

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 INTELLIGENTI”:
PROVE SPERIMENTALI PER LA VALUTAZIONE DELLE
CAPACITA' DI AUTO-ADATTAMENTO SU UN MODELLO DI
STRUTTURA MURARIA.**

Tesi di laurea di:

ANNA ROSA TILOCCA

n°matricola: 0000364690

Relatore:

Prof. Ing. **GIOVANNI PASCALE**

Correlatori:

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

Indice

Capitolo 1: Introduzione.....	6
Capitolo 2: Strumenti di misura per il monitoraggio: i sensori.....	8
2.1 Classificazione.....	9
2.2 Sensori a contatto meccanici.....	11
2.2.1 Comparatore.....	11
2.2.2 Deformometro.....	12
2.3 Sensori a contatto elettrici.....	13
2.3.1 LVDT	13
2.3.2 Sensore estensi metrico.....	14
2.3.3 Deformometro induttivo.....	15
2.4 Sensori a contatto (Ottici).....	16
2.4.1 Laser.....	16
2.4.2 Sensori Laser a triangolazione.....	17
2.4.3 Sensori Laser interferometrici.....	18
2.5 Sensori di inclinazione (Inclinometri).....	19
2.5.1 Inclinometro a bolla.....	19
2.5.2 Inclinometro a pendolo.....	19

2.6 Sensori di deformazione.....	20
2.6.1 Estensimetri elettrici a resistenza.....	21
2.6.2 Estensimetri elettrici a fibra ottica.....	26
2.7 Tipologie di sensori a fibra ottica.....	33
2.7.1 Sensori a reticolo di Bragg.....	37
2.7.2 Sensori di Fabry Pérot.....	43
2.7.3 Sensori di Brillouin.....	45
2.7.4 <i>Sofo</i> ®	46
2.7.5 Microbending.....	48
2.7.6 Diffusione Raman.....	49
2.7.7 Diffusione Rayleigh.....	50
2.7.8 Interferometri a bassa coerenza.....	51
2.7.9 DIC.....	52
2.7.10 Sensori a fibra ottica distribuiti.....	53
Capitolo 3: Attuatori.....	55
3.1 Classificazione generale.....	55
3.1.1 Attuatori elettrici.....	56
3.1.2 Attuatori elettrostatici.....	56
3.1.3 Attuatori elettromagnetici.....	57
3.1.4 Attuatori idraulici.....	59
3.1.5 Attuatori lineari.....	60

Capitolo 4: Materiali “Intelligenti”	61
4.1 Leghe a memoria di forma.....	66
4.1.1 Proprietà e caratteristiche.....	66
4.1.2 Comportamento meccanico.....	71
4.1.3 Effetto a memoria di forma.....	81
4.1.4 Superelasticità.....	88
4.1.5 Comportamento termo-meccanico.....	91
4.1.6 Capacità di smorzamento.....	94
4.1.7 Metodi di caratterizzazione.....	94
4.2 Materiali piezoelettrici.....	97
4.2.1 Materiali piezoceramici.....	100
4.2.2 Sperimentazioni.....	106
4.3 Materiali magnetostrittivi.....	107
4.4 Materiali dielettrici.....	114
Capitolo 5: Sensori e attuatori “intelligenti”	117
5.1 Sensori piezoelettrici.....	117
5.1.1 L’amplificatore.....	120
5.1.2 Bassa e alta impedenza.....	121
5.2 Attuatori.....	123
5.2.1 Attuatori a memoria di forma.....	124
5.2.2 Attuatori piezoelettrici.....	132

5.2.3 Attuatori ad elastomeri dielettrici.....	134
Capitolo 6: Monitoraggio e strutture “intelligenti”	137
6.1 Monitoraggio.....	138
6.2 Strutture “intelligenti”	144
6.2.1 Componenti.....	148
6.3 SHM: Structural health Monitoring.....	157
6.4 Strutture bio-ispirate.....	160
Capitolo 7: Allestimento della prova.....	163
7.1 Materiali.....	163
7.1.1 Blocchi.....	163
7.1.2 Malta.....	168
7.1.3 Piastre.....	169
7.1.4 Gomma.....	179
7.1.5 Attuatori.....	188
7.2 Analisi preliminare sulla stabilità della struttura.....	193
7.3 Modellazione della struttura.....	197

Capitolo 8: Struttura di prova.....	202
8.1 Realizzazione della struttura.....	202
8.2 Strumentazione di misura.....	207
8.2.1 Trasduttori di spostamento.....	208
8.2.2 LVDT.....	211
8.2.3 Smart brick.....	216
8.3 Struttura di prova.....	225
Capitolo 9: Risultati della prova.....	225
9.1 Prima prova.....	226
9.2 Seconda prova.....	234
Capitolo 10: Conclusioni.....	240
Bibliografia.....	241
Ringraziamenti.....	245

Capitolo 1: Introduzione

L'argomento d'interesse e di ricerca sviluppato va ad approfondire tutti gli aspetti che compongono e spiegano quella che oggi viene definita una “Struttura Intelligente” .

La necessità di monitorare edifici ed opere infrastrutturali in genere, sta diventando sempre più importante, nascono pertanto una serie di metodologie che permettono di affrontare con ottimi risultati tutto ciò che riguarda la valutazione ed il controllo temporale di strutture, parti di esse e l'insieme struttura-terreno di fondazione.

Con l'obiettivo di realizzare strutture attive, in grado cioè di adattarsi a diverse situazioni, si pone l'esigenza di un monitoraggio “intelligente”, che non si limiti a fornire informazioni, ma arrivi anche a fornire allarmi e intraprendere azioni.

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.

I sensori hanno quindi il compito di percepire eventuali danni o malfunzionamenti dell'opera e gli attuatori di correggere situazioni potenzialmente dannose.

Un attuttore in generale è un meccanismo attraverso cui un agente agisce su un ambiente.

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.

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.

Si è cercato di simulare perciò una struttura di questo tipo in scala.

Si è realizzato un pilastro che simulasse una struttura con elevata deformabilità a cui si è imposto un cedimento e di conseguenza uno spostamento e una deformazione della linea d'asse.

Attraverso una rete di trasduttori di spostamento, di LVDT ed di un apparecchio di innovativa tecnologia, lo Smart Brick, vengono misurate tutte le situazioni di criticità e la variazione dalla condizione di equilibrio della struttura.

Lo Smart Brick misura l'inclinazione della linea d'asse e grazie ad un software integrato comanda all'attuatore superiore di spostare una massa per ripristinare le condizioni iniziali, nel caso in questione si è cercato di recuperare la verticalità dell'asse.

Il tutto è stato modellato prima attraverso un programma di calcolo: Strauss; poi realizzato fisicamente in laboratorio analizzando su di esso, attraverso prove diverse, due condizioni distinte:

- Nella prima si è riapplicato istantaneamente lo stesso cedimento dato dal modello.
- Nella seconda si sono raggiunti valori ben più alti di cedimento grazie a step di carico.

In entrambi i casi la struttura si è comportata correttamente recuperando la verticalità e riportandosi nelle condizioni il più possibile simili a quelle iniziali.

Capitolo 2:

Strumenti di misura per il monitoraggio: i sensori.

Prima di illustrare le tecniche di monitoraggio per poi giungere al più innovativo monitoraggio “intelligente” è bene introdurre i principali strumenti di misura utilizzati per questo fine.

I sensori hanno il compito di percepire eventuali danni o malfunzionamenti dell’opera; per definizione è un dispositivo che in un sistema di controllo, è capace di rilevare il valore di una grandezza fisica.

Per essere più precisi, esso è in grado di convertire una grandezza fisica in ingresso in un’altra grandezza in uscita più facile da manipolare.

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, ecc... In quest’ultimo caso si preferisce definirli trasduttori.

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).

2.1 Classificazione

La classificazione di un sensore può essere effettuata in vari modi e ognuno di essi si adatta ad esigenze diverse.

- In base al *principio fisico* si distinguono sensori ottici, meccanici, pneumatici ed elettrici.
- Considerando la *grandezza da misurare* si possono identificare sensori di lunghezza, di temperatura, di pressione, di vibrazione, di deformazione e di corrosione.
- Facendo riferimento invece al *settore di destinazione* si riconoscono 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.
I sensori attivi 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.

- La classificazione che verrà usata in questo testo è data da:

SENSORI A CONTATTO : meccanici, elettrici

SENSORI SENZA CONTATTO: ottici

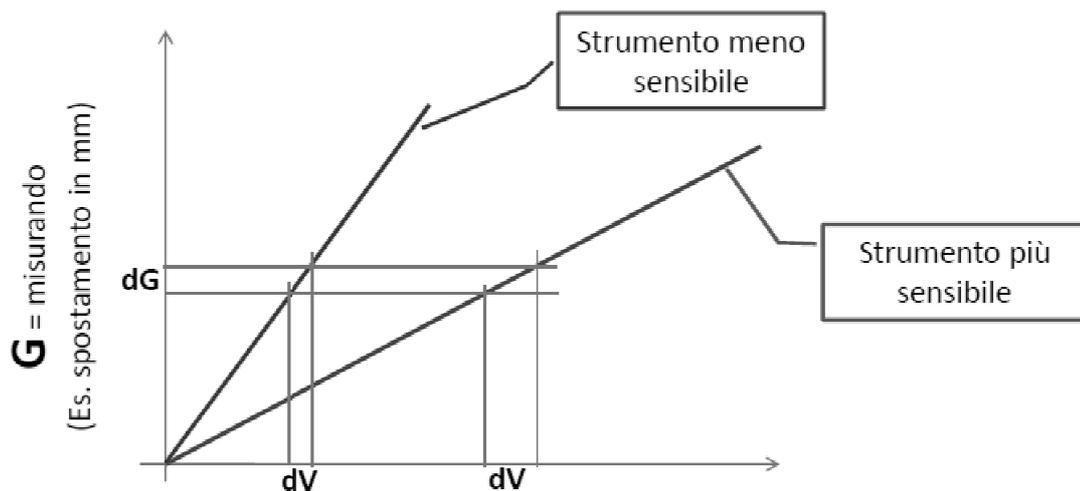
SENSORI DI INCLINAZIONE: a bolla, a pendolo

SENSORI DI DEFORMAZIONE: estensimetri elettrici a resistenza e a fibra ottica

Una grandezza importante da definire, prima di entrare nello specifico di ogni tipologia di sensore, è la *sensibilità*:

questa è 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.

$$S = \frac{dV}{dG} \left[\frac{U_{Output}}{U_{Input}} \right]$$



V = Valore fornito dallo strumento (Es. Volts)

Fig. 2.1

2.2 Sensori a Contatto meccanici

2.2.1 Comparatore

E' uno strumento per la misura di spostamenti assoluti che sfrutta un'asta cilindrica mobile che scorre all'interno di una guida tubolare.

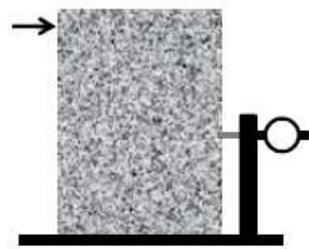
L'estremità dell'asta (tastatore) viene messa a contatto della superficie dell'oggetto sottoposto a misura e una molla spinge costantemente l'asta verso l'esterno, assicurando così il contatto con l'oggetto di misura.

Quando la superficie si sposta nella direzione dell'asse dell'asta (avvicinandosi o allontanandosi), anche quest'ultima si muove e un sistema di lettura amplifica e visualizza questo spostamento attraverso un display che può essere analogico e digitale.

L'intervallo di misura è tra 1 e 100 mm con una risoluzione che può essere centesimale (0,01 mm) o millesimale (0,001 mm).



(a)



(b)

Fig. 2.2 [(a) comparatore; (b) schema di applicazione]

2.2.2 Deformometro

Misura la distanza relativa tra due punti 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, 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.



Fig. 2.3 [deformometro]

2.3 Sensori a contatto elettrici

2.3.1 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.

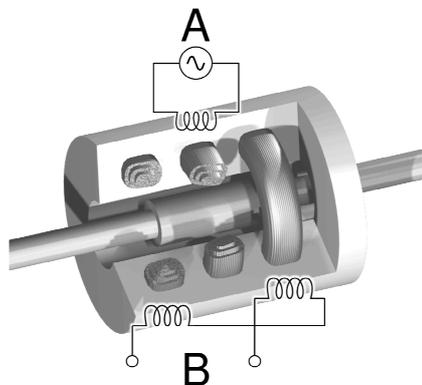
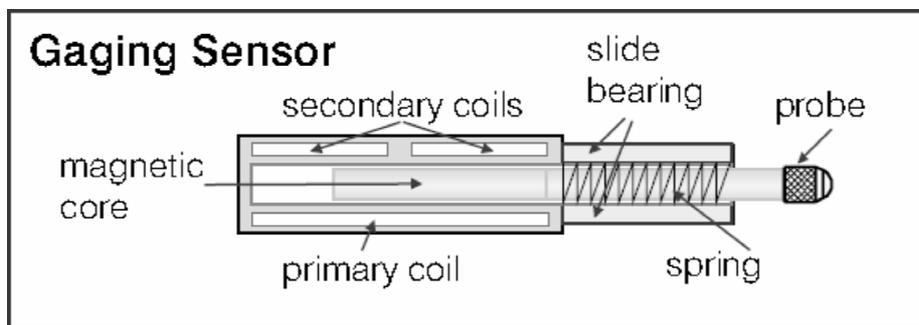


Fig. 2.4 [componenti del LVDT]

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.

2.3.2 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.

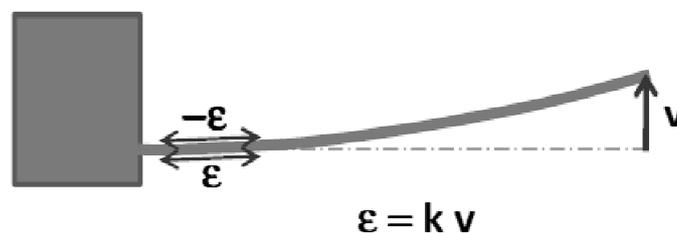
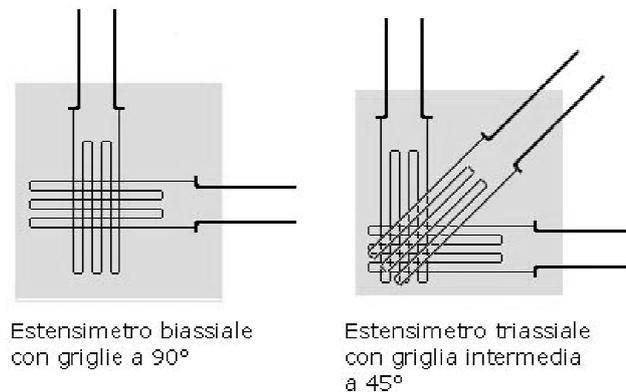


Fig. 2.5 [esempi di applicazione degli estensimetri]

2.3.3 Deformometro induttivo

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

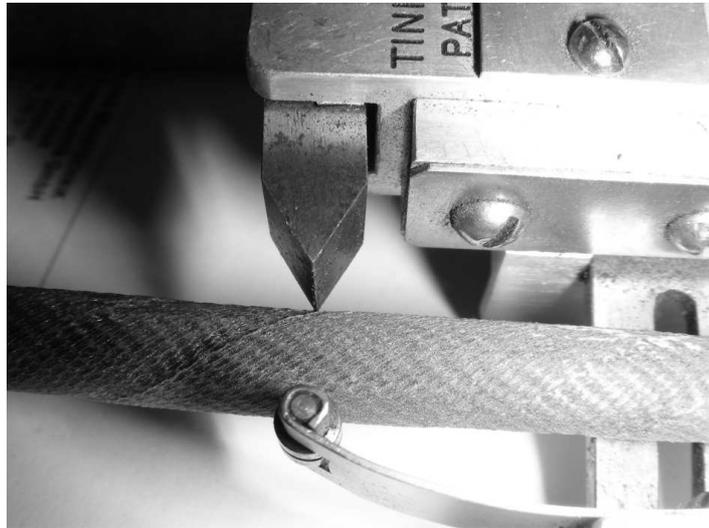


Fig. 2.6 [deformometro elettrico]

2.4 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.



Fig. 2.7 [sensore ottico]

2.4.1 Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

(Amplificazione di Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazione)

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.

2.4.2 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.

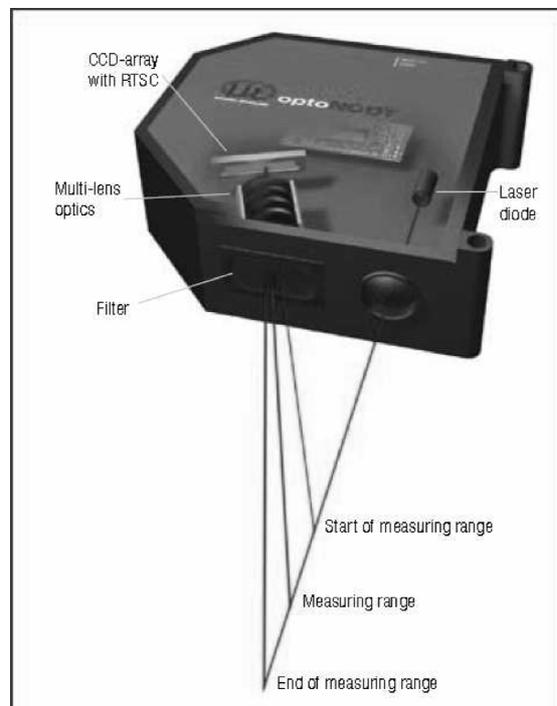


Fig. 2.8 [sensore laser a triangolazione]

La risoluzione peggiora all'aumentare della distanza dall'oggetto e dell'intervallo di misura

2.4.3 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.

Misura di distanza orizzontale e verticale e di inclinazione.

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 : 3mm

Risoluzione: 0.1 mm

Riproducibilità a lungo termine: < 0.5mm



(a)



(b)

Fig.2.9 [sensore laser interferometrico: (a) di distanza; (b) di distanza e spostamento]

2.5 Sensori di inclinazione (Inclinometri)

2.5.1 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°) e la posizione finale.

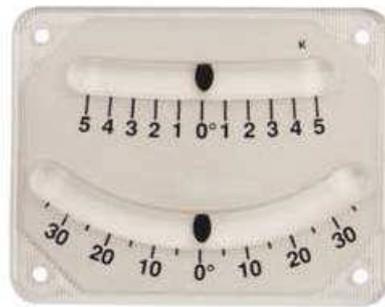


Fig. 2.10 [inclinometro a bolla]

2.5.2 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
- Coeff. di temperatura : + 250 ppm / $^\circ\text{C}$ max

- Temperatura di impiego : da $- 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+ 50\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fig. 2.11 [Inclinometro a pendolo]

2.6 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 puo risalire allo stato di tensione se si conoscono le costanti elastiche (E , ν , G se il materiale è isotropo).

2.6.1 Estensimetri elettrici a resistenza (STRAIN GAUGES)

L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di filo metallico applicata su di un supporto di materiale plastico.

Quando viene incollato sulla superficie del materiale in esame, ne segue le deformazioni; ciò causa una variazione della resistenza elettrica del filo.

Misurando tali variazioni si può risalire all'entità della deformazione.

L'estensimetro fornisce una misura della deformazione media in un tratto pari alla sua lunghezza utile.

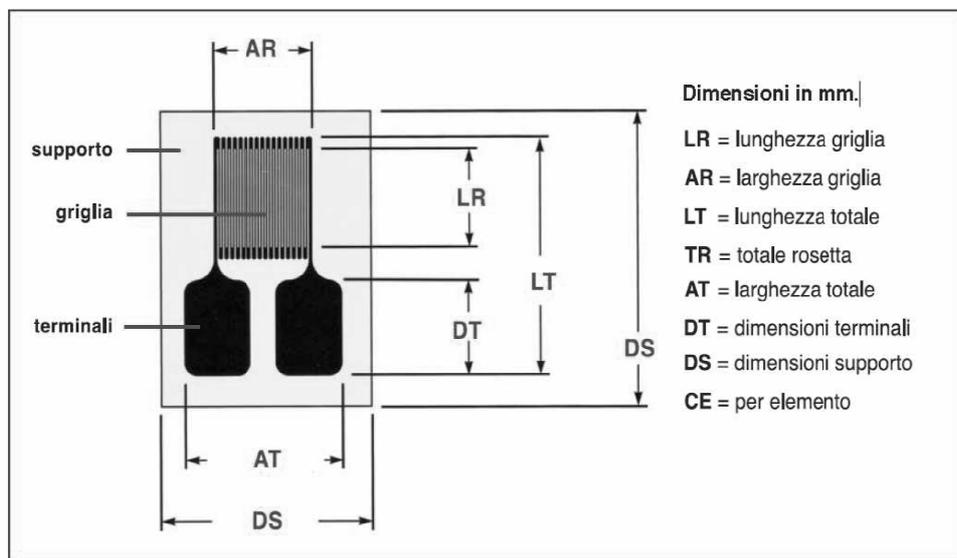


Fig. 2.12 [componenti dell'estensimetro]

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:

ρ = 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.

ϵ_t = dilatazione trasversale.

$\epsilon_t = - \nu \epsilon$

ν = coefficiente di Poisson del materiale.

nel caso di conduttore a sezione rettangolare.

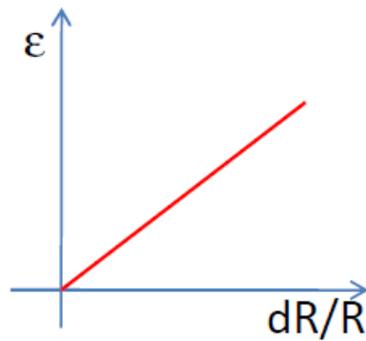
Sostituendo :

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

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

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

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



Per come è definito, K rappresenta anche la sensibilità.

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

Componenti degli estensimetri:

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.

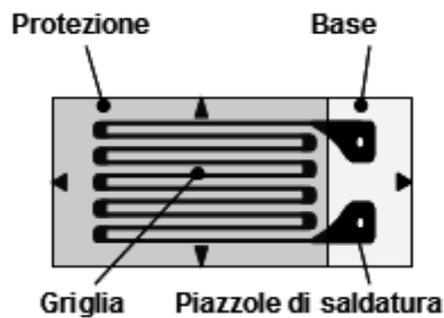


Fig.2.13 [componenti dell'estensimetro]

- Griglia
- Supporto
- Terminali/piazzole

- Adesivo
- Protettivo

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 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

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.

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.



Fig. 2.14 [esempio di applicazione di un estensimetro]

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.

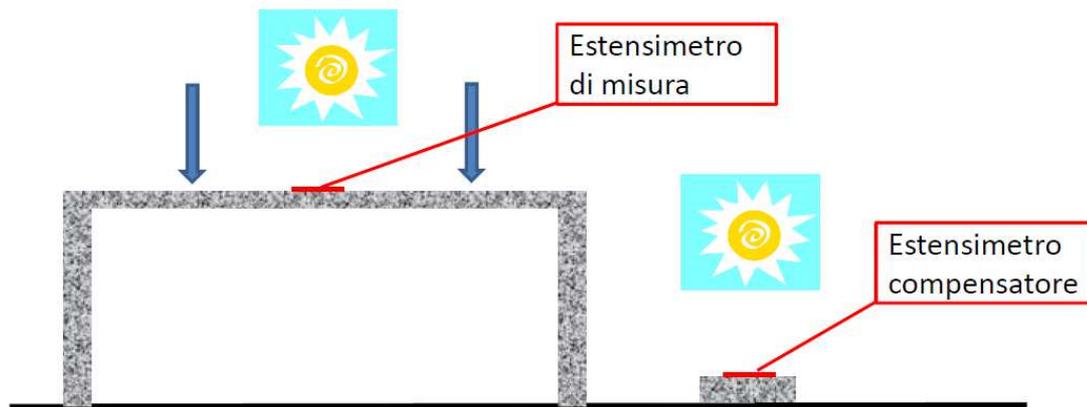


Fig. 2.15 [soluzione per compensare le deformazioni termiche]

2.6.2 Estensimetri elettrici a fibra ottica (FOS: Fiber Optic Sensors)

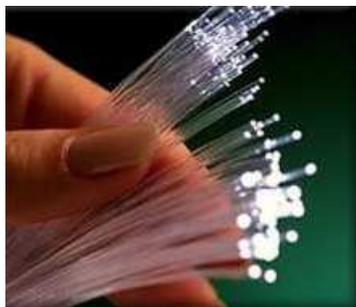


Fig.2.16 [fibra ottica]

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

Il monitoraggio “intelligente” è la nuova frontiera delle prove non distruttive e i sensori in 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.

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, ...)

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.

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

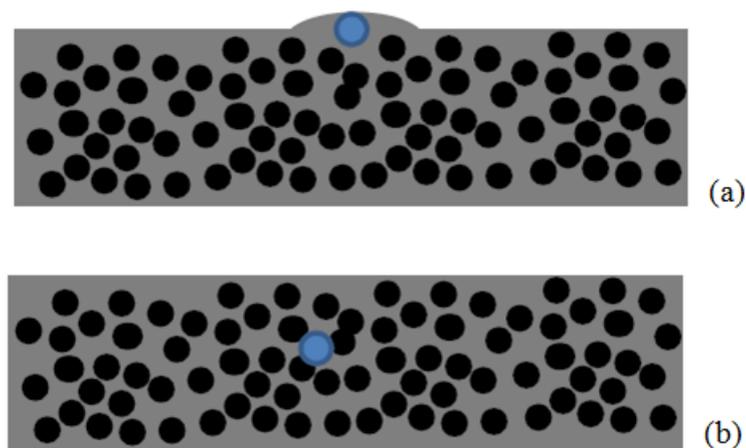


Fig. 2.17 [applicazioni della fibra ottica: (a) in superficie; (b) all’interno]

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.

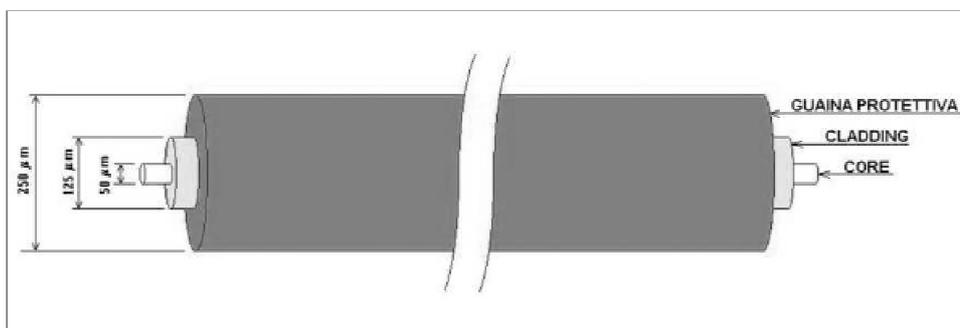


Fig. 2.18 [componenti del cavo]

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 (che 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: 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.

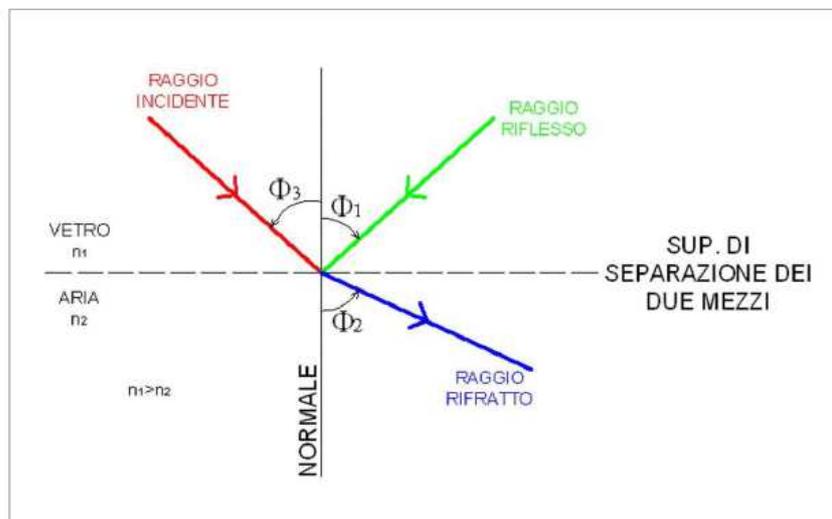


Fig. 2.19 [raggi e angoli di incidenza, rifrazione e riflessione]

All'aumentare dell'angolo di incidenza Φ_3 , anche l'angolo di rifrazione Φ_2 cresce, ma più velocemente, fino a quando il primo raggiunge il valore detto angolo limite ed il secondo arriva a 90° 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 di incidenza non è inferiore a questo valore, il raggio luminoso rimane all'interno del core.

