad esempio, dall'oscillazione delle campane o dal passaggio dei visitatori. Terminato l'intervento di consolidamento strutturale il sistema di monitoraggio ha la funzione di validare l'efficacia dell'intervento stesso. I sensori a fibra ottica sono uno strumento diagnostico di monitoraggio strutturale che offre una miglior risoluzione, flessibilità d'impiego e minore intrusività rispetto agli strumenti tradizionali: queste caratteristiche si traducono in misure e, quindi, in valutazioni tecniche più accurate, minori tempi e costi d'indagine, minore impatto sull'opera d'arte o struttura analizzata. I sensori a fibra ottica sono trasduttori di deformazione: a seconda di come il sensore viene applicato alla struttura e della banda in cui viene acquisito il segnale, tali sensori agiscono da estensimetro, vibrometro o inclinometro.

#### **4.10.3 Sensori di Fabry Pérot**

I sensori basati sull'interferometro di Fabry Pérot fanno parte della classe di sensori corti e singoli. Sono costituiti da un tubo capillare di vetro che contiene due fibre ottiche accuratamente tagliate che si fronteggiano lasciando una piccola distanza tra le due, generalmente tra 10 e 100 micron (cavità di Fabry-Pérot). I sensori basati sull'interferometro di Fabry Pérot fanno parte della classe di sensori corti e singoli.

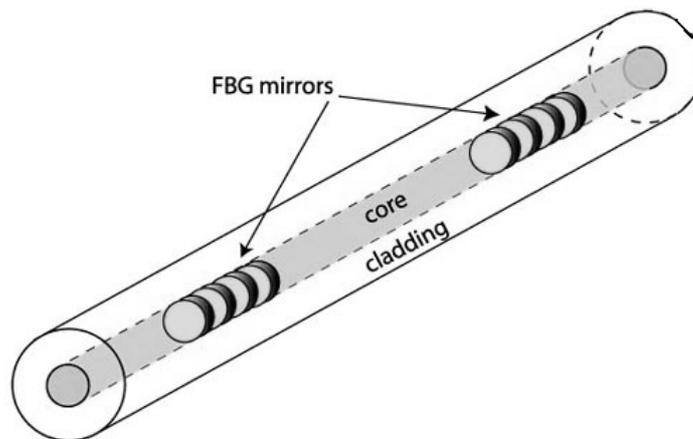


Figura4.30: Sensore di Fabry Pérot

Quando la luce è lanciata in una delle fibre, si verificano fenomeni di riflessione all'interfaccia vetro-aria e aria-vetro, in questo modo la luce viene modulata.

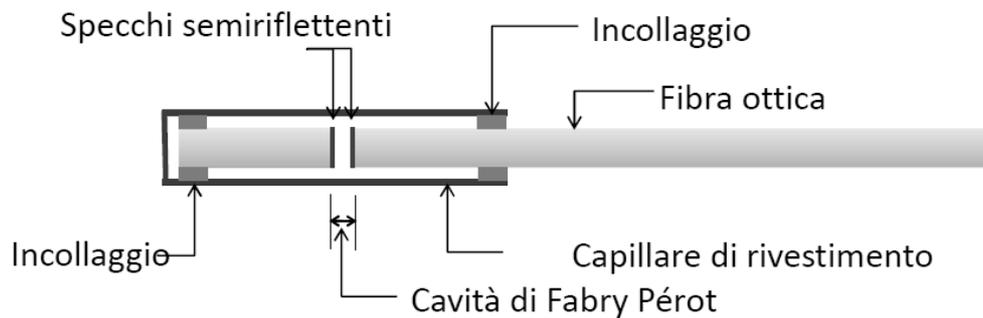


Figura4.31: Schema del sensore

Il raggio retro-riflesso viene demodulato all'interno dell'unità di acquisizione e fornisce il valore della lunghezza della cavità di Fabry Perot tramite tecniche di interferometria coerente. Quando il sensore è applicato sulla superficie di un materiale che subisce una deformazione, la lunghezza della cavità si modifica ed il suo valore, convertito in deformazione, viene letto sull'unità di controllo e trasmesso ad un'unità di acquisizione dati.

Non è possibile installare più sensori di questo tipo lungo la stessa fibra. Per monitorare più posizioni è necessario utilizzare una fibra per ogni sensore e disporre un multiplexer, come rappresentato in figura 4.37.

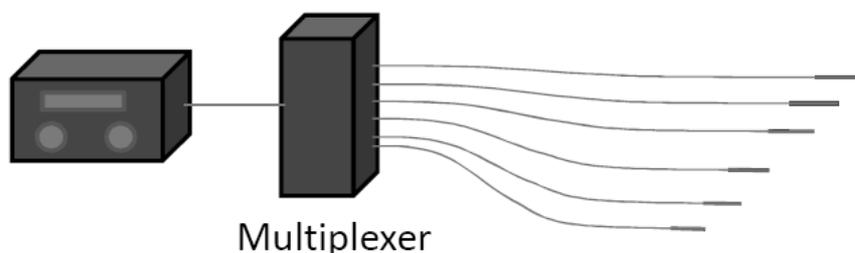


Figura 4.32

#### 4.10.4 Sensori di Brillouin

Esistono due tipi di sensori Brillouin: i Brillouin Optical Time Domain Reflectometers (BOTDR) e i Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Lo scattering Brillouin è dovuto all'interazione tra il segnale ottico e le onde acustiche presenti nelle fibre di silicio (Inaudi et al. 2006). In seguito alla diffusione la luce può subire uno spostamento Doppler in frequenza la cui entità è funzione della temperatura e deformazione locale. Dall'analisi delle frequenze foniche misurate, si possono ricavare alcune proprietà fisiche lungo la fibra. Gli attuali strumenti BOTDR sono molto utili per misurare efficacemente deformazioni e temperature su una certa distanza (detta risoluzione spaziale), ma non sono adatti per individuare alcuni importanti fenomeni localizzati, come ad esempio le fessure nelle strutture in cemento armato. La risoluzione dipende dalla larghezza d'impulso della luce emessa dal BOTDR ed è di circa due metri per una larghezza di impulso di 20 ns. I sensori BOTDA sfruttano invece un fenomeno noto come Stimulated Brillouin Scatter (SBS). La configurazione di questo sensore prevede l'utilizzo contemporaneo di due laser che lavorano in direzioni opposte sulla stessa fibra ottica, uno dei due con emissione continua e l'altro con emissione pulsata. Quando la

differenza di frequenza fra i due laser è uguale alla frequenza di Brillouin della fibra, i due raggi laser all'interno delle fibre e le onde acustiche generate in essa interagiscono tra di loro causando un'amplificazione del segnale di Brillouin che può quindi essere rilevato e localizzato usando un apparato di campionamento OTDR. Le misure di deformazione e temperatura vengono ottenute attraverso una scansione della differenza di frequenze dei due laser che permette di definire lo spettro di Brillouin. I sistemi attuali hanno una risoluzione spaziale dell'ordine di 10 cm e tale risoluzione potrà essere ulteriormente ridotta. La diffusione di Brillouin è il risultato dell'interazione fra le onde acustiche e le onde ottiche che si propagano nella fibra. Onde acustiche termicamente eccitate producono una modulazione periodica (non permanente) dell'indice di rifrazione della fibra. La luce che si propaga nella fibra viene diffratta all'indietro da questo reticolo in movimento, generando una componente spostata in frequenza. L'intensità riflessa è rilevata in funzione dello spostamento di frequenza e del tempo di volo.

- Lo spostamento di frequenza fornisce una misura della deformazione.
- Il tempo di volo fornisce la posizione in cui tale deformazione si è verificata.

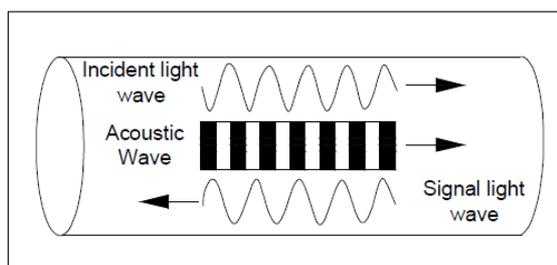


Figura4.33: Sensore di Brillouin

In questo caso vi è la possibilità di un monitoraggio continuo su tutta la fibra, anche per lunghezze molto elevate (km) e l'utilizzo della fibra senza alcuna lavorazione. Gli svantaggi sono dati dalla bassa risoluzione ( $20 \mu\epsilon$ ) e dall'elevato costo dell'unità di acquisizione.

## 4.11 SOFO

I sensori Sofo vengono adoperati nell'omonimo sistema di monitoraggio brevettato dagli svizzeri della "Smartec s.a." basato sull'interferometria a bassa coerenza utilizzata nei sensori a fibre ottiche. La sigla Sofo è l'acronimo francese di "Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques" e sta per "Monitoraggio strutturale a fibre ottiche"; le parti integranti dell'intero apparato comprendono i sensori Sofo a fibra ottica, l'unità di interrogazione ed il software dedicato come mostrato in figura 4.34.

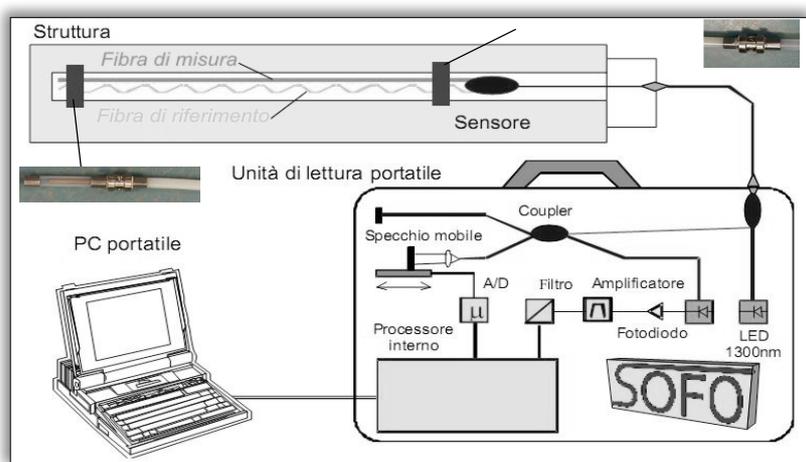


Figura4.34: Sistema di monitoraggio "Smartec"

Ogni sensore è costituito da due fibre ottiche, una di misura ed una di riferimento, ambedue racchiuse in un tubicino protettivo in materiale plastico. La fibra di misura viene resa solidale alla struttura e ne segue le deformazioni sia in trazione che in compressione, essa viene infatti pretesa allo 0.5% della sua lunghezza. Tutt'altra funzione ha la fibra di riferimento la quale è lasciata libera ed indipendente dai movimenti del supporto; essa ha il compito di compensare gli effetti termici sulle misure dell'altra fibra. Dall'unità di lettura parte un segnale ottico che viene inviato tramite un led ad infrarossi; esso è suddiviso all'interno del sensore nelle due fibre ed è riflesso da due specchi collocati nelle teste di ciascuna fibra, successivamente ritorna all'unità di

lettura nella quale viene demodulato, trattato e decodificato per fornire i rapporti sullo spostamento, le deformazioni o l'inclinazione del supporto.

La base di misura di un sensore standard di deformazione è compresa tra 25cm e 10m con una risoluzione di  $2\mu\text{m}$  ed una precisione dello 0.2%. Il sistema dei sensori Sofo riesce a mediare la misura della deformazione lungo tutta la parte attiva del sensore, consentendo di eseguire un monitoraggio strutturale completo e non puntuale, senza quindi influenze dirette da parte di fenomeni locali tipo fessure o disomogeneità varie.

E' da notare che esistono anche dei sensori Sofo ad alta frequenza utilizzati nel sistema di misura Sofo dinamico. Ogni unità di lettura può essere utilizzata per acquisire sino ad 8 sensori contemporaneamente, inoltre nel momento in cui fosse necessaria la lettura di più sensori è possibile integrare più unità in parallelo.

#### **4.12 DIFFUSIONE RAYLEIGH**

I sensori distribuiti o quasi distribuiti che si basano sulla diffusione o sullo scattering di Rayleigh e, nell'aspetto teorico, sono molto simili a quelli descritti precedentemente. Come verrà mostrato nel paragrafo successivo, per lo scattering di Raman, quando un fascio di luce monocromatica incide su di un materiale, è possibile osservare la diffusione da parte di quest'ultimo di un certo numero di linee spettrali a frequenze maggiori, minori ed uguali alla frequenza della linea eccitatrice. Si parlerà quindi di scattering Rayleigh se la frequenza è la stessa della radiazione incidente (oppure di scattering Raman Stokes e anti-Stokes a seconda che la radiazione diffusa sia a frequenze minori o maggiori di quella incidente):

Uno schema di funzionamento di questi sensori, utili nella misurazione della temperatura e della deformazione, è riportato nella figura 4.34:

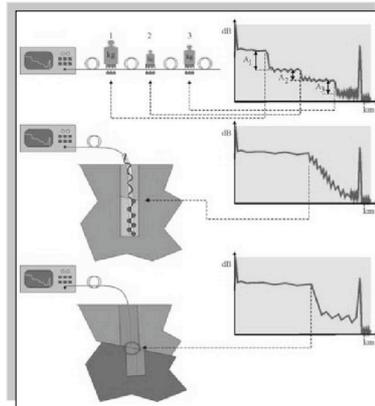


Figura4.35: Schema di funzionamento di un sensore basato sulla diffusione di Rayleigh

Tali sensori sono abbastanza economici anche nell'apparecchiatura utilizzata ed il loro numero massimo utilizzabile su un'unica fibra dipende dal range dinamico dell'OTDR (Optical Time Domain Reflectometer, riflettometro ottico nel dominio del tempo). L'accuratezza e la sensibilità diminuisce con la distanza di interrogazione, con la vicinanza di un sensore rispetto ad un altro e con la presenza di connettori, curvature e danneggiamenti lungo la fibra.

#### 4.13 DIFFUSIONE RAMAN

I sensori distribuiti basati sulla diffusione o lo scattering di Raman, provengono da un'influenza non lineare fra la fibra e la luce che si propaga nella fibra stessa. E' così possibile misurare il profilo di temperatura lungo tutto lo sviluppo della fibra emettendo un impulso ad un'estremità e misurando il rapporto tra l'intensità dell'impulso anti-Stokes e quello di Stokes (fenomeni di diffusione anelastica). In pratica, come illustrato nella figura 4.36, nel momento in cui un segnale energetico viene fatto entrare nella fibra con un'intensità  $I_i$  (rosso) si originano due nuovi segnali con lunghezze d'onda maggiori e minori del segnale originale. L'intensità relativa di Stokes  $I_S$  e di anti-Stokes  $I_A$  di questi due segnali dipende dalla temperatura locale della fibra.

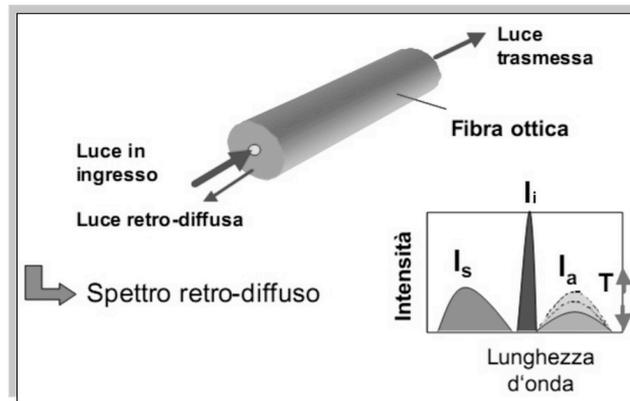


Figura4.36: Funzionamento di un sensore basato sulla diffusione di Raman

Pulsando il segnale luminoso, registrando l'intensità dello spettro retro-diffuso in funzione del tempo di volo, si ricava un profilo termico della fibra. Adoperando delle fibre ottiche multimodali, si può tranquillamente ottenere una risoluzione dell'ordine di  $0.1^{\circ}\text{C}$  per la temperatura ed una risoluzione spaziale di 1 metro su distanze fino a circa 10 chilometri. Se invece si utilizzano delle fibre monomodali è possibile creare una rete di monitoraggio di circa 30Km con una risoluzione di temperatura di  $2^{\circ}\text{C}$  ed una spaziale di 8metri.

#### 4.14 MICROBENDING

I sensori microbending vengono utilizzati per la misura della temperatura, della deformazione e della pressione su una base di misura abbastanza lunga. La parola “bending” dall’inglese vuol dire piegamento, curvatura, flessione, quindi si sfrutta il fatto che una fibra ottica multimodale è attorcigliata ad una seconda fibra o ad un filo metallico con una struttura simile a quella di un condensatore (figura 4.37).

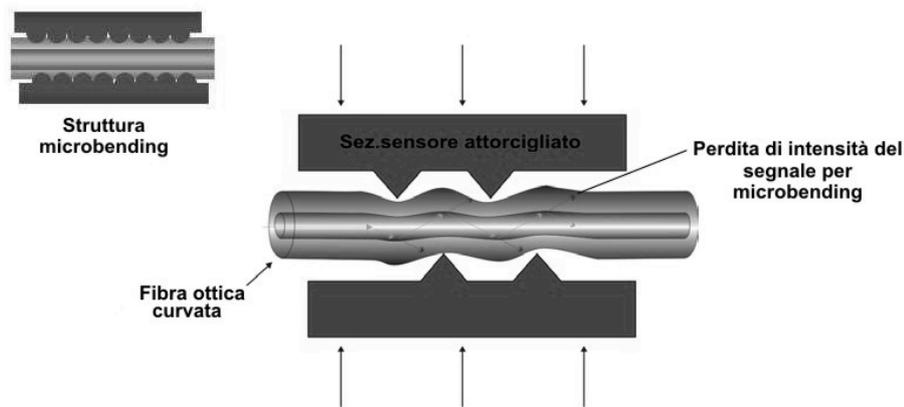


Figura4.37: Sensore microbending

Quando questo sistema viene deformato, si rileva un aumento della perdita di intensità del segnale per microbending, causato appunto dalle curvature introdotte reciprocamente tra le fibre. Valutando l'intensità della luce trasmessa si perviene alla deformazione o agli altri parametri da monitorare della struttura sulla quale è inserito il sensore.

Comunemente si possono conseguire risoluzioni dell'ordine di 10 micron per piccoli periodi e di nei 100  $\mu\text{m}$  lunghi periodi.

Tale classe di sensori, per quanto semplice nella sua modalità di funzionamento, mostra delle difficoltà rilevanti nella messa in opera, invero essi sono complicati da calibrare poiché risentono molto degli effetti termici e delle perdite di intensità a lungo termine; essi quindi sono soprattutto adatti per monitoraggi dinamici ed a breve termine.

#### 4.15 SENSORI A FIBRA OTTICA DISTRIBUITI

Le potenzialità di un sensore costituito da una semplice fibra ottica, in grado di fornire un profilo di deformazione o di temperatura per una lunghezza di diversi chilometri e una risoluzione spaziale inferiore al metro, sono enormi quando bisogna controllare grandi strutture come dighe, ponti, grandi edifici, etc. In questi casi, infatti, l'utilizzo di sensori puntuali richiederebbe la sistemazione di un elevato numero di sensori in un numero discreto di punti ritenuti strategici, con evidenti problemi di gestione dei dati e, in ogni caso,

non garantirebbe il monitoraggio dell'intera struttura. Inoltre, se un guasto o un cedimento avvenisse in una zona non coperta dai sensori, sarebbe impossibile segnalarlo. La capacità di consentire misure distribuite anche su lunghe distanze è, una volta ancora, un punto di forza della tecnologia delle fibre ottiche; esse consentono, difatti, di determinare i valori delle grandezze di interesse, in funzione della loro posizione, lungo l'intera lunghezza della fibra ottica. I sensori distribuiti risultano particolarmente utili quando è necessario eseguire misure in un gran numero di punti o con continuità lungo la fibra. Tipiche aree in cui trovano applicazione sono:

- ✓ il monitoraggio di deformazioni in grandi strutture come ponti, dighe, gallerie, edifici, serbatoi, pozzi petroliferi, navi, ecc.;
- ✓ le misure di profili di temperatura in trasformatori elettrici di potenza, generatori, reattori nucleari, gasdotti, oleodotti, sistemi per il controllo di processi e sistemi per la rivelazione di incendi;
- ✓ l'identificazione di perdite in condutture, la diagnostica dei guasti e la rivelazione di anomalie elettriche o magnetiche nei sistemi di distribuzione dell'energia elettrica;
- ✓ la valutazione, in tempo reale, delle deformazioni, delle vibrazioni e della temperatura nei materiali compositi mediante sensori inglobati negli stessi, in settori come l'industria aerospaziale.

Le tecniche impiegate per ottenere misure realmente distribuite sono basate su una qualche forma di meccanismo di diffusione della luce che avviene all'interno della fibra. La risoluzione spaziale è tipicamente ottenuta mediante la tecnica della riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR), nella quale vengono lanciati impulsi di luce nella fibra ottica e vengono misurate le variazioni dell'intensità retro-diffusa, causate dalla grandezza presa in

considerazione, in funzione del tempo. Attualmente, vengono implementate anche tecniche alternative, basate su misure nel dominio della frequenza.

#### **4.16 SENSORI PIEZOELETTRICI**

La comparsa dei dispositivi Mosfet a stato solido e lo sviluppo di materiali ad alto isolamento quali il Teflon e il Kapton hanno contribuito a migliorare sensibilmente le prestazioni dei sensori piezoelettrici, che oggi trovano posto virtualmente in tutte le aree della moderna tecnologia. I sensori piezoelettrici sono sistemi elettrici “attivi”; in altre parole, i cristalli producono un’uscita elettrica solo quando si verifica una variazione nel carico (stress) meccanico. Per questa ragione, non sono in grado di effettuare misure statiche nel vero senso della parola; non è comunque corretto affermare che la strumentazione piezoelettrica è in grado di effettuare solo misure dinamiche: trasduttori a quarzo, accoppiati ad adeguati circuiti per il condizionamento del segnale, possono effettuare misure quasi statiche in modo eccellente e con ottima precisione, su intervalli di minuti e finanche di ore. I sensori piezoelettrici sono utilizzati sia nei laboratori che nelle linee di produzione, in tutte quelle applicazioni che richiedono misure accurate dei cambiamenti dinamici di grandezze meccaniche quali la pressione, la forza e l’accelerazione. La lista delle possibili applicazioni continua a crescere, e a tutt’oggi comprende l’aerospazio, la balistica, la biomeccanica, l’ingegneria meccanica e strutturale. La maggior parte dei trasduttori piezoelettrici utilizza il quarzo come sensore, in virtù delle sue eccellenti caratteristiche: elevata resistenza allo stress meccanico, resistenza a temperature fino a 500 C, alta rigidità, alta linearità, isteresi trascurabile, sensibilità costante in un ampio range di temperature e bassissima conducibilità. Sono comunque in uso anche gli elementi piezo-ceramici. I trasduttori in quarzo consistono essenzialmente in sottili lastre di cristallo tagliate in modo opportuno (rispetto agli assi del cristallo), a seconda della specifica applicazione; il cristallo genera un segnale (una carica da pochi

picoCoulomb) che è proporzionale alla forza applicata. Il meccanismo piezoelettrico è semplice: quando al cristallo viene applicata una forza meccanica, le cariche elettriche si spostano e si accumulano sulle facce opposte. La forma e le dimensioni del cristallo dipendono dall'applicazione specifica; gli accelerometri in genere dispongono di una massa aggiuntiva (detta "sismica"). Esistono due diverse soluzioni: a pressione e a compressione; La configurazione a compressione ha il vantaggio di un'alta rigidità, che la rende adatta per la rilevazione di pressioni e forze ad alta frequenza. Alla semplicità del sistema a flessione si contrappone il limitato range di frequenze di funzionamento e la bassa tolleranza ai sovraccarichi meccanici. La configurazione "shear" (o a taglio) è quella tipicamente adottata negli accelerometri in quanto offre il giusto equilibrio tra range di frequenze utilizzabili, bassa sensibilità alle sollecitazioni fuori asse, bassa sensibilità alle sollecitazioni della base e bassa deriva termica. Il taglio del cristallo è spesso oggetto di brevetto; la maggior parte dei sensori Kistler, ad esempio, includono un elemento che è sensibile a carichi sia di compressione che shear; altri tagli "specializzati" includono il taglio trasversale (per alcuni trasduttori di pressione) e il taglio "polistabile" per trasduttori di pressione ad alta temperatura. La struttura tipica di sensori di forza, pressione e accelerazione è caratterizzata dalla presenza di un contenitore del sensore, il cristallo piezoelettrico e l'elettrodo dove si localizza la carica generata per effetto piezoelettrico prima che sia condizionata dall'amplificatore. L'accelerometro incorpora anche una massa. Non c'è molta differenza nella configurazione interna tra i diversi tipi di sensore. Negli accelerometri, che misurano la variazione di moto, la massa sismica viene costretta dal cristallo a seguire i movimenti della base e della struttura a cui è attaccata.

Dalla forza risultante è possibile ottenere l'accelerazione tramite la legge di Newton  $F = ma$ . I sensori di pressione e forza sono quasi identici, e in entrambi i casi la forza viene applicata direttamente sul cristallo; differiscono principalmente nel fatto che i sensori di pressione utilizzano un diaframma per convertire la pressione (che è forza per unità di area) in forza. A causa delle

sudette analogie, i sensori progettati per misurare una grandezza spesso sono sensibili anche ad altre sollecitazioni. Questa sensibilità è spesso indesiderata, e può essere ridotta con una progettazione accurata: nei sensori di pressione, ad esempio, può essere introdotto un elemento di compensazione per ridurre la sensibilità all'accelerazione; detto elemento altro non è che un accelerometro opportunamente calibrato connesso in serie al sensore di pressione, con polarità opposta. Un altro problema è la deriva termica del cristallo; questa può essere compensata mediante l'utilizzo di amplificatori con caratteristica termica opposta. Come già detto in precedenza, il segnale (una carica elettrica) generato dal cristallo va amplificato utilizzando un amplificatore ad elevata impedenza d'ingresso. Il dispositivo attivo è un amplificatore di tensione ad alto guadagno (in configurazione invertente) con ingresso a Fet o Mosfet. In sostanza, l'amplificatore agisce da integratore di carica, compensando la carica del trasduttore con una carica di valore uguale ma polarità opposta, producendo così una tensione ai capi del condensatore. In linea di principio, più che di amplificatore si dovrebbe quindi parlare di convertitore carica-tensione. I due parametri più importanti di cui tenere conto nell'utilizzo pratico degli amplificatori di carica sono la costante di tempo e il drift. La costante di tempo è definita come il tempo di scarica di un circuito accoppiato in AC: applicando in ingresso un gradino, trascorso un intervallo pari alla costante di tempo la tensione in uscita si riduce al 37% del suo valore iniziale. Il drift è definito come la variazione (indesiderata) del livello di uscita nel tempo, quando il segnale applicato in ingresso è costante. Dei due effetti uno sarà dominante: con ingresso "nullo" (forza sul cristallo costante) l'uscita dell'amplificatore di carica saturerà alla tensione di alimentazione (se a dominare sarà il drift) o decadrà a zero (alla velocità della costante di tempo). La costante di tempo ha inoltre un impatto importante sulle prestazioni del sensore nel suo complesso; in generale, più lunga è la costante di tempo, migliore è la risposta del sensore in bassa frequenza. Nella misura delle vibrazioni, l'amplificatore si comporta sostanzialmente come un filtro passa alto a singolo polo: se si vogliono misurare eventi impulsivi, la costante di tempo deve essere almeno 100 volte

più grande della durata totale dell'evento stesso; in caso contrario, la componente in continua del segnale d'uscita va a zero prima che l'evento sia terminato. Il progredire della microelettronica ha reso possibile l'integrazione dell'amplificatore nel sensore; i dispositivi di questo tipo sono classificati come sensori a "bassa impedenza", ed offrono una serie di vantaggi tra i quali si ricorda:

- la disponibilità in uscita di un segnale di tensione a bassa impedenza, compatibile con la maggior parte della strumentazione di misura;
- la possibilità di trasmettere il segnale in cavi di notevole lunghezza senza degrado delle prestazioni;
- la possibilità di caratterizzare in modo molto preciso il sensore, le cui prestazioni non dipendono più dall'elettronica cui è collegato.

Dal canto loro i sensori cosiddetti ad "alta impedenza" - quelli cioè che non integrano l'amplificatore - sono di utilizzo più complesso, in quanto:

- hanno bisogno di un circuito esterno di condizionamento e conversione del segnale;
- a causa dell'elevata impedenza d'uscita sono più sensibili ai disturbi ambientali quali accoppiamenti parassiti, interferenze elettromagnetiche, ecc.;
- richiedono speciali cablaggi a basso rumore e bassa perdita, che necessariamente non possono essere molto lunghi.

I sensori ad alta impedenza però offrono anche alcuni vantaggi rispetto a quelli a bassa impedenza. Non integrando elettronica, sono utilizzabili anche a temperature molto elevate (fino a 500 gradi centigradi); inoltre, le caratteristiche in termini di sensibilità e risposta in frequenza possono essere modificate agendo sull'amplificatore esterno. In conclusione, i sensori piezoelettrici possono offrire prestazioni uniche rispetto ai sensori realizzati con altre tecnologie; la convenienza del loro utilizzo va valutata tenendo conto

dei vantaggi (l'ampio range di frequenze e di temperature di lavoro) e degli svantaggi (non effettuano misure statiche) alla luce della specifica applicazione.

#### **4.17 SMART BRICK**

Il sistema di acquisizione dati "Smartbrick" ha caratteristica di essere completo, autosufficiente ed estremamente compatto. L'unica soluzione immediata ed autosufficiente per il monitoraggio che mette sotto controllo il comportamento delle strutture.

L'impiego di unità "Smartbrick" permette di garantire diversi vantaggi fondamentali:

- **Acquisizione veloce:** "Smartbrick" è il primo sistema di monitoraggio che include la possibilità di *scatenare registrazioni ad altissima velocità in risposta a fenomeni improvvisi* come impatti, vibrazioni, eventi sismici.
- **Versatilità:** grazie ai sensori integrati, alla varietà di ingressi pre-condizionati è possibile *aggiornare e riconfigurare il sistema sul campo velocemente e senza costi aggiuntivi*.
- **Affidabilità:** la tripla ridondanza di alimentazione e la connessione via rete cellulare indipendente per ciascuna unità permettono di *ridurre le avarie e limitare l'impatto di guasti ed atti vandalici sull'operatività dell'intero impianto*.

Ogni dispositivo "Smartbrick®" dispone di:

- connessione internet indipendente attraverso rete cellulare
- sensori di temperatura, inclinazione ed accelerazione integrati
- trigger sismico ad alta sensibilità
- ingressi pre-condizionati per sensori esterni aggiuntivi
- alimentazione a batterie a *tripla* ridondanza e da pannello solare

- autodiagnosi e controllo remoto

Schema del sistema basato su “Smartbrick®”: ogni singola unità invia con regolarità dati ed allarmi via *internet*, *e-mail* ed *SMS* usando una connessione cellulare indipendente. I dati aggiornati sono disponibili sul sito web dell’applicazione con grafici immediati.

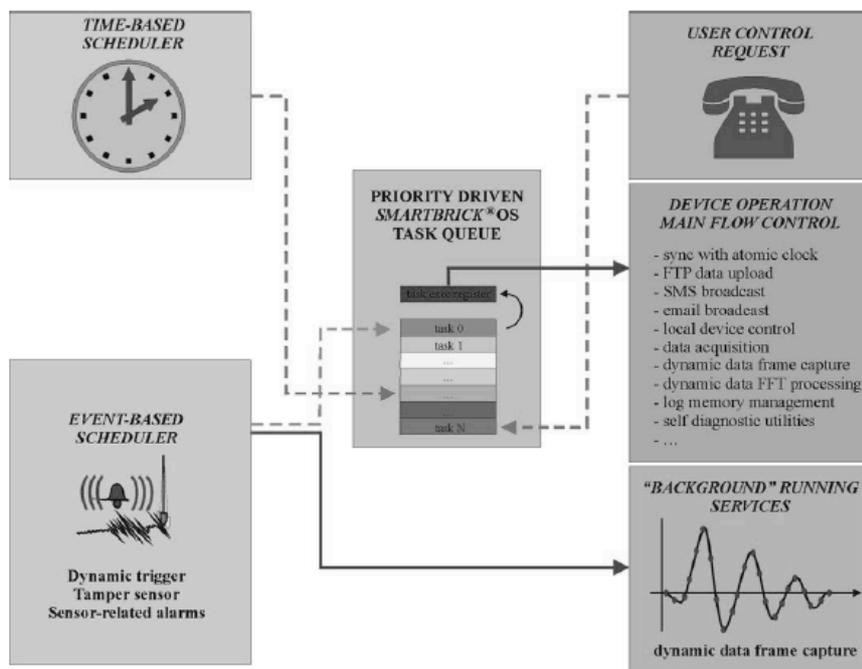
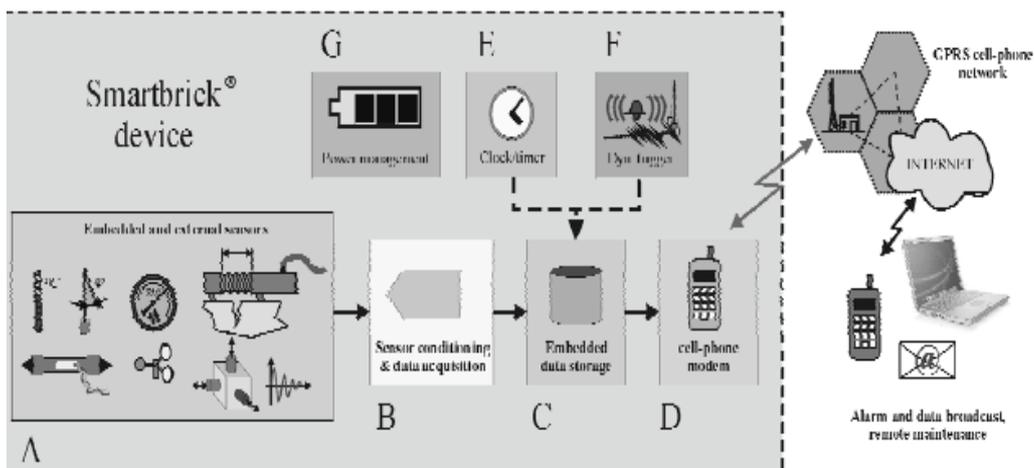


Figura4.38: Sistema dello Smart-brick

Il sensore Smartbrick è una soluzione compatta adatta per una vasta gamma di monitoraggio strutturale(SHM). Ha caratteristiche peculiari quali:

- comunicazione wireless integrata attraverso rete cellulare GPRS ;
- basso consumo di energia adatto per operazioni a lunga durata della batteria;
- sono presenti sensori incorporati per la temperatura, l' inclinazione e le accelerazioni, oltre a una vasta gamma di ingressi per ulteriori sensori esterni;

Questi ne fanno una soluzione perfetta per il monitoraggio di infrastrutture, edifici, siti geologici e archeologici, edifici storici e manufatti, anche mobili durante lo stoccaggio e il trasporto.



Figura4.39: Lo smartbrick consente attraverso sensori incorporati in un sistema compatto e potente di batterie, l'acquisizione di dati, comunicazione wireless.

E' un dispositivo in grado di fornire tutti i dati richiesti, periodici e ciclici senza la necessità di una connessione cablata per l'alimentazione . Oltre alle attività ciclica di acquisizione dei dati, è dotato di un dispositivo sensibile alla sismica in grado di rilevare e catturare eventi dinamici con rilevanza strutturale in modo da avere un monitoraggio continuo e dinamico.

E' un software specializzato che permette all'utente di scegliere il livello desiderato di performance, di impostare soglie di allarme specifiche per selezionare i dati preferiti e le modalità di trasmissione web. Vi sono inoltre sensori integrati di temperatura, inclinazione e accelerazione lungo le tre direzioni ortogonali.

Oltre ai sensori incorporati sono previsti ingressi per sensori esterni di uso comune tra cui lo spostamento, la deformazione, l'umidità, il vento e trasduttori di esposizione alla luce. Il dispositivo può essere configurato in modo da acquisire dati da sensori esterni e integrati, fornendo potenza di eccitazione per i sensori esterni quando necessario.

E' dotato di memoria Flash di memorizzazione dei dati, una volta acquisiti vengono memorizzati su una memoria non volatile (flash disk). Lo standard di capacità del disco flash è 2Mbyte e supera 2 anni di memorizzazione dei dati in comuni condizioni operative . Dispone di una comunicazione wireless infatti il dispositivo Smartbrick è dotato di un GPRS in grado di connettersi direttamente a Internet .

Si possono trasmettere i dati e inviare messaggi di avvertimento e di allarme direttamente ad altri terminali mobili . I dati registrati possono essere trasmessi attraverso Internet tramite connessioni FTP o allegati di posta elettronica.

La manutenzione del sistema remoto può essere eseguita utilizzando i messaggi script di comandi inviati al dispositivo tramite SMS o file di deposito FTP. Qualsiasi funzionalità del dispositivo, come l'acquisizione e la registrazione dei dati provenienti da sensori o la trasmissione di dati attraverso la rete, è caratterizzata da un livello fisso assegnato che identifica anche il compito con un codice numerico (codice attività).

Quando il dispositivo è necessario per eseguire un qualsiasi compito specifico, il codice viene messo in una lista di 16 posizioni in cui le attività da eseguire si accumulano in ordine decrescente di priorità. Quando un compito viene posto in coda, il sistema esegue tutti i codici, secondo il loro ordine di priorità. Il sistema operativo non è in grado di avviare un cambio di situazione sospendendo l'attività in esecuzione per avviare un'attività diversa (anche se con una priorità più alta), così il comando che ha una maggiore urgenza di esecuzione verrà eseguito solo dopo la fine dell'attuazione di quello in corso. Il tempo di reazione dalla modalità non attiva a quella attiva è inferiore ad un secondo. Dopo la configurazione del dispositivo selezionato dall'utente, le attività possono essere automaticamente poste in coda dall'orologio del sistema a intervalli di tempo.

Compiti specifici possono essere automaticamente spinti in coda al verificarsi di eventi esterni, come vibrazioni, eventi sismici e dalle soglie di allarme sull'acquisizione da sensori.

Per accedere al pannello frontale del dispositivo il coperchio della scatola deve essere rimosso svitando le viti di tenuta ai quattro angoli.

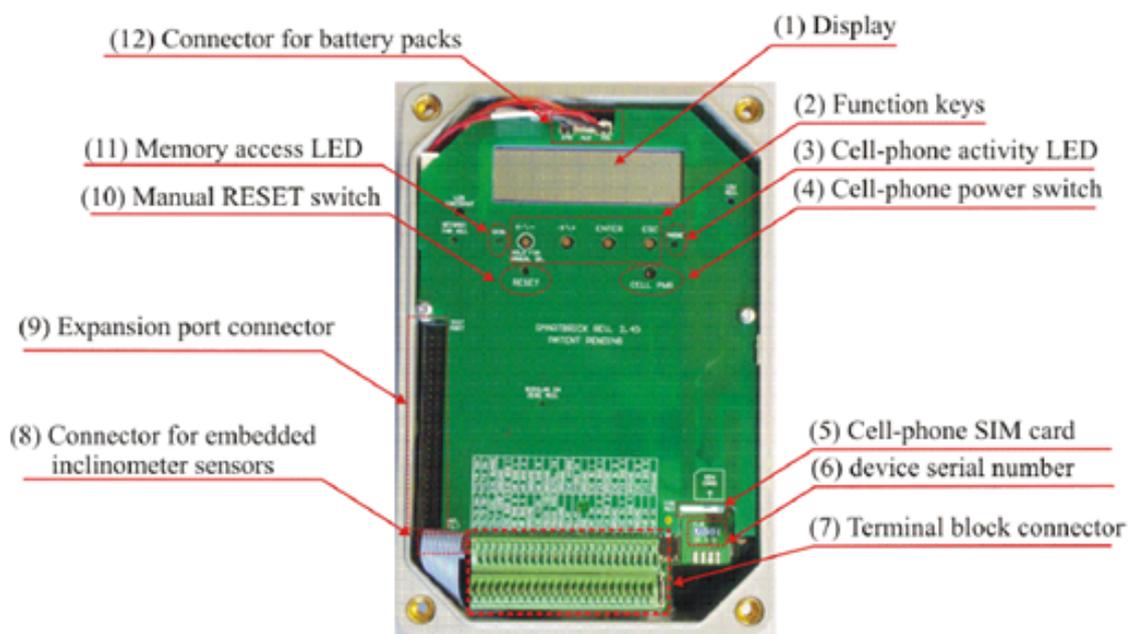


Figura4.40: Visione del pannello frontale dello Smartbrick

- (1) Display: lo Smartbrick è dotato di  $16 \times 2$  linee di display LCD con retroilluminazione selezionabile dall'utente;
- (2) Tasti funzione:  $\leftarrow$  / -e  $\rightarrow$  / pulsanti di feedback consentono all'utente di cambiare i parametri e navigare nei menu, i pulsanti INVIO e ESC permettono all'utente rispettivamente, di accettare o modificare le opzioni selezionate e di rifiutare la selezione.
- (3) Attività del telefono di cella LED:
  - ✓ lampeggia velocemente (una volta al secondo) = ricerca di rete;
  - ✓ lampeggia lentamente (ogni 3 sec) = registrato sulla rete;
  - ✓ fisso = chiamata dei dati in corso o connessione internet attiva;
  - ✓ lampeggia molto lentamente (ogni 10 secondi) = registrato in modalità di risparmio energetico;
- (4) Interruttore d'accensione di telefono di cella: quando il dispositivo è in modalità attiva il modem del cellulare può essere manualmente spento o acceso tenendo premuto il pulsante di alimentazione per almeno 1 sec.
- (5) Vano porta SIM del telefono : la fessura è accessibile dal basso a destra del pannello frontale. La carta SIM deve essere inserita nello spazio corrispondente al corretto orientamento dell'angolo smussato come mostrato sul pannello e poi spingendola all'interno fino a quando non si sente un "click".
- (6) Numero di serie del dispositivo e di revisione dell' hardware: il numero di serie è sul mercato una stringa di 5 caratteri alfanumerici, mentre la revisione dell' hardware ha la forma "SB X. YZ", dove X = revisione principale, Y = sub revisione e Z = revisione lotto di produzione.
- (7) Connettore di blocco finale : i sensori esterni, l' alimentazione elettrica e le interfacce possono essere collegati ai punti terminali di questo connettore.
- (8) Connettore per sensore di inclinazione incorporato: permette all' inclinometro interno, fissato alla struttura per ragioni di stabilità di

misura, di essere disconnesso quando la apparecchiatura principale del dispositivo deve essere rimossa.

(9) Test di fabbrica e porta del connettore di espansione: è utilizzato per collegare speciali accessori opzionali.

(10) Interruttore manuale di reset: permette all'utente di resettare l' hardware del sistema.

(11) Accesso alla memoria LED: fornisce informazioni all'utente durante qualsiasi operazione di scrittura dati sul disco flash interno. Qualsiasi interruzione di corrente (distacco della batteria) o reset dell'hardware durante le operazioni di scrittura dei dati potrebbe causare il danneggiamento del file di sistema della memoria e deve essere evitato.

(12) Connettori per batterie.

Il dispositivo è altamente specializzato per il monitoraggio e le specifiche caratteristiche dello hardware e del software sono finalizzati alla integrazione di sensori specifici per il monitoraggio strutturale, al funzionamento in completa autonomia ,alla trasmissione diretta dei dati di monitoraggio e alla possibilità di effettuare operazioni a lungo termine con batterie non ricaricabili. E' possibile monitorare i parametri in modo lento, attraverso una specifica acquisizione dati che sono configurati come dati "statici". L'acquisizione dei dati ciclica è ripetuta ad un intervallo fisso di tempo che può essere configurato dall'utente tra 10 minuti e 45 giorni. Il dispositivo Smartbrick ha caratteristiche di hardware specifiche e software in grado di catturare gli eventi di accelerazione temporanei che sono caratterizzati da un rapido cambiamento dei parametri strutturali, come terremoti, impatti, esplosioni e le vibrazioni indotte dal vento,da getti d'acqua, e dal traffico. Poiché la quantità dei dati acquisiti nel corso di un evento dinamico può essere significativamente maggiore di quella da registrare, il sistema è dotato di una capacità di elaborazione destinata a ridurre la quantità di dati da registrare. A causa della sua elevata sensibilità, l'hardware di innesco sismico potrebbe essere influenzato da interferenze elettromagnetiche forti come gli impulsi prodotti da fulmini, scariche elettriche e dai dispositivi a radiofrequenza.

### Caratteristiche tecniche

<b>Connettività GPRS quadribanda</b>		
Potenza di uscita:	2W (850-900 MHz) / 1W (1800-1900 MHz)	
Sensibilità:	-107 dBm (850-900 MHz) / - 108 dBm (1800-1900 MHz)	
<b>Alimentazione:</b>		
Batteria primaria:	Li-SOCl <sub>2</sub> 7.2V 13000 mAh	
Batteria ricaricabile:	Pb-gel 6V 4400 mAh	
Batteria di emergenza:	Li-SOCl <sub>2</sub> 7.2V 13000 mAh	
Ingresso di ricarica:	9 ÷ 24V 400mA max	
<b>Principali funzionalità programmabili:</b>		
Intervallo di acquisizione dati:	da 10 min a 45 giorni	
Intervallo per trasmissione dati, self-test, sincronizzazione con orologio atomico	da 6 ore a 45 giorni	
Ritardo di invio dati dopo evento sismico/impatto:	da 2 min a 250 ore	
Acquisizione ad alta velocità: (evento sismico/impatto)	campionamento:	1 ÷ 4100 Hz (totali)
	durata:	64 ÷ 32768 campioni (totali)
	Analisi dati:	FFT con thresholding ampiezze
<b>Sensori integrati:</b>		
Sensore di temperatura	Risoluzione:	0.1 °C
	Accuratezza assoluta:	± 1.8 °C
Inclinometro	Assi strumentati:	2 (rollio e beccheggio)
	Risoluzione:	0.001 °
Accelerometro	Deriva (-20 ÷ +80°C):	± 0.06 °
	Assi strumentati:	3
	Dinamica:	±1500mg (x, y) / ±600mg (z)
	Banda passante (-3dB):	0.2 ÷ 65 Hz
Trigger sismico/impatto	Rumore integrale:	7 mg <sub>pk-pk</sub> (opzione "Low Noise")
	Livello di soglia:	18 ÷ 150 mg <sub>pk</sub> regolabile
	Banda passante (±20%):	0.4 ÷ 30 Hz
Sensore antimanomissione	Magnetico (su griglia di protezione opzionale)	

<b>Ingressi pre-condizionati per sensori aggiuntivi:</b>		
Ingressi con possibilità di acquisizione ad alta velocità	Canali indipendenti:	5
	Risoluzione:	12 bit
	Uscite di eccitazione:	5, indipendenti da 3V 20mA
	Fondo scala:	3.3V (1%) o raziometrico
	Impedenza di ingresso:	> 2.5 kΩ
Ingresso bipolare	Banda passante (-3dB):	1600 Hz
	Risoluzione:	12 bit
	Fondo scala:	±10V
Ingressi ad alta risoluzione configurabili anche per sensori a ponte intero, ½ ponte o ¼ ponte	Impedenza di ingresso:	100 kΩ
	Canali indipendenti:	4 single-ended/differenziali + 1 single-ended
	Risoluzione:	24 bit (ENOB 19.8)
	Uscite di eccitazione:	2, indipendenti da 3V 50mA 5, completam. ¼ ponte a 120Ω
	Fondo scala:	5V (1%), raziom., ±1.7·10 <sup>5</sup> µe
Interfaccia seriale	Impedenza di ingresso:	5 MΩ (10GΩ a richiesta)
	Standard:	RS232
	Baudrate:	9600, 38400
Ingressi dedicati:	Preconfigurata telemetro laser risoluzione 0.05mm @100m	
	Ingressi per igrometro 0 ÷ 100%Rh e termometro esterno	
	Ingresso per inclinometro biassiale esterno	
Altre interfacce	Ingresso con eccitazione per anemometro ad impulsi	
	Uscite di eccitazione:	5V 0.4W, Uscita 12V 12W
	Uscita di controllo:	250V (ac/dc) 150mA max
<b>Contenitore:</b>		
Dimensioni esterne:	125 × 185 × 100 mm	
Grado di protezione:	IP68 (protezione totale all'immersione permanente @ 1m)	
Certificazioni:	ATEX a richiesta	

Figura4.41: Schede tecniche dello Smartbrick

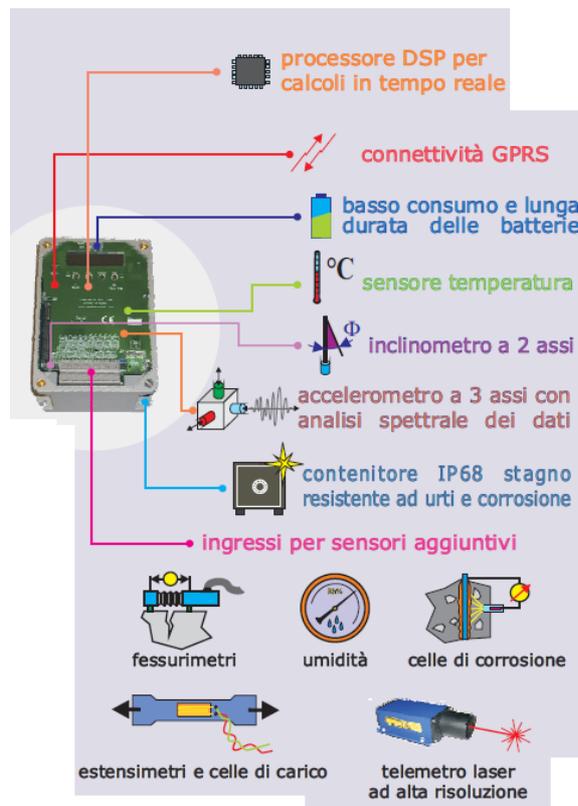


Figura4.42: Schema del pannello frontale

#### **Connettività cellulare:**

- quadribanda EGSM 850-900/1800-1900 MHz
- potenza in uscita 2W/1W (class 4/1)
- sensibilità -107/-108 dBm (tip.)