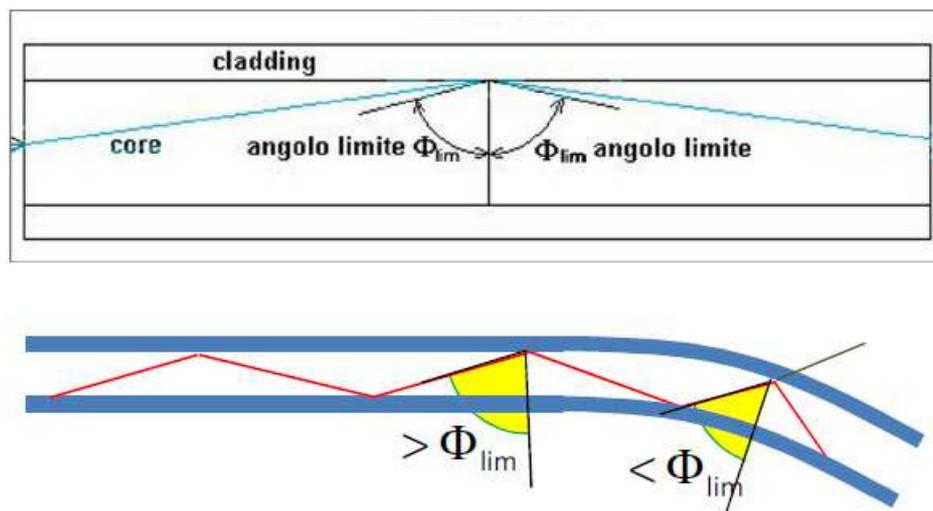
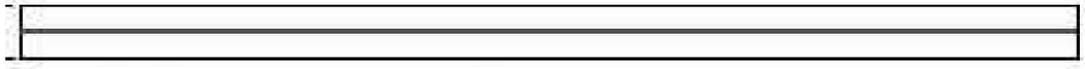


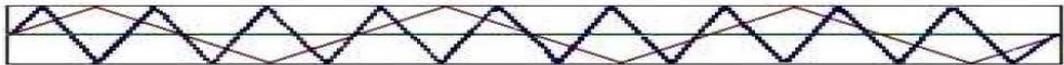
Fig. 2.20 [angolo limite]

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 hanno un diametro del core compreso tra 8 μm e 10 μm .



Quelle *multimodali* consentono la propagazione di più modi e hanno un diametro del core di 50 μm o 62.5 μm . Il cladding ha tipicamente un diametro di 125 μm .



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.

Lavorando con fenomeni fisici ad elevatissima frequenza (le onde luminose), con le fibre ottiche sarebbero idealmente possibili velocità di trasmissione molto elevate. In pratica, però, intervengono dei fattori fisici che limitano la banda di trasmissione possibile in una fibra ottica.

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 (il primo caso limite è il modo che percorre la fibra ottica completamente dritto; il

secondo caso limite è il raggio che 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.



Fig. 2.21 [relazione ampiezza-lunghezza d'onda]

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

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

2.7 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 è 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 concede di costruire

sensori con una sezione trasversale ristretta molto utili nelle riabilitazioni strutturali 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 Péroto 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, fluorescenza, doppler shift, photoelastic, evanescent field, etalon e pyrometers.

Ora, ma non per ordine di importanza, risulta necessario includere una 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 5.2, essi permettono una misura puntuale dei parametri d'interesse; ciò costituisce una difficoltà allorché si voglia monitorare una grandezza ad elevata risoluzione su lunghe distanze. In tal caso infatti sono necessari migliaia di sensori che debbono essere interrogati in serie mediante complicate reti di multiplexing, con un conseguente aumento dei costi e della complessità del monitoraggio.

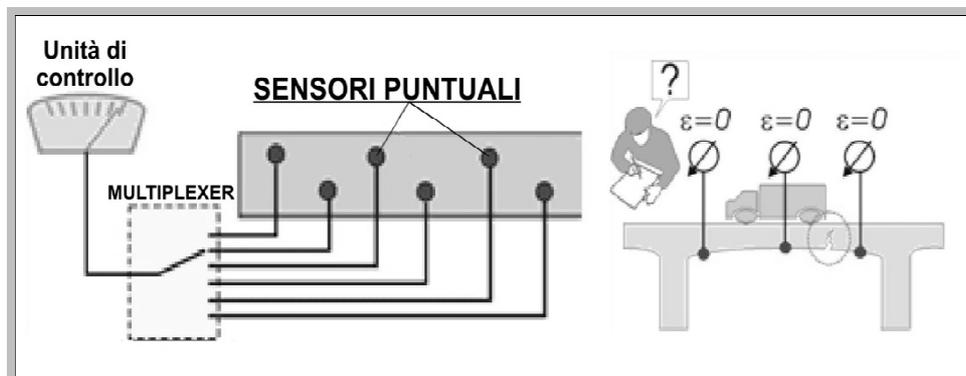


Fig. 2.22 [sensori puntuali]

- 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 5.3. I sensori di questo tipo che hanno raggiunto un maggior livello di maturità tecnologica sono quelli a reticolo di Bragg (FBG).

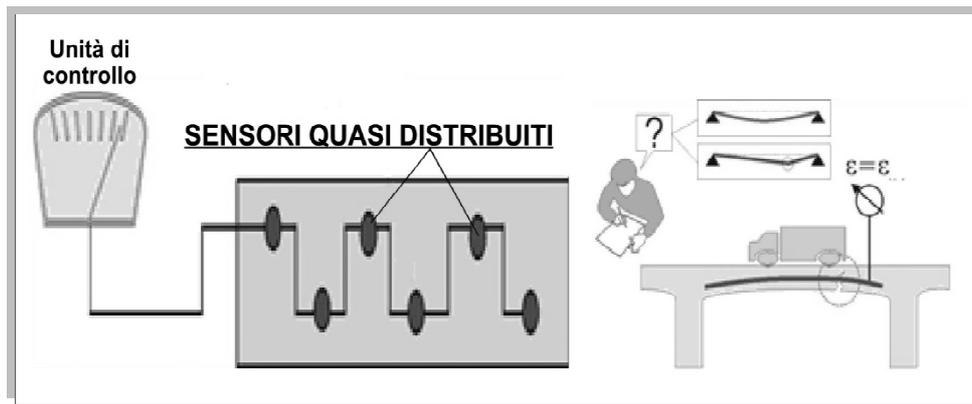


Fig. 2.23 [sensori quasi distribuiti]

- Sensori distribuiti: hanno la capacità di effettuare misure con una continuità spaziale su tutta la lunghezza della struttura di interesse (fig.5.4). 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. Essi 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 colgono variazioni di temperatura di mezzo grado centigrado. I più conosciuti sono basati sullo scattering di Brillouin, di Raman e di Rayleigh.

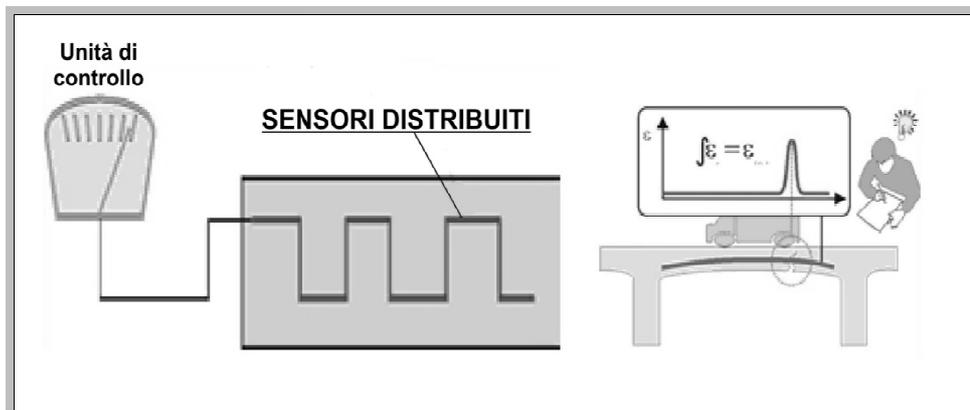


Fig.2.24 [sensori distribuiti]

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[®]</i>	Spostamento, deformazione, inclinazione.
<i>Raman</i>	Temperatura distribuita.
<i>Brillouin</i>	Temperatura e deformazione distribuite.

Tab. 1

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

2.7.1 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 core è provocata per mezzo di tecniche interferometriche: la porzione di nucleo che si trasformerà 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 di 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 una 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.

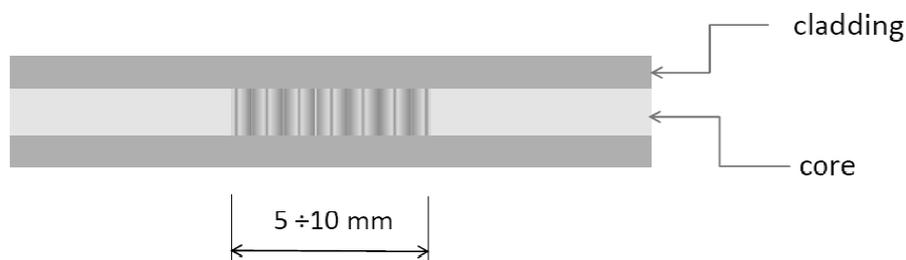


Fig. 2.25 [reticolo di diffrazione]

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.

λ_{Bragg} = lunghezza d'onda di Bragg

Λ = passo del reticolo

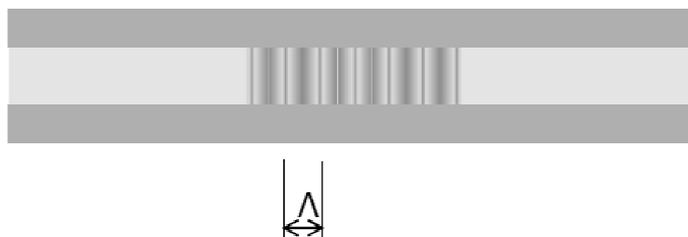


Fig. 2.26 [passo del reticolo]

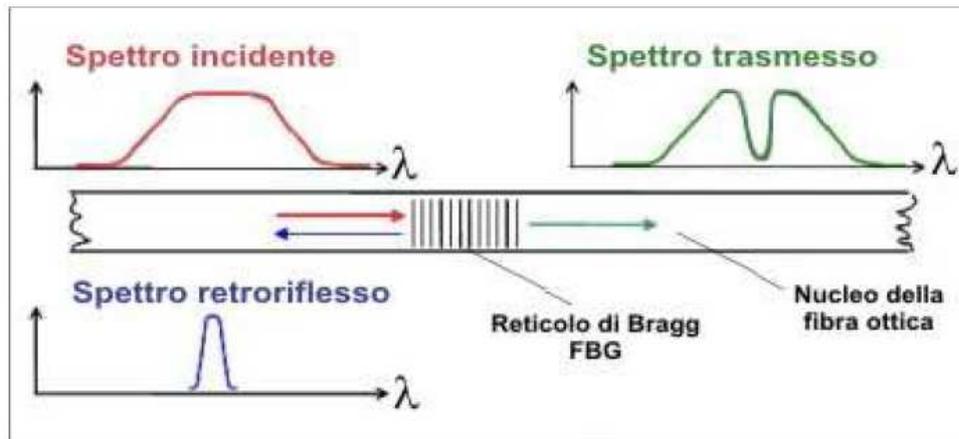


Fig. 2.27 [spettri: incidente, trasmesso e retroriflesso]

L'indice di rifrazione lungo l'asse longitudinale z della fibra, nel tratto occupato dal reticolo, può essere espresso come:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{\Lambda}\right)$$

n = indice di rifrazione

n_0 = valor medio dell'indice di rifrazione del core (≈ 1.5)

Δn = modulazione di $n_0 \approx 10^{-4}$

Λ = passo del reticolo $\approx 0.5 \mu\text{m}$

Tra λ_{Bragg} e Λ esiste la relazione:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda$$

La componente spettrale di luce che viene riflessa è quella con lunghezza d'onda:

$$\lambda = \lambda_{\text{Bragg}}$$

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.

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

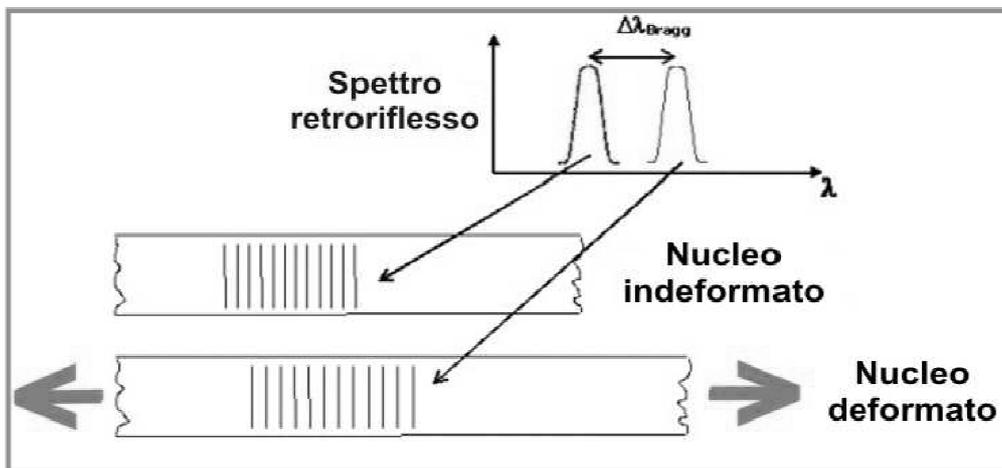


Fig. 2.28 [variazione di lunghezza d'onda]

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

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.

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.

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.

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.

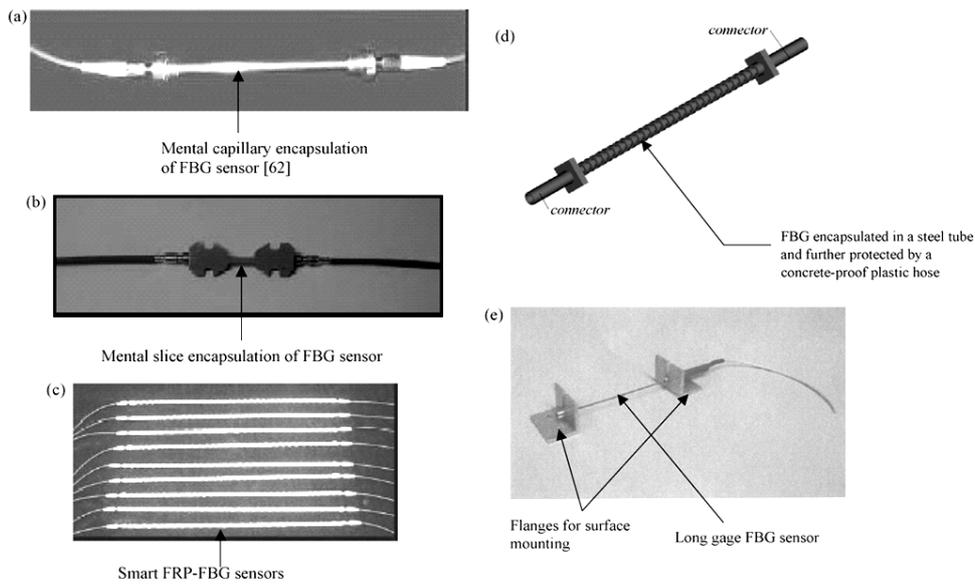


Fig. 2.29 [applicazioni FBG]

In altri casi la fibra viene applicata senza alcuna protezione

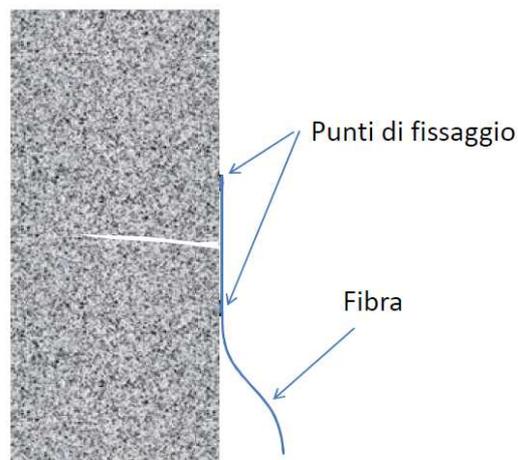


Fig.2.30 [applicazione senza protezione]

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.



Fig.2.31 [multiplexing]

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

2.7.2 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-Perot).

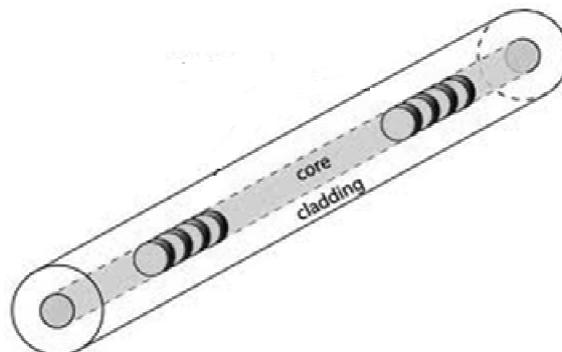


Fig.2.32 [sensori Fabry-Perot]

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.

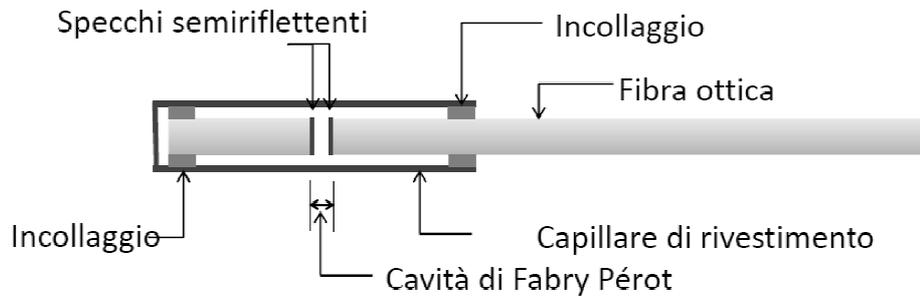


Fig.2.33 [componenti]

Il raggio retro-riflesso viene demodolato 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*.

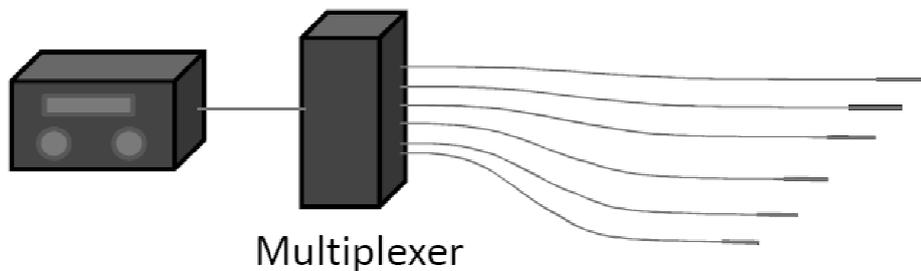


Fig.2.34 [monitoraggio di più posizioni attraverso multiplexer]

2.7.3 Sensori di Brillouin

La diffusione di Brillouin è il risultato dell'interazione fra le onde acustiche e 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.

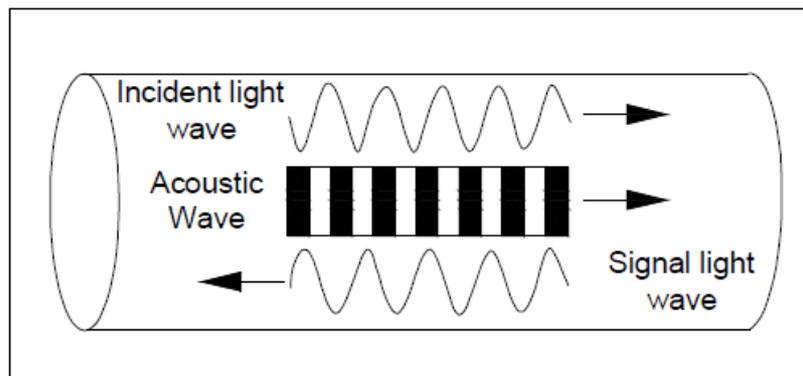


Fig. 2.35 [Sensore Brillouin]

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.

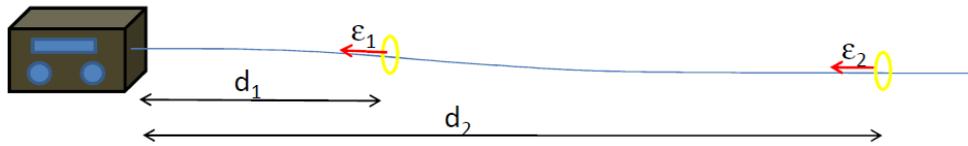


Fig. 2.36 [monitoraggio continuo su tutta la fibra]

2.7.4 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 nella figura.

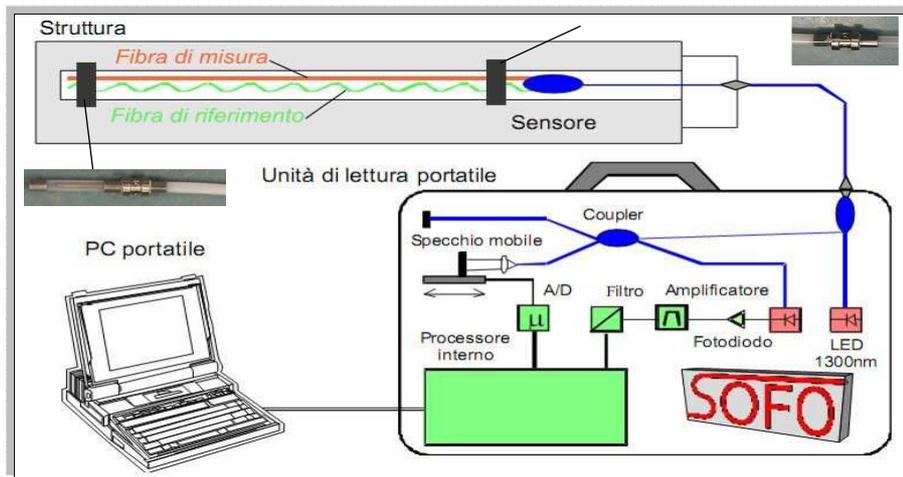


Fig. 2.37 [parti integranti dell’apparato]

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 $2\mu m$ 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.

2.7.5 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 é attorcigliata ad una seconda fibra o ad un filo metallico con una struttura simile a quella di un condensatore

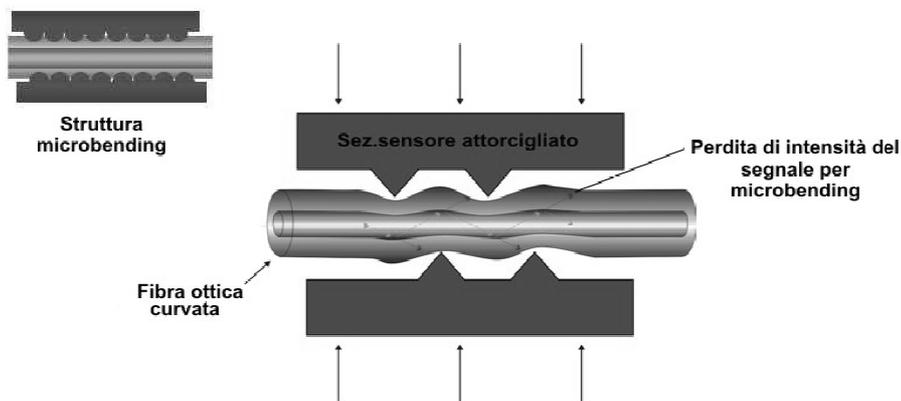


Fig. 2.38 [Microbending]

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 $100\mu m$ nei 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.

2.7.6 Diffusione Raman

I sensori distribuiti basati sulla diffusione 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 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.

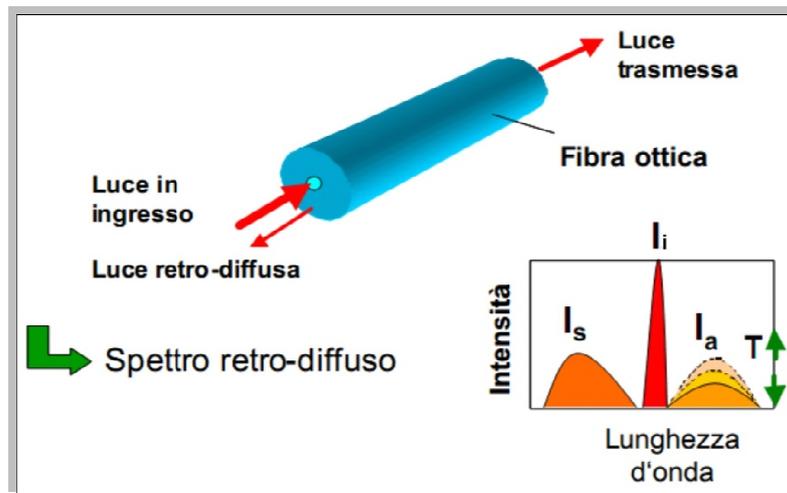


Fig.2.39 [diffusore Raman]

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°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 30 chilometri con una risoluzione di temperatura di 2°C ed una spaziale di 8 metri.

2.7.7 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 anticipato 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):

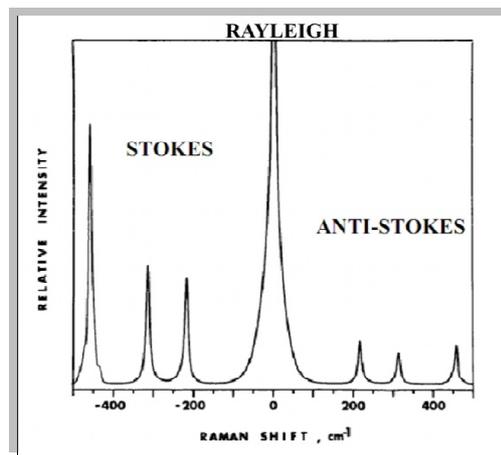


Fig. 2.40 [Diffusione Rayleigh]

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

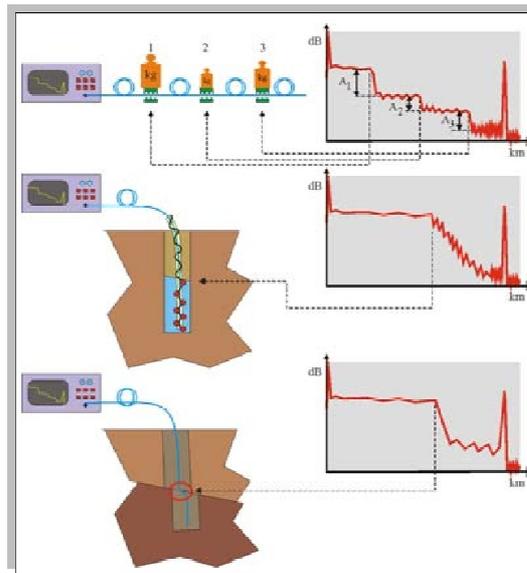


Fig. 2.41 [schema di funzionamento]

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.

2.7.8 Interferometri a bassa coerenza

Il sensore è formato da interferometri a fibra ottica, uno di misura ed uno di riferimento, entrambe le fibre sono alloggiare all'interno di un tubo di protezione in materiale plastico.

La fibra di misura è pre-tesa, in modo da poter rilevare deformazioni positive e negative, la fibra di riferimento è invece libera ed ha lo scopo di auto-compensare gli effetti termici.

Questi sensori possono essere montati esternamente o inglobati nei getti di calcestruzzo.

Un’applicazione frequente è il monitoraggio delle variazioni di ampiezza delle fessure.

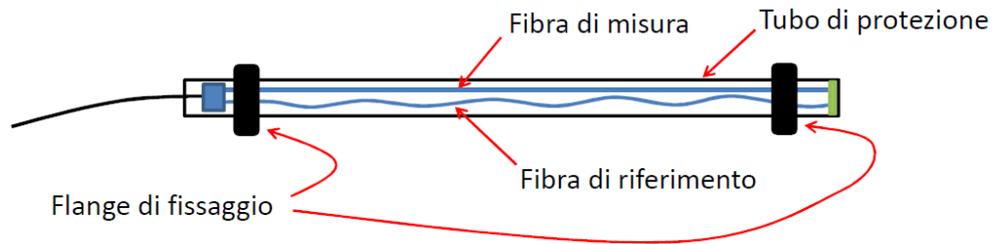


Fig. 2.42 [applicazione]

2.7.9 DIC (Digital Image Correlation)

Consiste nel confrontare immagini successive della superficie esterna di un oggetto mentre si deforma.