#### **Alimentazione:**

- batterie interne a lunga durata (2÷5 anni, typ. )
- ingresso di alimentazione 10÷24V AC/DC 0.3A

#### **Sensore di temperatura incorporato:**

- risoluzione: 0.1°C

- precisione assoluta:  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$

**Inclinometri incorporati:**

- assi strumentati: 2 (rollio e beccheggio)

- risoluzione:  $0.001^{\circ}$

- deriva termica tipica:  $\pm 0.06^{\circ}$  ( $-20^{\circ}$ ÷ $+80^{\circ}\text{C}$ )

**Accelerometro incorporato:**

- assi strumentati: 3 (X, Y, Z)

- dinamica: 3000mg (orizz.), 1200 mg (vert)

- banda passante @ -3dB: 0.2÷ 65 Hz

- liv. di rumore:  $< 3.5$  mg/Hz (@  $27^{\circ}\text{C}$ , tip.)

- freq. di campionamento: fino a 4100Hz- campioni registrati: fino a 32786

- soglia min. trigger sismico:  $< 20$ mg (2÷ 35Hz)

**Contenitore (Smartbrick classic):**

- ingombri (L x A x P) : 125 185 100 mm

- grado di protezione: IP68

- certificazione ATEX : a richiesta

**Porte per sensori aggiuntivi:**

- 5 x ingressi veloci 12bit 0÷3V (raziometrici)

- 5 x uscite di eccitazione 3V 20mA

- 1 x ingresso veloce bipolare 10V (12bit)

- 1 x uscita di eccitazione 5V (80mA max)

- 1 x uscita di eccitazione 12V (120mA max)
- 5 x ingressi alta ris. (24 bit) anche differenziali
- completamento 14 ponte per estensimetri 120Ω
- 2 x uscite 3V 50mA eccitazione sens. a ponte
- ingressi umidità, anemometro e termom. est.
- ingresso per inclinometro biassiale aggiuntivo
- uscita di controllo optoisolata (a richiesta)
- sensore di allarme antimanomissione
- interfaccia seriale RS232 (telemetro laser)

## **Capitolo5:**

### **PROGETTAZIONE DELLA PROVA**

#### **5.1 INTRODUZIONE**

L'intento di questa tesi è la valutazione della capacità di adattamento di "strutture autoadattive" a fronte di cedimenti imposti. Viene realizzato un pilastro reso deformabile, mediante l'utilizzo di giunti di gomma posti tra i primi tre blocchi. Questo è vincolato su di una piastra quadrata, ad una estremità della quale è saldato su un profilo IPE, che poggia direttamente su di un attuatore. S'impone una rotazione per far inclinare la struttura, mediante lo spostamento verticale dell'attuatore alla base e si recupera il cedimento conseguente, facendo muovere con un secondo attuatore, una massa posta sulla piastra in sommità, anch'essa vincolata alla colonna. Per la realizzazione del pilastro si è scelto di utilizzare elementi vibro compressi in conglomerato cementizio alleggerito con argilla espansa e per i giunti che collegano gli ultimi tre blocchi, la gomma para. Le piastre invece sono realizzate in acciaio da carpenteria Fe360. Una volta deciso quali materiali utilizzare si procede con la modellazione della colonna, mediante il programma di calcolo Straus7. Si riescono in questo modo a stabilire il dimensionamento della piastra superiore, il cedimento conseguente alla rotazione di  $0.5^\circ$  e la massa che è necessario muovere con l'attuatore per recuperare lo spostamento avvenuto.

#### **5.2 I MATERIALI**

##### **5.2.1 Blocchi**

Sono stati utilizzati blocchi 50x50  $\times$  22 (figura 5.1) per canna fumaria a sezione interna quadrata, a parete doppia con intercapedine. Sono elementi vibro compressi in conglomerato cementizio alleggerito con argilla espansa. Il calcestruzzo leggero è un conglomerato cementizio la cui massa volumica (variabile tra 300 e 2000  $\text{kg/m}^3$ ) è sensibilmente inferiore a quella di un calcestruzzo ordinario (solitamente compresa tra 2200 e 2600  $\text{kg/m}^3$ ).

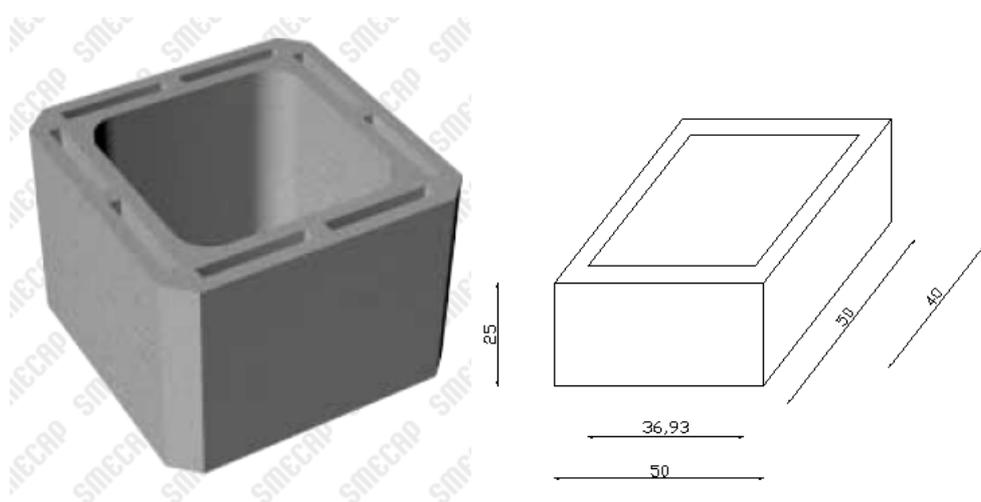


Figura5.1: Blocco per canna fumaria

CODICE	DESCRIZIONE	Int. Ax B cm	Est. CxD cm	H cm	s cm	Peso kg	Pezzi per m	Dimensione pedana cm	Pezzi su pedana	Peso ped. kg
CF1515AE	Canna fumaria in A.E.	15x15	25x25	25	5	14	4	100x100x150	96	1344
CF2020AE	Canna fumaria in A.E.	20x20	30x30	25	5	15	4	100x100x150	54	810
CF2030RE	Canna fumaria in A.E.	20x30	30x40	25	5	22	4	120x120x150	66	1452
CF2525AE	Canna fumaria in A.E.	25x25	35x35	25	5	21	4	105x105x150	54	1134
CF3030AE	Canna fumaria in A.E.	30x30	40x40	25	5	25	4	120x120x150	54	1350
CF4040AE	Canna fumaria in A.E.	40x40	50x50	25	5	33	4	100x100x150	24	792

Figura5.2: Caratteristiche dei blocchi

Generalmente la produzione del calcestruzzo leggero avviene inglobando un sistema di vuoti, che può essere realizzato in tre modi differenti:

- Sostituendo gli inerti ordinari con inerti leggeri naturali o artificiali caratterizzati nella maggior parte dei casi da un'elevata porosità e quindi da una ridotta massa volumica (**“calcestruzzi con inerti leggeri”**);
- Inglobando nella malta un sistema di bolle d'aria oppure di gas di dimensioni dell'ordine del mm, mediante aggiunta all'impasto di

schiuma preformata oppure di sostanze capaci di sviluppare gas in ambiente alcalino (“calcestruzzi cellulari”);

- Utilizzando un inerte grosso ordinario monogranulare i cui granuli sono legati da un sottile strato di sola pasta di cemento, in modo da creare un sistema di alveoli grossolani tra i granuli dell’inerte (“calcestruzzi alveolari”);

Il calcestruzzo leggero con Leca Strutturale (argilla espansa) presenta una stabilità dimensionale di poco inferiore a quella dei calcestruzzi ordinari di pari prestazioni meccaniche, ma più pesanti[33].

Il modulo elastico è circa 20500 N/mm<sup>2</sup>, questo valore è fornito da attività sperimentali[33]. Ciò comporta che a parità di deformazioni (termiche e igrometriche) contrastate, la tensione indotta nel calcestruzzo leggero è minore di quella del calcestruzzo ordinario di pari resistenza. L’impiego di argilla espansa, quindi di aggregati leggeri con ridotto valore di assorbimento d’acqua, ha consentito, di produrre calcestruzzi con una massa volumica compresa tra 1600 e 1800 kg/m<sup>3</sup>. Il minore modulo elastico da una parte riduce la rigidità della struttura realizzata in calcestruzzo leggero, dall’altra determina una diminuzione degli stati tensionali indotti da deformazioni contrastate di origine termo-igrometrica con il risultato di produrre elementi con una minore tendenza alla fessurazione.

### 5.2.2 Gomma Para

Per la realizzazione dei giunti tra i mattoni si è utilizzata la gomma para, in modo da rendere la struttura più deformabile. Di seguito è riportata la scheda tecnica:

	DUREZZA	PESO SPECIFICO	CARICO DI ROTTURA	ALLUNGAMENTO A ROTTURA %	RESISTENZA LACERAZIONE (mm)	TEMPERATURA ESERCIZIO (min/max)	MODULO ELASTICO
<b>LASTRA PARA</b>	45	1.1	160	600	24	-50/+80	6

Figura 5.3: Proprietà della gomma Para

Per la definizione del modulo elastico è stato necessario effettuare delle prove di caratterizzazione presso il LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica). Sono stati sottoposti ad una prova di compressione due campioni aventi dimensioni 5x5x1 [mm]:

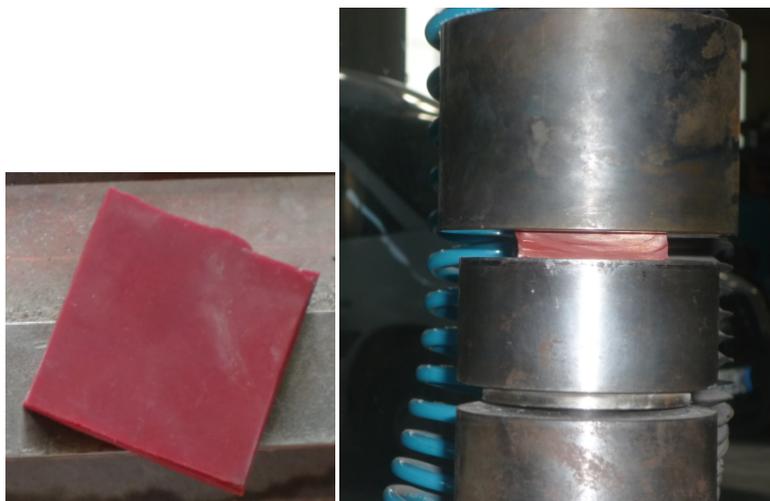


Figura5.4: Campione di gomma para e prova di compressione



Figura5.5: Strumentazione di prova

Si è eseguita la prova sul primo provino (gomma 1) con un carico di compressione massimo pari a 4000 N, con un doppio ciclo di carico e scarico, come mostrato nel diagramma riportato di seguito:

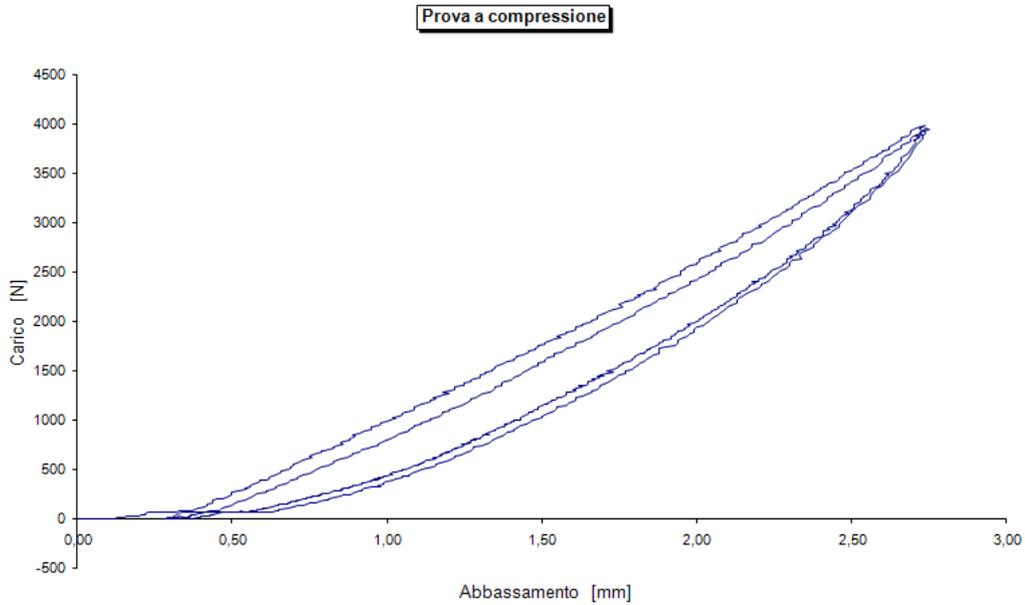


Figura5.6: Prova a compressione per il campione di gomma 1

Si è ripetuta poi la prova su un secondo provino (gomma 2), imponendo sempre un carico di 4000 N e effettuando un solo ciclo di carico e di scarico:

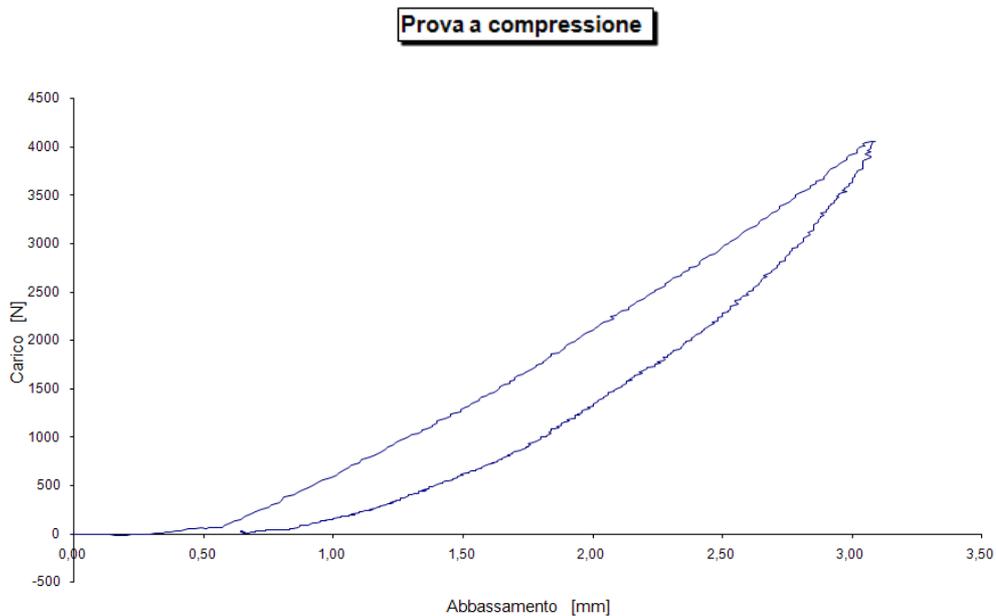


Figura5.7: Prova a compressione per il campione di gomma 2

Si è infine testato il provino, dopo averlo scaricato, fino ad un carico di 20000 N (gomma H) e si è visto come il comportamento della gomma, sia pressoché lineare per carichi bassi, fino a circa 2000 N (corrispondente ad una tensione di  $0.8 \frac{N}{mm^2}$ ) e poi diventi non lineare per carichi più elevati, come mostra il diagramma di seguito riportato:

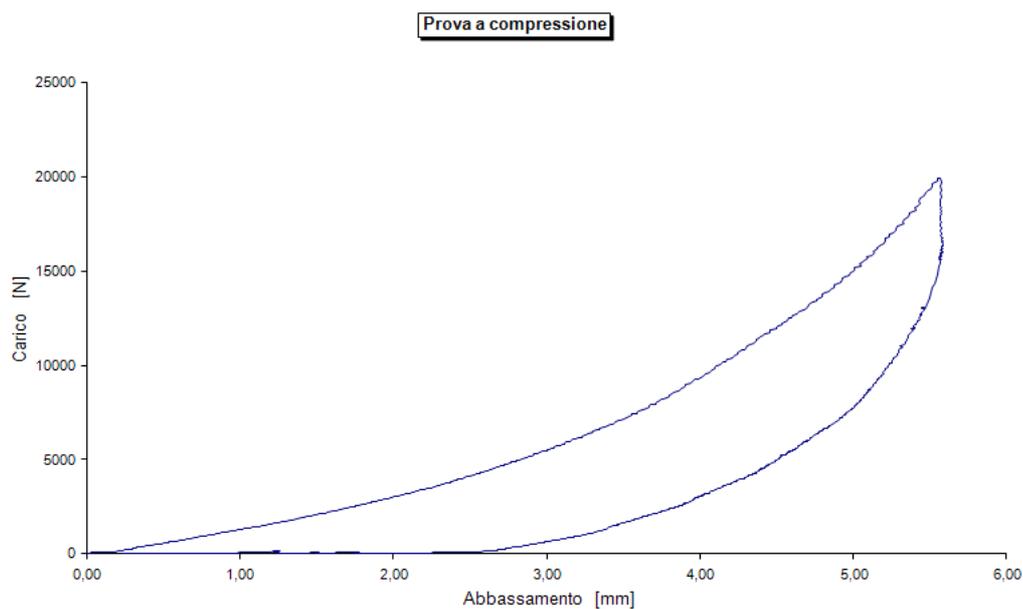


Figura 5.8: Prova a compressione per il campione di gomma H

Sovrapponendo i tre grafici sopra riportati, limitandosi a considerare il ramo di carico, fino a 2000 N, è possibile vedere come tutti e tre mostrino un andamento quasi lineare e coincidente:

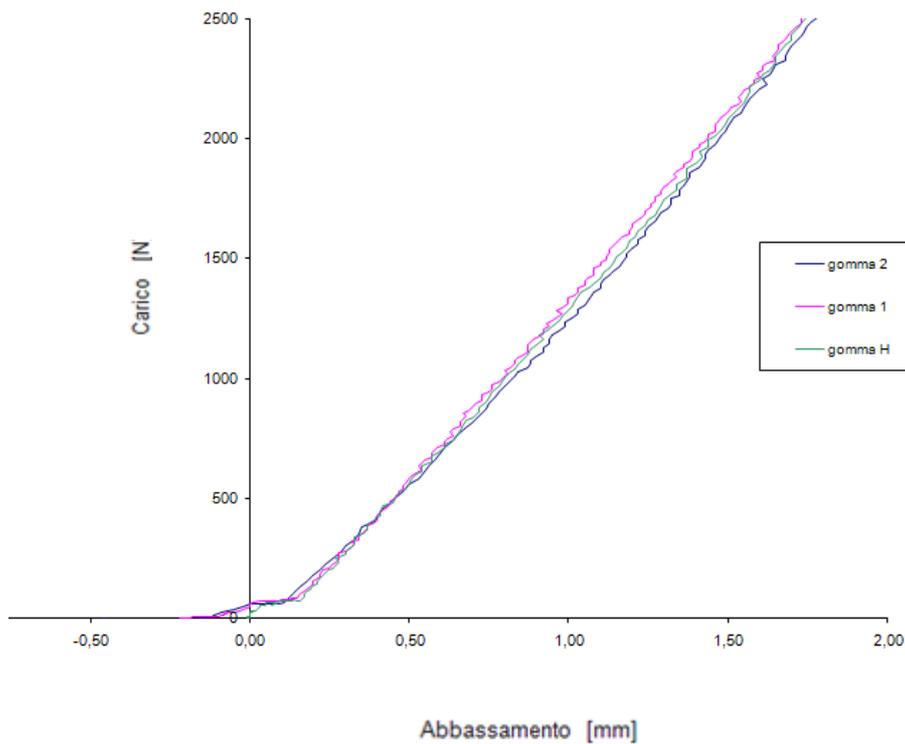


Figura5.9: La prova a compressione dei tre campioni di gomma mostra un andamento lineare dell'abbassamento in funzione del carico applicato.

Per calcolare la tensione massima agente sulla gomma bisogna valutare:

- ✓ Peso totale (pilastro, piastra, massa) agenti ;
- ✓ La tensione agente sui giunti di gomma pre e post cedimento;
- ✓ La deformazione misurata con la prova di compressione;

Il peso totale è la somma del peso del pilastro, della piastra superiore e della massa in sommità:

$$\text{Peso pilastro: } 10 \times [(50 \times 50) - (40 \times 40)] \times 25 \times 1200 \times 10^{-6} = 270 \text{ kg}$$

$$\text{Peso della piastra: } 0.011625 \times 78,7 = 0.9148875 \text{ KN} = 91,5 \text{ kg}$$

Bisogna inoltre considerare il peso della massa appesa in sommità, disposta per evitare lo sbilanciamento della piastra che è asimmetrica. L'entità di questo carico è di 54.64 Kg

Considerando anche la massa di 75 kg che è necessario spostare per recuperare lo spostamento in cima, si stima un peso totale di circa  $490\text{Kg} = 4900\text{N}$ .

Avendo un peso totale di 4900 N e essendo quattro i giunti di gomma su cui si scarica il peso, su ciascun giunto si considera agente un carico di 1200N. Si valuta allora nei diagrammi sforzo-deformazione ottenuti dalla prova di compressione l'entità delle deformazioni in corrispondenza di un carico pari a 1200 N:

gomma 1: 1,16 mm

gomma2 : 1,45 mm

gomma H : 0,98 mm

Facendo una media si ottiene un valore di deformazione pari a 1,2 mm.

Si considera dopo, il caso in cui sia avvenuto il cedimento e quindi il carico agisce solo sui due giunti posti su uno stesso lato, allora invece di 1200 N bisognerà considerare 2400 N e si ottiene:

gomma 1: 1,9 mm

gomma2 : 2,19 mm

gomma H : 1,70 mm

Facendo una media si ottiene un valore di deformazione pari a 2 mm.

Si valuta ora il modulo elastico.

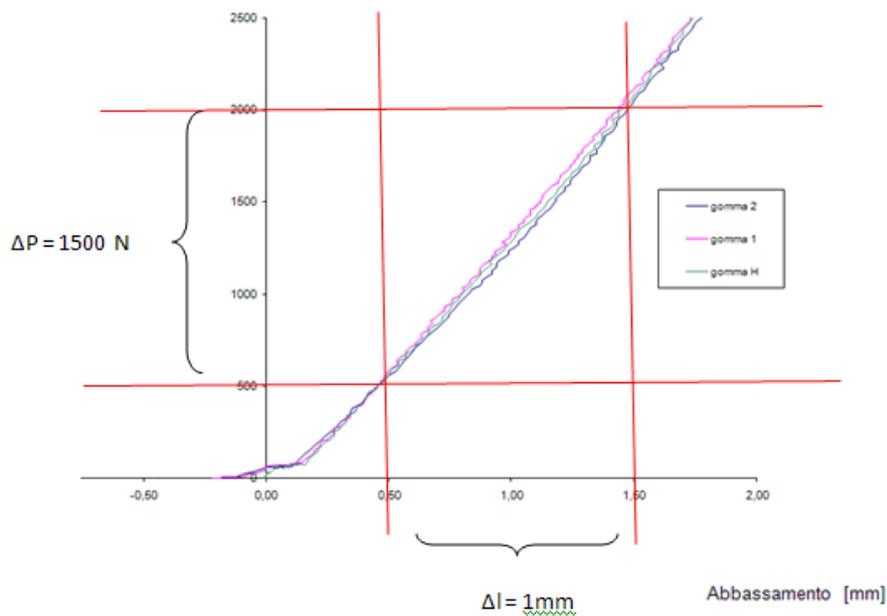


Figura5.9 b

Per valutare il modulo elastico si considera una variazione della tensione e della deformazione, tali da tener conto degli errori iniziali degli strumenti e dell'assestamento del materiale nella fase iniziale di carico.