Sull’oggetto vengono materializzati dei punti e il confronto tra immagini successive permette di calcolarne gli spostamenti.

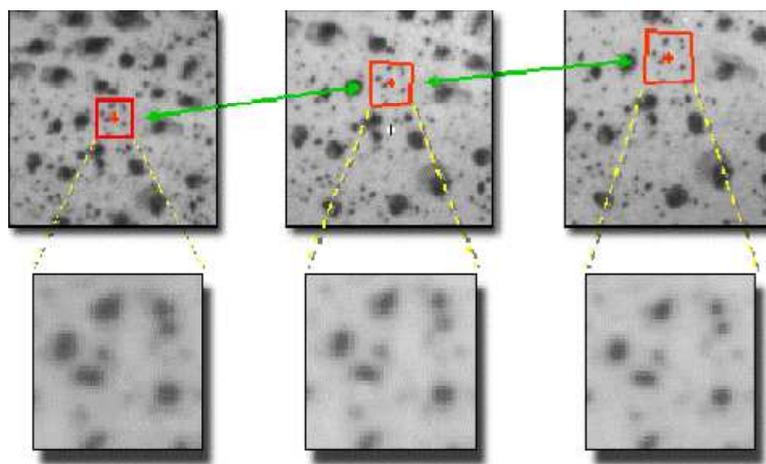


Fig. 2.43 [immagini per visualizzare gli spostamenti]

Dagli spostamenti si può successivamente risalire alle deformazioni, utilizzando un algoritmo matematico.

Il confronto tra una immagine e la precedente permette di definire un campo di deformazione, visualizzato in scala di grigi o a colori, relativo a un incremento della causa deformante.

2.7.10 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 ed una risoluzione spaziale inferiore al metro, sono enormi quando bisogna controllare grandi strutture come dighe, ponti, grandi edifici... 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 comunemente 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.

Capitolo 3: Attuatori

Un **attuatore** 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 attuatore 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.

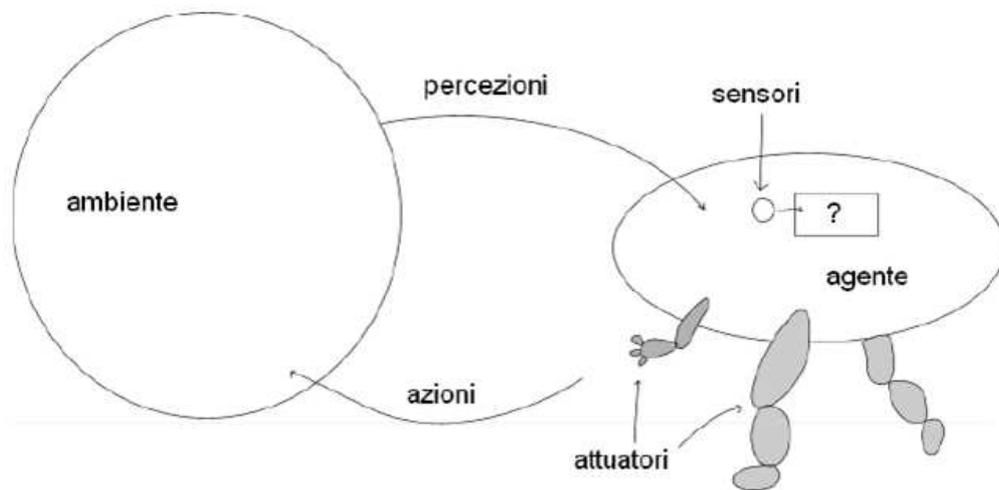


Fig. 3.1 [schema del legame tra sensori e attuatori]

Le classificazioni possono essere di vario tipo, ma la più frequente è quella in base al tipo di energia utilizzata:

- Idraulica
- Pneumatica
- Elettrica
- Meccanica
- Termica
-

3.1 Classificazione generale

I principali e più utilizzati sono microattuatori:

- elettrici
- elettrostatici,
- elettromagnetici
- idraulici.

3.1.1 Attuatori 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.



Fig. 3.2 [attuatore elettrico]

3.1.2 Attuatori Elettrostatici

I microattuatori elettrostatici sono semplici da realizzare e con essi si possono ottenere elevate velocità di rotazione.

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.



Fig. 3.3 [attuatore elettrostatico]

3.1.3 Attuatori 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
- 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 ed 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 degli inconvenienti più significativi degli attuatori magnetici 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.



Fig. 3.4 [attuatori elettromagnetici]

3.1.4 Attuatori 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.



Fig. 3.5 [attuatore idraulico lineare]

3.1.5 Attuatori lineari

La prima generazione di attuatori universali fu sviluppata per comandare l’azionamento di accessori sui trattori da giardino e attrezzature agricole. Trascorsi i tempi di questo semplice inizio, 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.

Ingranaggi a denti dritti, a vite o elicoidali, lubrificanti per aeronautica e motori dalle alte prestazioni aumentano al massimo durata e valore.

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.



Fig. 3.6 [attuatore lineare]

Capitolo 4: Materiali “Intelligenti”

Un materiale funzionale è in grado di svolgere una funzione in risposta ad uno stimolo (temperatura, campo elettrico, etc.).

Forse tutti i materiali sono funzionali in quanto ad esempio si espandono a seguito di un riscaldamento, ma un materiale intelligente è in grado di rispondere a stimoli differenti ed adattare la sua risposta all’esigenza.

In realtà si dovrebbe parlare di materiali funzionali e strutture intelligenti (fatte di materiali funzionali): in inglese il termine smart (intelligente e furbo) è più appropriato.

I *materiali intelligenti* sono materiali dotati di una o più proprietà che possono essere cambiate e controllate tramite degli stimoli esterni, come lo [stress meccanico](#), la [temperatura](#), l'[umidità](#), il [pH](#), il [campo elettrico](#) o [magnetico](#).

Ci sono molti tipi di materiali intelligenti, alcuni dei quali sono già diffusi:

- I materiali [piezoelettrici](#) producono tensione elettrica quando subiscono una forza, tipicamente un urto. Poiché questo effetto agisce anche al contrario, ossia generano degli urti se sottoposti a corrente, sono usati per produrre delle componenti meccaniche che si espandano o contraggano se sottoposte a una tensione.

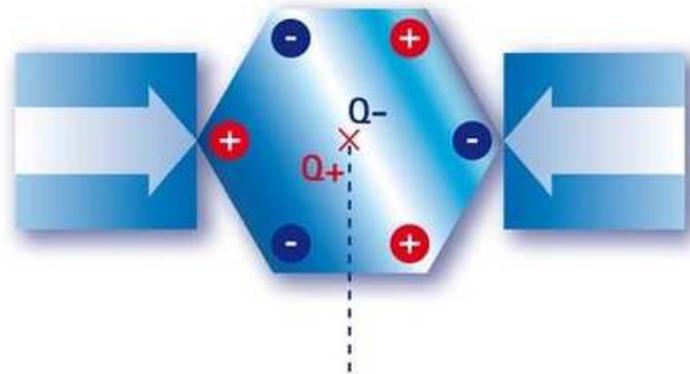


Fig. 4.1 [materiale piezoelettrico sottoposto a una forza]

- Le leghe e i [polimeri](#) a [memoria di forma](#) sono materiali che possono essere deformati in maniera controllata dal calore.

In particolare, se sottoposti a una deformazione possono ritornare, se scaldati, a una forma memorizzata.

Le leghe a memoria di forma magnetiche ritornano alla loro forma originale se magnetizzate.

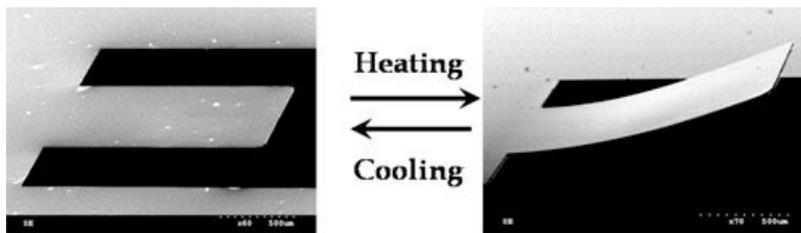


Fig. 4.2 [leghe a memoria di forma]

- I materiali [magnetostrittivi](#) possono cambiare la forma se sottoposti a un campo magnetico e, viceversa, possono generare campi magnetici se sottoposti a stress meccanico.[2]

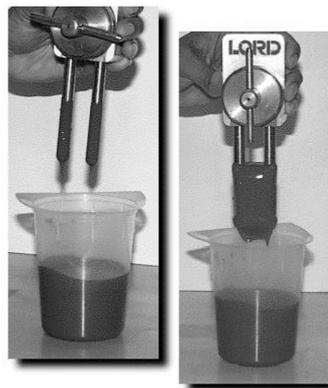


Fig. 4.3 [fluido magnetoreologico]

- I materiali [halocromici](#) sono materiali di largo utilizzo che cambiano colore in base all'acidità.

Un utilizzo frequente è la produzione di vernici che cambiano colore quando il materiale che ricoprono si sta corrodendo.

- I polimeri sensibili al pH si allungano, accorciano o cmq aumentano di volume al variare del pH del liquido in cui sono immersi.

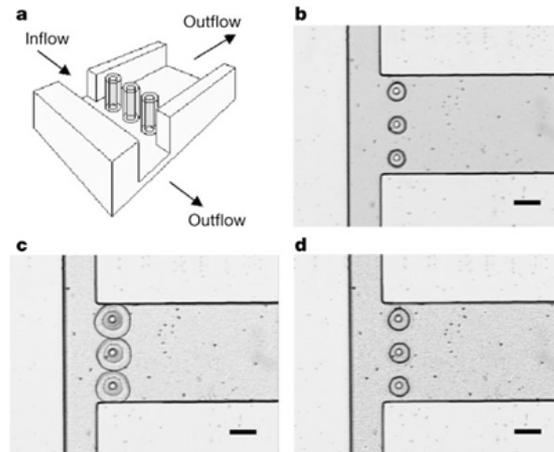


Fig. 4.4 [Microvalvole autoattivanti, il volume cresce quando il fluido diventa troppo acido]

- I materiali cromatici cambiano colore se sottoposti a cambiamenti termici, ottici o elettrici.

Esempi comuni sono lo schermo a cristalli liquidi, gli occhiali che si scuriscono se esposti alla luce solare e i rullini delle macchine fotografiche.[2]

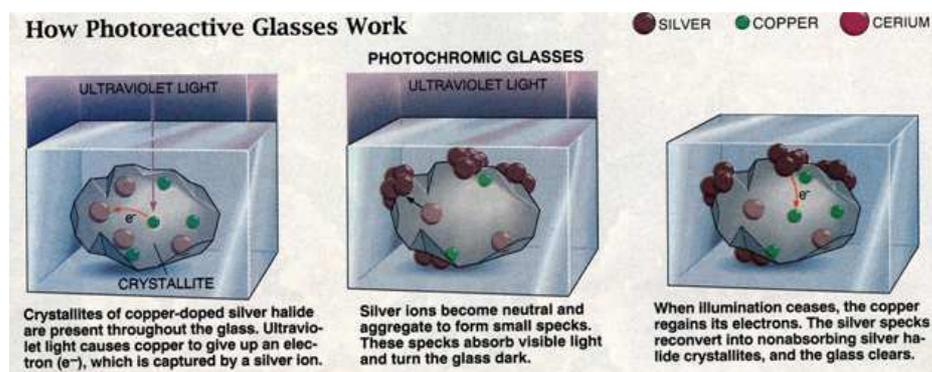


Fig. 4.5 [vetri fotocromici]

- I [ferrofluidi](#) cambiano la forma se esposti a campi magnetici.[2]

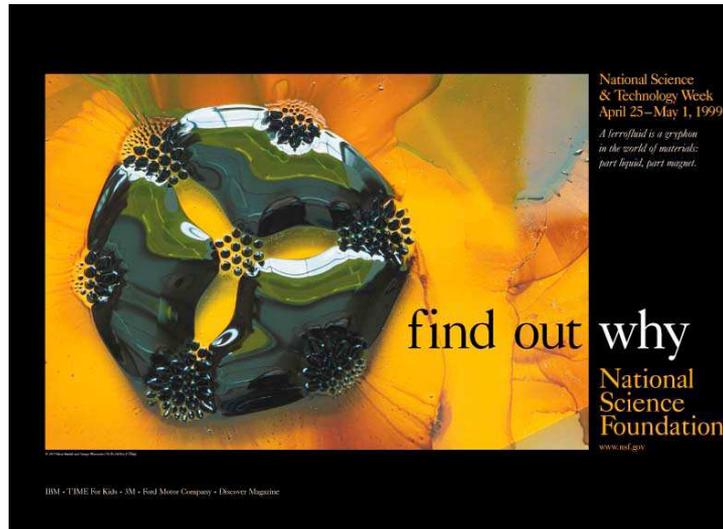


Fig.4.6 [fluidi ferroeologici]

- I materiali [fotomeccanici](#) cambiano forma se esposti alla luce.
- I materiali [autoriparanti](#) hanno la capacità di recuperare piccoli danni dovuti all'utilizzo comune, aumentando la durata.
- Gli [elastomeri dielettrici](#) [4] sono polimeri in grado di allargarsi (fino al 300% delle dimensioni originali) se sottoposti a un campo elettrico.

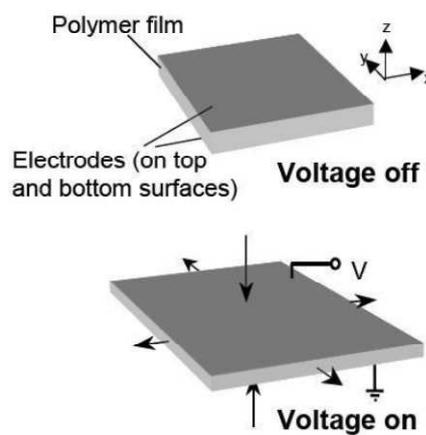


Fig. 4.7 [allargamento di un polimero dielettrico sotto un campo elettrico]

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 praticamente 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

4.1 Leghe a memoria di forma

4.1.1 Proprietà e caratteristiche

Le leghe a memoria di forma (dall'inglese *Shape Memory Alloys*, SMA o LMF) fanno parte di una categoria di materiali metallici molto particolari perché possono essere deformati, e se scaldati, ritornano alla forma iniziale, sono cioè capaci di subire trasformazioni cristallografiche reversibili, in funzione dello stato tensionale e termico (accoppiamento termo meccanico).

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).

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 di 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 1962 l'effetto fu scoperto casualmente anche nella lega equiatomica Nichel-Titanio, ad 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.

Le SMA più studiate sono quelle di Rame-Alluminio-Nickel (CuAlNi), Rame-Zinco-Alluminio (CuZnAl) e Ferro-Manganese-Silicio (FeMnSi).

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

Leghe aventi un effetto di memoria di forma

Tab.3

In realtà 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

- disponibilità in fili e lamine sottili
- biocompatibilità

Proprietà del NiTiNOL		
Density	6.45 gm/cm ³	(0.23 lb/in ³)
Thermal Conductivity	10 W/mK	(5.78 Btu/hr ft ² F)
Specific Heat	322 j/kgK	(0.08 Btu/lb ² 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

Tab.4

In seguito a successivi studi sulla lega NiTi si osservò che 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.

Immediatamente si compresero le potenzialità di simili leghe ed 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.

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 ²)	350 Mpa (35 Kg/mm ²)	400 Mpa (40 Kg/mm ²)
Tensione di snervamento in fase martensitica	70 Mpa (7 Kg/mm ²)	80 Mpa (8 Kg/mm ²)	130 Mpa (13 Kg/mm ²)
Tensione a rottura	700 Mpa (70 Kg/mm ²)	600 Mpa (60 Kg/mm ²)	500-800 Mpa (50-80 Kg/mm ²)
Densità (g/cm ³)	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

Tab.5

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. Massima forza applicabile senza provocare la rottura del materiale.

- Temperatura di memoria. Temperatura alla quale inizia il ritorno alla forma originale (corrisponde all'inizio della fase di austenite).
- Temperatura di lavorabilità. E' la temperatura alla quale la lega, estesa e manipolata, mantiene la sua forma senza ritirarsi; è minore di quella di transizione.
- Tempo di risposta. E' 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. Per mettere di stabilire la resistenza elettrica del pezzo di materiale considerato.

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.

4.1.2 Comportamento meccanico

- **Trasformazione martensitica e austenitica**

Le proprietà delle SMA derivano dalle trasformazioni martensitiche (transizione di fase solido-solido).

Queste leghe 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*:

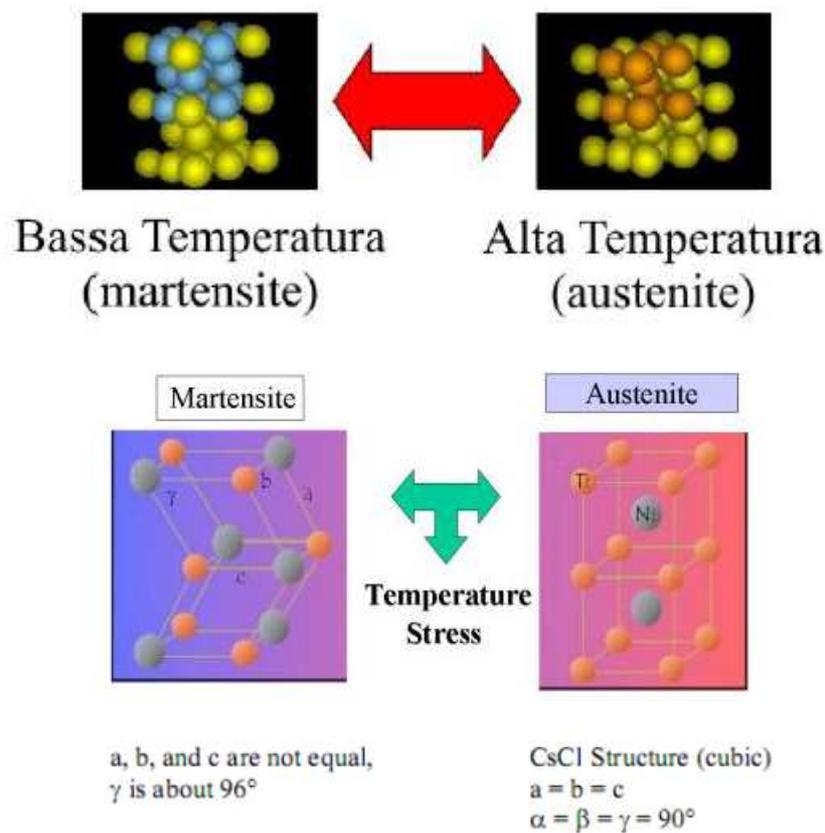


Fig. 4.8 [Disposizione cristallina: Martensite e Austenite]

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*; il processo inverso è detto *trasformazione austenitica*.

Quella martensitica 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.

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 ed in quella di raffreddamento, in cui i percorsi non coincidono.

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.

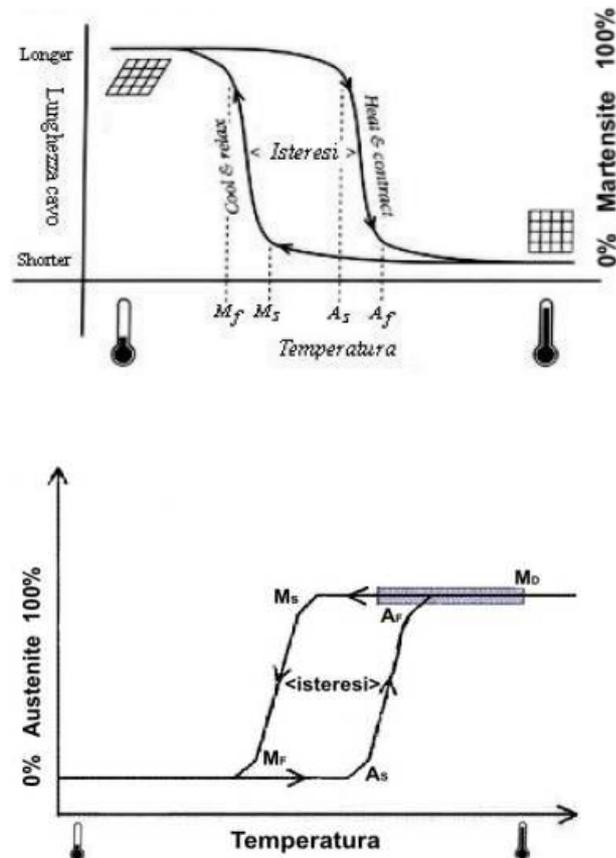


Fig. 4.9 [cicli di isteresi]

Diverso comportamento tra le fasi di riscaldamento/raffreddamento; i percorsi non coincidono.

L'ampiezza dell'isteresi dipende soprattutto dal *materiale*:

- Lega Fe-Ni: si va dai circa 400°C, 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%;
- Lega 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 .
- 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.

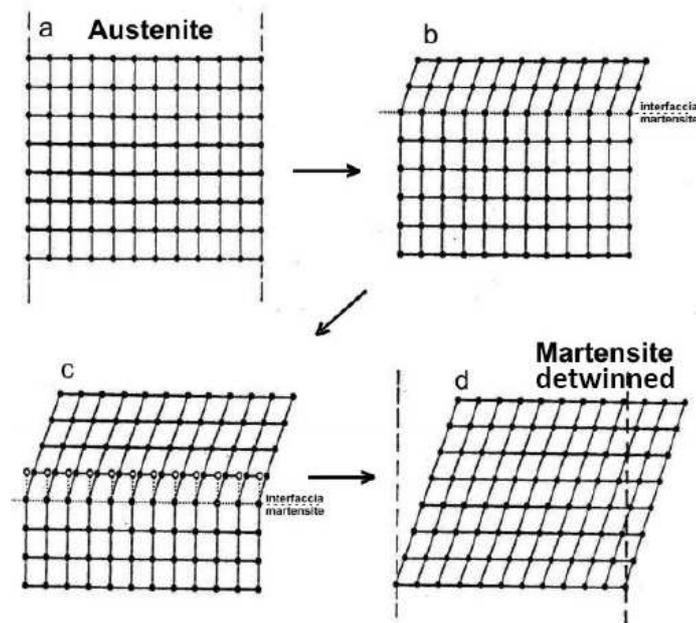


Fig. 4.10 [deformazione del reticolo cristallino]

In figura 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, in quanto 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 ad una deformazione locale, a livello della singola “riga molecolare” attuando due meccanismi:

- scorrimento (*slip*)
- geminazione (*twinning*)

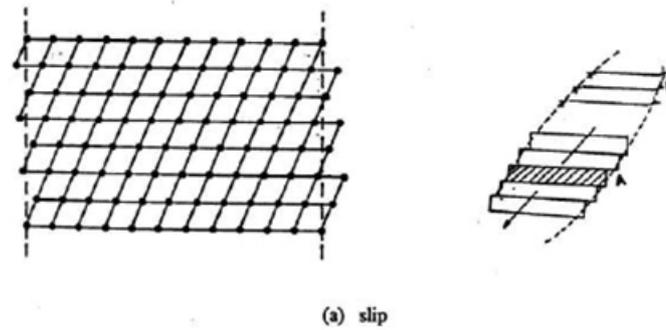


Fig. 4.11 [(a) Deformazione plastica, reversibile con rottura dei legami]

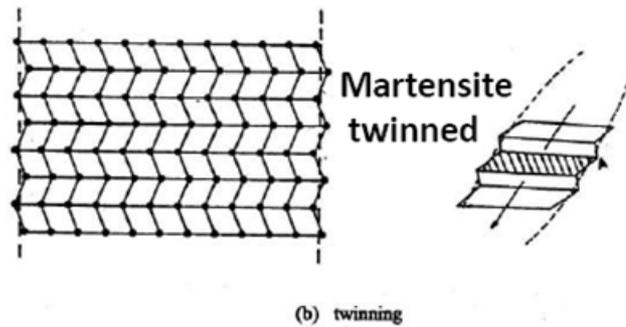


Fig. 4.11 [(b) Deformazione termoelastica, reversibile con accomodamento dei legami atomici; meccanismo reale che sussiste nella trasformazione martensitica]

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 ed 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, 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* che può avvenire a livelli di carico bassi ed a una temperatura inferiore della martensite finish M_F .

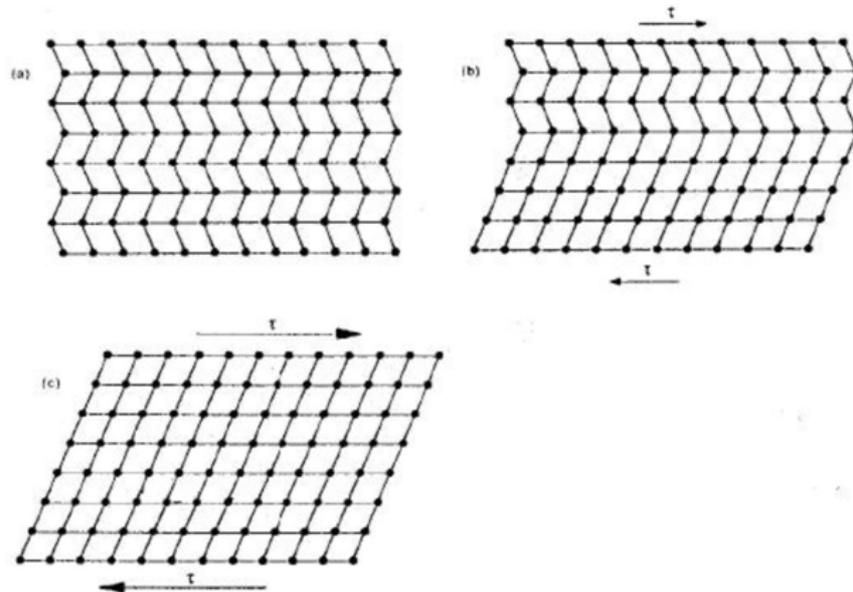


Fig. 4.12 [detwinning]

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 *ad 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).

Si possono così riassumere le due trasformazioni:

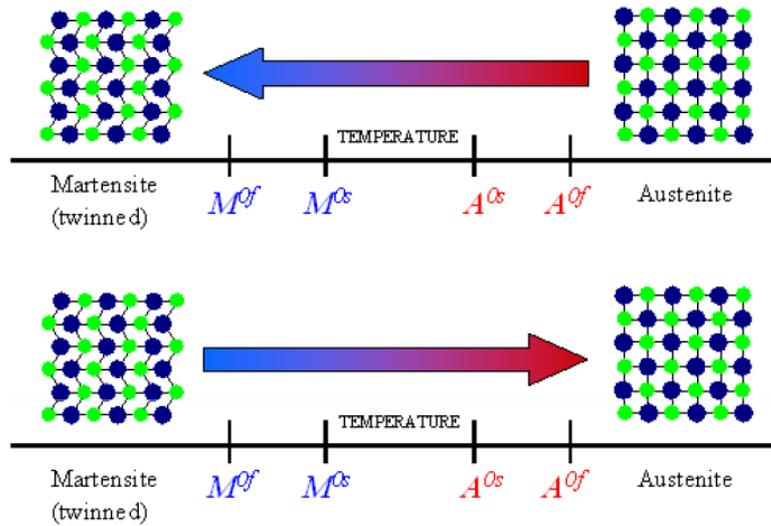


Fig. 4.13 [Trasformazione martensitica e austenitica]

Soffermando l’attenzione sugli effetti macroscopici, 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.

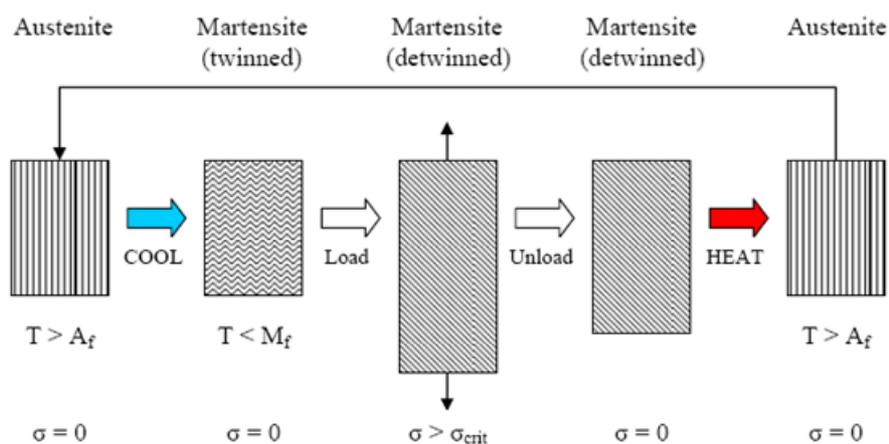


Fig. 4.14 [Comportamento macroscopico]

Se si studia una *curva tensione – deformazione* 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.

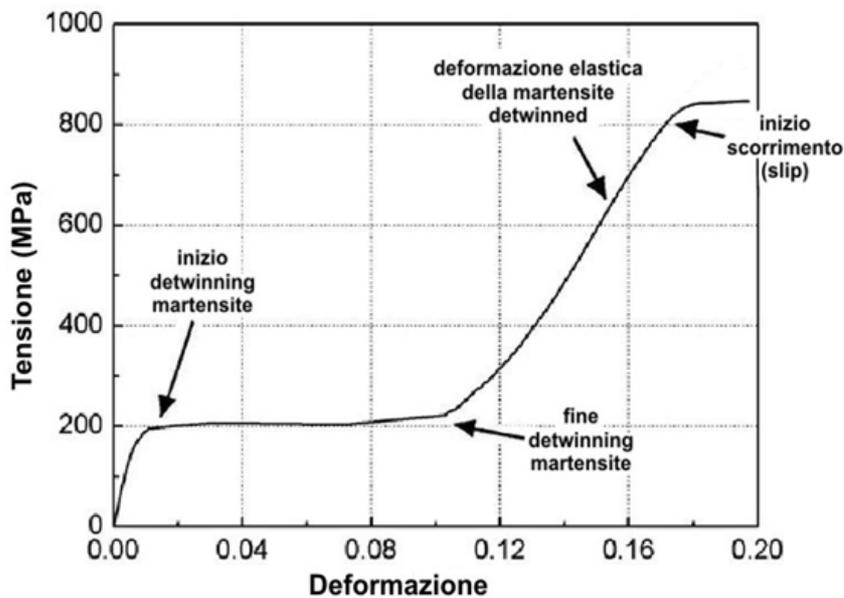


Fig. 4.15 [curva tensione-deformazione]

Proprietà SMA:

$$E_M \approx 11000-41000 \text{ MPa}$$

$$E_A \approx 28000-80000 \text{ MPa}$$

$$f_u \approx 900 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{rec} \approx 10\%$$

$$\gamma = 64.5 \text{ kN/m}^3$$

Proprietà Acciaio:

$$E \approx 200000 \text{ MPa}$$

$$f_{tk} \approx 540 \text{ MPa (barre)}$$

$$e_y \approx 0.2\%$$

$$g = 78 \text{ kN/m}^3$$

Tutti i vari tipi di configurazione martensitica ritornano alla stessa e ben definita fase madre 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 elemento in NiTi quindi, si deformerà in questa modalità 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 irreversibile 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.

4.1.3 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).

Si può osservare come un filo in NiTi passi dalla configurazione martensitica molto flessibile ad una temperatura di 10°C (a) a quella austenitica (i) con un escursione di 30°C.

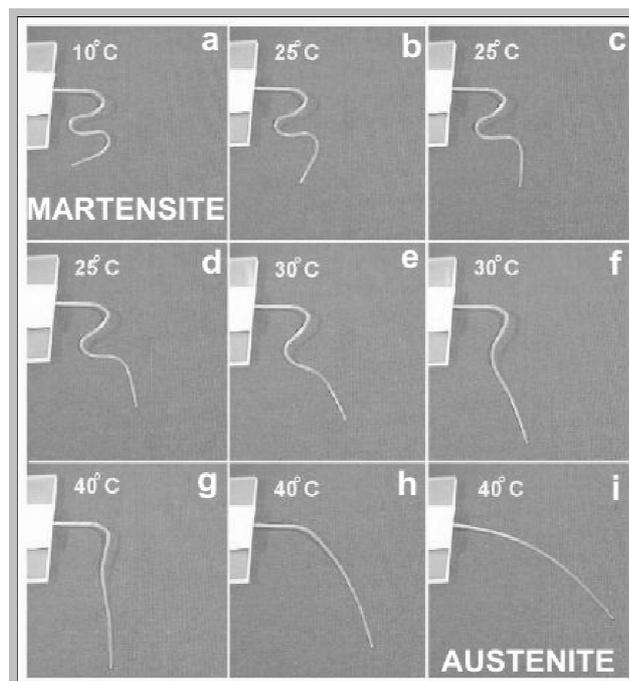


Fig.4.16 [effetto SME]

Lo stesso fenomeno può essere rappresentato in un grafico tridimensionale 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.

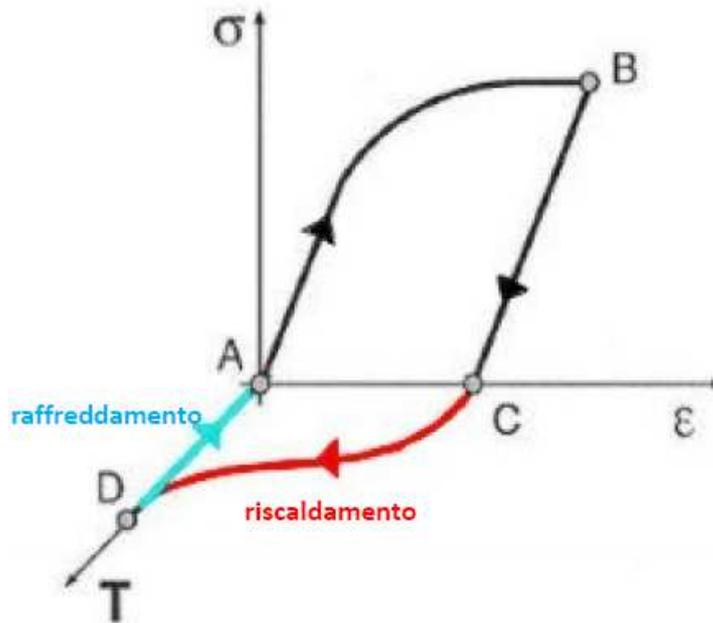


Fig. 4.17 [Ciclo della memoria]

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

A livello molecolare:

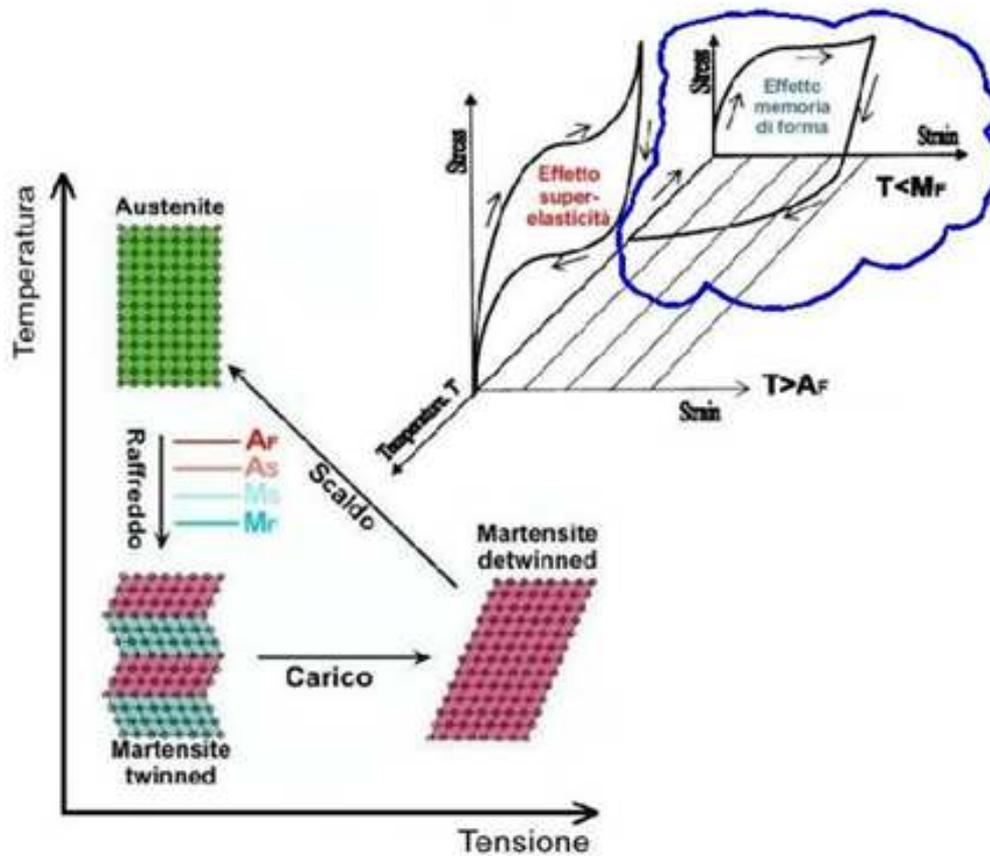


Fig. 4.18 [tensione-temperatura a livello cristallino per SME]

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.

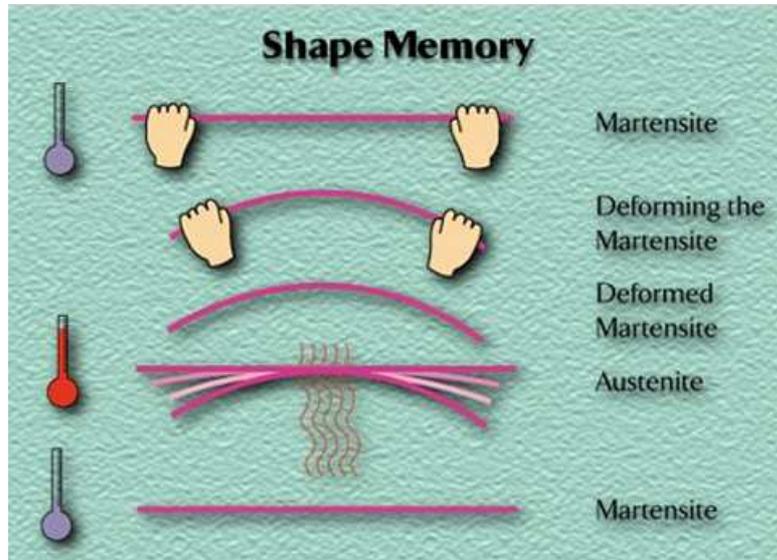


Fig. 4.19 [effetto a memoria di forma]

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:

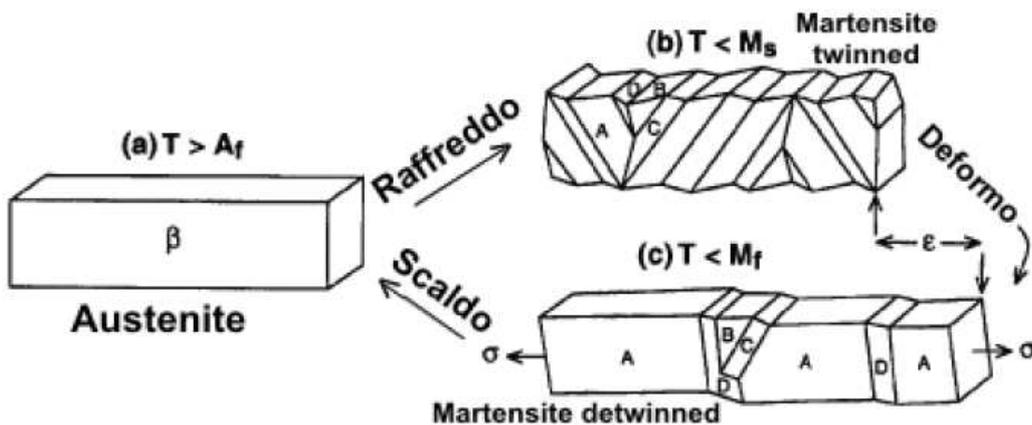


Fig. 4.20 [Trasformazioni]

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 \mathcal{E} 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 “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:

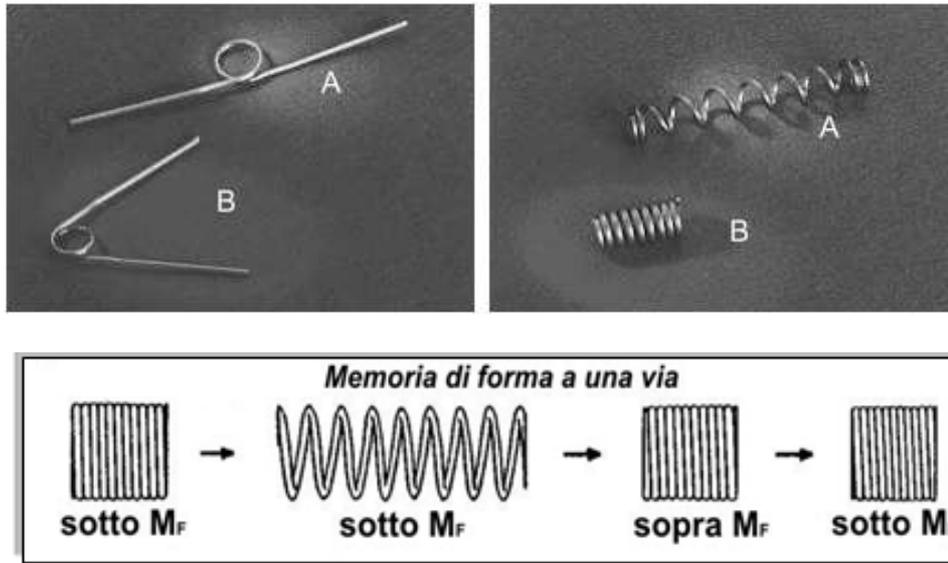


Fig. 4.21 [memoria di forma a una via]

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 (ciò 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:

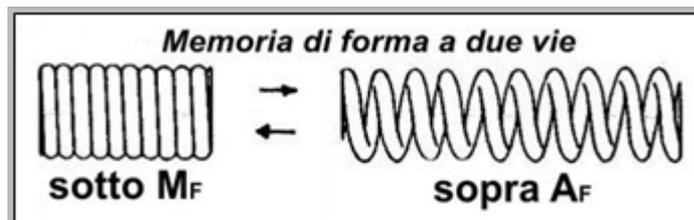


Fig. 4.22 [comportamento a due vie]

Il comportamento a due vie 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

Tab.6

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 così il trattamento di ciclaggio termico forzato.

4.1.4 Superelasticità o pseudo elasticità

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.

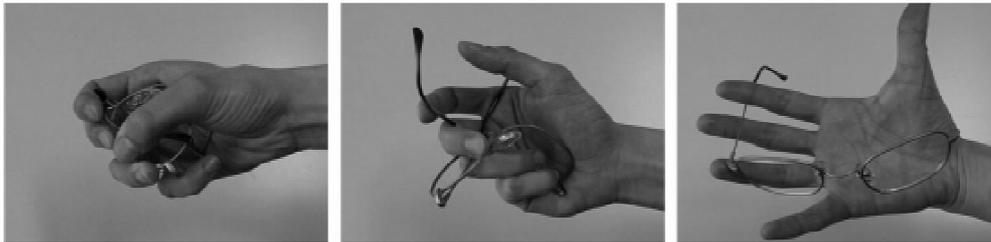


Fig. 4.23 [superelasticità]

L'esempio più classico è quello in figura, 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 in cui si può notare chiaramente che stavolta non compare l'asse della temperatura, poiché si mantiene costante nel passaggio tra le diversi fasi.

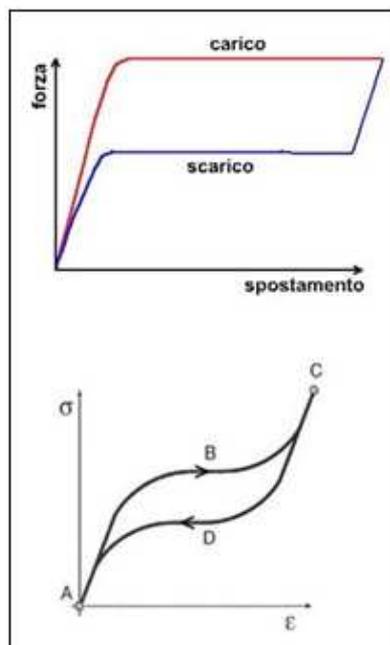


Fig. 4.24 [diagrammi forza-spostamento superelastici]

Nel ramo di carico si può notare un punto di pseudosnervamento 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 pseudoelastico 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.

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

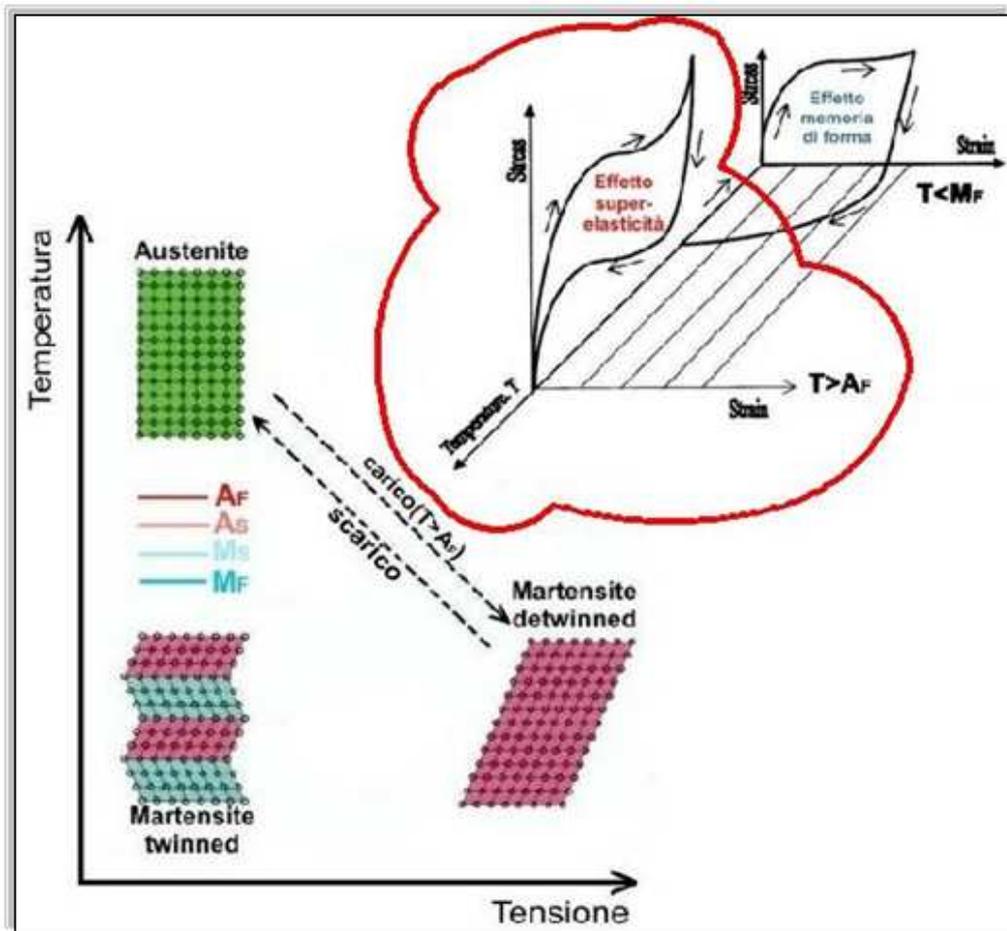


Fig. 4.25 [diagramma tensione-temperatura per la superelasticità]

4.1.5 Comportamento termo meccanico

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

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

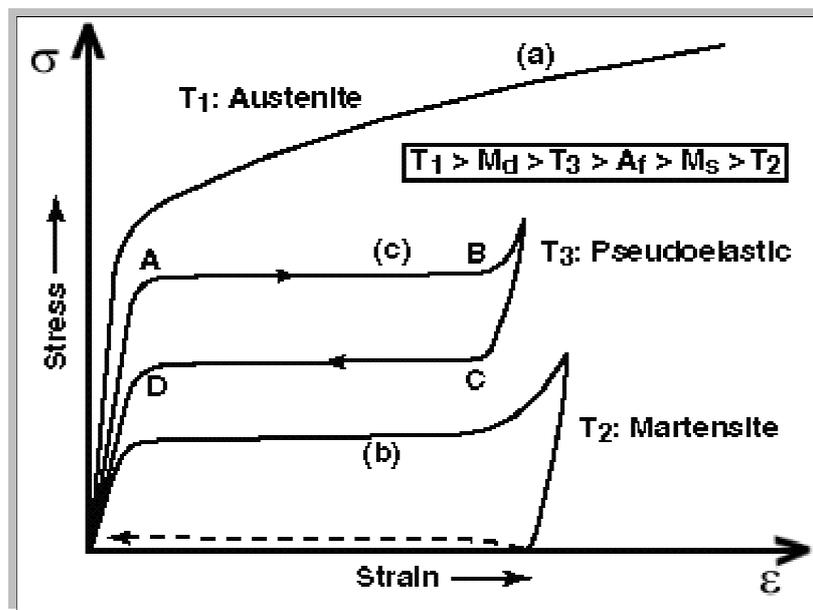


Fig. 4.26 [comportamento NiTi al variare della temperatura]

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 δ .

Tornando alla figura 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.

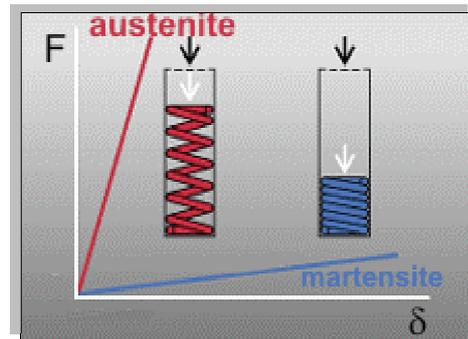


Fig.4.27 [F- δ per austenite e martensite]

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 ed in maniera non lineare; ciò comporta che il modulo di Young di un materiale superelastico sia quasi indefinibile, poiché dipende sia dalla temperatura che dalla deformazione. Si ricorda, tuttavia, che esiste una temperatura massima M_D oltre la quale non si è capaci a 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, 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 prossimità 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.

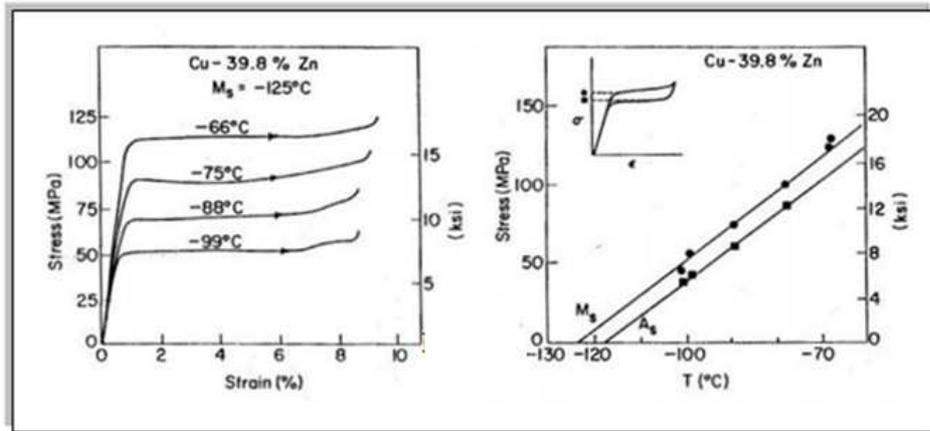


Fig.4.28 [variazione del plateau al variare della temperatura]

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

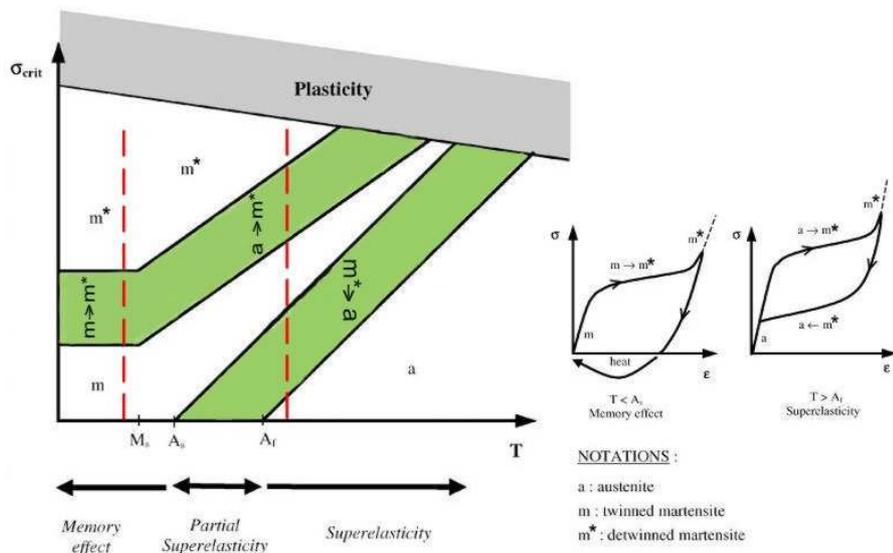


Fig.4.29 [cambiamenti di fase]

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

4.1.6 Capacità di smorzamento

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:

$$h = \frac{D_w}{2 * p * W}$$

dove:

W = energia applicata

D_w = 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.

4.1.7 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 nella figura seguente:

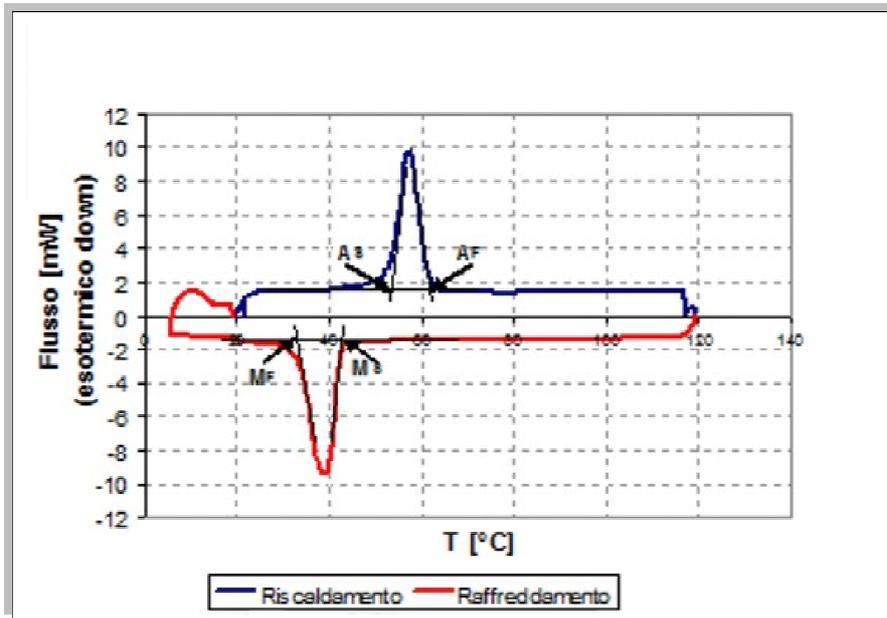


Fig.4.30 [metodo DSC]

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 è sempre 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 nella figura precedente; 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 perchè 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.

4.2 Materiali Piezoelettrici

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 ad un campo elettrico, esibiscono una deformazione meccanica (effetto piezoelettrico inverso).

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.

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 è stato il titanato di bario (BaTiO_3), che esibisce costanti dielettriche fino a 100 volte superiori a quelle dei cristalli di taglio comune.

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.

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 tempere dell'acciaio, presente in natura in alcuni quarzi.

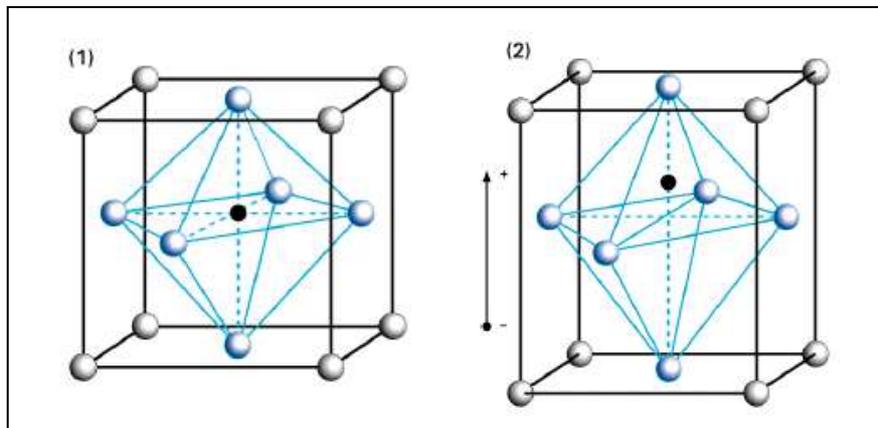


Fig.4.31 [reticolo cristallino]

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 anisotropicità.