Si ha :

$$\Delta\sigma = \frac{1500}{2500} = 0,6$$

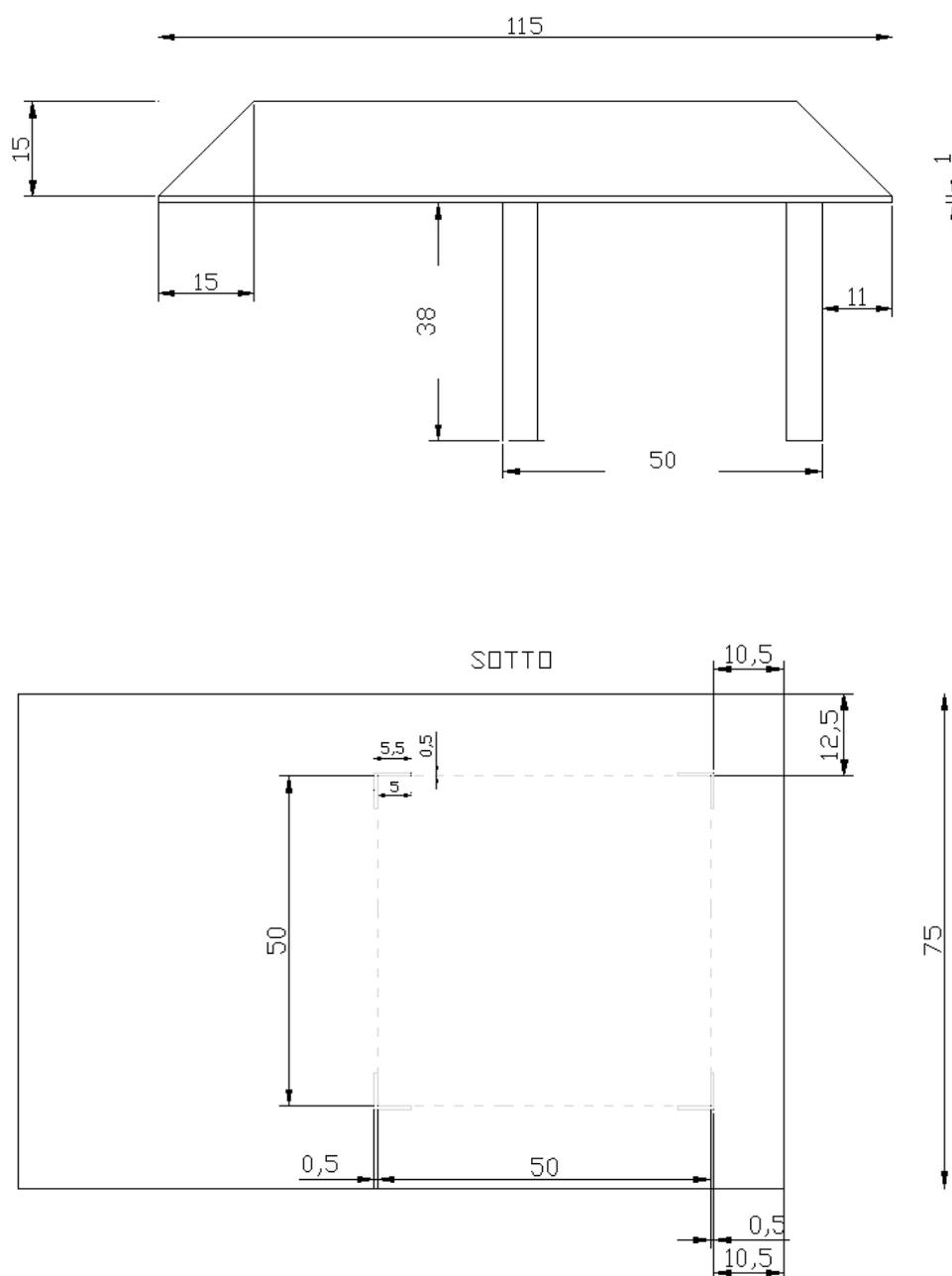
$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{0,6}{0,1} = 6$$

### 5.2.3 Piastre

Per la realizzazione delle piastre è stato utilizzato acciaio da carpenteria Fe360. Per il dimensionamento della piastra superiore è stato utilizzato il programma di calcolo Straus7, come verrà spiegato nei paragrafi successivi.

- Piastra superiore



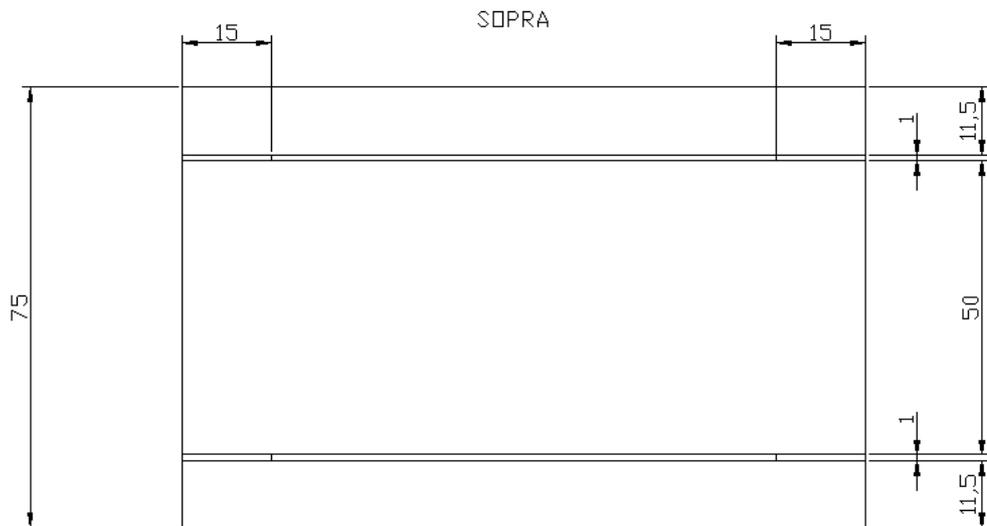


Figura5.10: Vista laterale e in pianta della piastra superiore

Sono state realizzate due nervature, in modo da evitare eccessiva inflessione della piastra, come si vede in figura 5.11:



Figura5.11: Nervature della piastra superiore

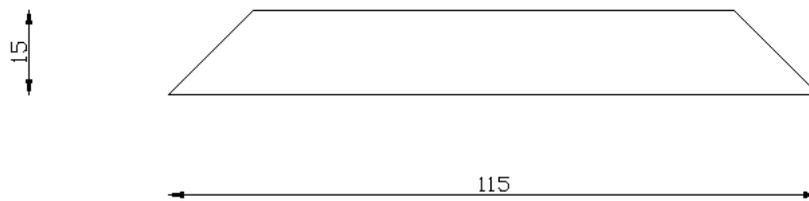


Figura5.12: Dimensioni delle nervature della piastra superiore

Area nervatura:  $(115+85) \times 15/2 = 1500 \text{ cm}^2$

Le nervature sono due allora l'area sarà di  $3000 \text{ cm}^2$

Volume della piastra:

$(115 \times 75 \times 1) \text{ cm}^3 + 3000 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ cm} = 11625 \text{ cm}^3 = 0.011625 \text{ m}^3$

Peso della piastra ( peso specifico dell'acciaio Fe360 è  $78,7 \text{ kN/m}^3$  )

$0.011625 \text{ m}^3 \times 78,7 \text{ kN/m}^3 = 0.9148875 \text{ kN} = 91,5 \text{ kg}$

Viene poi realizzata una piastra con profili a C e a L. Questa, fissata alla piastra superiore, funge da supporto per l'attuatore in sommità (figura 5.13, 5.14).

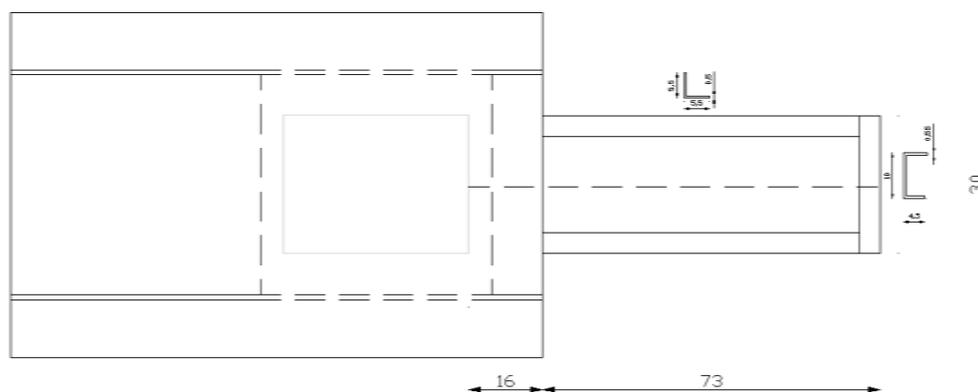


Figura5.13: Vista in pianta del supporto

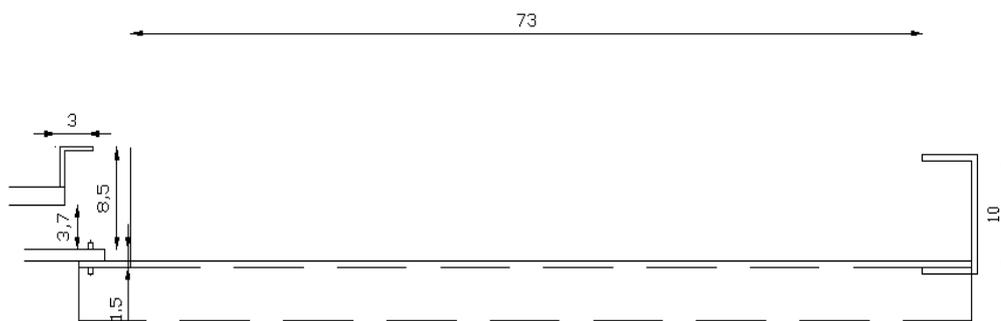


Figura5.14: Vista frontale del supporto

- Piastra inferiore

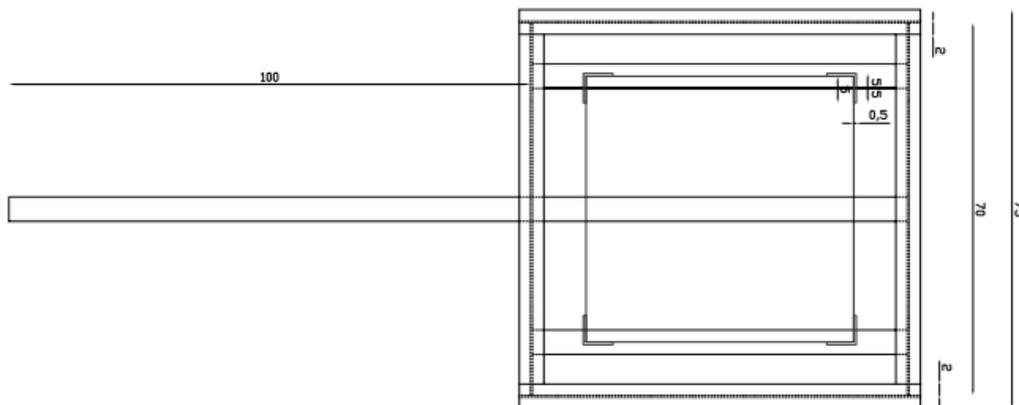


Figura5.15: Vista in pianta della piastra inferiore

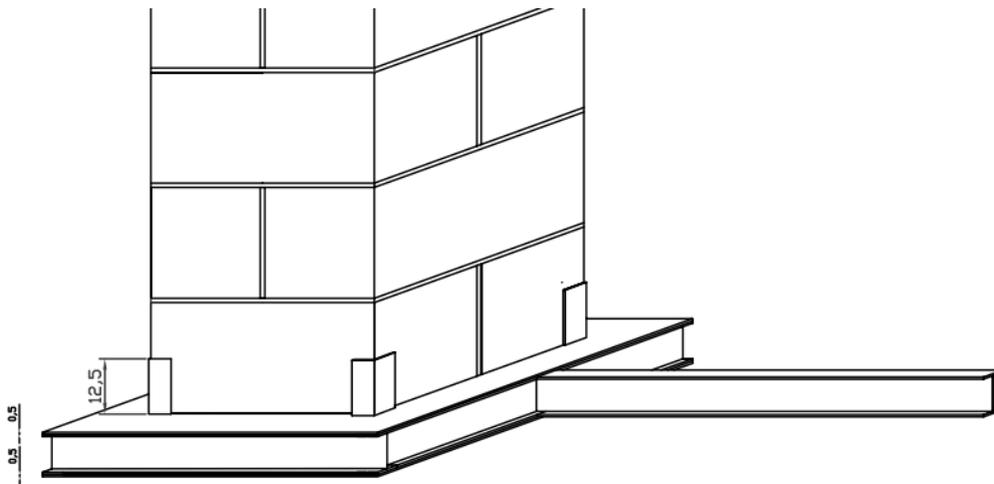


Figura5.16: Piastra inferiore vincolata al pilastro

#### 5.2.4 Attuatori

Per decidere quali attuatori utilizzare è stato valutato:

- la lunghezza della corsa necessaria;
- la forza massima in spinta e in tiro;

Quello da posizionare alla base è l'attuatore lineare LA31 che ha come caratteristiche:

- corsa massima tra i 100 e i 250 mm;
- massimo carico in spinta di 6000 N;
- massimo carico in tiro di 4000 N;
- motore standard a 24V;

### Dimensioni LA31

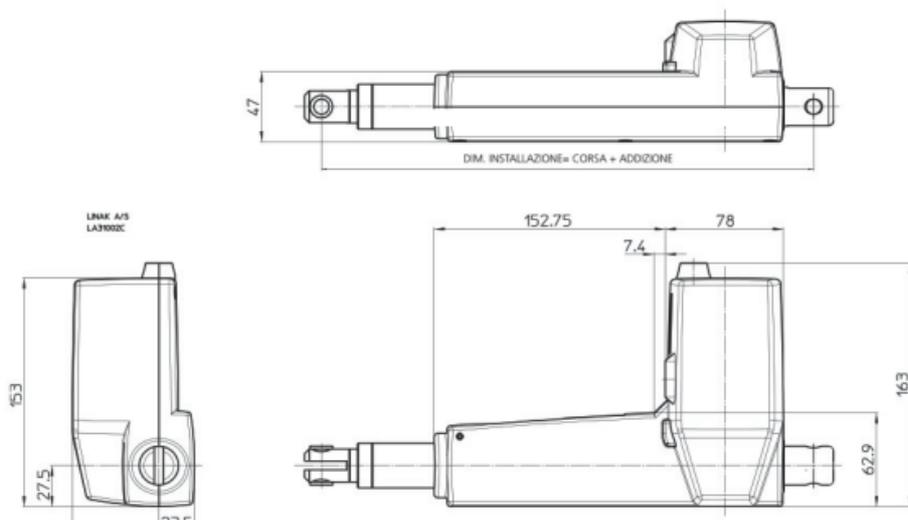


Figura5.17: Dimensioni d'installazione con diverse combinazioni di occhielli e attacchi posteriore su LA31.

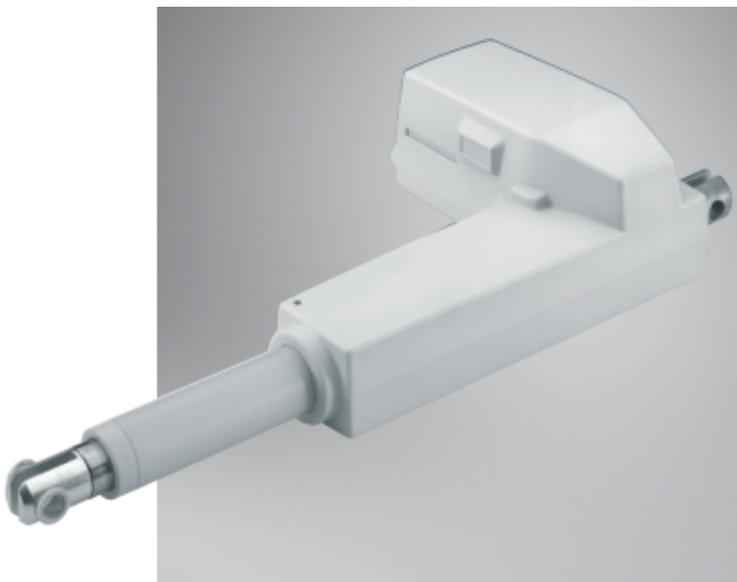


Figura5.18: Attuatore lineare LA31

Quello da utilizzare in sommità è l'attuatore lineare LA35 che ha come caratteristiche:

- corsa massima di 600 mm;
- massimo carico in spinta di 6000 N;
- massimo carico in tiro di 4000 N;
- motore standard a 24V;
- segnale analogico incorporato;
- velocità tipica a pieno carico 18,9 mm/sec

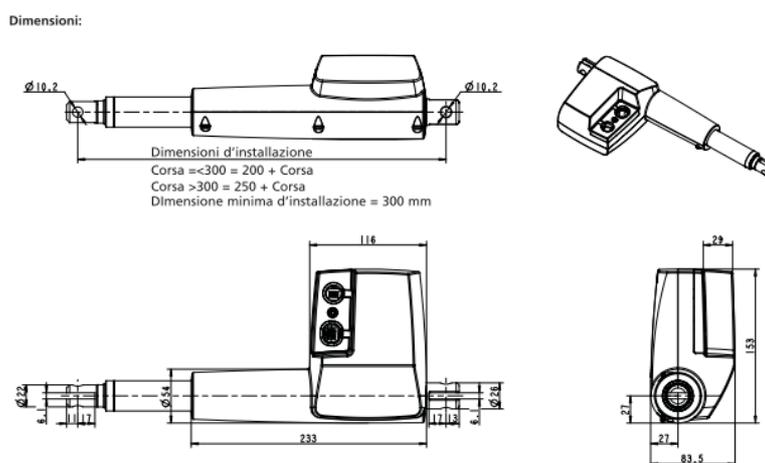


Figura5.19: Dimensioni d'installazione con diverse combinazioni di occhielli e attacchi posteriore su LA35.



Figura5.20: Attuatore lineare LA35

### 5.3 MODELLAZIONE DELLA PROVA

La prova ha come scopo la valutazione della capacità della struttura di recuperare il cedimento imposto dall'attuatore posto alla base, attraverso lo spostamento della massa in sommità, come schematizzato in figura 5.21:

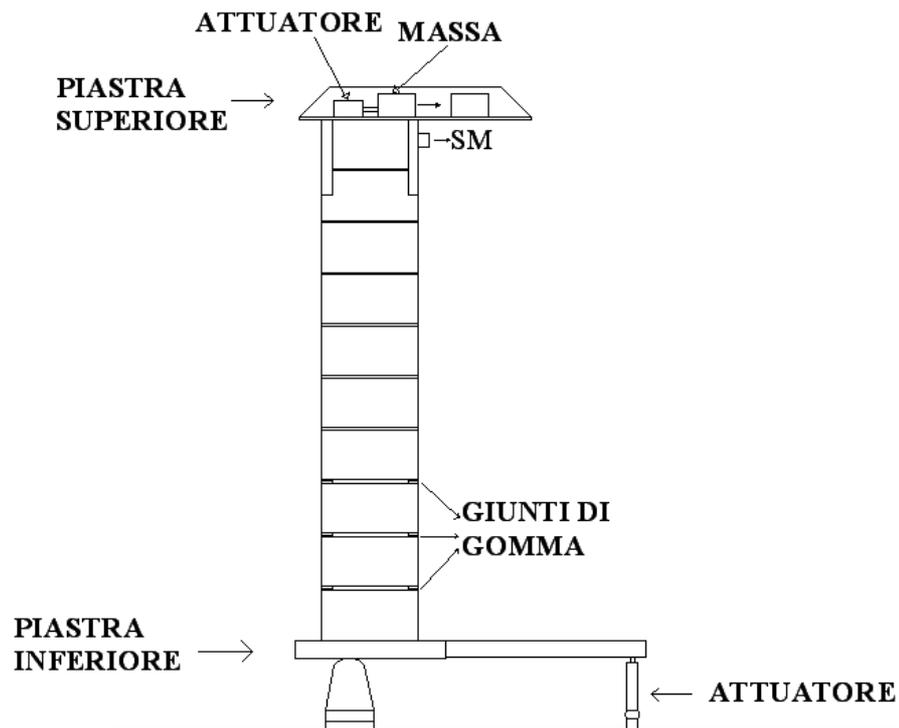


Figura5.21: Schematizzazione della struttura

Una volta scelti i materiali da utilizzare per la realizzazione del pilastro, si procede con la modellazione della struttura in Straus7, in modo da :

- Effettuare un dimensionamento di massima della piastra superiore;
- Modellare il comportamento del pilastro e valutare lo spostamento orizzontale in sommità in seguito al cedimento imposto;
- Determinare lo spostamento da imporre alla massa in sommità per recuperare la verticalità in conseguenza alla inclinazione del pilastro di  $0.5^\circ$ .

E' stata modellata la mesh che schematizza il pilastro e la piastra superiore in Straus7, come mostrato in figura 5.22:

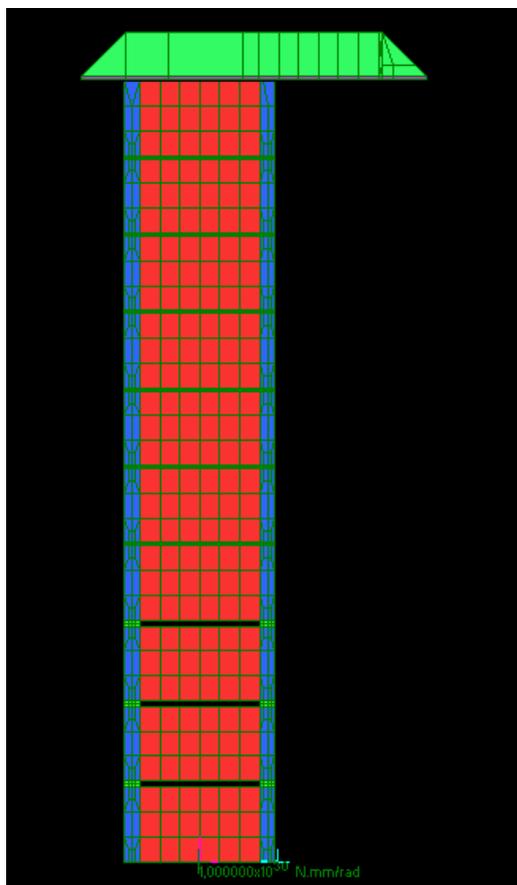


Figura5.22: Schematizzazione in Straus7 della struttura

Proprietà materiali utilizzati:

	BLOCCHI	GOMMA	MALTA	ACCIAIO
Modulo elastico(E) MPa	205000	6	2000	210000
Coeff. Poisson( $\nu$ )	0.15	0.25	0.25	0.27
Densità( $\gamma$ ) Kg/m <sup>3</sup>	1200	1100	2000	7870
Coesione(c)	0.3	/	/	/
Angolo attrito( $\phi$ )	40°	/	/	/

Tabella 1 : Proprietà dei materiali utilizzati

Il pilastro è vincolato alla piastra inferiore mediante quattro angolari , quindi si suppone che il corpo ruoti rigidamente, come si vede in figura:

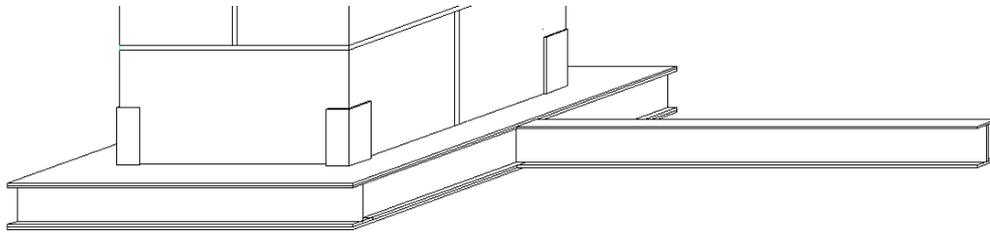


Figura5.23: Collegamento pilastro-piastra inferiore

La base è stata modellata tramite rigid link per garantire il comportamento indeformabile dell'appoggio. Al posto dei giunti di malta tra i primi tre blocchi sono stati posti nei quattro spigoli, dei quadratini di gomma dello spessore di 2 cm, in modo da rendere il pilastro più deformabile. Una volta che viene schematizzato il sistema, si impone una rotazione rigida alla base di  $0.5^\circ$ . Essendo la piastra asimmetrica è stato necessario calcolare una massa necessaria a bilanciarne il peso in sommità in modo da evitarne il ribaltamento, prima della applicazione della prova. Questa verrà posizionata come un carico appeso in corrispondenza della estremità della piastra superiore. Per valutare l'entità della massa s'impone l'annullarsi del momento, in modo che la risultante passi per il baricentro della colonna e quindi il sistema sia in equilibrio.

Peso della piastra superiore: 91,5 Kg

$$91,5 \text{ kg} * 21,5 \text{ cm} = X * 36 \text{ cm}$$

$$X = \frac{91,5 * 21,5}{36} = 54,64 \text{ kg}$$

La massa che bilancia risulta essere di 54,64 kg.