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 più o meno allo stesso modo e si distinguono in :

- Quarzo: (naturale o sintetico):
non hanno 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, LiNbO_3 , LiTaO_3 , Langasite, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_6$.
- Ferroelectrici e Piroelectrici: (sintetici):
hanno un dipolo naturale, manifestano comparsa di cariche se sottoposti a riscaldamento (piroelectricità) e invertono il dipolo sotto l'applicazione di un campo elettrico di intensità opportuna (ferroelectricità).
Questi materiali generano una tensione abbastanza elevata, ma non sono abbastanza resistenti alla variazione della temperatura. Si distinguono in:
 - Piezoceramici policristallini: BaTiO_3 , PbTiO_3 , PZT, PbNb_2O_6 ;
 - Piezopolimeri: PVDF, copolimeri di TrFE e TeFE;
 - Piezocompositi .

Le possibili applicazioni per i materiali piezoelettrici sono fornite nella tabella che segue:

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.

Tab.7

4.2.1 Materiali Piezoceramici PZT

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.[6]

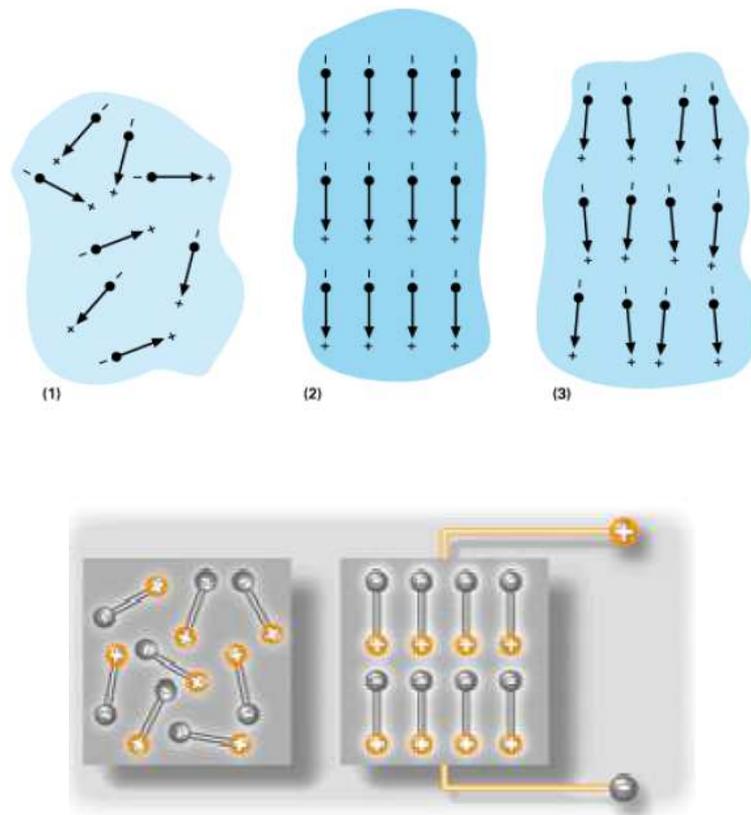


Fig. 4.32 [processo di polarizzazione]

A livello dei grani si può osservare, nel materiale polarizzato, 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 ad un valore limite del campo indicato con E_c .

Oltre tale limite il materiale inizia ad 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 pzt 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.

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.

Materiali utilizzati:

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

- Quarzo (SiO_2)
 $T_c = 573 \text{ }^\circ\text{C}$
Molto stabile con la temperatura però presenta bassi coefficienti elettromeccanici e piezoelettrici.
Applicazioni: accelerometri e risonatori ($Q_m=106$)
- Niobato di Litio (LiNbO_3)
 $T_c = 1140 \text{ }^\circ\text{C}$
Ottime proprietà piezoelettriche a T_{amb} ma non ad alta temperatura.
Ottime proprietà elettro-ottiche
Applicazioni: filtri SAW
- Titanato di Bario (BaTiO_3)
 $T_c = 130 \text{ }^\circ\text{C}$
Struttura cristallina perovskite. Grande resistenza a depolarizzazione
Applicazioni: alte potenze acustiche (drogato con ioni CO_3^{2+})
- Titanato di Piombo (PbTiO_3)
 $T_c = 490 \text{ }^\circ\text{C}$
Struttura cristallina perovskite; molto fragile; basso coefficiente k_p
Applicazioni: sonde miniaturizzate
- Metaniobato di Piombo (PbNb_2O_6)
 $T_c = 570 \text{ }^\circ\text{C}$
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 105uto riscaldamento.
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)

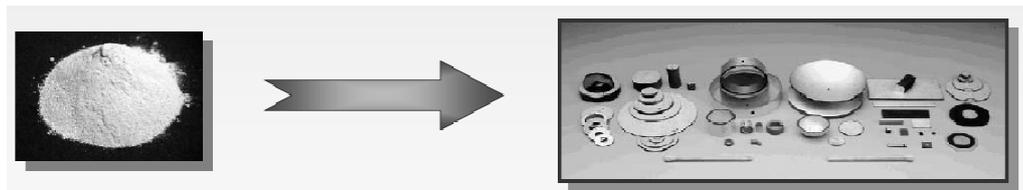


Fig.4.33 [produzione]

Applicazioni:

- Sensori: sfruttano l'effetto piezogeneratore
- Attuatori: sfruttano l'effetto piezomotore

Svantaggi:

Hanno tutti gli svantaggi dei materiali ceramici:

- scarsa resistenza a frattura
- scarsa resistenza 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.

4.2.1 Sperimentazioni

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 es., 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.

4.3 Materiali Magnetostrittivi

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 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.

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, infatti i magneti elementari sono infatti orientati in una 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.

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.

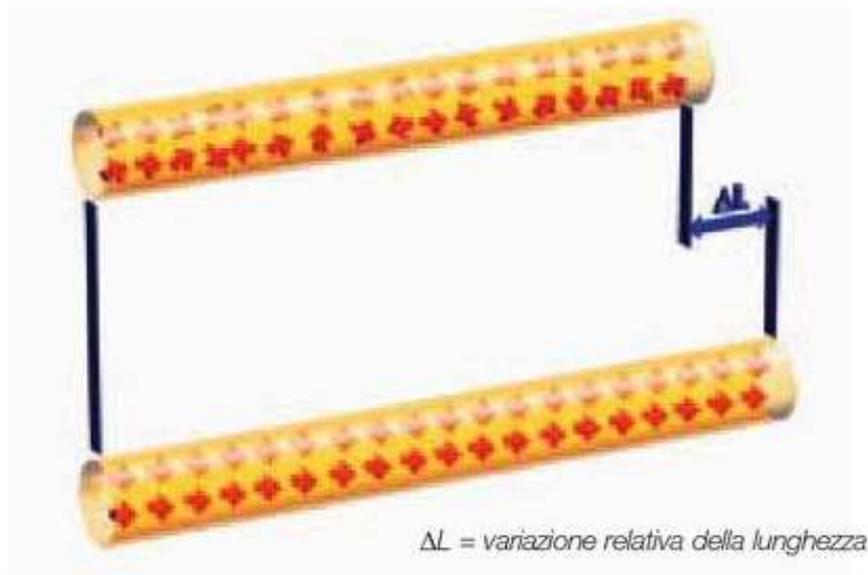


Fig. 4.34 [effetto magnetostrittivo (ΔL) dovuto all'orientamento delle micro aree sottoposte all'influenza del campo magnetico esterno parallelo alla barra.]

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, poichè la magnetizzazione del materiale aumenta da zero al valore di saturazione .

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.

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 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 ad 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 di 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.

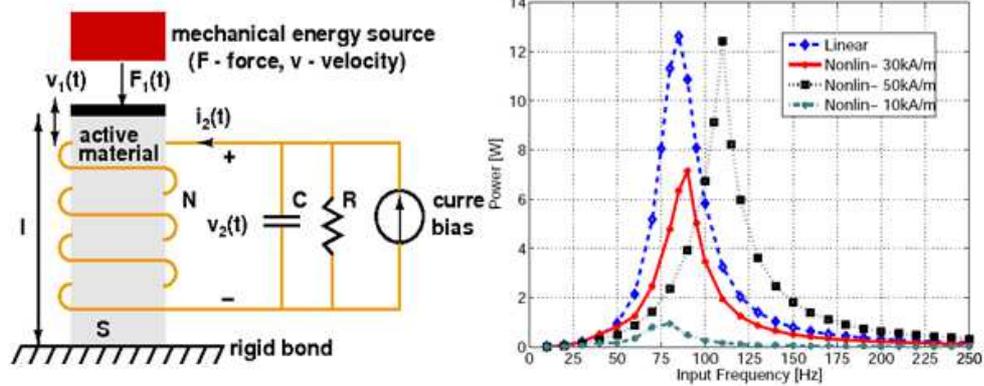
D'altra parte la modellizzazione lineare ha anche degli svantaggi perché bisogna ipotizzare piccole variazioni delle variabili meccaniche dal momento che si trascura sia la saturazione magnetica del materiale sia la dipendenza dal carico meccanico applicato dei coefficienti di accoppiamento.

Una modellazione non lineare e con isteresi mostra invece l'influenza di questi ed 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, si include un risonatore meccanico, nella forma di un sistema massa-molla o un cantilever.

In realtà questa soluzione permette di massimizzare la potenza convertita ad 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 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.



schema di principio del dispositivo per l'energy harvesting. La sorgente meccanica applica una forza $F_1(t)$.

potenza convertita al variare del bias con $l=5\text{cm}$, $S=78\text{mm}^2$, $R=10\Omega$, $C=0.6\text{mF}$, $F_1(t) = [2000 + 940 \sin(\omega t)]\text{N}$.

Fig.4.35 [schema e diagramma potenza-frequenza]

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, 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;

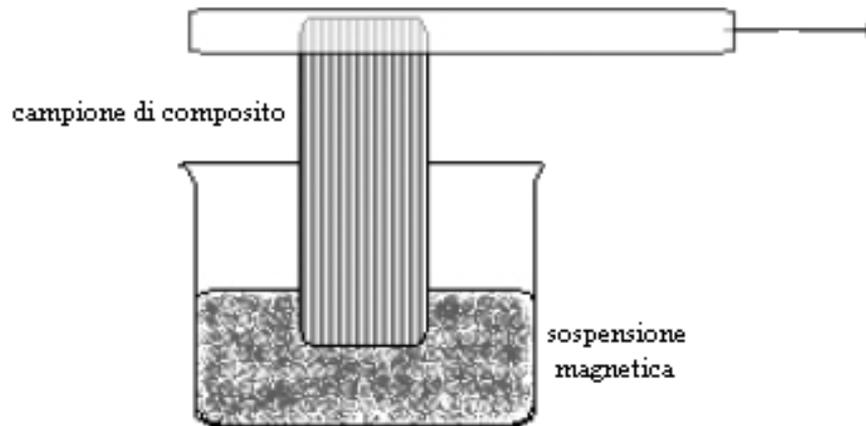


Fig. 4.36 [impianto]

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.

4.4 Materiali Dielettrici

I polimeri elettroattivi (EAP),[4] in grado di esprimere significative variazioni di forma in risposta ad uno stimolo elettrico, possono essere divisi in due gruppi a seconda del tipo di attivazione:

- EAP Ionici, attivati dallo spostamento o dalla diffusione di ioni
- EAP Elettronici, attivati da un campo elettrico o dalle forze di Coulomb

EAP *electroactive polymer*

- Ionici IPMC
 - Nanotubi in carbonio(CNT)
 - Ionic Polymer Gels(IPG)
 - Fluidi elettroreologici
- elettronici
 - Polimeri piezoelettrici
 - Elastomeri Dielettrici
 - Polimeri ferroelectrici

Il polimero dielettrico viene ricoperto da entrambi i lati con un film di materiale conduttivo, elastico anch'esso.

Quando applichiamo una tensione tra i due elettrodi, si viene a creare una pressione esercitata dalla forze di Coulomb.

Il polimero dielettrico si comporta come un fluido incompressibile, quindi la pressione esercitata dagli elettrodi rende il film più sottile, espandendosi nelle direzioni planari. [1]

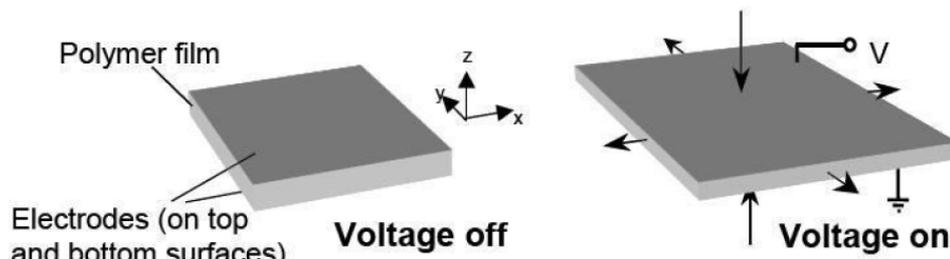


Fig. 4.37 [allargamento di un polimero dielettrico sotto un campo elettrico]

Questa classe di Ionic EAP si deforma in risposta ad una attivazione elettrica, la quale ha come risultato la migrazione di cationi nel reticolo elastico del polimero.

Le forze elettrostatiche e la mobilità dei cationi sono responsabili della deformazione.[4]

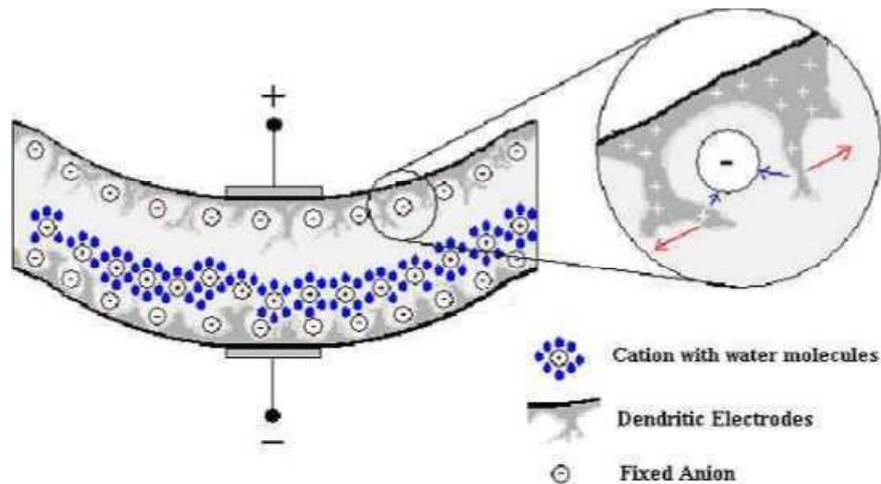


Fig. 4.38 [migrazione dei cationi]

Vantaggi:

- Possono operare a condizioni standard per molto tempo
- Ottimo tempo di risposta (msec)
- Se mantenute attivate da DC rimangono in tensione
- Inducono forze di attuazione relativamente ampie.

Svantaggi:

- Richiedono elevati voltaggi per essere attivati, nell'ordine dei 150 MV/m (Ferroelettrici 20 MV/m)
- Compromesso tra strain e stress

- La temperatura di transizione vetrosa li rende inadeguati per impieghi a basse temperature
- Applicazioni ad alte temperature sono limitate dalla temperatura di Curie
- Principalmente hanno attuazione monopolare: indipendente dalla polarità.

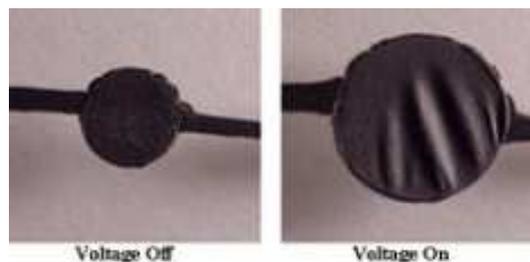


Fig. 4.39 [polimero dielettrico sottoposto a un campo elettrico]

Caratteristiche:

- L'abilità di produrre grandi movimenti senza l'uso di ingranaggi o altre parti mobili;
- La possibilità di produrre apparecchiature con gradi di libertà multipli, agendo sulla diversificazione dell'applicazione degli elettrodi o su un singolo sottostrato;
- La possibilità di accoppiare al movimento prodotto una o più direzioni di deformazione del polimero;
- La capacità di progettare alcune caratteristiche meccaniche basandosi sul funzionamento dei muscoli naturali;
- La robustezza intrinseca del materiale elastico;
- La capacità dell'elastomero di funzionare nelle due direzioni, sia da attuatore che da sensore (multifunzionalità);
- Tolleranze alle condizioni ambientali:
Operano senza variazioni nelle prestazioni tra i -20°C e 80°C

Capitolo 5: Sensori e attuatori “intelligenti”

Dopo aver introdotto vari strumenti di misurazione ed aver approfondito le varie tipologie di sensori e, legate a queste, le categorie degli attuatori esistenti; il passo successivo, per arrivare a definire una “Smart Structure”, è stato quello di descrivere nel dettaglio dei materiali di recente studio e sperimentazione che al giorno d’oggi vengono inglobati nei così detti “materiali intelligenti”.

Grazie alla ricerca che è stata effettuata negli ultimi anni è possibile oggi sfruttarli per ottenere sensori e attuatori sempre più all’avanguardia e prestazionali.

Qui di seguito verranno descritti alcuni tra i più noti e in uso.

5.1 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.

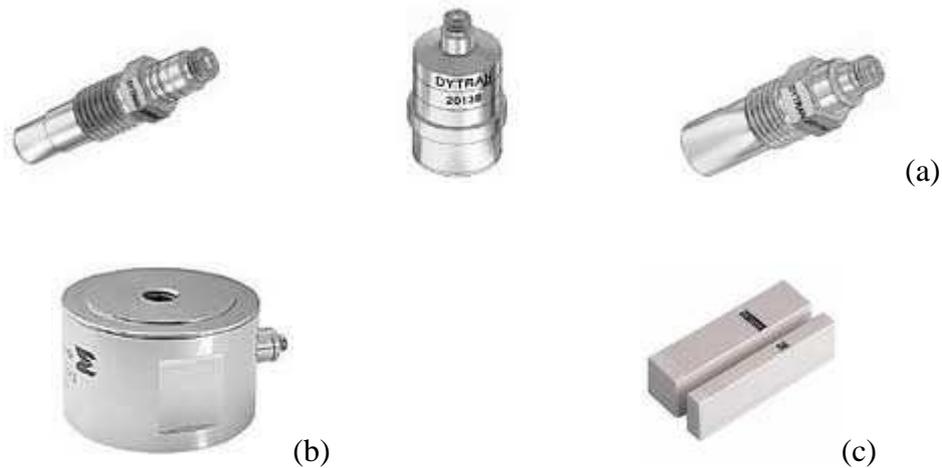


Fig.5.1 [sensori piezoelettrici: (a) di pressione; (b) di forza; (c) con contatto]

I sensori piezoelettrici sono utilizzati ampiamente 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 piezoceramici.

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 la seguente: è presente 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 suddette 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.

5.1.1 L'amplificatore

Come detto, 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.

5.1.2 Alta e bassa impedenza

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 ricordiamo:

- 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.

Ma i sensori ad alta impedenza offrono anche alcuni vantaggi rispetto a quelli a bassa impedenza, che possono consigliarne l’impiego in applicazioni particolari: 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.

5.2 Attuatori

I materiali così detti “intelligenti” sono utilizzati nella realizzazione di nuovi ed evoluti attuatori:

Le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloys* – **SMA**) risultano particolarmente interessanti 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

5.2.1 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).

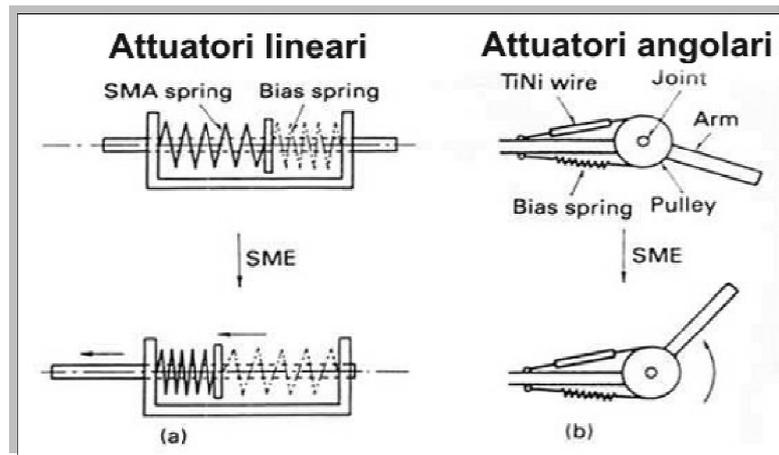


Fig.5.2 [attuatori lineari e angolari]

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

Un attuatore 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:

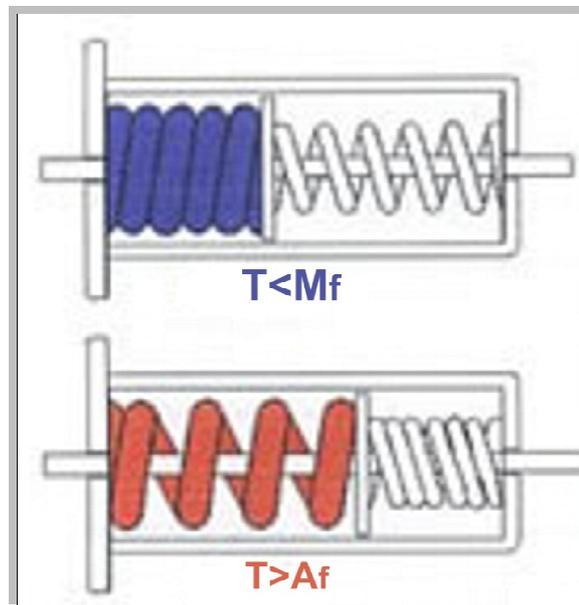


Fig.5.3 [schematizzazione attuatore con molla]

A bassa temperatura il materiale ha un modulo tale per il quale 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 di partenza 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.

In linea di massima 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 (~ 100 W/kg), lo si ha per pesi piccoli (inferiori a 100 g), come si può notare dalla figura seguente:

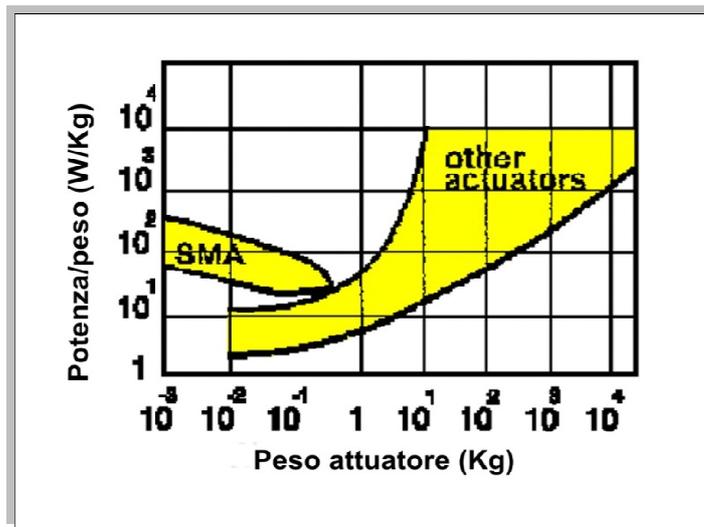


Fig.5.3 [confronto tra attuatori SMA e altri attuatori]

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 storici.

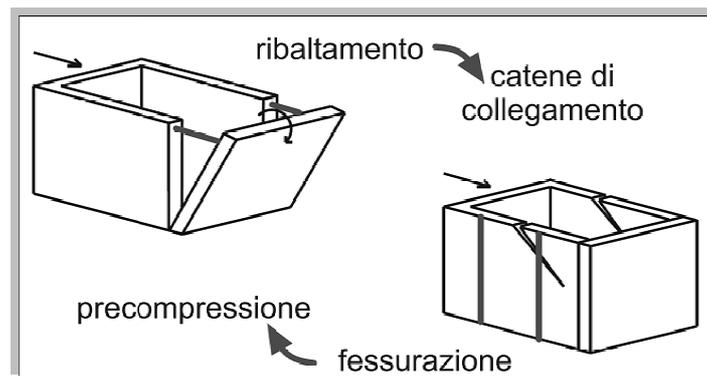


Fig.5.4 [applicazione SMA]

Un esempio concreto di applicazione SMA negli edifici storici, riguarda la basilica superiore di Assisi, 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 di interazione.



Fig.5.5 [Basilica di Assisi]

Anche il campanile di San Giorgio in Trignano, 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

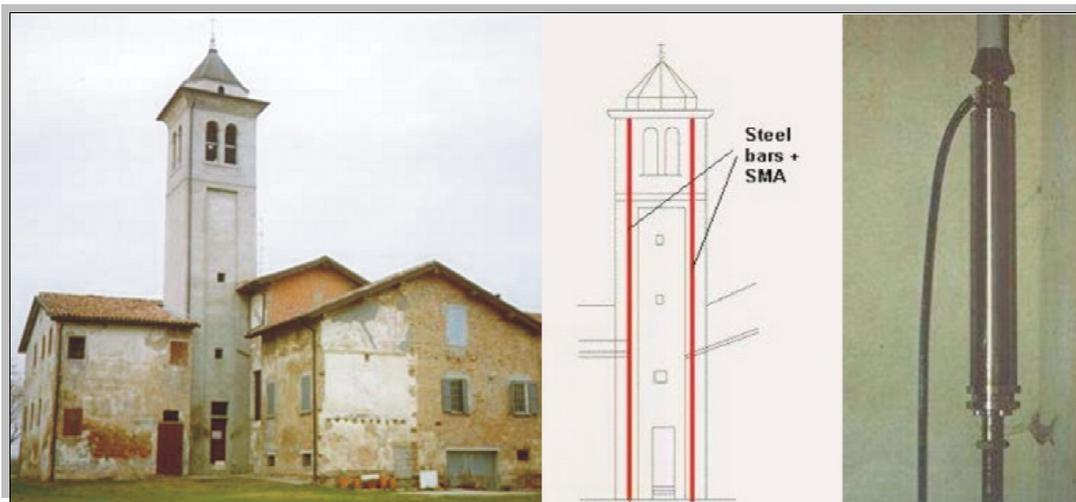


Fig.5.6 [Campanile di San Giorgio]

Un altro esempio di utilizzo delle SMA per migliorare la dissipazione energetica riguarda i treni ad alta velocità italiani: 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:

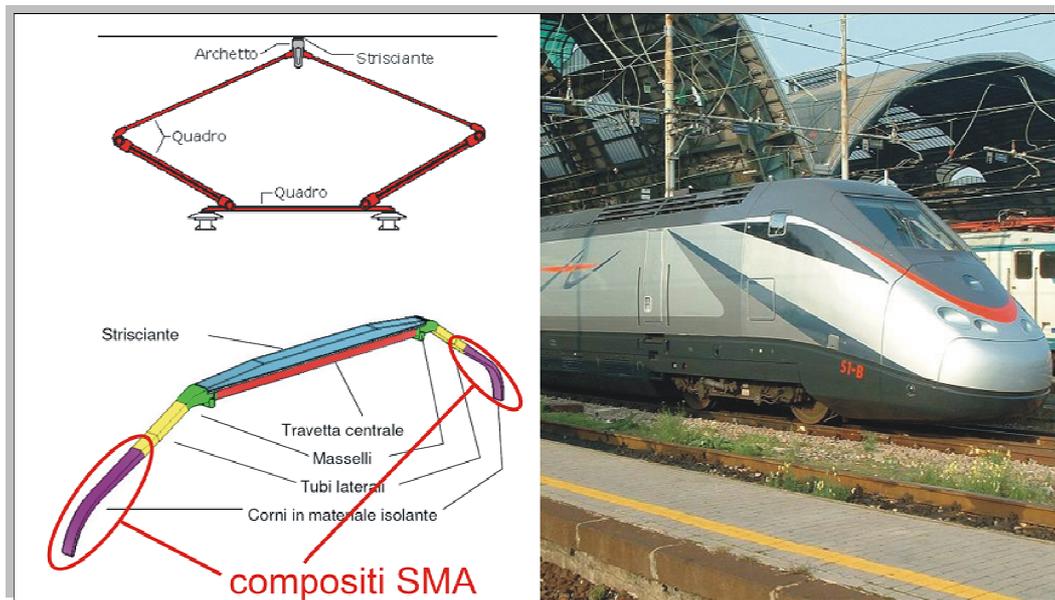


Fig.5.7 [attuatori SMA]

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.