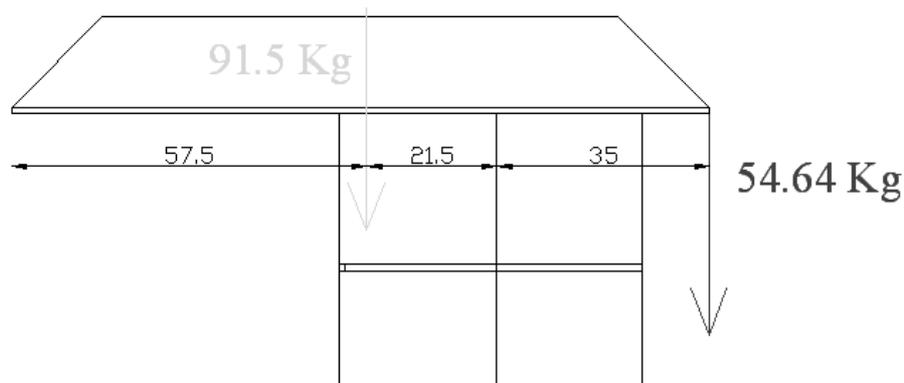


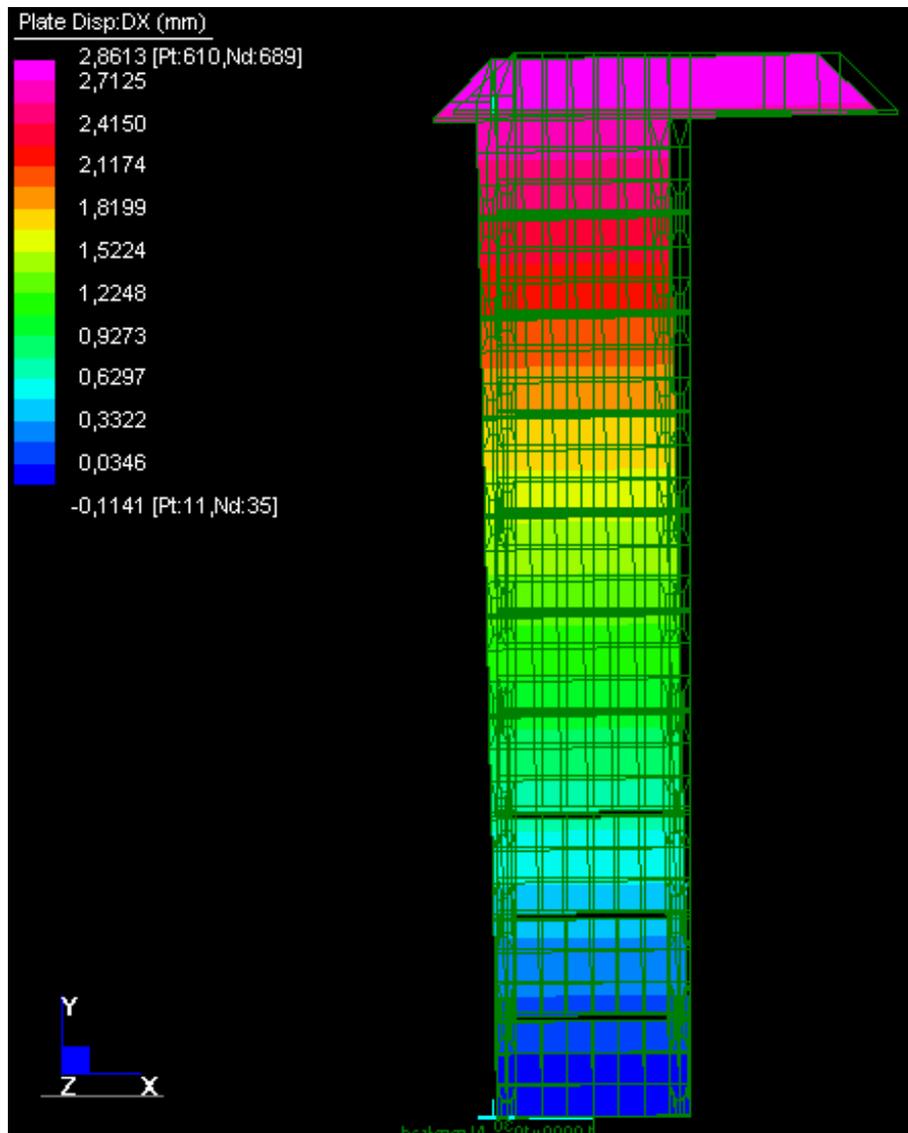
Figura5.24: Schematizzazione del calcolo della massa di bilancio

Dalla modellazione fatta in Straus7 risulta che la massa da applicare per bilanciare la rotazione di mezzo grado è di 75kg ad una distanza di 60 cm dall'asse del pilastro e lo spostamento in sommità è di 2,69cm.

La progettazione della massa appesa e di quella di recupero verrà affrontata nel capitolo della realizzazione della prova.

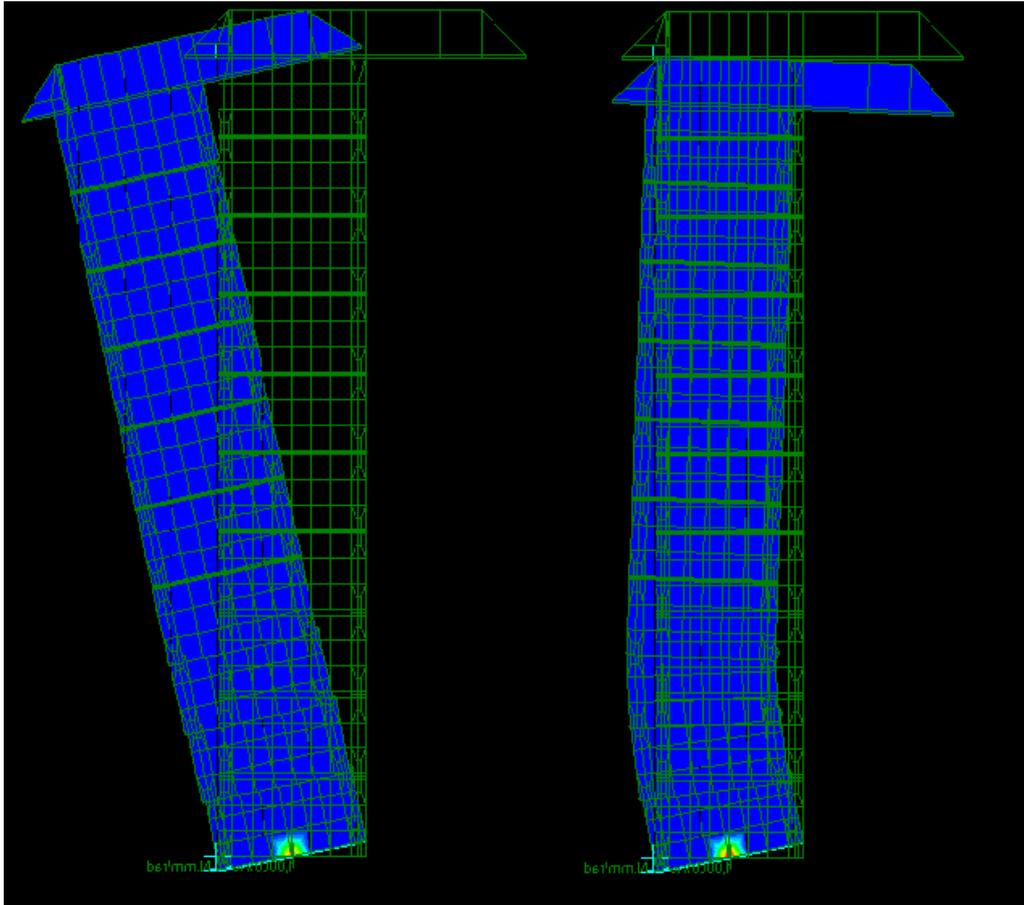
E' possibile, facendo un'analisi non lineare in Straus7, vedere come possa spostarsi la struttura, tenendo conto delle approssimazioni necessarie dalla modellazione:

- la struttura viene modellata come un corpo continuo, non tenendo conto del distacco tra i blocchi;
- Il letto di gomma viene simulato con pochi elementi;
- Dalle prove sperimentali la gomma mostra avere un comportamento lineare allora si utilizza il criterio di Von Mises;



(a)

Figura5.25(a): Deformata: spostamento orizzontale con un fattore di scala pari a 2.



(b)

Figura5.25(b): Deformata inseguito a rotazione e recupero con fattore di scala pari a 10

Elaborando i dati forniti dal programma in un foglio Excel è possibile ottenere:

- L'andamento della deformata della linea d'asse dopo la rotazione e dopo il recupero (figura 5.27);
- Il grafico del recupero dello spostamento (figura 5.28);

Tabella2: variazione della linea d'asse

posy	posx-inizi	posx-fine
0	0	0
83,3333	0,7272	0,7272
166,6667	1,4545	1,4543
250	2,1817	2,1815
270	2,3991	2,3525
353,3333	3,1863	2,7827
436,6667	3,9736	3,2128
520	4,7608	3,643
540	4,9919	3,7246
623,3333	5,8307	3,8523
706,6667	6,6695	3,9801
790	7,5083	4,1078
810	7,7503	4,1008
893,3333	8,6323	3,9246
976,6667	9,5142	3,7484
1060	10,3962	3,5721
1065	10,4491	3,5615
1070	10,5021	3,5509
1153,333	11,3841	3,3746
1236,667	12,266	3,1982
1320	13,148	3,0217
1325	13,201	3,0111
1330	13,2539	3,0006
1413,333	14,1359	2,824
1496,667	15,0179	2,6474
1580	15,8999	2,4708
1585	15,9528	2,4602
1590	16,0058	2,4496
1673,333	16,8878	2,2729
1756,667	17,7698	2,0961
1840	18,6518	1,9193
1845	18,7047	1,9087
1850	18,7577	1,8981
1933,333	19,6397	1,7212
2016,667	20,5217	1,5443
2100	21,4038	1,3673
2105	21,4567	1,3567
2110	21,5096	1,3461
2193,333	22,3916	1,169
2276,667	23,2737	0,9919
2360	24,1557	0,8148
2365	24,2086	0,8041
2370	24,2615	0,7935
2453,333	25,1436	0,6163
2536,667	26,0256	0,4389
2620	26,9076	0,2615

Le grandezze riportate in tabella sono:

- posy: quote di riferimento corrispondenti ai punti di discretizzazione della mesh del pilastro, operata con Straus7;
- posx-inizio: spostamento orizzontale alle quote di riferimento, in seguito alla rotazione imposta;
- posx-fine: spostamento orizzontale alle quote di riferimento dopo il recupero;

Per poter valutare l'andamento della linea d'asse si riportano poi in un grafico (figura 5.27):

- in ordinata le varie quote corrispondenti ai nodi della mesh del pilastro, lungo l'altezza, discretizzata con Straus7 ;
- in ascissa lo spostamento orizzontale;

Noti gli spostamenti alle varie quote, durante la rotazione iniziale e durante il recupero, ottenuto con lo spostamento della massa di 75 kg, si valuta la deformata della linea d'asse.

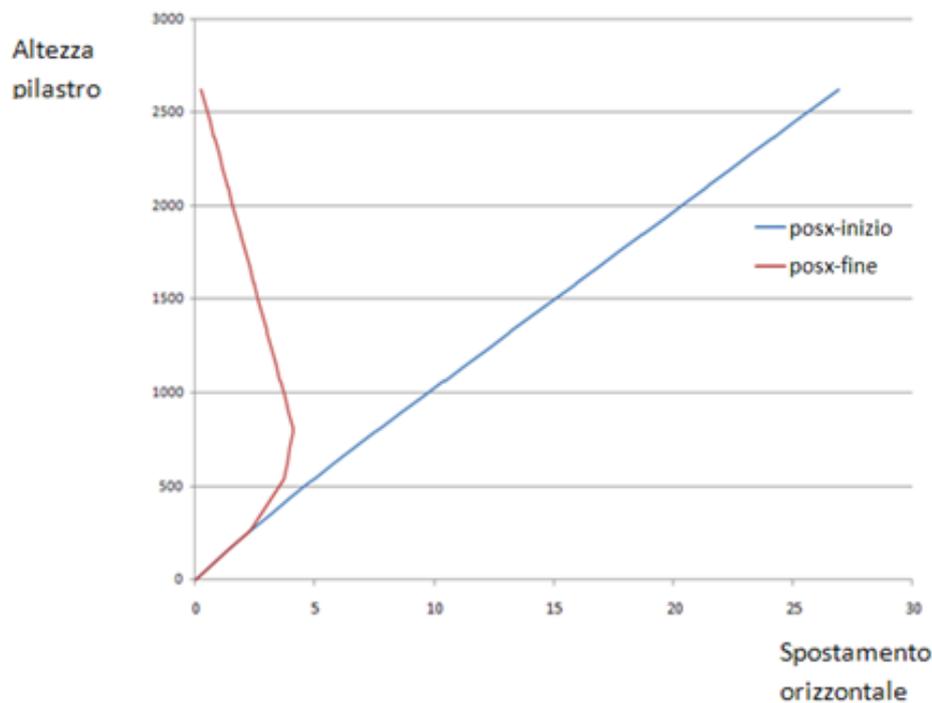


Figura 5.27: Variazione della linea d'asse dopo la rotazione e dopo il recupero.

Il grafico mostra un andamento lineare della linea d'asse nella fase iniziale (posx - inizio), quando viene imposta la rotazione e un andamento lineare a tratti (posx - fine) nella fase di recupero, effettuato spostando la massa in sommità con l'attuatore.

Nella fase iniziale della progettazione la logica era quella di far recuperare il più possibile lo spostamento impresso inizialmente con la rotazione di  $0.5^\circ$ . Nella fase finale di analisi però si è modificato questo criterio, pensando fosse più logico fare riferimento ad un ritorno alla verticalità della struttura. Ciò si deve all'andamento della deformata, che tende a rimanere nella propria configurazione dove vi sono i giunti di gomma che si comprimono e si allungano, e che subisce una rotazione rigida nella parte sovrastante i giunti.

Con il programma agli elementi finiti si compie un'analisi incrementale. Per tener conto della non linearità geometrica è stata raggiunta l'inclinazione di  $0.5^\circ$  con 10 step. Applicata poi una massa pari a 100N, si va a incrementarla attraverso fattori moltiplicativi fino a raggiungere lo spostamento desiderato. Tale massa viene modellata tramite una forza concentrata applicata a 60 cm dal centro del pilastro. Dalla tabella sotto riportata si vede che dallo step 10 inizia il recupero con l'incremento della massa. In corrispondenza dello step 23 si ha il recupero quasi totale, essendo il valore residuo di 0,2615.

Tabella 3: relazione tra la forza applicata e lo spostamento in sommità.

Step	Factor	N	mm
1	0	0	2,6919
2	0	0	5,3827
3	0	0	8,0734
4	0	0	10,7641
5	0	0	13,4548
6	0	0	16,1455
7	0	0	18,8358
8	0	0	21,5265
9	0	0	24,217
10	0	0	26,9076
11	0,625	62,5	24,7906
12	1,25	125	22,6559
13	1,875	187,5	20,5026
14	2,5	250	18,3308
15	3,125	312,5	16,1403
16	3,75	375	13,9308
17	4,375	437,5	11,7017
18	5	500	9,4534
19	5,625	562,5	7,1858
20	6,25	625	4,8981
21	6,875	687,5	2,59
22	7,1875	718,75	1,4284
23	7,5	750	0,2615
24	7,8125	781,25	-0,9104
25	8,125	812,5	-2,0876
26	8,75	875	-4,4574
27	10	1000	-9,2617
28	12,5	1250	-19,1332

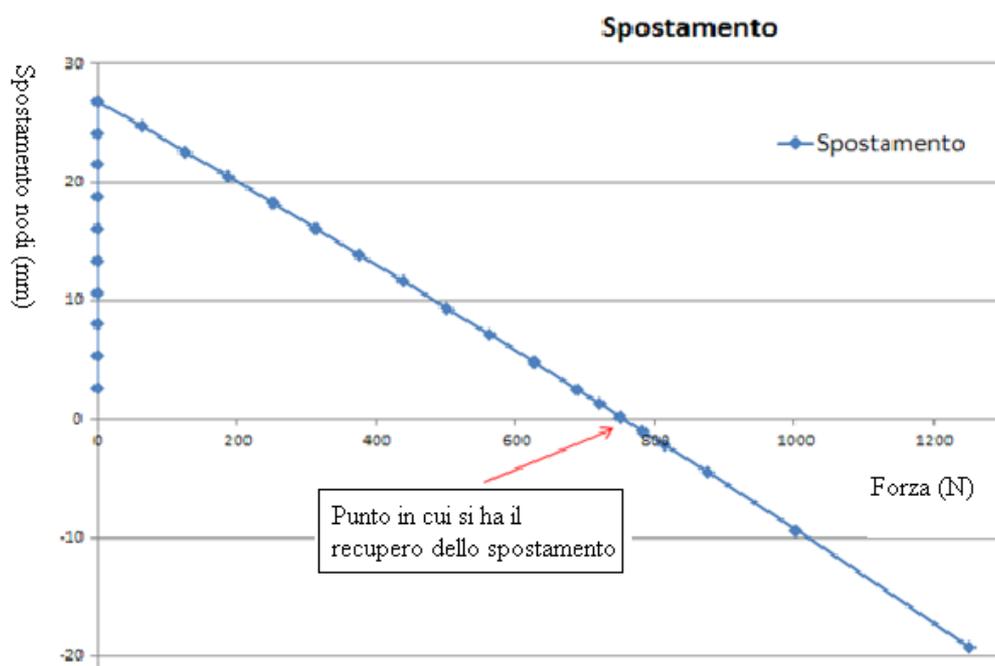


Figura5.28: Recupero dello spostamento.

Dal grafico in figura 5.30 si evince che in corrispondenza di 750 N (75 kg) si ha un recupero dello spostamento quasi totale, considerando il residuo di deformazione di 0,2615 mm., trascurabile.

### 5.3.1 Verifica a ribaltamento

Si effettua, infine una verifica al ribaltamento in sommità e alla base del pilastro, quando la massa di 75 kg subisce il suo spostamento massimo.

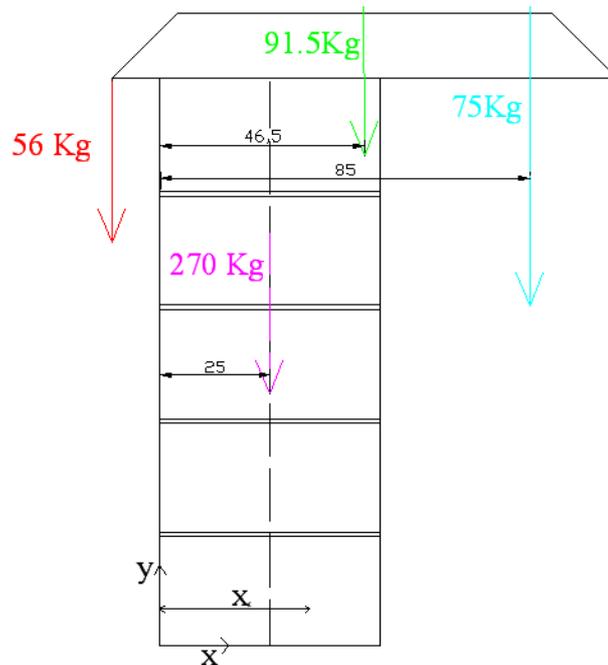


Figura5.29: Schematizzazione delle forze

Preso un sistema di riferimento iniziale x-y si valuta dove cade la risultante delle forze e si verifica che cada all'interno del nocciolo di inerzia:

$$B = 270 * 25 + 91,5 * 46,5 + 75 * 85 - 56 * 11492,5 = 34 \text{ cm}$$

$$B = 34\text{cm} - 25\text{cm} = 9\text{cm}$$

Si valuta l'ellisse centrale e il nocciolo centrale d'inerzia della sezione quadrata cava.

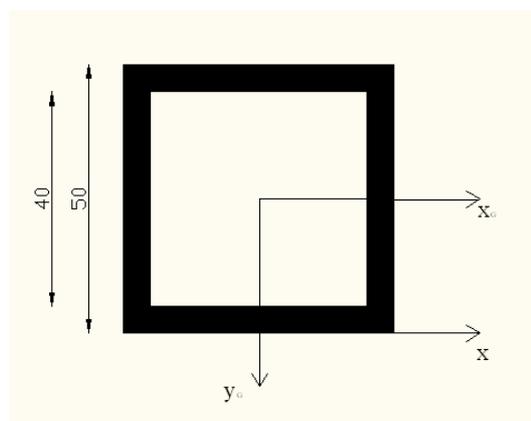


Figura5.30: Schematizzazione della sezione

Facendo riferimento alla figura 5.30, la sezione rappresentata presenta la doppia simmetria rispetto agli assi baricentrici principali di inerzia  $x_0, y_0$ . Le grandezze necessarie per la caratterizzazione geometrica sono:

$$\text{Area} = (500 * 500) - (400 * 400) = 90000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Momento statico rispetto ad x: } S_x = A * x_G = 90000 * 250 = 225 * 10^5 \text{ mm}^3$$

$$S_y = S_x$$

$$\text{Momento principale di inerzia : } I_{x_0} = I_{y_0} = 500412 - 400412 = 307500 * 10^4 \text{ mm}^4$$

L'ellisse centrale di inerzia è riferita agli assi principali di inerzia  $x_0 (= \xi)$ ,  $y_0 (= \eta)$  ed ha equazione:

$$\xi^2 / \rho_x^2 + \eta^2 / \rho_y^2 = 1$$

Per la determinazione dell'ellisse centrale si calcolano i raggi giratori principali di inerzia ed una volta noti questi, l'ellisse si traccia disponendo i semidiametri  $\rho_x$  e  $\rho_y$  perpendicolarmente agli assi  $x_0$  e  $y_0$ , a partire dal baricentro G, come mostrato in figura 5.31. L'ellisse è in realtà un cerchio, dato che la sezione è quadrata.

$$\text{Raggio giratore principale di inerzia } \rho_x = \rho_y = \sqrt{I_{x_0}} = \sqrt{307500 * 10^4} = 55400 \text{ mm} = 55,4 \text{ cm.}$$

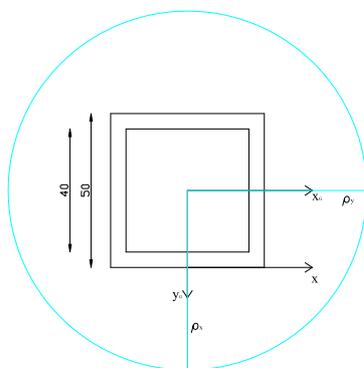


Figura 5.31: Rappresentazione dell'ellisse d'inerzia

Per l'individuazione de nocciolo centrale d'inerzia si determina la distanza del contorno del nocciolo dal baricentro G e in seguito si traccia il luogo geometrico unendo i nodi prima ottenuti.

$$AG = BG = \sqrt{2250} = \sqrt{6} = 1364,22 \text{ mm} = 13,64 \text{ cm}$$

Quindi risulta  $B < \sqrt{6}$  ;

Bisogna inoltre valutare la possibilità di un eventuale ribaltamento in sommità, dove terminano gli angolari della piastra (piano b-b):

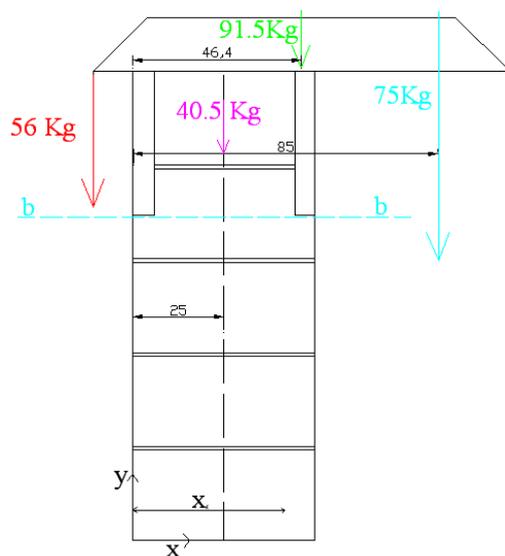


Figura5.30: Schematizzazione delle forze(seconda verifica)

In questa seconda verifica il peso del pilastro da considerare non è più 270 kg, ma 40,5 kg, corrispondenti al peso di un blocco e mezzo. Questo perché gli angolari terminano a metà del secondo mattone a partire dall'alto( sezione b-b in figura 5.30). Ripetendo il calcolo si ottiene:

$$\sum M = 40,5 * 25 + 91,5 * 46,5 + 75 * 85 - 56 * 11263 = 42 \sum M$$

$$c = 42 \text{ cm} - 25 \text{ cm} = 17 \text{ cm}$$

Quindi risulta  $c > \frac{1}{6} \rightarrow$  la risultante cade fuori dal terzo medio.

Si potrebbe verificare allora il distacco del blocco superiore. La prova è svolta molto lentamente e controllando lo spostamento imposto dall'attuatore alla base, quindi è possibile monitorare il comportamento della struttura e fermarsi prima di un eventuale crollo.

## **Capitolo6:**

### **MESSA IN SICUREZZA DELLA PROVA**

#### **6.1 INTRODUZIONE**

Prima di procedere con la costruzione della struttura è necessario illustrare la procedura di messa in sicurezza, durante l'allestimento e lo svolgimento della prova al fine di assicurare la salvaguardia dei tecnici e di tutti coloro che lavorano alla prova, mediante alcuni semplici accorgimenti.

La fase di messa in sicurezza viene articolata in 4 step:

- 1) Allestimento prova;
- 2) Montaggio della strumentazione;
- 3) Esecuzione della prova;
- 4) Smaltimento della prova;

#### **6.2 ALLESTIMENTO DELLA PROVA**

Il pilastro è realizzato con 10 blocchi di dimensioni 50x25x50(cm).

Tra i primi tre blocchi sono disposti dei giunti alti 2 cm e larghi 5 cm, realizzati con la gomma Para, tra i rimanenti blocchi invece vi è uno strato di malta con maturazione a 10 giorni spesso 1 cm.

In totale si raggiunge un'altezza di 2,62 m, senza considerare l'appoggio e lo spessore della piastra superiore.

Il pilastro così realizzato poggia su una piastra di acciaio, 75x75 cm e spessa 9 cm, a cui è saldato un IPE lungo 100 cm.

Il tutto poggia a una estremità su un appoggio cilindrico e due piastre di acciaio per una altezza di 36cm, e dall'altra sull'attuatore che è posizionato su un blocco di legno in modo da garantire una maggiore aderenza con il pavimento.

In sommità è disposta un'altra piastra 75x115 cm, spessa 1 cm e con delle nervature alte 15 cm che ne evitano l'inflessione. L'altezza totale è di circa 310 cm.

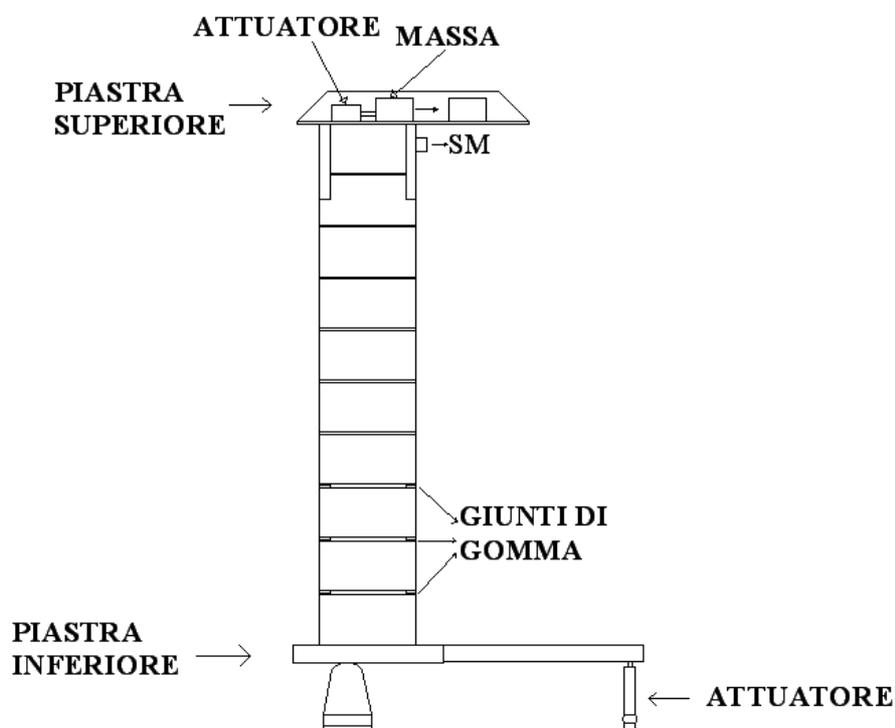


Figura6.1: Schematizzazione della prova

La struttura viene realizzata direttamente sopra la piastra, senza la necessità di utilizzare un muletto o un carroponete. La piastra in sommità è asimmetrica e potrebbe una volta tolto il ponteggio causare un ribaltamento della struttura per questo per conferire una maggiore stabilità si è pensato di realizzare un contrappeso agganciato al bordo, in modo da riequilibrare il carico.

La massa deve avere un peso di 56.4 Kg e sarà composta da elementi metallici uniti insieme già presenti in laboratorio.

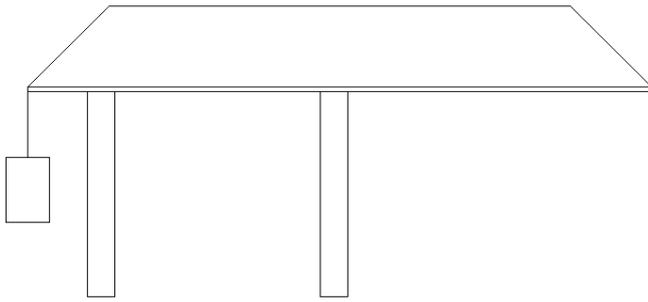


Figura6.2: Schematizzazione della massa di bilanciamento

### 6.2.1 Realizzazione della struttura

Una volta realizzato l'appoggio verrà disposto un ponteggio nei due fianchi del pilastro da costruire, i quali verranno poi collegati anteriormente e posteriormente; così da creare una vera e propria gabbia su tutti i lati.

Il ponteggio verrà quindi ad essere un unico corpo che verrà poi agganciato ad un contrasto rigido fissato a terra che è posto in laboratorio già accanto alla zona adibita per la prova( Figura 6.3).

Il ponteggio con 2 cavalle (altezza  $180 \times 2 = 360$  cm e larghezza 100 cm) permette di lavorare a tutte le possibili altezze in sicurezza.

Allestita tutta la gabbia di sicurezza si procede alla realizzazione del pilastro e ogni 40-50 cm sarà posto un elemento orizzontale nei lati del ponteggio per far sì che anche se si verificasse un eventuale sbandamento della struttura questa si appoggi alle protezioni senza nessun rischio per chiunque sia nei pressi dell'area.

Giunti all'ultimo blocco verrà calata la piastra superiore e le varie masse di bilanciamento della piastra e sbilanciamento della struttura.

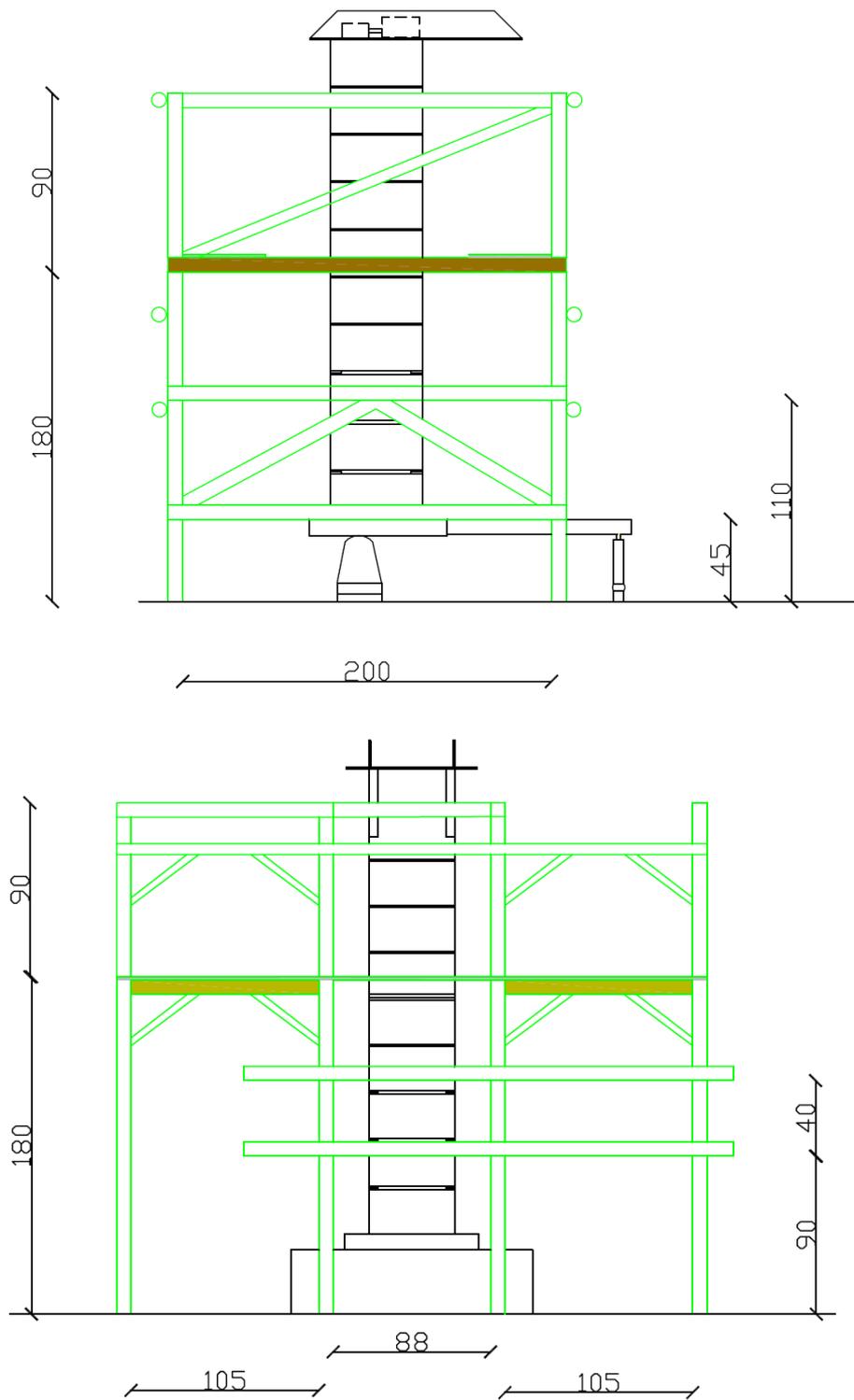


Figura6.3: Schematizzazione del ponteggio

### 6.2.2 Realizzazione della massa

La massa che si deve muovere in sommità ha un peso di 75 Kg e viene realizzata mediante la sovrapposizione di elementi di acciaio che vengono posizionati al di sopra di una piastra scorrevole, munita di ruote, creando un blocco unico in modo da avere la maggiore stabilità possibile. Il tutto è collegato all'attuatore che ne gestisce il movimento.

### 6.3 MONTAGGIO DELLA STRUMENTAZIONE

Per misurare e controllare gli spostamenti durante la prova si utilizzano dei trasduttori di spostamento, disposti in posizioni significative:

- in corrispondenza dei giunti di gomma, da ambedue i lati della colonna, in modo da controllare bene gli spostamenti durante la simulazione e rilevare così accorciamenti o distacchi che potrebbero provocare il ribaltamento dell'elemento.

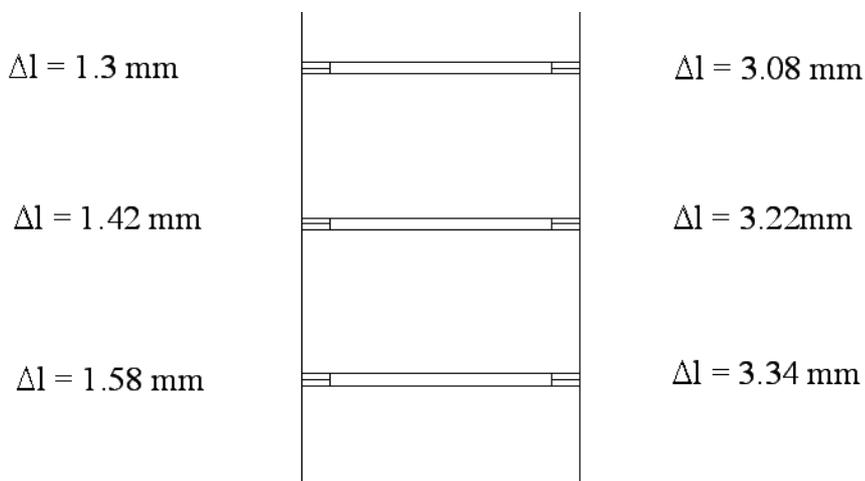


Figura6.4: deformazioni dei giunti in seguito alla prova

- Altri comparatori sono collocati a metà dell'altezza e in corrispondenza dell'appoggio dove viene imposto il cedimento.

- L'attuatore in sommità dispone di un sistema integrato di controllo analogico degli spostamenti.

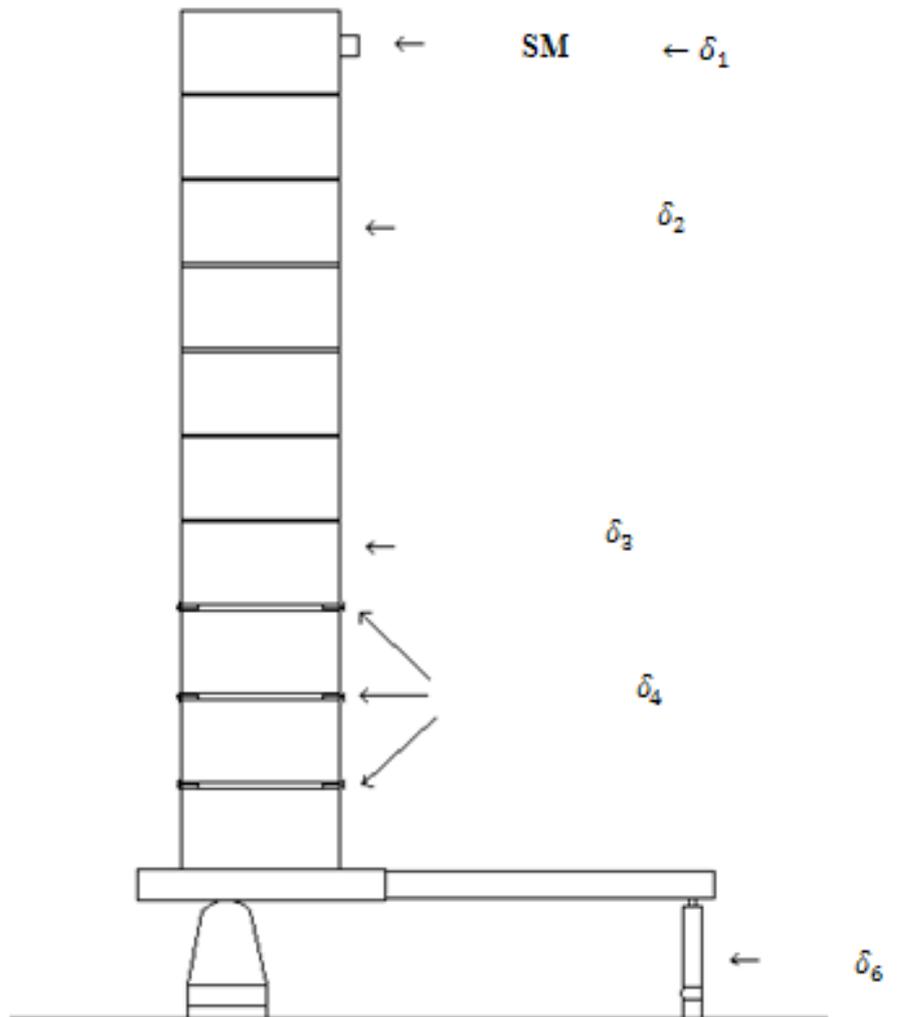


Figura6.5: Disposizione della strumentazione

La gabbia ha permesso l'installazione dei dispositivi di controllo in sicurezza e senza difficoltà.

Per il montaggio della strumentazione la gabbia realizzata con il ponteggio viene mantenuta alla stessa distanza di costruzione.

Come sistema di riferimento assoluto da collegare alla strumentazione viene utilizzato il ponteggio, questo è possibile solo perché durante le prove l'area non è soggetta a potenziali fonti di disturbo esterne.

- Smart-brick

Lo smart-brick posto in sommità permette un ulteriore controllo degli spostamenti e la valutazione dell'inclinazione dell'asse del pilastro.

#### **6.4 ESECUZIONE DELLA PROVA**

Durante l'esecuzione della prova si recinta il pilastro in tutta l'area del laboratorio adibita alla sua costruzione in modo da poter effettuare le simulazioni in tutta sicurezza, anche nei confronti di un eventuale crollo inaspettato.

I cavi cui è collegata la strumentazione devono essere sufficientemente lunghi in modo da rispettare la distanza di sicurezza prevista.

## Capitolo7:

### REALIZZAZIONE DELLA PROVA

La realizzazione della struttura è stata effettuata presso il LISG (Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica).

#### 7.1 FASI COSTRUTTIVE DELLA STRUTTURA

La piastra di base è posta su un appoggio cilindrico in modo da consentire la rotazione durante la prova (figura 7.1).



Figura7.1: Appoggio su cui è posta la piastra di base

L'attuatore alla base è appoggiato su di un blocco di legno in modo da conferire una migliore aderenza e limitare lo slittamento, che sarebbe maggiore con un contatto diretto con il pavimento.



Figura7.2: Attuatore lineare alla base

Dopo aver sistemato la piastra sull'appoggio, per avere una maggiore stabilità sia durante la costruzione che durante la prova, si dispone l'IPE su due blocchi di legno. In questo modo il peso della struttura non si scarica interamente sull'attuatore disposto all'estremità (figura 7.3).

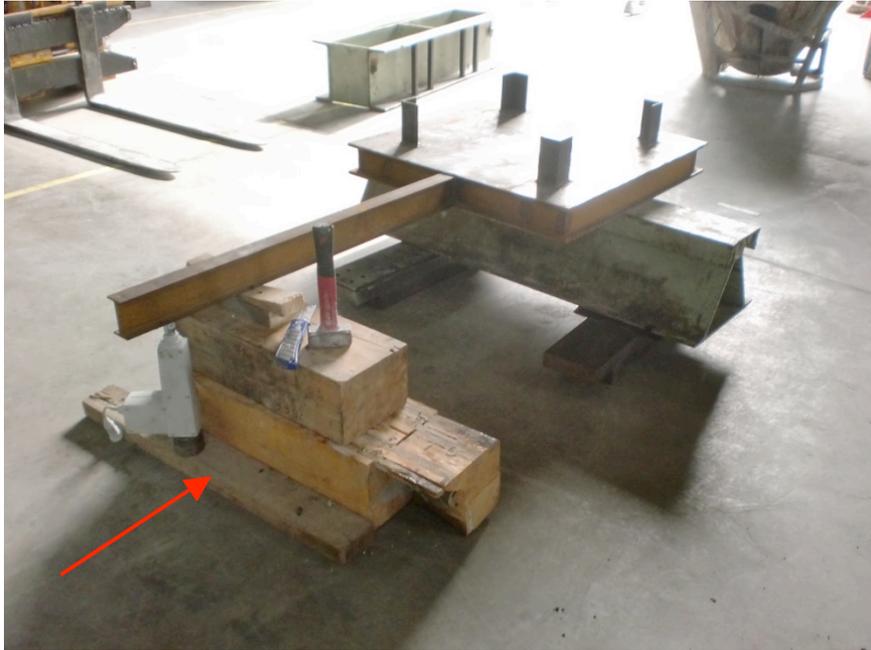


Figura7.3: Posizionamento della piastra di base

Si procede in seguito con la costruzione del pilastro utilizzando blocchi da canna fumaria in conglomerato cementizio alleggerito con argilla espansa (figura 7.4).



Figura7.4: Blocchi per canna fumaria

Prima di continuare con la costruzione del ponteggio si posano i blocchi in cui i giunti non sono realizzati con la malta, ma con la gomma.



Figura7.5: Inizio costruzione del pilastro

I giunti di gomma di 2cm vengono realizzati con l'incollaggio di due elementi di gomma Para della dimensione di 5\*5\*1 mm. Viene utilizzato il silicone sia per formare il giunto che per l'incollaggio sui blocchi (figura 7.6).



Figura7.6: Realizzazione giunti di gomma

Questa operazione viene effettuata su tutti e quattro gli spigoli del blocco (figura 7.7).



Figura7.7: Realizzazione giunti di gomma sui quattro spigoli

Si realizzano in questo modo i giunti tra i primi quattro mattoni e per assicurare una maggiore stabilità fino a quando il silicone si asciughi completamente si dispongono dei rigoni ai lembi dei blocchi(figura 7.8).



Figura7.8: Parte inferiore bloccata con rigoni

Prima di posizionare gli altri blocchi si procede con il montaggio del ponteggio realizzato con 2 cavalle (altezza  $180 \times 2 = 360$  cm e larghezza 100 cm) e tubi dalmine posizionati a diverse quote per far sì che anche se si verificasse un eventuale sbandamento della struttura questa si appoggi alle protezioni senza nessun rischio per chiunque sia nei pressi dell'area. Si realizza una gabbia che circonda la struttura (figura 7.9).





Figura7.9: Realizzazione del ponteggio intorno alla struttura

Per una maggiore sicurezza il ponteggio viene agganciato ad un contrasto rigido già presente in laboratorio (figura 7.10).



Figura7.10: Particolare del ponteggio ancorato ad un contrasto rigido

La malta utilizzata per realizzare i giunti tra i blocchi è la H40 Eco.(Figura 7.11 )



Figura7.11: Malta utilizzata per i giunti

Il posizionamento della piastra in sommità, una volta terminata la costruzione del pilastro, sarà effettuato dopo due giorni , tempo richiesto dalla malta per fare presa (figura 7.12).



Figura7.12: Pilastro

La piastra in sommità è asimmetrica (figura 7.13) e potrebbe una volta tolto il ponteggio causare un ribaltamento della struttura per questo per conferire una maggiore stabilità si è pensato di realizzare un contrappeso agganciato al bordo, in modo da riequilibrare il carico. Questo viene realizzato tramite due piastre di 14 Kg, agganciate l'una sotto l'altra e una di 28 Kg.(figura 7.14), disposte simmetricamente (figura 7.15). Queste vengono fissate alla piastra appena questa viene appoggiata sulla sommità del pilastro(figura 7.15).



Figura7.13: Piastra superiore



Figura7.14: Piastre che costituiscono la massa di bilancio



Figura7.15: Ancoraggio delle piastre con moschettoni

La piastra viene puntellata ad una estremità per una maggiore stabilizzazione.  
Il puntello verrà rimosso durante la procedura di prova (figura 7.16).



Figura7.16: Puntone al di sotto della piastra



Figura7.17: Pilastro ultimato

## 7.2 MONTAGGIO DELLA STRUMENTAZIONE PER IL MONITORAGGIO DURANTE LA PROVA

Una volta terminata la costruzione si può procedere con il posizionamento della strumentazione per misurare e controllare gli spostamenti durante la prova.

Per il controllo in corrispondenza dei giunti di gomma si utilizzano trasduttori di spostamento (TML) di tipo UB-5 (figura 7.19). Questi permettono il controllo dell'apertura della fessura.

<b>Capacità</b>	5 (da 2 a 7) mm	<b>Resistenza</b>	350 ohm
<b>Sensibilità</b>	Approx. $1000 \times 10^{-6}$ strain/mm	<b>Voltaggio raccomandato</b>	Inferiore a 2V
<b>Non-linearità</b>	1% RO		

Figura7.18: Proprietà dei trasduttori di tipo UB-5



Figura7.19: Trasduttori di spostamento

In totale vengono montati 6 trasduttori, in corrispondenza dei giunti di gomma, in modo da monitorare entrambi i lati .Gli strumenti vengono montati su dei supporti(figura 7.20) .

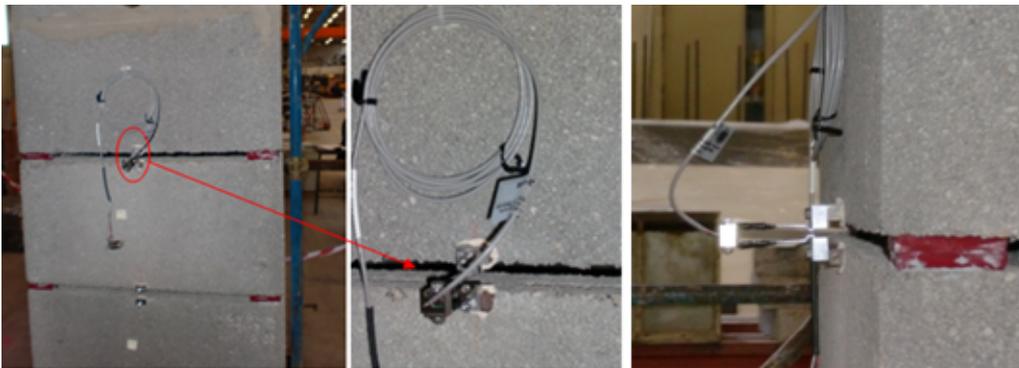


Figura7.20: Posizionamento Trasduttori di spostamento tra i giunti

Vengono utilizzati altri trasduttori per monitorare gli spostamenti a diverse quote lungo il pilastro, durante la prova. I trasduttori LVDT (linear variable differential transformer) vengono impiegati per misurare piccoli spostamenti.

Essi si basano sul principio dell'induzione elettromagnetica. Generalmente questi trasduttori sono costituiti da un cilindro metallico, detto armatura, che contiene l'avvolgimento primario ed i 2 avvolgimenti secondari. E' molto sensibile e in grado di misurare spostamenti dell'ordine delle frazioni di micron. A seconda della frequenza di alimentazione del primario e della massa del nucleo si hanno frequenze di taglio di alcune centinaia di hertz e quindi buone risposte dinamiche a spostamenti velocemente variabili nel tempo.

I trasduttori di spostamento (LVDT) utilizzati, vengono posizionati a quote caratteristiche sull'altezza del pilastro: a 121 cm, 170 cm e 241 cm, come mostrato in figura 7.22.

I trasduttori di spostamento utilizzati sono :

- 1-WA/20 MM alla quota di 121 cm, dove ci si aspetta uno spostamento di 12,2 mm;
- 1-WA/20 MM alla quota di 170 cm, dove ci si aspetta uno spostamento di 17,5 mm;
- WA50 MM in sommità all'altezza di 241 cm, dove ci si aspetta uno spostamento di 25 mm;



Figura7.21: Trasduttori di spostamento LVDT

Vengono montati tubi dalmine sul ponteggio in corrispondenza delle tre quote fissate, in modo da costituire un appoggio per gli strumenti(Figura 7.22).

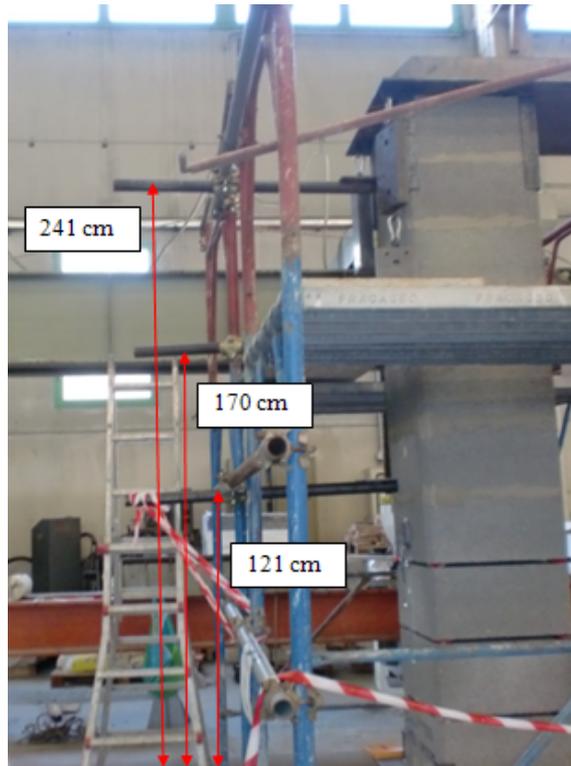


Figura7.22: Quote di riferimento per il montaggio degli LVDT

Viene riportata di seguito una tabella che illustra le specifiche di questi trasduttori:

Tabella : Caratteristiche degli LVDT

<b>Tipo</b>		<b>WA10</b>	<b>WA20</b>	<b>WA50</b>	<b>WA100</b>	<b>WA200</b>
<b>Spostamento nominale</b>	mm	0.....10	0.....20	0.....50	0...100	0....200
<b>Sensibilità nominale</b>	mV/V	80				
<b>Tolleranza</b>	%	±1				
<b>Tolleranza a zero</b>	mV/V	±8				
<b>Input di Resistenza</b>	Ω	100 ± 10%	350±10%			

<b>Output di Resistenza</b>	$\Omega$	570± 10%	680±10%
<b>Non linearità</b>	%	$\leq \pm 0.2$ on $\leq \pm 0.1$	

Stabiliti i punti in cui effettuare le misure, per garantire una misura più precisa, è stata trattata la superficie dei blocchi con una spazzola, in modo da ridurre la rugosità (figura 7.23). Preparata la superficie si procede con l'incollaggio dei vetrini (figura 7.24).