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

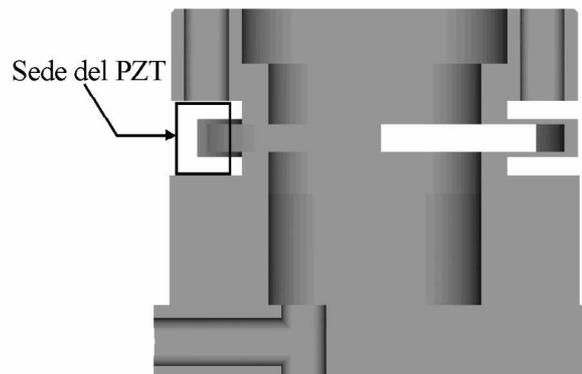


Fig.5.8 [attuatore piezoelettrico]

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 stata realizzato un opportuno circuito elettrico il quale permette di variare singolarmente la tensione di alimentazione su ogni singolo piezoelettrico.

Ogni piezoelettrico (Physik Instrumente modello PL033.20, dimensioni 3x3x2 mm), quindi, è chiuso su una resistenza variabile fra 100 e 110 k Ω , 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.5 sono riportati alcuni particolari dell’attuatore. In Fig.5a è 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. In Fig.5b è visibile la posizione che andrà ad occupare il singolo piezoelettrico e sono visibili i tre grani per il precarico. Infine in Fig.5c 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.



Fig.5.9 [attuatore: (a) singolo piezoelettrico, (b) posizione nella cassa, (c) collegamenti elettrici]

5.2.3 Attuatori ad elastomeri dielettrici

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

Gli Elastomeri Dielettrici (ED) appartengono ad 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.[1]

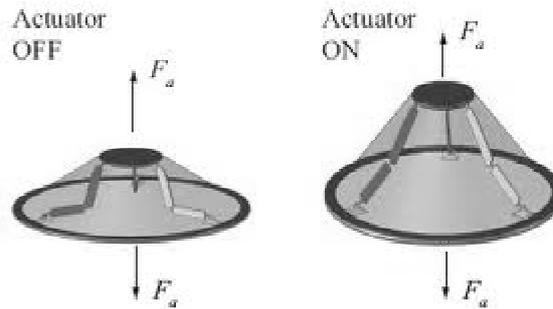


Fig.5.10 [attuatore dielettrico]

Lo spessore dei film, prima del pretensionamento e prima della applicazione del campo elettrico, è usualmente nel campo dei 50-100 μ 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 ad 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 rigidezza 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.

In questa memoria sarà 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.

Si presentano infine dei prototipi del dispositivo.[1]

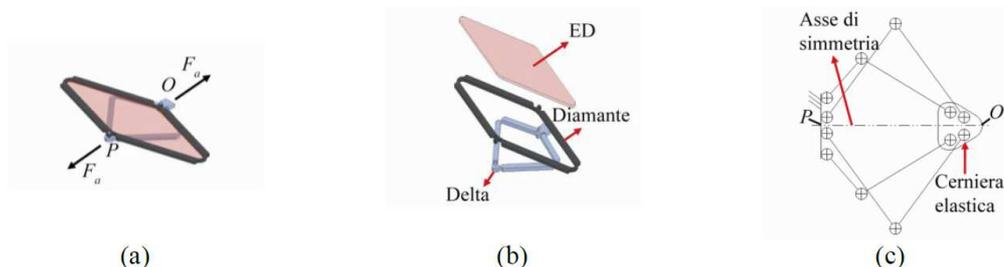


Figura 3: Soluzione proposta. Modello Cad (a), vista esplosa (b), schematico del dispositivo di supporto formato da meccanismi cedevoli.

Fig.5.11 [Dispositivo composto]

Capitolo 6: Monitoraggio e “Strutture Intelligenti”

Il più moderno ed indicato approccio per scongiurare i numerosi incidenti e disastri conseguenti all'invecchiamento fisiologico dei manufatti, ad eventi naturali (quali frane, sismi, fenomeni di subsidenza) o a cattivi criteri di costruzione porta alla 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,

In condizioni normali, devono presentare variazioni entro limiti prefissati in base alle caratteristiche di progetto e alla tecnologia costruttiva.

La necessità di monitorare edifici ed opere infrastrutturali in genere, sta diventando sempre più importante, nascono pertanto una serie di metodologie che permettono oggi di affrontare con ottimi risultati tutto ciò che riguarda la valutazione ed 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.

Il monitoraggio può consentire la misurazione:

- periodica,
- continua,

del comportamento degli elementi la cui integrità è vitale per la sicurezza delle strutture civili.

6.1 Monitoraggio

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 per questo vi è il bisogno oggettivo di un controllo migliore.

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.

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 ed infine può abbattere gli oneri di 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 ed ottimizzando la qualità delle decisioni relative agli eventuali interventi.

Il monitoraggio può segnalare rapidamente ed in tempo utile un malfunzionamento strutturale fornendo informazioni affidabili.

Il monitoraggio diventa anche l’unica soluzione possibile in quelle situazioni 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.

Gli edifici antichi spesso presentano fessure di dimensioni ragguardevoli, di cui raramente si conosce l'origine e di cui è necessario prevedere l'evoluzione e capire 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; anche se 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 capirlo.

Un sistema di monitoraggio ad 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 eventualmente correlati con eventi e situazioni ambientali particolari.

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.

Queste forniscono un quadro integrale e preciso sullo stato di salute della struttura e sulla conservazione dei propri materiali.

- I sensori a fibra ottica tradizionali 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.
- 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 ad 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, tra queste 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.

I sensori a fibra ottica FBG

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.

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, infatti 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 le deformazioni che 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 di 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.

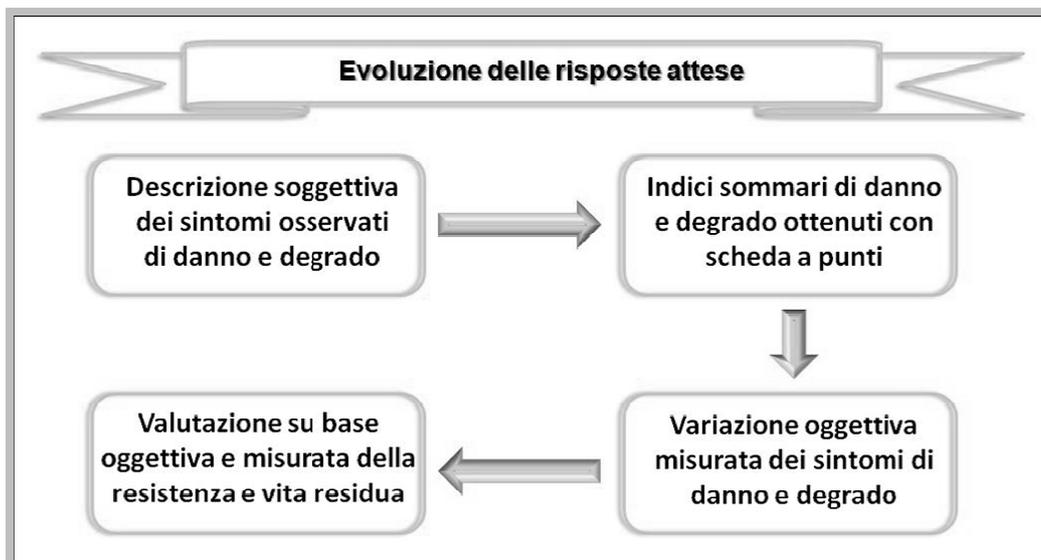
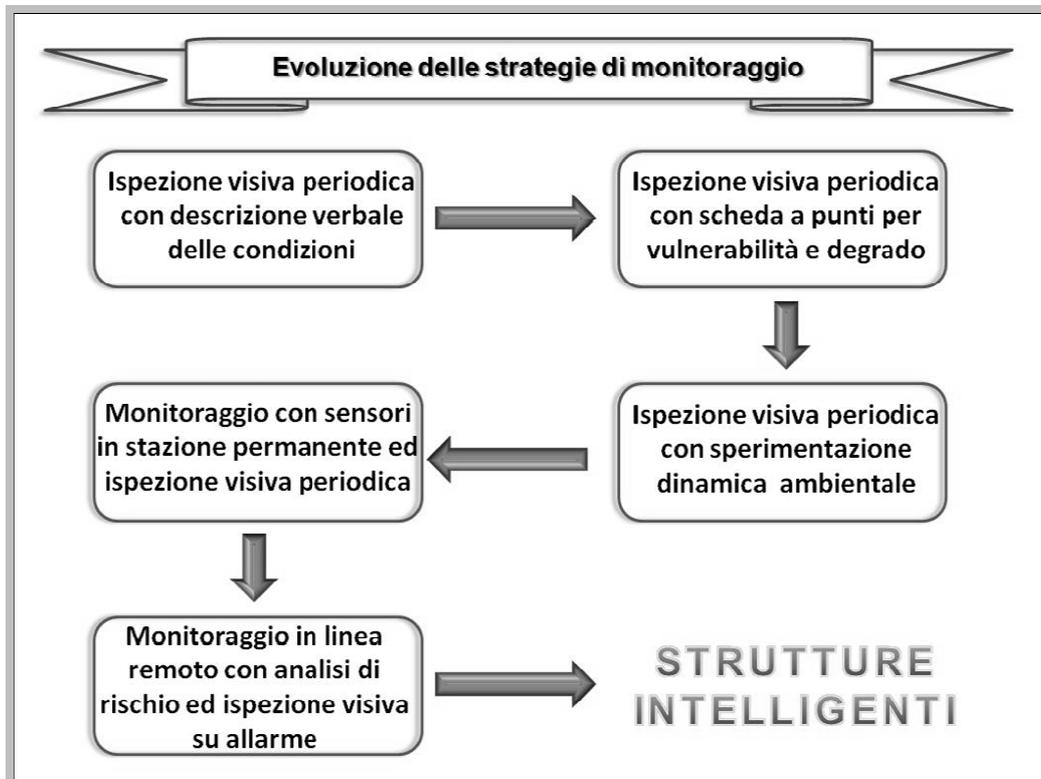
Tuttavia, i sensori di Bragg non si prestano a misure spazialmente distribuite su grandi distanze. Oltre ai sensori che effettuano misure puntuali, è molto forte

l’interesse verso sensori a carattere distribuito in grado di lavorare anche su grandi distanze.

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.

6.2 “Strutture intelligenti”



[5]

Con l'obiettivo di realizzare strutture attive, in grado cioè di adattarsi a diverse situazioni, si pone l'esigenza di un monitoraggio “intelligente”, che non si limiti a fornire informazioni, ma arrivi anche a fornire allarmi e intraprendere azioni.

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.

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 ad attuatori 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 indirizza oggi la ricerca verso l'impiego di sistemi meno invasivi.

Uno degli obiettivi più affascinanti dell'ingegneria strutturale è imitare la natura, realizzando strutture che siano in grado di reagire agli stimoli esterni auto-adattandosi e assumendo una nuova configurazione atta ad aumentare la sicurezza strutturale.

Per esempio, possono essere fornite forze di pre-tensionamento da sistemi inglobati nelle strutture, in modo da ostacolare l'apertura delle fessure, possono essere imposti spostamenti verticali per compensare il cedimento delle fondazioni, e così via.

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.

Oggi giorno 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 ”

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 ad 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 “conscio” dei suoi rapporti energetici con il mondo esterno.

Un edificio 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.

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 meteo-climatiche 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.

6.2.1 Componenti

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.

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.

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.

Si distingue tra:

- Un materiale **piezoelettrico**, come detto, è soggetto a deformazioni quando viene applicato un campo elettrico nelle sue vicinanze; la deformazione dà luogo ad 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).

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.

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.

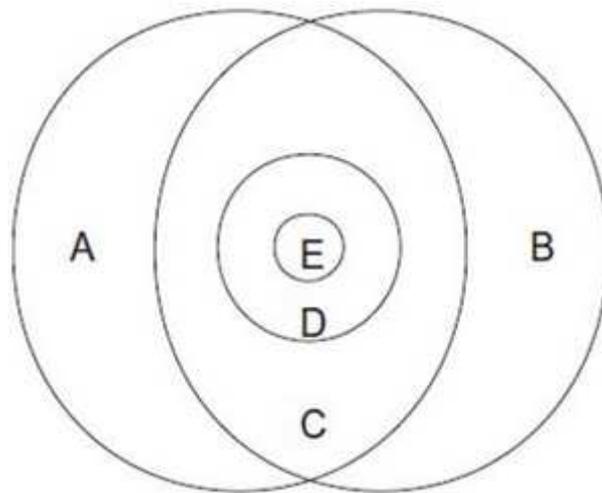
Poiché la tensione di recupero si sviluppa durante il riscaldamento dei fili di SMA per poi diminuire durante il raffreddamento, gli attuatori forniscono solo un temporaneo auto-ripristino, che dovrebbe essere fatto seguire da un intervento esterno permanente, come un rinforzo con polimeri in fibre di carbonio (CFRP).

- 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 perciò incorpora una distribuzione di attuatori e sensori, così come integratori e circuiti elettronici. [3]

Si definiscono i vari tipi di struttura:



- **Strutture adattive (A):** 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 (B):** 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 (C):** 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 (D):** sono una sottocategoria delle strutture controllate. Gli attuatori integrati ed i sensori hanno capacità portante (funzioni strutturali).
- **Strutture intelligenti (E):** sono una sottocategoria delle strutture attive. 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 ed 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.

In ambito mondiale ed europeo, si sta approvando un orientamento che sostiene raccomandazioni tecniche (*guidelines*) e standard in termini di monitoraggio infrastrutturale.

Tali “normative” che dovrebbero essere disponibili a breve termine, si stanno affermando grazie all'appoggio di linee guida accettate a scala globale: ISIS Canada SHM Guidelines, FHWA USA guide 9-8-SHM Guidelines, FIB Europe task Group 5-1-SHM Guidelines, ISO-SHM Guidelines.

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.

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 e che possano anche .

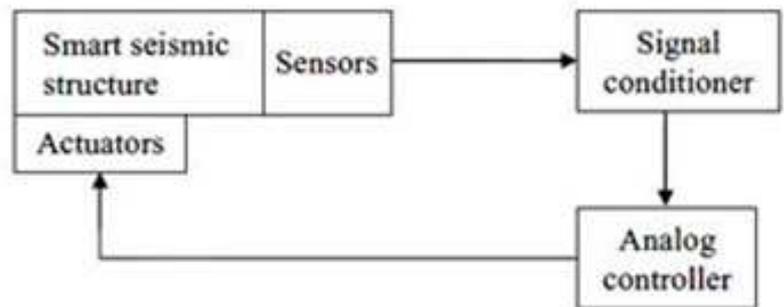
In realtà i sistemi a controllo attivo della risposta sono già esistenti, ma comportano un notevole consumo di energia e la necessità di impiegare costosi sistemi di continuità in caso di black-out.

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.

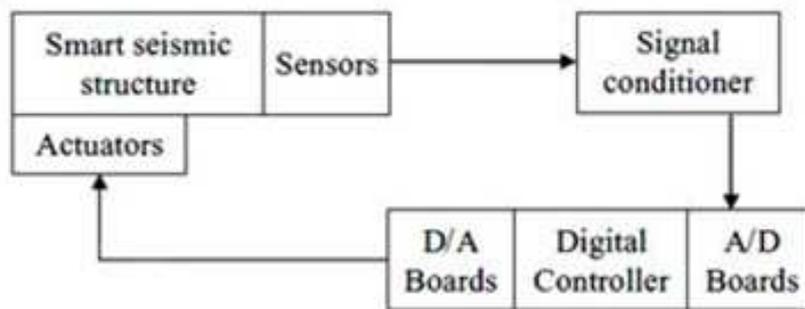
Si può avere sistema con controllo:

- analogico (a),
- 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)



(b)

Fig.6.1 [schema: (a) analogico; (b) digitale]

6.3 SHM: Structural Health Monitoring

Applicazioni pratiche

Alcuni casi pratici di monitoraggio intelligente in ambito civile, si possono trovare nei ponti, negli edifici, nelle dighe, nelle gallerie e nelle tubazioni.

Il **ponte di Siggenthal** in Svizzera, per esempio, è un ponte ad arco in calcestruzzo lungo 217m, 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.

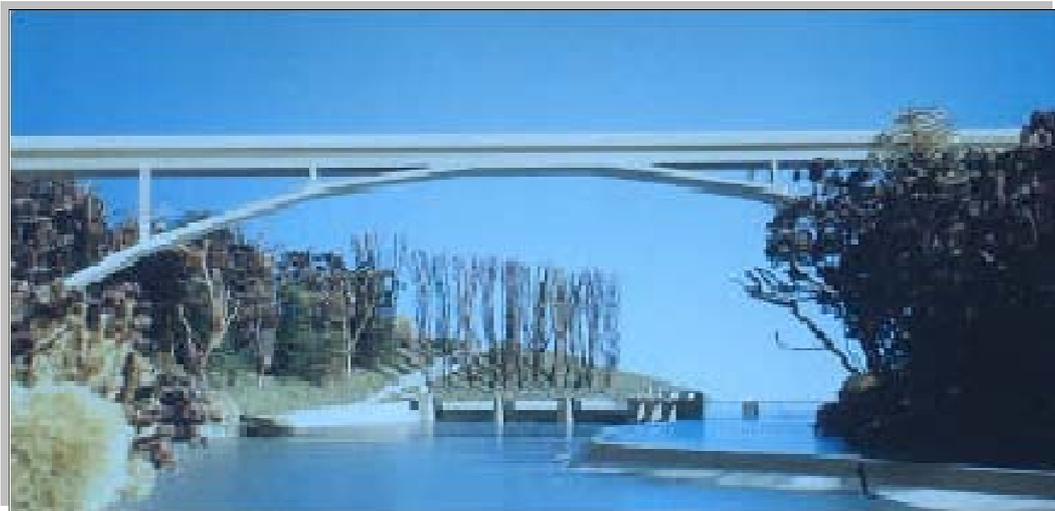


Fig.6.2 [ponte Siggenthal]

Un altro esempio di Structural Health Monitoring tutto italiano applicato ad un vecchio edificio è quello del **Duomo di Como**: [5]



Fig.6.3 [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 di SHM per dighe, è quello della **diga di Luzzone** in Svizzera, la quale è monitorata mediante sensori in fibra ottica per controllare l'apertura delle fessure fra i conci di calcestruzzo a breve ed a lungo termine.[5]



Fig.6.4 [diga di Luzzone]

6.4 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.

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 ad 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.

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**.

Otto elementi architettonici bioispirati.

Stile ed eleganza per un’[architettura contemporanea](#) di impatto e memorabile.



Fig.6.5 [Torri Putrajaya]



Fig.6.6 [torri Putrajaya]

Dopo le incredibili **Petrona's Twin Towers**, la Malaysia ci stupisce con un nuovo **complesso architettonico** progettato, udite udite, da uno studio italiano. E' lo studio Manfredi Nicoletti, autore di questo bellissimo progetto e di molte altre architetture (Palermo, Milano, Siena, Catania, Roma, Atene, Malaysia...) caratterizzate spesso da una morfologia organica e fluida.

Un **complesso residenziale** ispirato agli organismi marini e caratterizzato da un' [architettura bioclimatica](#); sorge a circa 30km a sud di Kuala Lumpur su un bellissimo lago artificiale.

Il complesso consumerà circa il **50% in meno di CO2** rispetto alle attuali residenze, questo grazie alla ventilazione naturale, alle zone dedicate al verde e all'utilizzo di energie alternative.

Capitolo 7: Allestimento della prova

7.1 Materiali

7.1.1 Blocchi

Canna fumaria modulare a sezione interna quadrata a parete doppia con intercapedine costituita da elementi vibro compressi in conglomerato cementizio alleggerito con argilla espansa.

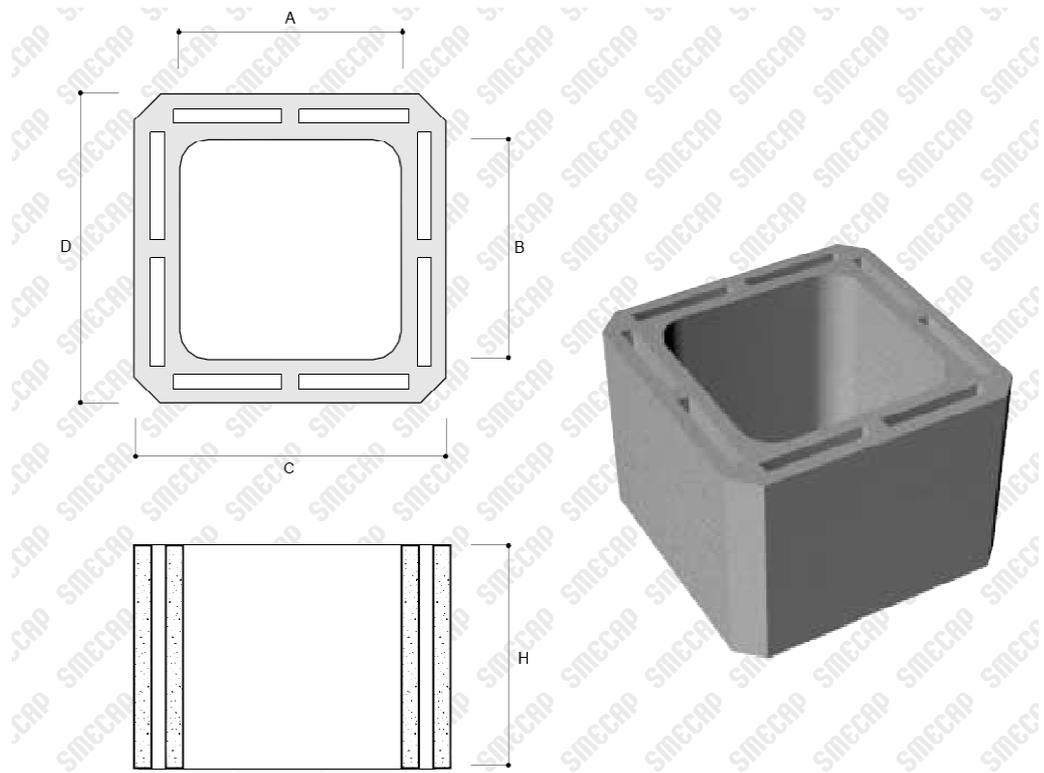


Fig.7.1 [blocchi di cls in argilla espansa]

CODICE	DESCRIZIONE	Int. Ax B cm	Est. CxD cm	H cm	s cm	Peso kg	Pezzi per m	Dimensione pedana cm
CF1515AE	Canna fumaria in A.E.	15x15	25x25	25	5	14	4	100x100x150
CF2020AE	Canna fumaria in A.E.	20x20	30x30	25	5	15	4	100x100x150
CF2030RE	Canna fumaria in A.E.	20x30	30x40	25	5	22	4	120x120x150
CF2525AE	Canna fumaria in A.E.	25x25	35x35	25	5	21	4	105x105x150
CF3030AE	Canna fumaria in A.E.	30x30	40x40	25	5	25	4	120x120x150
CF4040AE	Canna fumaria in A.E.	40x40	50x50	25	5	27	4	100x100x150

Il **calcestruzzo leggero** [9] è un conglomerato cementizio la cui massa volumica (variabile tra 300 e 2000 kg/m³) è sensibilmente inferiore a quella di un calcestruzzo ordinario (solitamente compresa tra 2200 e 2600 kg/m³). La ridotta massa volumica del calcestruzzo leggero è imputabile alla presenza di un sistema di vuoti.



Fig.7.2 [Blocco di prova]

L'introduzione di un sistema di vuoti, e quindi la produzione del calcestruzzo leggero, si realizza sostanzialmente in tre modi, ciascuno dei quali è caratterizzato da una diversa microstruttura:[9]

- 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;
- 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;
- utilizzando un inerte grosso ordinario *monogranulare* i cui granuli vengono legati da un sottile strato di sola pasta di cemento, in modo da creare un sistema di alveoli grossolani tra i granuli dell'inerte.

Nel primo caso si parla di "calcestruzzi con inerti leggeri", nel secondo di "calcestruzzi cellulari", anche se a rigore si dovrebbe parlare di "malte cellulari", nel terzo di "calcestruzzo alveolari". In generale il costo per m³ di **calcestruzzo leggero** è superiore di quello di un calcestruzzo ordinario, sia per un maggior costo di produzione degli aggregati leggeri rispetto a quelli ordinari, sia perché la bassa densità territoriale delle fonti di approvvigionamento degli inerti leggeri fa sì che il costo del trasporto incida sul costo totale del calcestruzzo.

Tuttavia, l'impiego del calcestruzzo leggero può risultare più economico in quanto, per la sua leggerezza, diminuiscono i carichi permanenti della struttura, e quindi è possibile ridurre le dimensioni degli elementi strutturali.

Il peso minore dell'ossatura portante permette, inoltre, di costruire anche su terreni di scarsa portanza, senza dover ricorrere a tipologie di fondazione complesse e costose, ma soprattutto consente, a parità di pressioni trasmesse al terreno, di realizzare edifici con uno sviluppo verticale maggiore: il maggior costo del calcestruzzo leggero in questi casi risulta ampiamente compensato dalla maggiore superficie abitabile.

Con il calcestruzzo leggero strutturale è possibile costruire sopraelevazioni di costruzioni esistenti che non sono sufficientemente resistenti da poter sopportare il peso di strutture in calcestruzzo ordinario e che quindi richiederebbero dei complessi interventi di adeguamento per aumentarne la capacità portante.

Inoltre, l'impiego del calcestruzzo leggero strutturale riduce le forze d'inerzia che insorgono allorché la struttura è soggetta ai movimenti tellurici, consentendo una diminuzione delle armature a parità di sezione, oppure a parità di armature una diminuzione della sezione resistente.

Da indagini sperimentali per l'ottimizzazione del calcestruzzo leggero strutturale; si è fatto riferimento ai seguenti obiettivi prestazionali:

- $R_{ck} = 30-35 \text{ N/mm}^2$;
- Massa Volumica: $1650-1750 \text{ kg/m}^3$ (1550 kg/m^3 su provini asciutti);
- Lavorabilità per 30' :S4 (slump 16-20 cm);
- Messa in opera : tradizionale, senza pompa.

Le prove sperimentali [9] hanno evidenziato che è possibile - attraverso un attento *mix-design* - confezionare calcestruzzi leggeri di **argilla espansa** di eccellente lavorabilità, e conseguentemente di facile posa in opera, caratterizzati in pratica da assenza di segregazione.

L'impiego di aggregati leggeri con un ridotto valore di assorbimento d'acqua ha consentito, inoltre, di produrre calcestruzzi con una massa volumica compresa tra 1600 e 1800 kg/m^3 con resistenza caratteristica a compressione pari a circa 35 N/mm^2 .

Questi calcestruzzi hanno evidenziato valori di resistenza a trazione e di aderenza acciaio/conglomerato paragonabili o leggermente superiori rispetto a quelli ottenibili con un conglomerato ordinario di pari resistenza. I risultati sperimentali, inoltre, hanno confermato per il calcestruzzo leggero un modulo elastico inferiore a quello conseguibile con un conglomerato ordinario di pari resistenza meccanica a compressione come conseguenza della minore

rigidità dei granuli di argilla espansa rispetto agli aggregati silico-calcarei correntemente impiegati per la produzione dei normali calcestruzzi.

Il minor **modulo elastico** se, da una parte, può ridurre la rigidezza delle strutture realizzate 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 strutturali con una minore tendenza alla fessurazione.

Proprio per il minore modulo elastico è stato scelto questo tipo di materiale, infatti il modello doveva risultare deformabile in modo da rendere apprezzabili i vari spostamenti anche con modeste rotazioni e allo stesso tempo far sì che il recupero delle deformazioni avvenisse con un carico non eccessivo in modo da poter essere realizzato fisicamente in laboratorio.