Figura7.23: Trattamento della superficie irregolare dei blocchi



Figura7.24: Incollaggio dei vetrini



Figura7.25: Posizionamento degli LVDT

E' previsto inoltre un quarto trasduttore di spostamento alla base(figura 7.26), in corrispondenza dell'attuatore che viene comandato manualmente per imporre il cedimento. L'LVDT , posizionato su di un supporto magnetico permette in questo modo di monitorare lo spostamento verticale e quindi la conseguente rotazione alla base del pilastro, durante la prova.



Figura7.26: Posizionamento LVDT alla base

Tutti i trasduttori di spostamento, sei tra i giunti di gomma, e quattro per monitorare lo spostamento del pilastro durante la prova, sono collegati ad una stessa centralina. Gli strumenti sono dotati di prolunghe sufficienti ad assicurare lo svolgimento della prova in sicurezza.



Figura7.27: Strumentazione per i controllo dei trasduttori

## **7.4 POSIZIONAMENTO DELL'ATTUATORE E DELLA MASSA SULLA PIASTRA SUPERIORE**

### **7.4.1 Realizzazione del supporto per l'attuatore**

L'attuatore da posizionare in sommità è l'LA35 (figura 7.28). Questo è lungo circa 90 cm, senza considerare il pistone che fuoriesce per spingere la massa, che può arrivare ad una corsa massima di 60 cm.



Figura7.28: Attuatore lineare LA35

Viene realizzato in laboratorio, un supporto con due profili a L e uno C, tra di loro bullonati, in modo da sostenere l'attuatore in sommità ( figura 7.29).



Figura7.29: Supporto(a) e montaggio dell'attuatore in sommità(b)

#### 7.4.2 Posizionamento del carrello e della massa

Per consentire alla massa in sommità di scorrere è stato realizzato un carrellino, con una piastra a cui sono state saldate delle rotelle (figura 7.30).

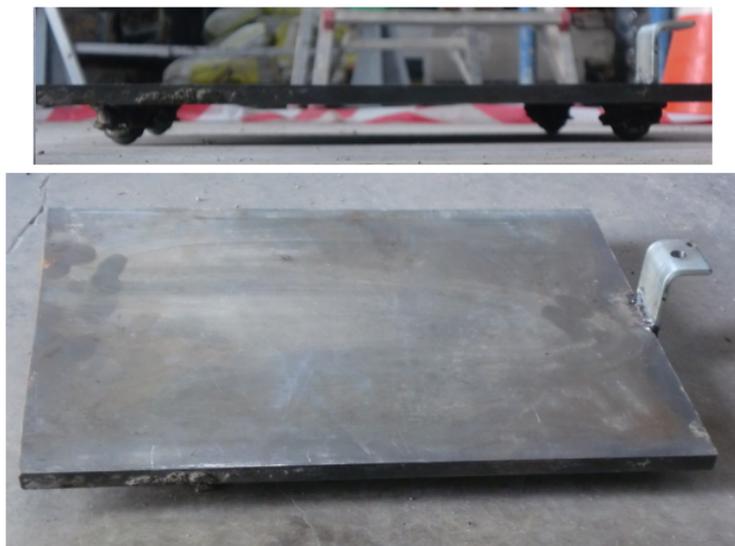


Figura7.30: Vista laterale e dall'alto del carrellino

La massa viene realizzata mediante la sovrapposizione di due piastre 40\*40 mm del peso di 25 kg e una 20\*20 mm di 10 kg sul carrello che pesa circa 15 kg, ottenendo così un peso totale di 75 kg.



Figura7.31: Piastre utilizzate per la realizzazione della massa

Una volta bloccate le estremità dell'attuatore con delle viti filettate al supporto e al carrello, come mostrato in figura 7.32, si procede alla disposizione delle piastre sul carrello( figura 7.33), che deve scorrere tra le nervature della piastra superiore. Le piastre vengono semplicemente appoggiate e il tutto è centrato, mantenendo la stessa distanza dalle nervature.



Figura7.32: Particolari dell'attuatore bloccato alle due estremità



Figura7.33: Particolari della massa

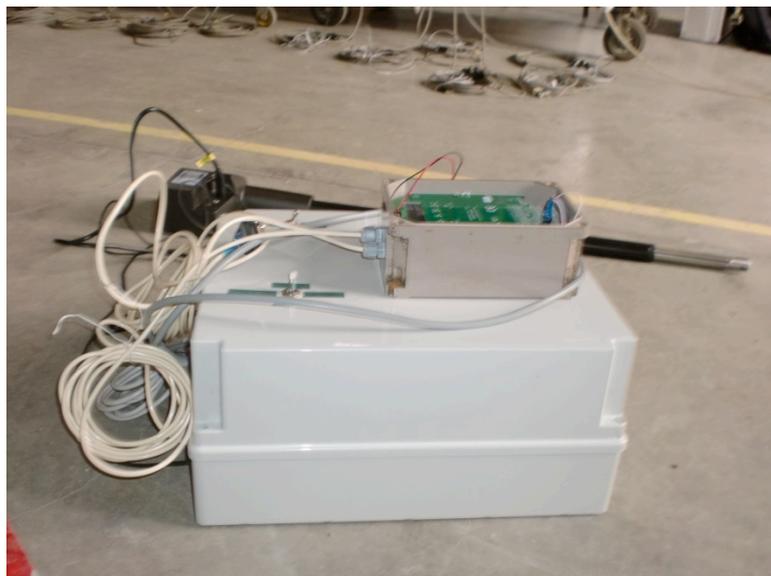
## 7.5 POSIZIONAMENTO DELLO SMART-BRICK

Lo Smart-brick è posizionato in sommità con l'asse in direzione ortogonale alla direzione del moto (figura 7.34).



Figura 7.34: Posizionamento dello smart-brick

Lo smart-brick, l'attuatore in sommità e l'attuatore alla base sono collegati tutti alla scatola di comando in figura 7.35.



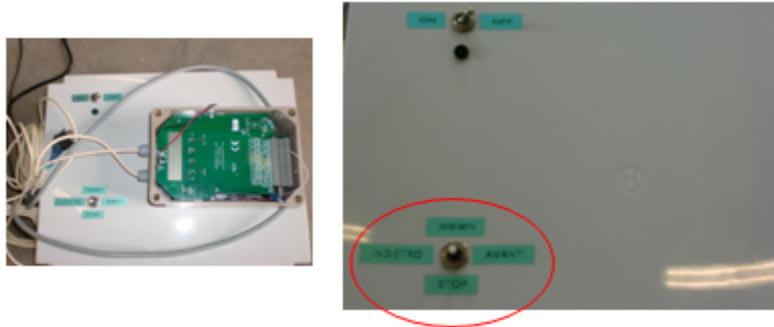


Figura7.35: Scatola di comando

Attraverso il movimento del pulsante in avanti o indietro, come messo in evidenza in figura 7.35, è possibile comandare manualmente il movimento dell'attuatore alla base. Lo smart-brick è poi collegato ad un pc (figura 7.36).



Figura7.37: Computer collegato allo smart-brick

Quando si fa sollevare l'attuatore alla base, dando così una rotazione, lo smart-brick al cui interno è presente un inclinometro, rileva la variazione di inclinazione e a seconda che questa sia positiva o negativa, comanda il movimento del pistone dell'attuatore in sommità che può spingere la massa in avanti o indietro, affinché si raggiunga la verticalità della struttura.

## Capitolo 8

### ESECUZIONE DELLA PROVA E RISULTATI OTTENUTI

#### 8.1 ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova viene realizzata, una volta posizionati e registrati tutti gli strumenti. Manualmente, si muove il pulsante sulla scatola, che fa sollevare l'attuatore alla base di 1,23 cm, per avere una rotazione di  $0.5^\circ$ .

Lo smart-brick rileva la variazione nell'inclinazione e fa muovere il pistone in sommità, che spinge la massa fino a quando non viene recuperata la verticalità dell'asse.

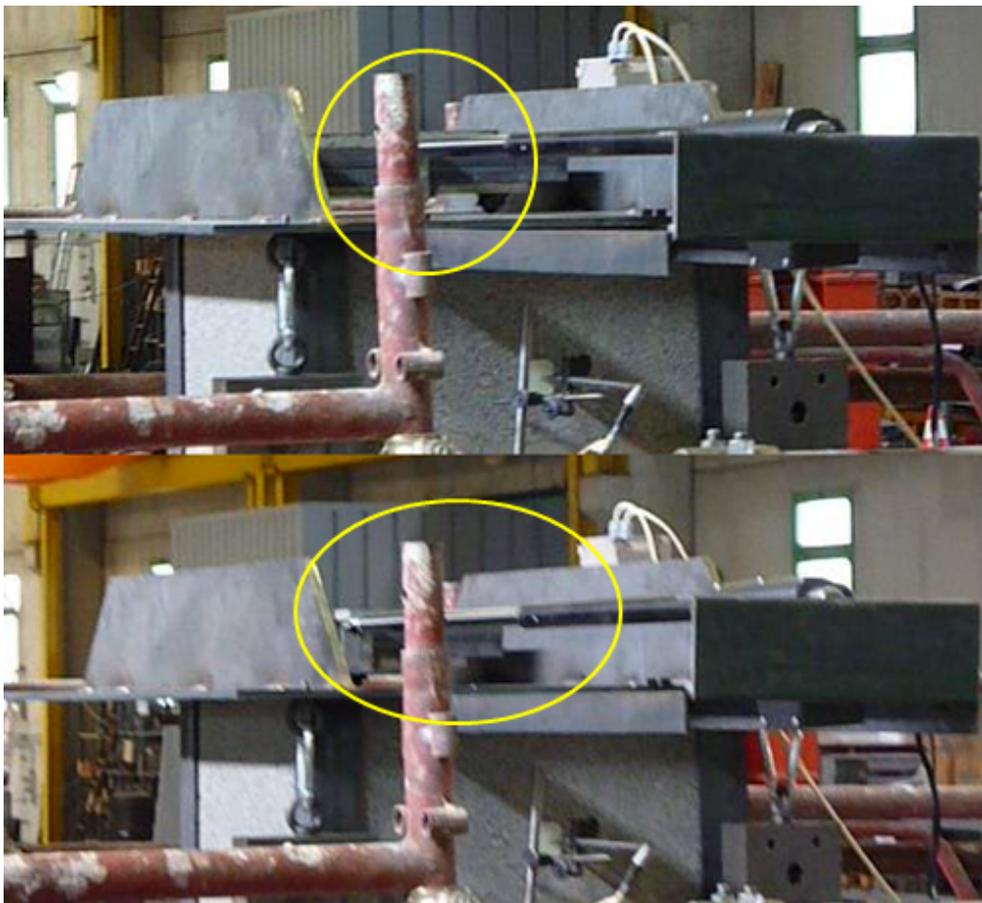


Figura8.1: Spostamento della massa



Figura8.2 : Confronto tra struttura iniziale e struttura sottoposta a cedimento

Lo spostamento è quasi impercettibile, trattandosi di pochi centimetri su un'altezza di circa tre metri.

Sono state effettuate due prove:

- La prima in cui si è impressa in un solo step la rotazione di  $0.5^\circ$  ;
- La seconda in cui si è suddiviso lo spostamento verticale in 5 step;

Dividendo lo spostamento in step è possibile analizzare in maggiore dettaglio il comportamento dei giunti di gomma alla base.

Prima di procedere con i risultati ottenuti, vengono riportati maggiori informazioni sull'attuatore comandato dallo smart-brick, con relativo circuito di funzionamento.

## Sistema movimento per tesi sperimentale

Attuatore e motore:

LINAK ITALIA - Via del Commercio, 27 - 20090 Buccinasco (MI)

Riferimento per informazioni: Dott. Ottavio Maioli (Service Dept.) tel 02/48463381 email om@linak.it

### dati attuatore

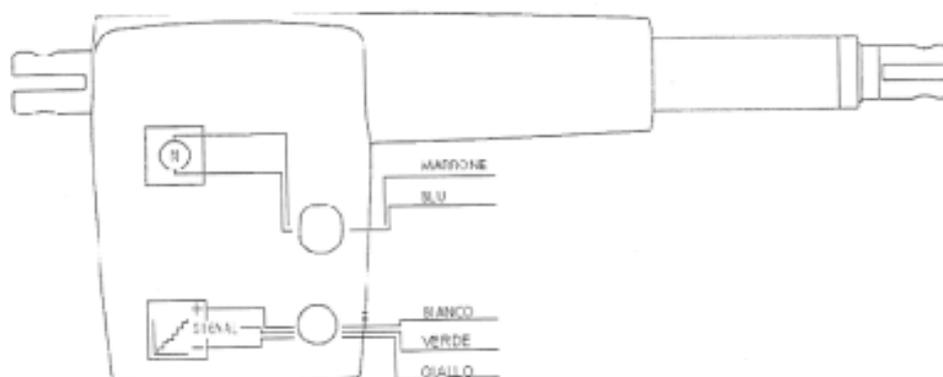
L'attuatore è comandato, attraverso l'interfaccia di potenza in scatola Gewiss, allo *SmartBrick*. Il codice produttore è:

3540A010A600B21

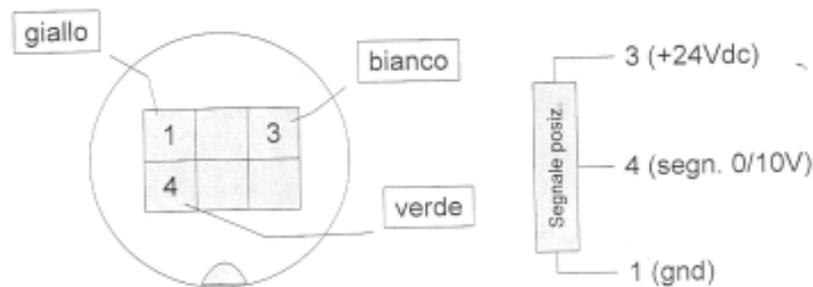
Il codice indica il modello (legenda sul data sheet <C:\Documents and Settings\Federico\Desktop\fbidati\laurea ragazze\Attuatore lineare LA35.pdf>):

- modello La35
- pistone 12 mm - 1000 N
- non frenato
- Attacco posteriore in acciaio inox (AISI 304), con foro 10.2 per albero 10 mm
- Occhiello pistone in acciaio trattato con foro  $\varnothing 10.2$  per albero 10mm (cod. 0351006)
- Madrevite di sicurezza
- Opzioni PCB: nessuna
- segnale di posizione analogico
- Lunghezza corsa Acme pistone 600 mm
- Tipo motore 24 V DC
- Cavo alimentazione 1.5 m (0367002 - 1500)

Attuatore con segnale di posizionamento assoluto:  
35XXXX0Axxxx



piedinatura connettore segnale analogico:



Vista inserimento pannello

**I/O Specifications: Absolute positioning**

Item	Specification	Comment
Description	The actuator can be equipped with electronic circuit that gives an analog feedback signal when the actuator moves.	
Input Voltage	11-28VDC	Feedback circuit to be powered 1 second before motor runs, and until 1 second after the motor has stopped. Cable dimension 6 x 0,5mm <sup>2</sup> (6 x AWG20)
Output voltage	0 - 10V 0V = Fully retracted 10V = Fully extended	+/- 0.5V
Current consumption	Current consumption is max. 40mA	Also when actuator is not running
Connection	Supply: White (Pin 3) Ground: yellow(Pin 1) Signal: green (Pin 4)	See figure 4 Use cable 0367003-XXXX

**dati motore**

Il motore è collegato direttamente all'invertitore manuale 314100+1110002P.

Il codice indica il modello (legenda sul data sheet [C:\Documents and Settings\Federico\Desktop\fbidati\laurea ragazze\Linear Actuator LA31C \(Data Sheet\).pdf](C:\Documents and Settings\Federico\Desktop\fbidati\laurea ragazze\Linear Actuator LA31C (Data Sheet).pdf)):

- modello LA31
- Mini-fit cable, 0.08 m (Without Hall feedback- REED feedback possible)
- IPX6
- 24VDC Standard motor
- lunghezza della corsa 100mm
- freno alla pressione (non alla trazione)

- colore grigio
- Attacco posteriore standard con fessura da 6,1 mm, foro da 10,1 mm diametro
- finecorsa integrati, non regolabili
- Duty cycle: Max 10% or 2 minutes continuous use followed by 18 minutes not in use
- carico max: 6000N (push) 4000N (pull) con 5A di carico elettrico.

### **schema realizzato**

#### schema dispositivo.

- All'interno sono presenti le seguenti protezioni, che dovrebbero ridurre drasticamente il rischio per l'operatore):
  - fusibile sul primario del trasformatore
  - *polyswitch* in serie all'attuatore (intervento con autoripristino se la corrente sale troppo e per troppo tempo)
  - protezione intrinseca dell'omnifet di comando attuatore (temperatura e corrente).

Naturalmente, non bisogna collegare un carico troppo elevato (superiore a quello dell'attuatore di progetto)

- l'omnifet può assorbire fino a 300 uA in ingresso, e nel progetto abbiamo considerato quella corrente
- l'*hfe* statico del BC247C è circa 10, quindi abbiamo considerato una corrente in base di almeno 30 uA.
- l'invertitore esterno è collegato con il classico schema incrociato per l'inversione
- i morsetti *motore* servono per il motore a comando diretto, attivato dall'invertitore a pannello. Anche questo motore deve essere a 24Vdc.
- l'attuatore è comandato dal circuito interno (con l'omnifet), che riceve i comandi da uno *SmartBrick* opportunamente programmato.
- Il blocco "relè 1 e 2 inversione" contiene due contatti NC+NA collegati per l'inversione di marcia. L'inversione è comandata tramite un darlington npn in connessione "low-side". Servono 500  $\mu$ A in base (ingresso) per attivare il darlington. Questa corrente deve provenire dallo *SmartBrick*.
- L'attuatore contiene al suo interno un *sensore di posizione*, che deve essere alimentato e che fornisce un segnale (0 ÷ 10V) proporzionale alla posizione del pistone.
- Connessioni tra l'attuatore e l'interfaccia di potenza in scatola Gewiss; (←) ingresso (→) uscita rispetto al sistema; i termini in corsivo sono i nomi dei terminali indicati sullo schema elettrico (schema dispositivo):
  - *attuatore* → alimentazione (2 fili. La polarità determina la direzione di spostamento). C'è un cavo dedicato per questo. I tre segnali seguenti sono invece contenuti in un altro cavo dedicato
  - *out\_fbck* → segnale posizione attuatore (0 ÷ 10V). 0V=retratto, 10V=esteso
  - *+24V\_fbck* → alimentazione sensore posizione



## **8.2 CONFRONTO TRA ATTIVITA' SPERIMENTALE E MODELLAZIONE FATTA IN STRAUS7**

- Prova con un solo step di carico:

Dai valori ottenuti dalle misurazioni in continuo con lo Smart Brick , si nota che a partire dalla posizione iniziale, in cui la massa è centrata con l'asse del pilastro, si è ottenuto circa il recupero totale, così come previsto dal modello, con un'eccentricità di 56 cm (a fronte dei 60 cm stimati).

Sono riportati di seguito i dati forniti dallo smart-brick, in cui è possibile leggere per ogni valore dell'inclinazione quello dello spostamento.

Legenda:

Stop = il pistone in sommità è fermo perché si ha la verticalità;

Move forward = sposta il pistone in avanti;

Move backward = sposta il pistone indietro;

Inclinazione = di quanto è inclinato il pilastro;

Posizione = la posizione della massa in sommità rispetto alla posizione iniziale;

```

POSIZIONAMENTO IN ASSE
" Inc linaz io ne=0.0042(arcdeg); Pos iz i one=0.0(cm) STOP "
STEP CARICO
" Inc linaz io ne=-0.5424(arcdeg); Pos iz i one=0.1(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.3423(arcdeg); Pos iz i one=1.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.3926(arcdeg); Pos iz i one=2.6(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.3030(arcdeg); Pos iz i one=4.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.3693(arcdeg); Pos iz i one=5.3(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.3273(arcdeg); Pos iz i one=6.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2924(arcdeg); Pos iz i one=8.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2895(arcdeg); Pos iz i one=9.1(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2919(arcdeg); Pos iz i one=10.4(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2923(arcdeg); Pos iz i one=11.9(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2816(arcdeg); Pos iz i one=13.2(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2675(arcdeg); Pos iz i one=14.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2447(arcdeg); Pos iz i one=15.9(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2261(arcdeg); Pos iz i one=17.2(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.2131(arcdeg); Pos iz i one=18.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1910(arcdeg); Pos iz i one=19.9(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1689(arcdeg); Pos iz i one=21.3(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1594(arcdeg); Pos iz i one=22.6(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1494(arcdeg); Pos iz i one=23.8(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1428(arcdeg); Pos iz i one=25.4(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1235(arcdeg); Pos iz i one=26.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1229(arcdeg); Pos iz i one=26.1(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1100(arcdeg); Pos iz i one=27.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1046(arcdeg); Pos iz i one=28.2(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1032(arcdeg); Pos iz i one=31.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1258(arcdeg); Pos iz i one=32.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.1093(arcdeg); Pos iz i one=33.3(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0922(arcdeg); Pos iz i one=34.7(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0921(arcdeg); Pos iz i one=35.6(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0912(arcdeg); Pos iz i one=36.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0877(arcdeg); Pos iz i one=36.4(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0871(arcdeg); Pos iz i one=38.7(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0780(arcdeg); Pos iz i one=40.0(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0748(arcdeg); Pos iz i one=41.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0712(arcdeg); Pos iz i one=42.7(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0670(arcdeg); Pos iz i one=44.1(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0648(arcdeg); Pos iz i one=45.6(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0608(arcdeg); Pos iz i one=46.9(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0573(arcdeg); Pos iz i one=48.3(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0518(arcdeg); Pos iz i one=49.8(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0498(arcdeg); Pos iz i one=51.1(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0423(arcdeg); Pos iz i one=52.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0385(arcdeg); Pos iz i one=53.5(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0321(arcdeg); Pos iz i one=54.9(cm) MOVE forward "
" Inc linaz io ne=-0.0291(arcdeg); Pos iz i one=55.9(cm) STOP "

```

Si riportano poi in un grafico gli spostamenti degli LVDT posizionati lungo l'asse del pilastro, a variare dello spostamento del pistone:

Tabella 1: spostamenti degli LVDT

Spost A	Spost M	Spost B
mm	mm	mm
0	0	0
0,005	0	-0,00199
0,005	0	-0,00199
0,005	0	-0,00199
0,005	0	-0,00199
0,005	0,00199	-0,00199
0,005	0	-0,00199
0,005	0,00199	0
0,010	0,00199	0
0,010	0,00398	0
0,005	0,00199	-0,00199
0,005	0,00199	-0,00199
0,010	0,00199	-0,00199
0,010	0,00398	0
0,010	0,00398	0
0,010	0,00398	0
0,010	0,00398	0
0,010	0,00398	-0,00199
0,010	0,00398	-0,00199
0,010	0,00398	-0,00199
0,010	0,00398	0
0,221	0,20696	0,19502
7,888	5,53419	3,85065
12,319	8,75401	6,19686
18,582	13,22355	9,09828
24,387	17,4523	10,65645

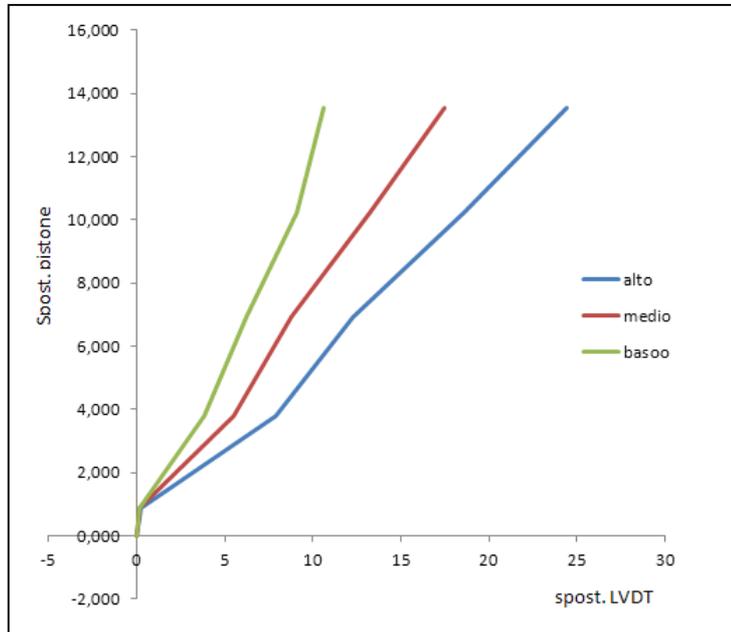


Figura8.3: Spostamento degli LVDT

Si possono così confrontare gli spostamenti misurati dagli LVDT con quelli dati dal modello analitico:

	Modello [mm]	Prova [mm]
LVDT 1210 mm	12,2	10,7
LVDT 1700 mm	17,5	17,5
LVDT 2410 mm	25	24,4

Tabella 2: Confronto dati sperimentali con dati misurati

Emerge dal confronto, una corrispondenza tra i risultati stimati e quelli ottenuti con la prova in laboratorio.

Si analizza poi il comportamento dei giunti, che come mostrato in figura 8.4, sia a compressione che a trazione si sono comportati quasi in maniera simmetrica. A differenza della modellazione, fatta mostrano una minore deformabilità.

Tabella 3: Spostamenti trasduttori posizionati tra i giunti di gomma

mA	mM	mB	LA	LM	LB
mm	mm	mm	mm	mm	mm
0	0	0	0	0	0
0,002558	0,002578	0,002578	0,002602	0,003428	0
0,002558	0,002578	0,002578	0,001734	0,001714	0,00089
0,001706	0,001718	0,001719	0,001734	0,000857	0,00089
0,000853	0,001718	0,001719	0,001734	0,002571	0,00089
0,000853	0,000859	0,001719	0,000867	0,001714	0,00089
0	0,000859	0,000859	0,001734	0,001714	0,00089
0,000853	0,000859	0,000859	0,001734	0,001714	0,00089
-0,00085	0	0	0,001734	0,002571	0,001779
0,000853	0,000859	0,000859	0,001734	0,001714	0,00089
0,000853	0,000859	0,000859	0,001734	0,001714	0,00089
0,001706	0,000859	0,001719	0,001734	0,001714	0,00089
0,000853	0,000859	0,000859	0,002602	0,003428	0,00089
0,000853	0,000859	0,000859	0,001734	0,001714	0,00089
0,001706	0,001718	0,001719	0,002602	0,002571	0,00089
0,000853	0,001718	0,000859	0,003469	0,003428	0,00089
0,000853	0,000859	0,000859	0,002602	0,002571	0,001779
0,000853	0,001718	0,000859	0,002602	0,002571	0,00089
0,000853	0,000859	0	0,001734	0,001714	0,00089
0,002558	0,001718	0,001719	0,003469	0,002571	0,00089
0,000853	0,000859	0,001719	0,001734	0,001714	0,00089
0,03667	0,041242	0,044689	-0,03469	-0,03856	-0,04092
-0,04776	-0,05327	-0,06102	0,053766	0,06084	0,065823
-0,01791	-0,01976	-0,02148	0,02168	0,025707	0,028464
-0,03496	-0,03866	-0,04383	0,040758	0,04713	0,052481
-0,06652	-0,07475	-0,08766	0,071978	0,083976	0,094287

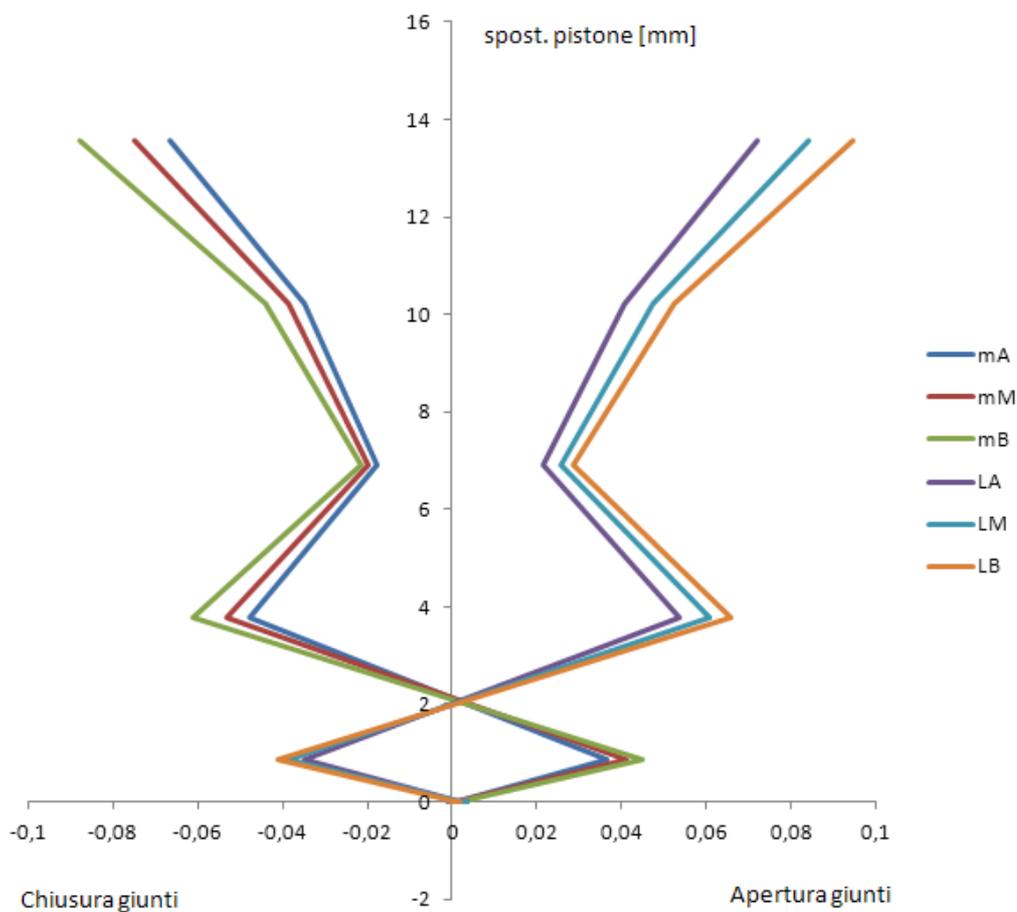


Figura8.4: Comportamento giunti di gomma

I giunti per effetto del colpo di inerzia, tendono inizialmente a rimanere rigidi, quindi prima si aprono e poi per effetto del peso ci chiudono. Ciò vale per i giunti che si trovano a destra nel pilastro, dal lato quindi in cui si ha la rotazione iniziale. Dalla foto sotto riportata si vede la deformazione del giunto di gomma durante a prova.



Figura8.5: Particolare del giunto di gomma deformato in seguito alla prova

- Prova con un 5step di carico:

La seconda prova effettuata, prevede invece di un unico step di carico, la suddivisione in cinque step, in modo da avere un controllo maggiore sulla strumentazione e sui risultati ottenuti.

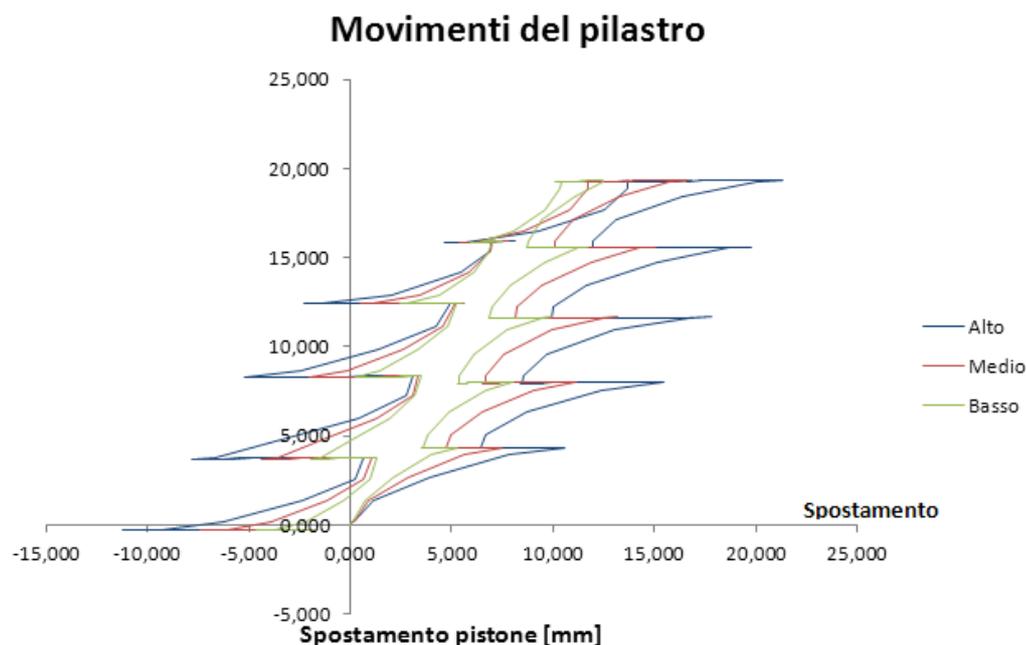


Figura8.6: Spostamenti LVDT durante i 5 step

Sono stati effettuati cinque step di carico e di scarico.

Tutti e tre gli LVDT mostrano un comportamento simile sia durante il ciclo di carico che durante quello di scarico, con spostamenti crescenti sull'altezza. Allora è possibile affermare che la rotazione della struttura al di sopra dei tre giunti di gomma sia praticamente rigida.

La risposta della struttura con un comportamento a gradini risulta migliore e rende più stabili le misurazioni, in quanto si hanno meno oscillazioni e misurazioni più accurate in confronto alla prima prova. Ciò probabilmente si

deve al fatto che inizialmente lo spostamento è stato dato di colpo, senza sapere come potessero reagire gli strumenti.

In tabella sono riportati gli spostamenti massimi registrati dai trasduttori per un spostamento del pistone alla base di circa due centimetri. Durante la prova, infatti valutata la stabilità della struttura, considerando sempre spostamenti molto piccoli si è arrivati fino ad una rotazione di  $0.8^\circ$ .

Tabella 4: Spostamenti finali dei tre trasduttori

Spost.Pist	Spost A	Spost M	Spost B
mm	mm	mm	mm
19,341	21,347	16,647	12,461

Nel grafico in figura 8.7 viene riportato il comportamento dei giunti di gomma.

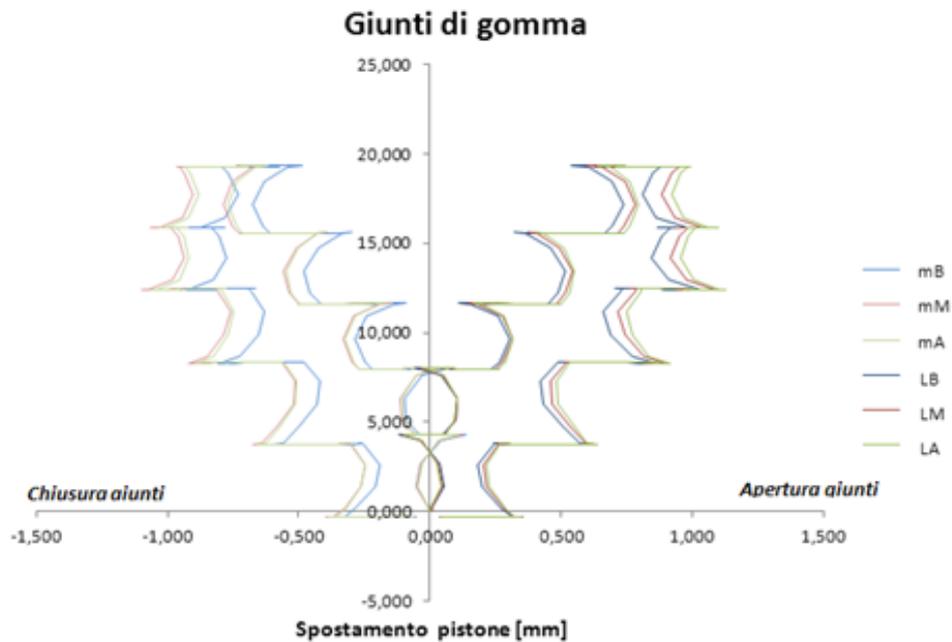


Figura8.7: Spostamenti giunti durante i 5 step

Anche in questo caso i giunti mostrano un comportamento analogo alla prima prova. Hanno un comportamento quasi simmetrico a compressione e a trazione, sia nella fase di carico che di scarico. I giunti mA, mB, mM sono quelli a sinistra del pilastro, quelli LA, LB, LM a destra.

Ciò non era stato rilevato dal modello, in cui si era supposto un comportamento differente a trazione e a compressione.

### **8.3 CONCLUSIONI**

Lo scopo della tesi è quello di valutare le possibilità delle tecnologie di auto-adattamento. I risultati della modellazione mostrano una buona corrispondenza con quelli ottenuti durante la realizzazione della prova in laboratorio:

- Gli spostamenti misurati lungo l'asse del pilastro dalla strumentazione in laboratorio, sono pressoché identici a quelli ottenuti con il modello in strauss;
- L'eccentricità stimata dal modello di 60 cm, con cui si doveva ottenere il recupero dello spostamento risulta durante la prova di circa 54 cm;

Risulta invece incerto e non molto corrispondente con quanto stimato, il comportamento della gomma con cui sono stati realizzati i giunti alla base. Questo, si deve probabilmente alla non approfondita conoscenza del materiale elastico usato e all'interazione che questa ha avuto con i blocchi con cui è stata a contatto. Il comportamento è stato deformabile, ma non tanto quanto ci si aspettava.

I risultati ottenuti mostrano, comunque una buona prospettiva per applicazioni future. Si potrebbe infatti pensare di effettuare altre prove, in cui monitorare il comportamento della struttura, ad esempio recuperando con lo spostamento del pistone alla base, un eventuale spostamento orizzontale in sommità, effettuato con la massa mossa dal pistone in alto.

Si possono determinare nuove relazioni tra attuatori e smart-brick che diano risultati ancor più precisi. In un futuro si potrebbe anche pensare ad applicazioni su edifici reali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Leghe a Memoria di Forma, Caratteristiche ed Applicazioni, Vincenzo Arricchiello(Studio di fattibilità);
- [2] K. Shimizu, T.Tadaky; Shape Memory Alloys, H.Funakubo, Ed. Gordon and Breach Science Publishers,1987;
- [3] Langer,R.,and Tirrell D.A.,Nature(2004);
- [4] Leghe a memoria di forma:modellazione costitutiva,analisi strutturale,validazione sperimentale e progettazione di dispositivi innovativi biomedici. Ferdinando Auricchio.Università degli studi di Pavia;
- [5] Arup K.Maji,Member,ASCE,and Ihosvany Negret,,"Smart Prestressing with Shape-Memory Alloy";
- [6] AMT, Advanced Materials and Technologies; website:  
<http://www.amtbe.com/>
- [7] YQFu1,3, J K Luo1, A J Flewitt1, SEong, S Zhang, H J Du andW I Milne,  
"Microactuators of free-standing TiNiCu films;
- [8] M. Saiid Saiidi, F.ASCE1; Mahmoud Sadrossadat-Zadeh; Chadi Ayoub;  
and Ahmad Itani, F.ASCE,," Pilot Study of Behavior of Concrete Beams Reinforced with Shape Memory Alloys";
- [9]Materiali piezoelettrici e loro applicazioni(Seminario dell'università degli studi del Sannio);
- [10]Ceramici piezoelettrici e loro applicazioni, Maggio 2004;
- [11] F. Ciani, D. Fabiani, G. C. Montanari,," Materiali polimerici polarizzati per applicazioni elettriche ed Elettroniche";
- [12]Temposonics, Sensore di posizione assoluto e lineare, privo di contatto meccanico basato sul principio della magnetostrizione;
- [13] Daniele Davino, Materiali magnetostrittivi e dispositivi intelligenti,modelli e applicazioni;
- [14]Articolo Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile, della Sicurezza e del Controllo Strutturale ed Ambientale;

- [15] A. Kell, *Intelligent Buildings now*. Electrotechnology, October/Novembre (1966), 26,27;
- [16] CIB Working Group W98, Proceedings of the International Building Congress, Tel Aviv, Israel, Feb.1995. Ed. A. Lustig.;
- [17] Monitoraggio di edifici civili e monumentali (ESSEBI S.r.l.);
- [18] Le Smart Structures: la nuova frontiera dell'isolamento sismico intelligente, Ing. Onorio Francesco Salvatore;
- [19] Farhad Ansari, "Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring";
- [20] the World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, whose proceedings were edited by B.F. SPENCER JR., M. TOMIZUKA, C.B. YUN, W.M. CHEN & R.W. CHEN under the copyright of Taylor & Francis in 2008;
- [21] a Joint US-European Workshop on Biosensors, Bioactuators and Bio-Inspired Systems was held in Taormina, Sicily, Italy from June 15 to June 17, 2008, just after the CIMTEC2008 conference for which the project coordinator organized theme C on active systems;
- [22] Shoureshi, R.A. and Faravelli L., 2008, Bio-inspired structural monitoring system architecture, in World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Taylor & Francis, London, UK;
- [23] (Ansari, 1998, Arduini et al., 1999, Abbiati et al., 2000);
- [24] Bonfiglioli et al., 2002, 2003, Straus7s et al., 2004;
- [25] A E Aktany, A J Helmicki and V J Hunt;" Issues in health monitoring for intelligent infrastructure";
- [26] By Surendra P. Shah,<sup>1</sup> Member, ASCE, John S. Popovics,<sup>2</sup> Associate Member, ASCE, Kolluru V. Subramaniam,<sup>3</sup> Student Member, ASCE, and Corina-Maria Aldea "New directions in concrete health monitoring technology";
- [27] D.Uttamchandani," Fibre-optic sensors and smart structures: Developments and prospects";
- [28] Sensori a fibra ottica per la diagnostica strutturale dei beni architettonici;

- [29] L. Baruchello, G. Assenza, Diagnosi dei dissesti e consolidamento delle costruzioni,  
ed. DEI, 2004;
- [30] B. Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, Optical Fiber Technology,9-2003, pgg.57-79, Academic Press;
- [31] Bonfiglioli, B., Arduini, M., Pascale, G., and Manfroni, O. “Monitoring of FRP reinforcements in structural elements by means of fiber optic sensors.” L’Edilizia;
- [32] Choquet, P., Juneau, F., and Bessette, J. ~2000!. “New generation of Fabry-Pe´rot fiber optic sensors for monitoring of structures,” Proc., 7th Annual Int. Symp. on Smart Structures and Materials, SPIE, Bellingham, Wash;
- [33]L.Coppola,S.Collepari,P.Bellinzona, “Il calstruzzo strutturale con aggregati leggeri per la realizzazione di manufatti prefabbricati”, Enco, Engineering Concrete,Laterite Spa;

## **RINGRAZIAMENTI**

Sono passati sei anni e ormai è arrivato il tanto atteso traguardo finale. Una sola parola: GRAZIE.

Un ringraziamento sincero e profondo al professore Pascale, all'ing. Bastianini e a Roberto per l'aiuto e il sostegno dimostrati in questi lunghi mesi.

Grazie, mamma e papà, per la pazienza, l'incoraggiamento e la sopportazione che avete mostrato in questi anni. Ci sono stati momenti felici, ma anche momenti difficili, che senza di voi non sarei mai riuscita a superare. Grazie per aver creduto in me e nell'avermi fatto superare le mie ansie e le mie non poche insicurezze.

Grazie, Michy, non deve essere stato affatto facile sopportarmi in questi anni. Non ti ho reso la vita facile, ma mi hai sempre incoraggiato e aiutato. Sei una delle persone più importanti della mia vita e aver fatto questo cammino insieme, a parte tutte le difficoltà e le mie invidie, è stato meraviglioso. Grazie tesoro mio.

Grazie Sery, anche te ho messo duramente alla prova in questi anni, ma mi hai sempre sopportato. Grazie per tutti i sorrisi e la felicità che mi hai regalato. Ti voglio un bene smisurato. Grazie tesoro mio.

Grazie Giuppy, fonte delle migliori risate. Sei l'unica persona in grado di restituire un sorriso con una semplice battuta. Vita mia ti voglio un mondo di bene.

Grazie zia Rosa, per essere sempre stata così paziente e incoraggiante. Anche tu mi hai sopportato, senza lamentarti e mi hai sempre spronato ad andare avanti. Ti voglio bene

Grazie nonnina, la mia più grande sostenitrice !! Hai sempre creduto in me, mi hai sempre aiutato a superare i momenti in cui volevo abbandonare tutto. Anche grazie a te non ho mai mollato. Ti voglio un mondo di bene.

Grazie Egi, sei come un fratello, te l'ho sempre detto e sempre te lo dirò! Anche tu hai avuto la tua buona dose di pazienza per sopportarmi. Grazie, sei il mio punto di riferimento. Ne hai passate di disavventure ma non ti sei mai arreso, ti sei sempre rimesso in piedi. Grazie, ti voglio bene.

Grazie Liana, la mia sory, anche se lontane, anche se in paesi diversi, non mi hai mai abbandonato. Hai sempre avuto fiducia in me, mi hai sempre detto di continuare, di non arrendermi e così ho fatto. Sei la prova che l'amicizia a distanza può esistere. Ti voglio bene

Grazie, Franco e Chiarina., Peppe e Mariarosaria. Chiarina sei come una seconda mamma e Franco un fratello, quante volte mi avete sopportato da piccolina e quante volte da grande. Grazie per la pazienza e il bene dimostrato. Vi voglio bene

Grazie Giù, ti ho stressato un sacco ma mi hai sempre sopportato. Anche da Roma sei riuscito sempre ad infondermi coraggio e a spronarmi. Grazie davvero di cuore. Ti voglio bene.

Grazie Ila, ormai sorella acquisita, sei entrata nella mia vita da poco, ma è come se ci fossi da sempre. Grazie anche a te, per essermi stata vicina nei momenti belli e in quelli brutti, senza mai lasciarmi da sola. Ormai che sei una Vinciguerra non potrai liberarti facilmente di me. Ti voglio bene

Grazie Andrea, siamo amici da sei anni, ne abbiamo passate tante insieme. Nonostante le diverse strade intraprese, i momenti difficili che ci hanno messo alla prova, siamo ancora qui, amici come prima. Con te la parola "amicizia" vuol dire disinteresse e bene incondizionato. Pensare che adesso saremo in città diverse, mi fa venire una fitta al cuore, ma sai che sei nel mio cuore e ci sarai per sempre. Spero davvero che le nostre strade si incontrino un giorno. Io ci sono e ci sarò sempre per te. Ti voglio bene

Grazie Ele, la mia metà. Ci siamo ritrovate da poco, ma spero che la nostra amicizia diventi sempre più forte. Non dimenticherò mai le serate passate e le

nostre chiacchierate notturne. Ora che ci siamo riavvicinate non ti lascio più andare via. Ti voglio tanto bene.

Grazie Stefano, Chiara, Luisa e Liborio, compagni di tante serate e cene indimenticabili. Sono contenta che siate entrati nella mia vita e spero che la nostra amicizia vada al di là di questi anni universitari, qualsiasi sia la strada intrapresa. Vi voglio bene

Grazie Anna , compagna in questa ardua e non semplice avventura. Ci sono stati mille imprevisti, ma alla fine ci siamo riuscite. Abbiamo iniziato tutto insieme e finiamo insieme. Il nostro rapporto è cambiato, come può succedere, ma ne abbiamo passate tante insieme tra risate, gioie ,dolori e incomprensioni, e sono contenta di averti nella mia vita. Ti voglio bene

Grazie Vero, anche tu hai dovuto sopportare tutti i miei sfoghi e i miei sbalzi d'umore, sempre incoraggiandomi e facendomi forza. Grazie

Grazie Roby, sei stato una scoperta per me. Sei stato e spero continuerai ad essere un grande amico. Quante serate divertenti abbiamo trascorso insieme. Ho superato tanti momenti di scoraggiamento anche grazie a te e al tuo sostegno, come dici tu siamo due vichinghi!!!!!! Ti voglio bene e spero che la nostra amicizia duri anche se saremo in città diverse.

Grazie Fizz, tra alti e bassi, sei diventato una tra le persone più importanti per me, qui a Bologna. Devi sempre credere in te stesso, puoi farcela, qualsiasi cosa tu voglia, puoi ottenerla, devi solo crederci. Tesoro ti voglio un mondo di bene e sai che potrai sempre fare affidamento su di me.

Grazie Simo, sei il gentiluomo che qualsiasi donna vorrebbe avere come amico. Sei una persona splendida. Anche te mi hai sopportato con tutte le mie lamentele e le mie ansie, ma hai sempre creduto in me. Grazie

Grazie Diego, il mio brontolo preferito. Grazie perché senza di te non sarei arrivata a questo punto. Hai avuto sempre una pazienza infinita. Sei una delle

persone più disponibili e gentili, che abbia mai conosciuto, pronto ad aiutare gli altri senza mai lamentarsi. Grazie

Grazie Vale, compagna in questi sei lunghi e faticosi anni. Te , come pochi può comprendere le mie lamentele per tutte le sfortune e la sfiga avuta in questo periodo. Grazie per il tuo sostegno, per le belle chiacchierate e le giornate trascorse insieme.

Grazie Matt, sei stato sempre un amico sincero e leale. Anche tu mi hai sempre sostenuta e mi hai sempre dato coraggio. Grazie di tutto.

Grazie Ginn,brontolo n.2, con le tue battutine e gli sfottò sul mio accento sei sempre riuscito a regalarmi un sorriso.

Grazie Ronny, Claudia, Daniel, Paolino,Lellus, per tutti i bellissimi momenti passati insieme.

Son passati sei lunghi anni, e nonostante le scelte diverse siamo ancora qui, tutti insieme. Vi voglio bene