Peso del pilastro:

$$10 \times [(50 \times 50) - (40 \times 40)] \times 25 \text{ cm}^3 \times 1200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \times 10^{-6} = 270 \text{ kg}$$

7.1.2 Malta

È stata utilizzata per unire i blocchi, ad esclusione dei tre giunti con la gomma H40® Eco Rapid.



Fig.7.3 [Malta]

Adesivo minerale certificato, eco-compatibile a presa e indurimento ultrarapidi per la posa anche in sovrapposizione ad alta resistenza e scivolamento verticale nullo.

Monocomponente a bassissime emissioni di sostanze organiche volatili.

H40® Eco Rapid sviluppa rapidi tempi di messa in servizio anche alle basse temperature garantendo elevati valori d'adesione tanto negli interventi di ristrutturazione quanto nel nuovo mantenendo una lavorabilità prolungata simile agli adesivi a presa normale.

7.1.3 Piastre

- Piastra inferiore

Per la realizzazione della piastra inferiore vengono utilizzati degli IPE 80, uniti come mostrato in figura e poi saldati.

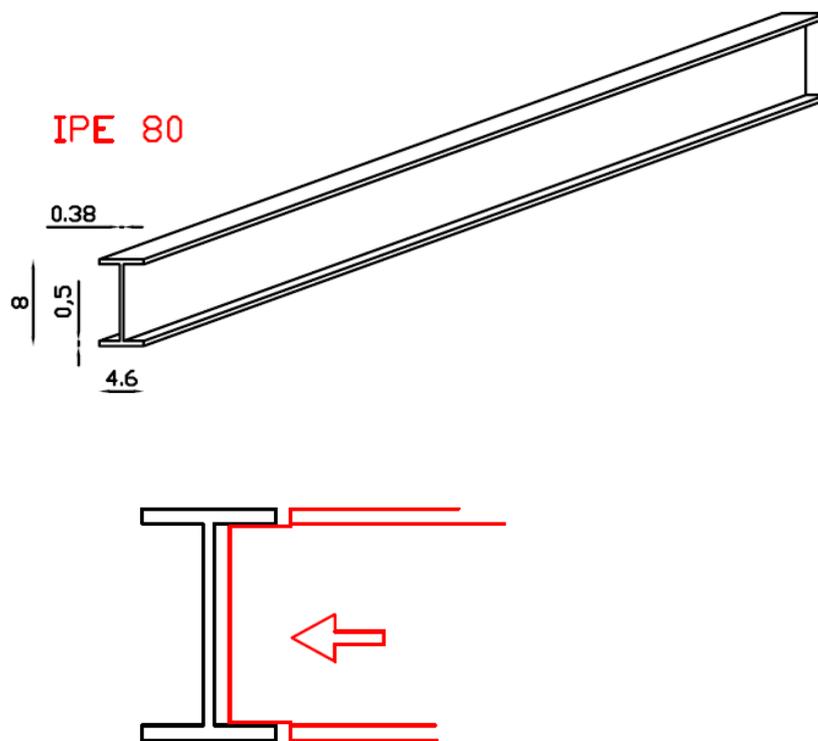


Fig.7.4 [IPE 80]

Gli IPE una volta assemblati vengono ricoperti da una piastra di 0,5 cm di spessore sia sopra che sotto per rendere quella che sarà la superficie di appoggio del pilastro il più possibile uniforme.

“Strutture Intelligenti”:
Prove sperimentali per la valutazione delle capacità di auto-adattamento su un modello di struttura muraria

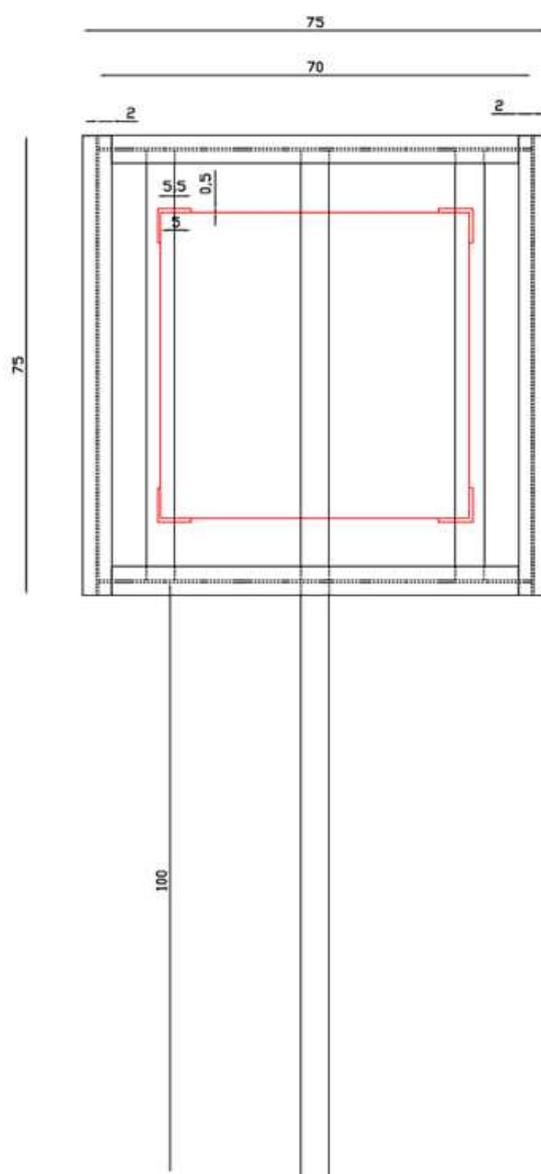


Fig.7.5 [Piastra inferiore]

Infine vengono saldati quattro angolari con funzione di supporto dell'intero pilastro rendendo così omogeneo anche il movimento della piastra con esso.

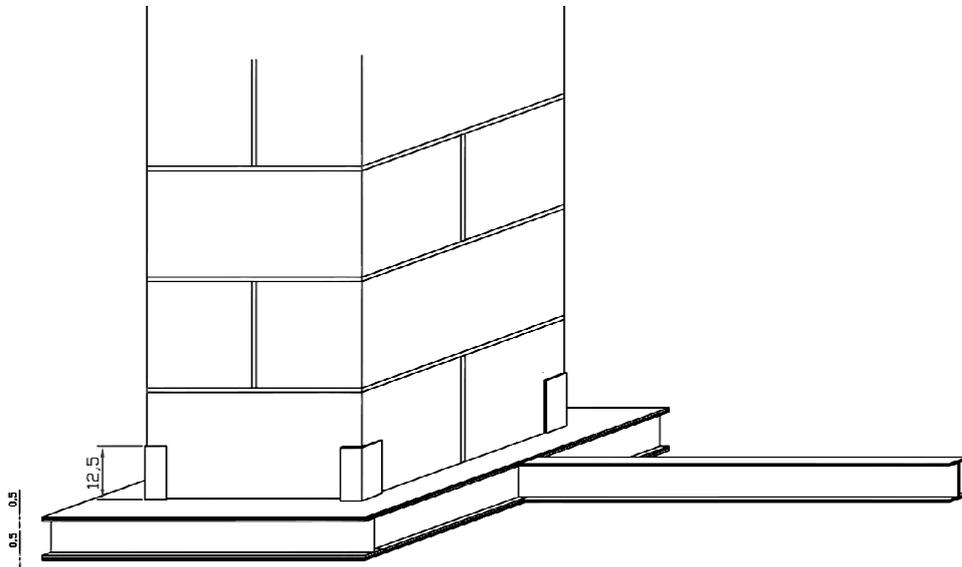


Fig.7.6 [Piastra inferiore]

- Piastra superiore

Per realizzare la struttura di prova è stato necessario valutare i carichi che entrano in gioco e di conseguenza i pesi delle piastre e il bilanciamento di quella superiore che risulta eccentrica rispetto al pilastro.

In questo modo si permette all'elemento di mantenersi in perfetto equilibrio prima di eseguire la prova.

Analizzando in Strauss l’inflessione della piastra (spessa 1 cm) sottoposta a un carico eccentrico di 75 kg si può notare che si ottengono valori non accettabili:

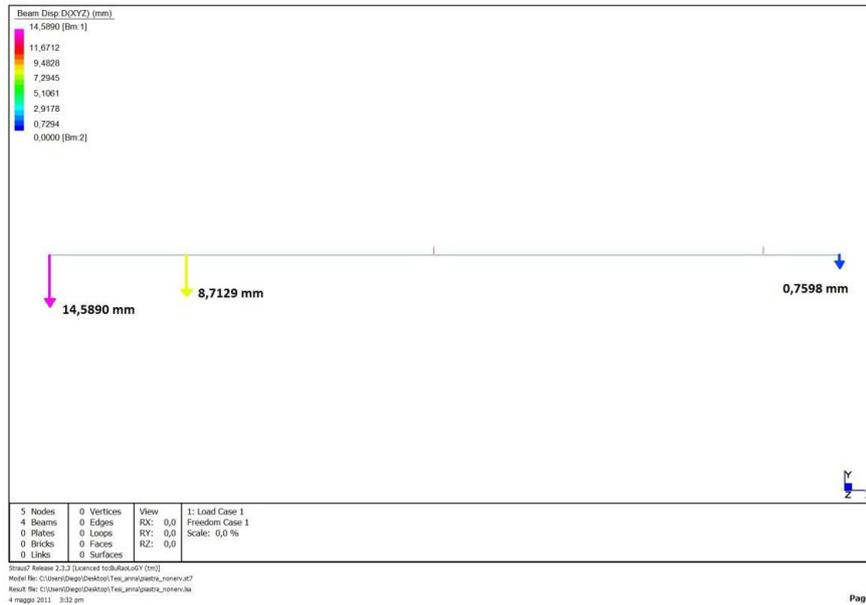


Fig.7.7 [Piastra superiore senza nervature]

Per questo vengono poste delle nervature che portano praticamente ad annullarsi l’inflessione:

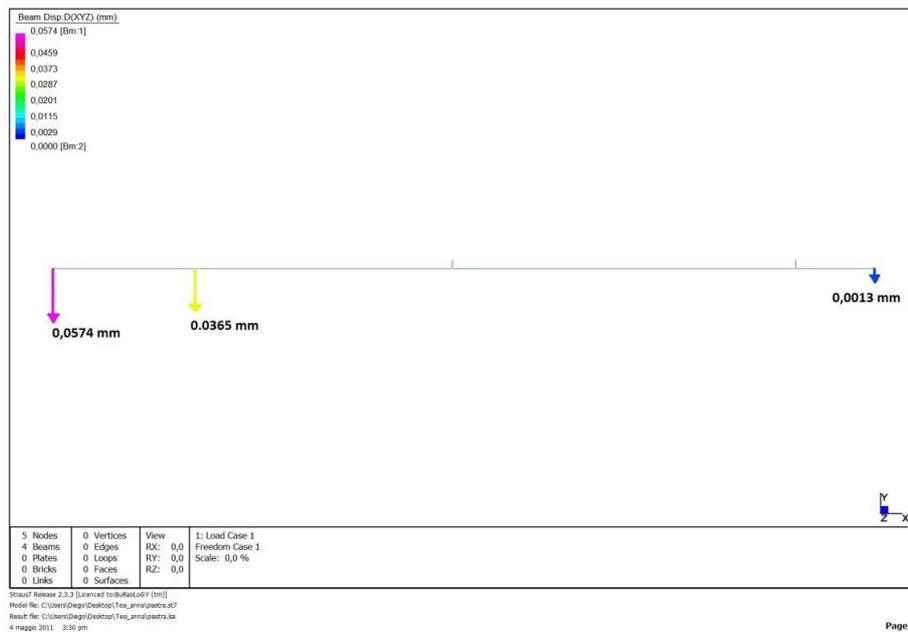


Fig.7.8 [Piastra superiore con nervature]

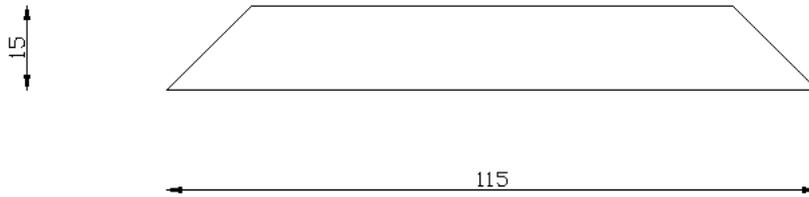


Fig.7.9 [Nervatura]

Area nervatura:

$$(115 + 85) \times \frac{15}{2} = 1500 \text{ cm}^3$$

Le nervature sono due allora l'area sarà di 3000 cm^3



Fig.7.10 [Piastra superiore]

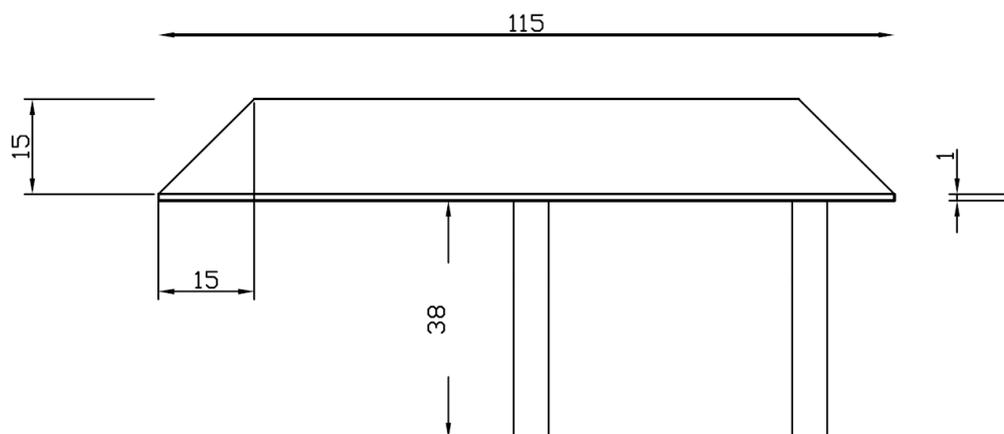


Fig.7.11 [Vista laterale della piastra]

..

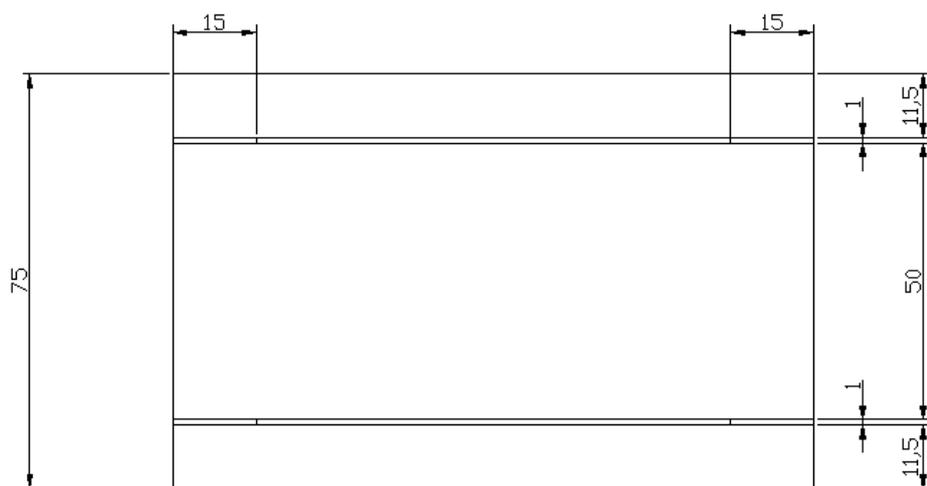


Fig. 7.12 [Vista della piastra dall'alto]

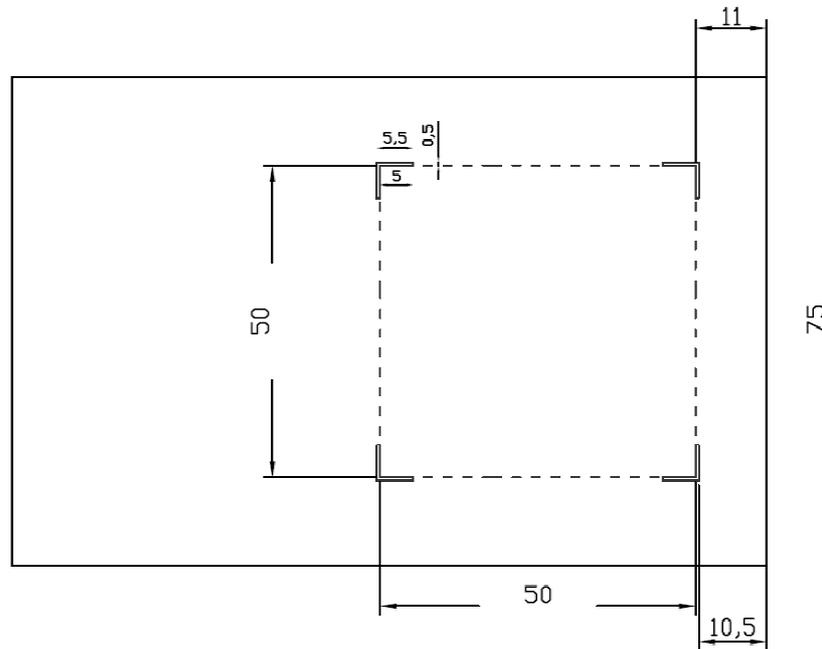


Fig.7.13 [Vista della piastra dal basso]

Volume della piastra:

$$(1,15 \times 0,75 \times 1) + (2 \times 0,15 \times 0,01 \times 1) = 0.011625 \text{ m}^3$$

Peso della piastra

Il peso specifico dell'acciaio Fe360 è $78,7 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

$$0.011625 \text{ m}^3 \times 78,7 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} = 0.9148875 \text{ KN} = 91.5 \text{ kg}$$

Questa piastra è stata appoggiata sopra al pilastro e per evitare che lo sbilanci creando una coppia dovuta al fatto che è eccentrica, è stato applicato un carico di contrappeso necessario alla stabilità della struttura.

Questa verrà posizionata come un carico appeso in corrispondenza della estremità della piastra superiore.

Per valutare l'entità della massa si impone l'annullarsi del momento, in modo che la risultante passi per il baricentro della colonna e quindi il sistema sia in equilibrio.

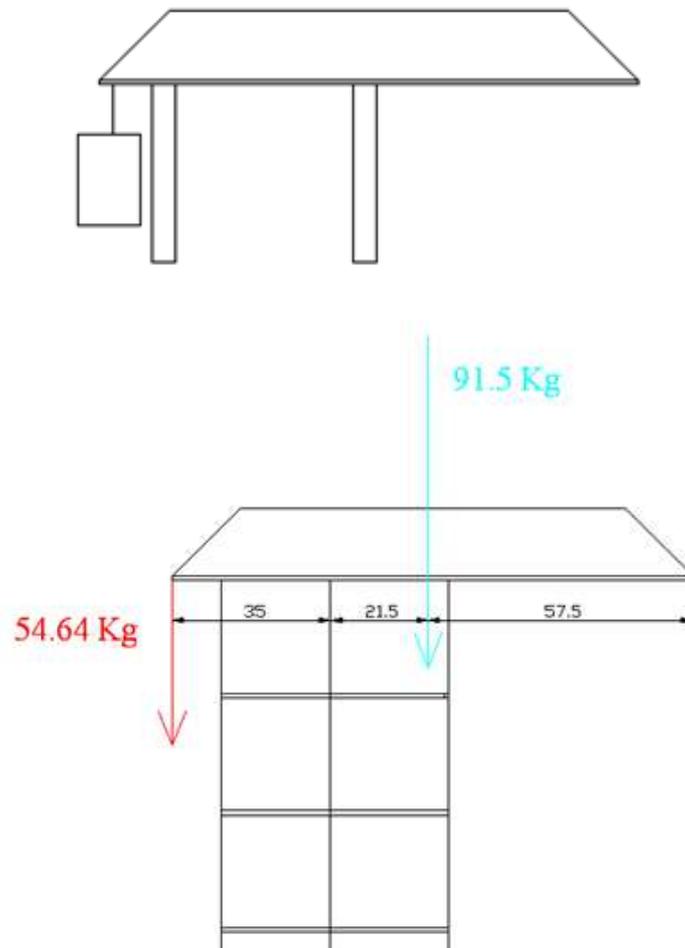


Fig.7.14 [Massa di contrappeso della piastra superiore]

$$91.5 \text{ kg} \times 21.5 \text{ cm} = X \times 36 \text{ cm}$$

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

La massa necessaria per il bilanciamento risulta essere di 54.64 kg.

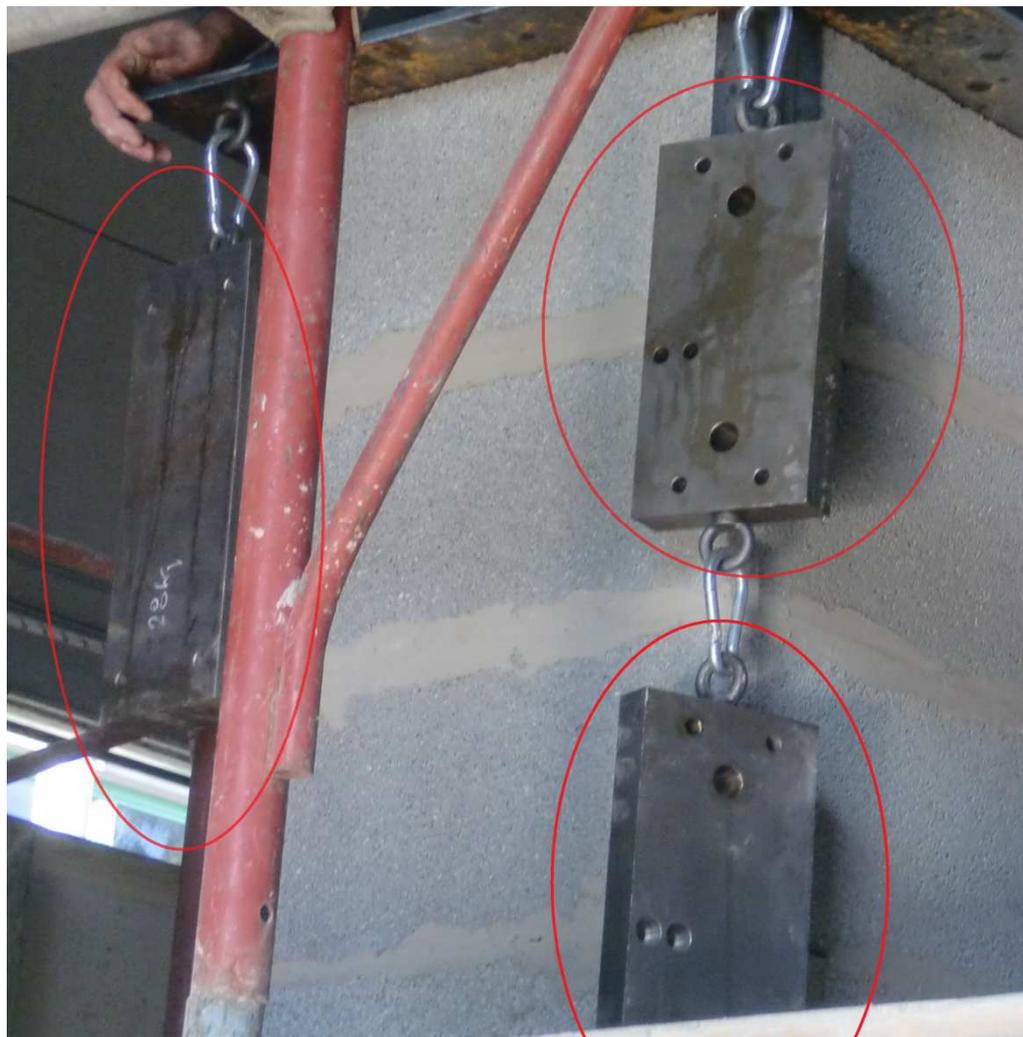


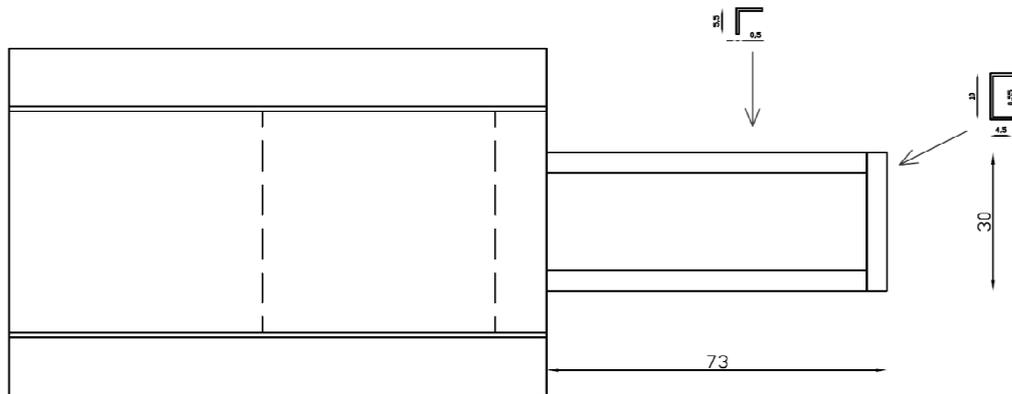
Fig.7.15 [Contrappesi]

Aggiunta del supporto per l'attuatore:

Dal momento che l'attuatore superiore presenta delle dimensioni notevoli con una lunghezza di circa 88 cm il posizionamento sulla piastra ha bisogno di un supporto solidale con essa.

Per questo è stato progettato con dei profili a C ed L un elemento unito alla piastra attraverso bullonatura.

Vista dall’alto:



Vista laterale:

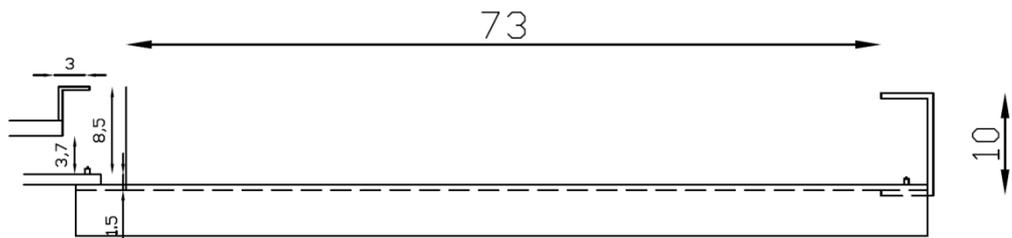


Fig.7.16 [Supporto per l’attuatore superiore]

Tra il profilo a C e il carrello, posto nella figura a sinistra, verrà inserito l’attuatore.



Fig.7.17 [Supporto per l’attuatore superiore]

7.1.4 Gomma

Per aumentare ancora di più il livello di deformabilità della struttura oltre ai blocchi in calcestruzzo alleggerito sono stati introdotti nei primi tre giunti delle piastrine di gomma PARA.

Di seguito è riportata la scheda tecnica:

	DUREZZA	PESO SPECIFICO	CARICO DI ROTTURA	ALLUNGAMENTO A ROTTURA %	RESISTENZA LACERAZIONE E (mm)	TEMPERATURA ESERCIZIO (min/max)	MODULO ELASTICO $\frac{N}{mm^2}$
<u>LASTRA PARA</u>	45	1.1	160	600	24	-50/+80	4,5

A causa del non lineare comportamento delle gomme con l'aumentare del carico per la definizione del modulo elastico è stato necessario effettuare delle prove di caratterizzazione presso il Lisg (Laboratorio di Ingegneria Strutturale Geotecnica).

Sono stati sottoposti ad una prova di compressione due campioni aventi dimensioni $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$:

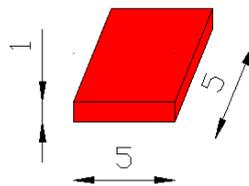


Fig.7.18 [Campione di gomma]



Fig.7.19 [Prova di compressione sul provino di gomma]

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

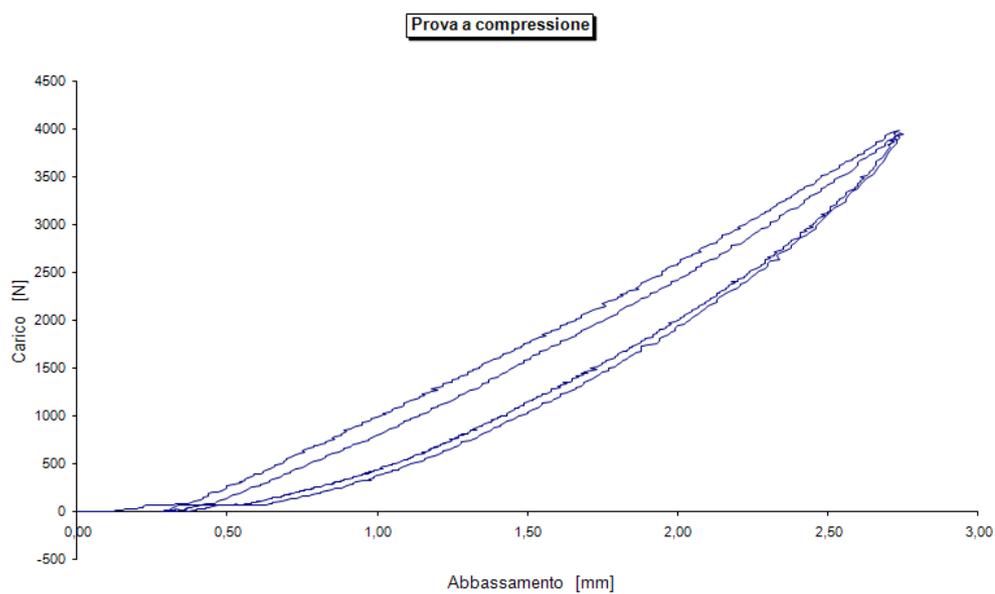


Fig.7.6 [Prima prova]

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

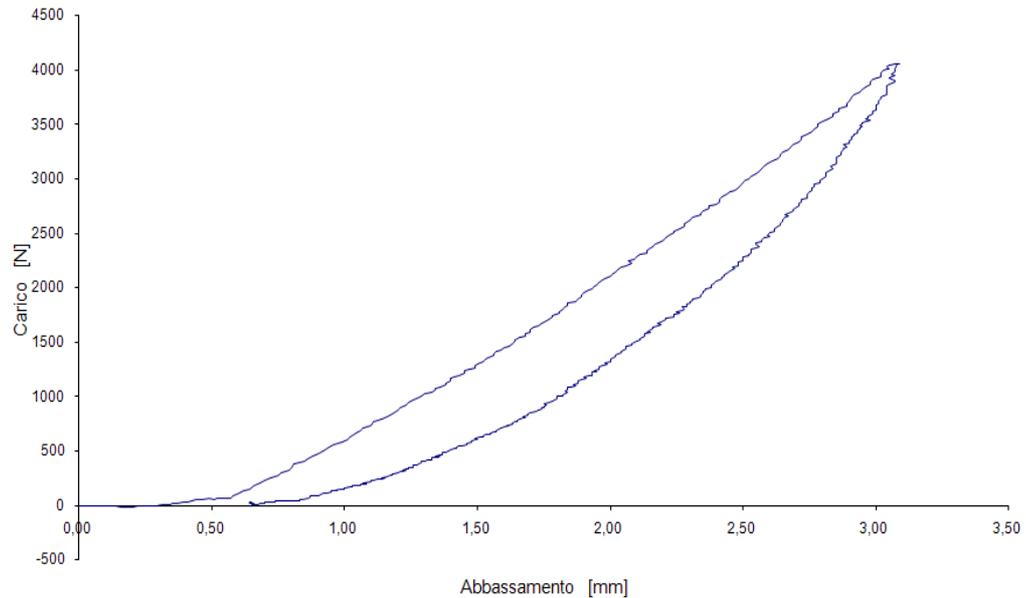


Fig.7.20 [Seconda prova]

Si è infine ripreso il primo provino, dopo averlo scaricato, per portarlo a un carico di 20000 N (gomma H) e si è visto come il comportamento della gomma, sia pressoché lineare per carichi bassi, fino a 2000 N e poi diventi non lineare per carichi più elevati, come mostra il diagramma di seguito riportato:

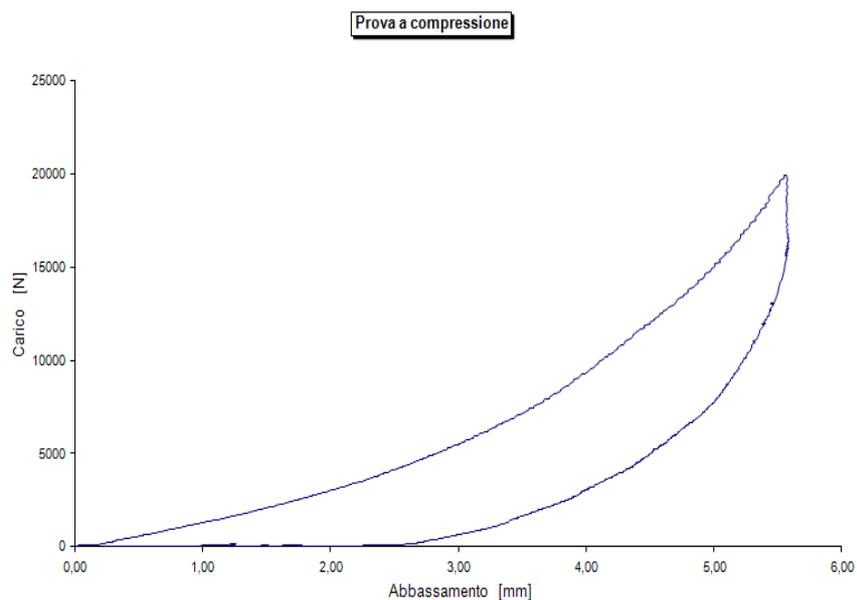


Fig.7.21 [Terza prova]

Sovrapponendo i tre grafici sopra riportati, limitandosi a considerare il ramo di carico fino a 2500 N, è possibile vedere come tutti e tre mostrino un andamento lineare e praticamente coincidente:

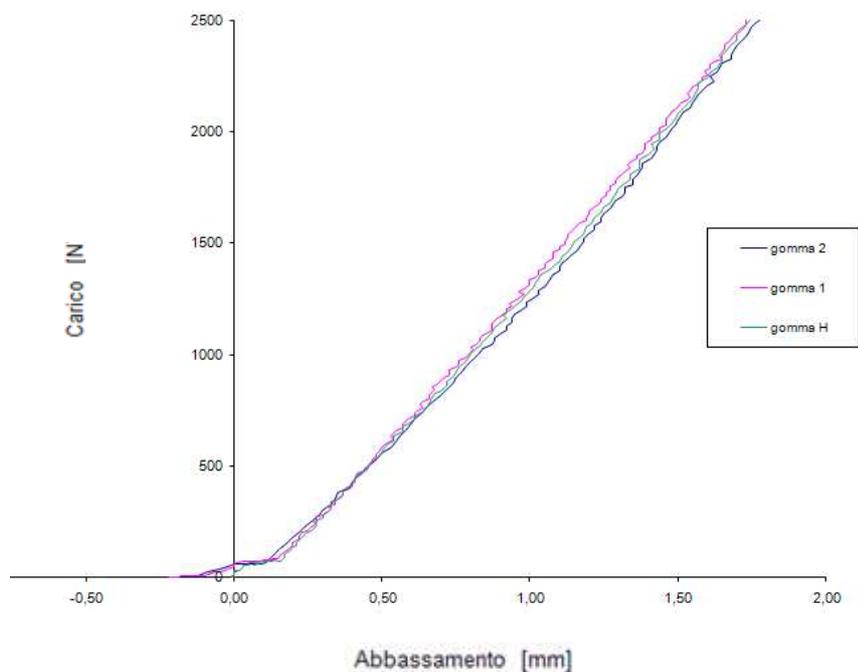


Fig.7.22 [Confronto tra prove]



Fig.7.23 [Strumentazione di prova]

Per calcolare il **modulo elastico** della gomma sono stati valutati:

- Peso totale (pilastro, piastra, masse aggiuntive) ;
- 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 delle masse disposte in sommità.

Peso del singolo blocco: 27 kg

Peso pilastro (10 blocchi): $27 \times 10 = 270 \text{ Kg} = 2,7 \text{ KN}$

Volume della piastra:

$$(1,15 \times 0,75 \times 1) + (2 \times 0,15 \times 0,01 \times 1) = 0,011625 \text{ m}^3$$

Peso della piastra:

$$78.5 \frac{KN}{m^3} \times 0.011625m^3 = 91,5 \text{ Kg} = 0,91 \text{ KN}$$

Massa di contrappeso:

$$\frac{91,5 \times 21,5}{36} = 54,64 \text{ kg} = 0,55 \text{ KN}$$

Massa di recupero del cedimento: 75 kg = 0,75 KN

Considerando anche la massa in sommità si stima un peso totale di circa

$$491\text{Kg} = 4,91 \text{ KN.}$$

- Deformazione dovuta ai soli pesi propri della struttura

Avendo un peso totale di 4,91 KN e essendo quattro i giunti di gomma su cui si scarica il peso, su ciascun giunto si considera agente un carico di 1,25 KN.

Si valuta allora nei diagrammi sforzo-deformazione ottenuti dalla prova di compressione l'entità delle deformazioni in corrispondenza di un carico pari a 1250 N:

gomma 1: 1,17 mm

gomma2 : 1,46 mm

gomma H : 0,97 mm

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

Si riporta per la prima prova a titolo di esempio anche la tabella Excel che fornisce i valori di abbassamento del primo ciclo di carico fino al valore di carico desiderato pari a 1,25 KN:

Carico N	Abbassamento mm	Carico N	Abbassamento mm	Carico N	Abbassamento mm
2	0,02	308	0,55	972	0,98
4	0,03	320	0,54	984	1
6	0,04	330	0,56	998	1,01
6	0,07	342	0,56	1010	1,02
8	0,08	354	0,57	1022	1,03
10	0,08	364	0,58	1034	1,02
10	0,10	376	0,59	1046	1,04
10	0,10	389	0,59	1061	1,05
10	0,12	401	0,61	1073	1,05
14	0,13	413	0,62	1087	1,06
14	0,14	427	0,62	1099	1,08
18	0,14	439	0,63	1111	1,09
20	0,15	453	0,64	1123	1,09
22	0,15	466	0,65	1137	1,09
26	0,16	478	0,66	1150	1,10
26	0,17	490	0,66	1164	1,11
30	0,19	504	0,68	1176	1,13
36	0,20	516	0,69	1190	1,14
43	0,21	528	0,69	1202	1,14
51	0,22	540	0,7	1216	1,16
59	0,22	555	0,7	1229	1,15
67	0,23	567	0,71	1241	1,17
73	0,25	581	0,72	1255	1,18
73	0,25	593	0,73		
73	0,26	607	0,74		
75	0,27	619	0,76		
75	0,29	634	0,75		
75	0,30	648	0,76		
75	0,31	660	0,77		
77	0,32	674	0,79		
79	0,33	688	0,79		
79	0,33	698	0,8		
81	0,34	710	0,81		
81	0,36	725	0,83		
83	0,35	739	0,83		
87	0,37	751	0,84		
101	0,38	763	0,86		
115	0,39	777	0,85		
130	0,41	789	0,86		
144	0,42	802	0,88		
158	0,42	818	0,88		
172	0,44	830	0,89		
186	0,44	842	0,9		
200	0,45	854	0,89		
210	0,47	866	0,91		
225	0,48	882	0,92		
235	0,49	895	0,93		
247	0,50	907	0,95		
261	0,50	919	0,95		
271	0,50	933	0,95		
281	0,52	943	0,97		
296	0,54	957	0,98		

- Deformazione a seguito del cedimento

Si considera 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 1,25 N bisognerà considerare 2,50 N e si ottiene:

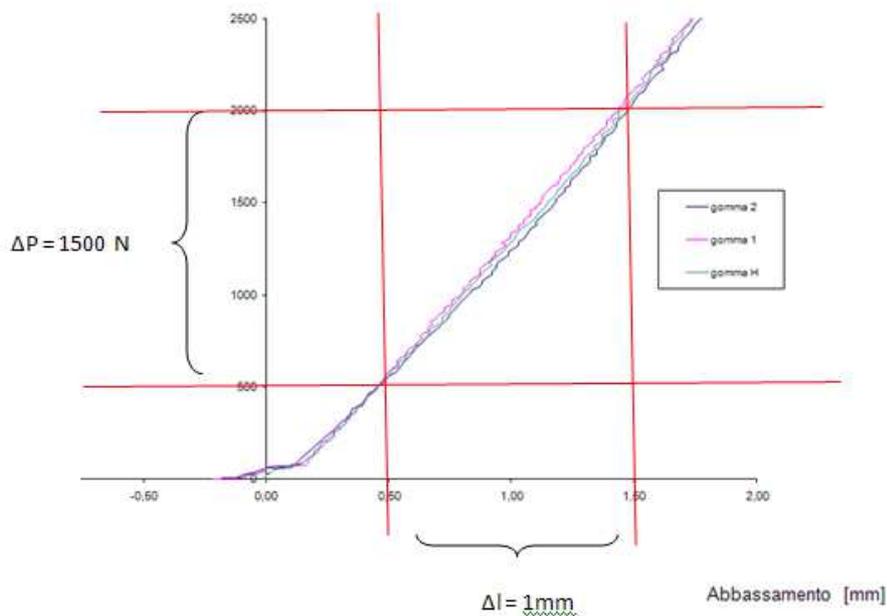
gomma 1: 1,95 mm

gomma2 : 2,23 mm

gomma H : 1,74 mm

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

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 :

$$\Delta\sigma = \frac{1500 \text{ N}}{2500 \text{ mm}^2} = 0,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \Delta\varepsilon = \frac{1 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{0,6}{0,1} = 6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sono stati realizzati quindi i tre giunti sovrapponendo due strati di gomma delle dimensioni dei campioni testati incollati attraverso del silicone sia tra strato e strato sia con i blocchi adiacenti.



Fig.7.24 [Incollaggio dei giunti di gomma]

7.1.5 Attuatori

- LA31

L'attuatore disposto all'appoggio della piastra inferiore che consente di ottenere la rotazione dell'elemento simulando così il cedimento è LA31C.



Fig.7.25 [Attuatore inferiore]

LA31 è un attuatore potente e silenzioso, utilizzato per svariate applicazioni nei vari settori.[10]

Dimensioni LA31

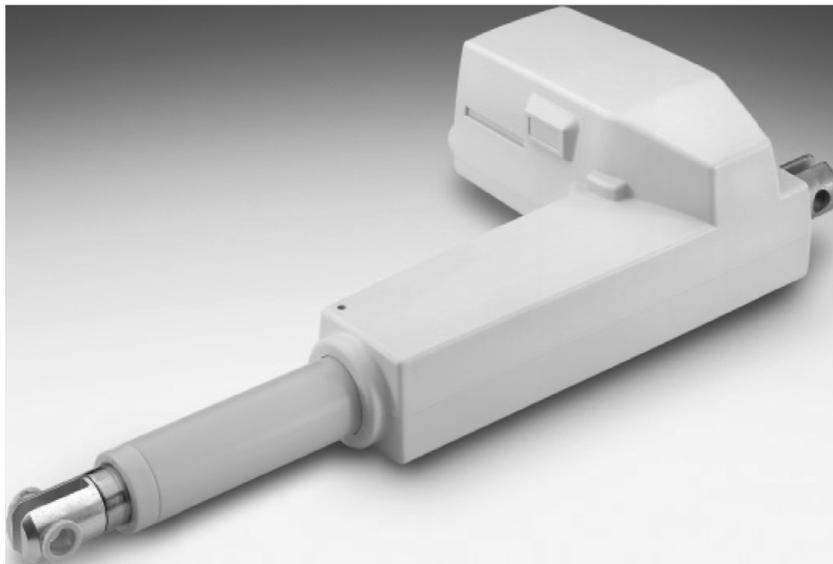
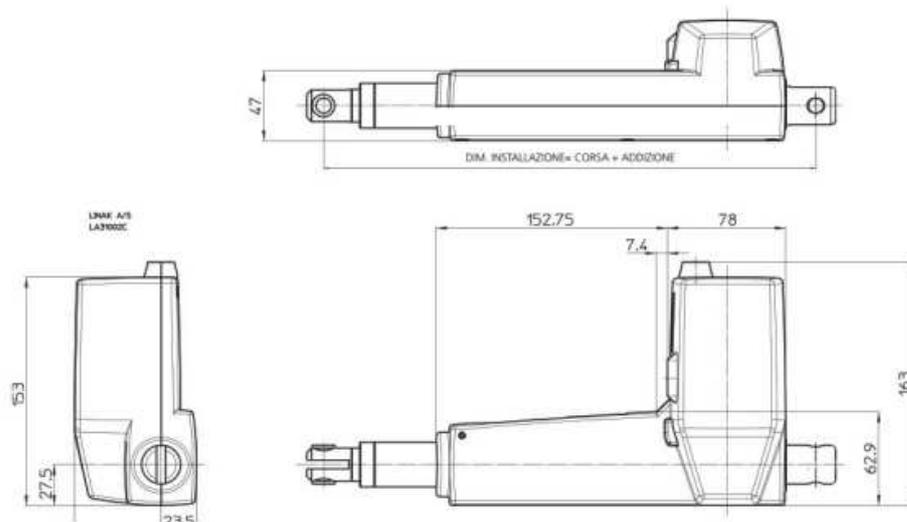


Fig.7.26 [Attuatore LA31]

Caratteristiche:

- *Motore a magneti permanenti a 24 V DC*
- *Forza fino a 6000 N in spinta e 4000 N in tiro*
- *Corsa 100 mm e passo 3 mm*
- *Occhiello pistone a forcella in acciaio elettro-galvanizzato*
- *Carcassa in materiale plastico ad alta resistenza*
- *Grado di protezione standard: IPX4*
- *Cavo diritto da 2.25 m*
- *Fine-corsa interni (non regolabili)*
- *Tube pistone esterno Ø30 mm protetto con vernice a polveri*
- *Fissaggio posteriore zincato*
- *Tube interno in acciaio inox resistente a corrosione ed usura*
- *Livello di rumorosità 48 dB (A); metodo DS/EN ISO 3746, senza carico*

La corsa del pistone necessaria per avere una rotazione di $0,5^\circ$ risulta essere di 1,23 cm.

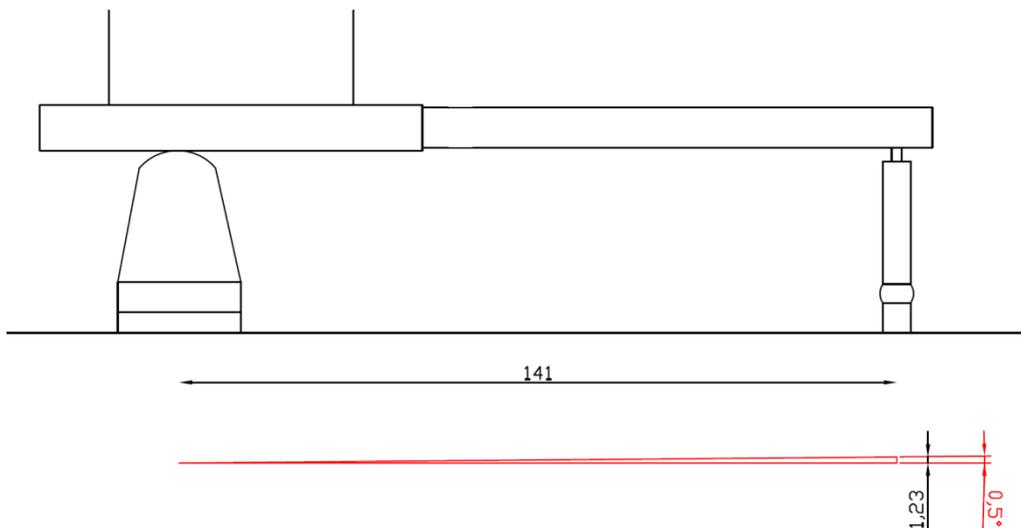


Fig.7.27 [Spostamento del LA31]

- **LA35**

L'attuatore LA35 fa parte della gamma TECHLINE™ ed è caratterizzato dal suo design robusto, ideale per lavorare in condizioni estreme.

L'attuatore LA35 è ideale per applicazioni dinamiche su attrezzature utilizzate all'esterno come macchinari agricoli, forestali e costruzioni di macchine pesanti.

Inoltre l'attuatore LA35 è molto silenzioso e potente, quindi adatto per numerose applicazioni interne ed esterne.[11]

Dimensioni:

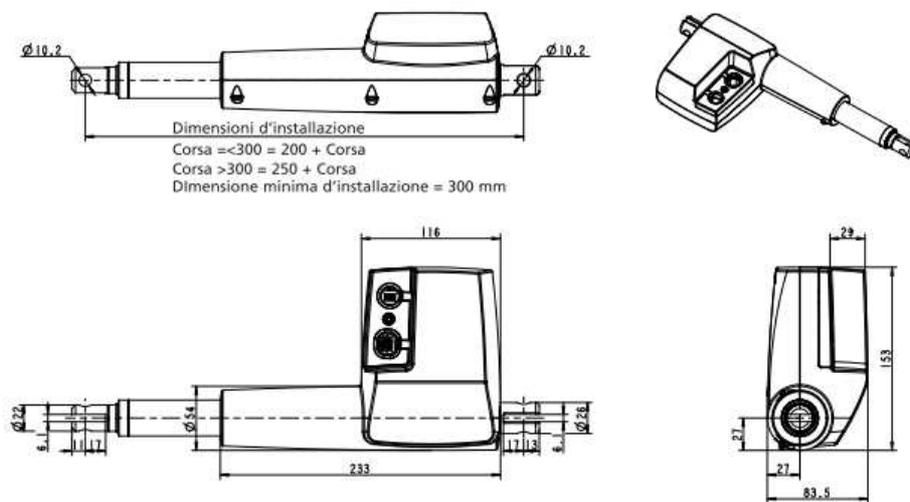


Fig.7.28 [Attuatore LA35]

Caratteristiche:

- *Motore a magneti permanenti 12 / 24V DC*
- *Max forza: 6000 N in spinta e 4000 N in tiro*
- *Robusta carcassa in alluminio per condizioni gravose*
- *Grado di protezione: IP66 per uso esterno (dinamico).*
- *Freno integrato, elevata capacità di autofrenanza*
- *Fine corsa interni*
- *Tube interno del pistone in acciaio inossidabile*
- *Livello di rumorosità 48dB(A); misurato con metodo DS/EN ISO 3746, senza carico applicato sull' attuatore*
- *Dispone di un sistema integrato di controllo analogico degli spostamenti.*

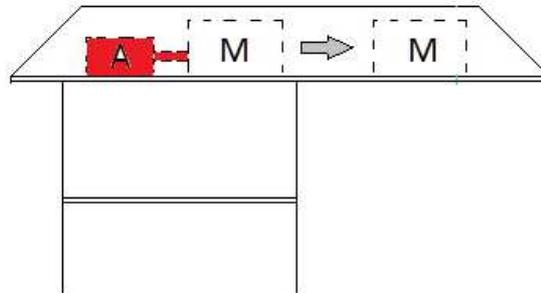


Fig.7.29 [Posizionamento dell'attuatore LA35]

7.2 Analisi preliminare sulla stabilità della struttura

Per prima cosa si è analizzata la stabilità al ribaltamento della struttura, si è così verificato che la risultante di tutti i carichi cadesse dentro al nocciolo d’inerzia della sezione.

Le forze in gioco e gli assi di riferimento sono:

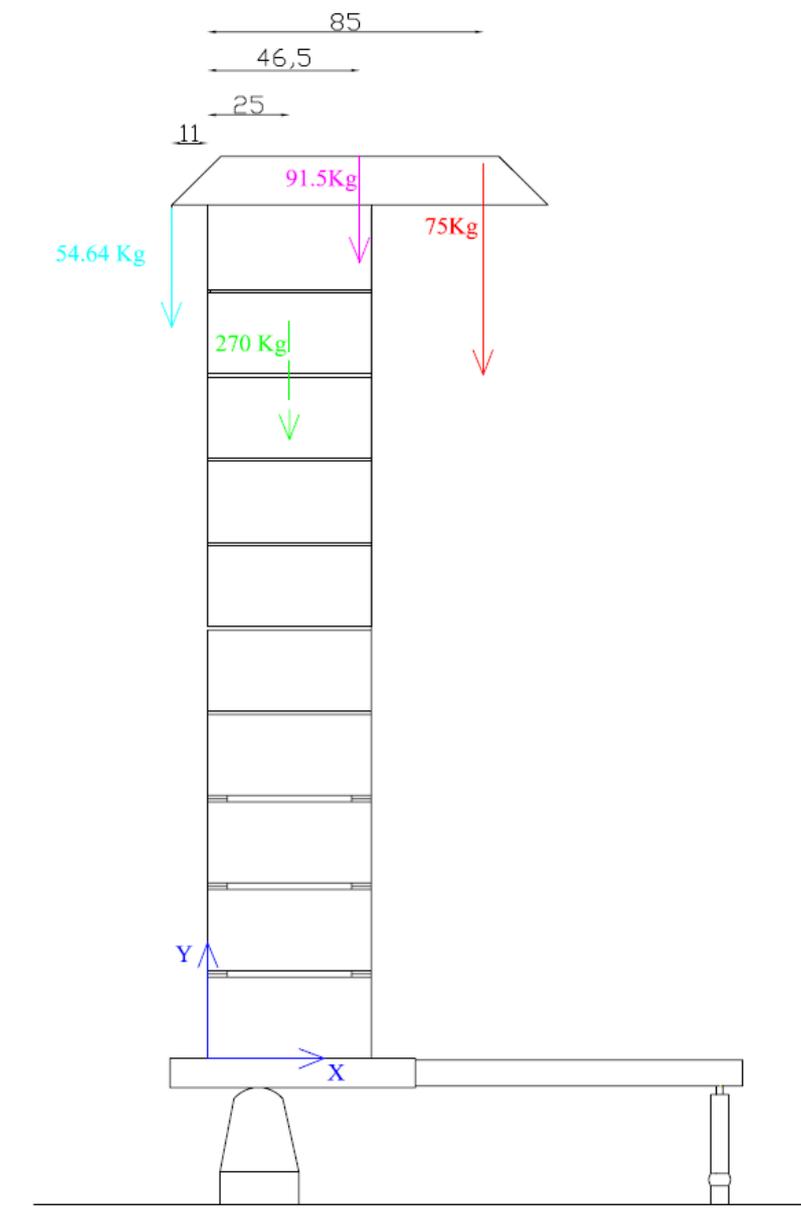


Fig.7.30 [Verifica a ribaltamento]

La distanza della risultante dal centro degli assi risulta:

$$X_G = \frac{270 \cdot 25 + 91,5 \cdot 46,5 + 75 \cdot 85 - 56 \cdot 11}{270 + 91,5 + 75 + 56} = 34 \text{ cm}$$

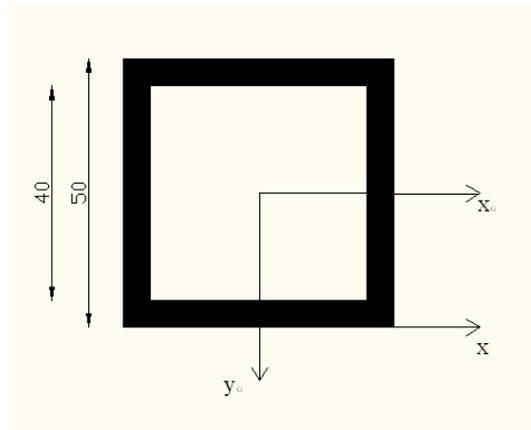
La distanza dal baricentro del pilastro sarà perciò:

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

Se la sezione fosse piena il nocciolo centrale d'inerzia arriverebbe a una distanza dal baricentro di $b/6$ e quindi essendo $b = 50 \text{ cm}$ otterrei 8,3 cm.

In realtà la sezione è cava e il nocciolo risulta più grande.

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



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

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

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

$$S_x = S_y$$

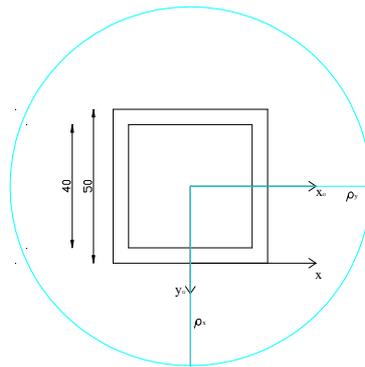
$$\text{Momento principale di inerzia: } I_x = I_y = \frac{500^4}{12} - \frac{400^4}{12} = 307500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

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

$$\frac{\xi^2}{\rho_\eta^2} + \frac{\eta^2}{\rho_\xi^2} = 1$$

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 ρ_x e ρ_y perpendicolarmente agli assi x_g e y_g , a partire dal baricentro G, come mostrato in figura 5.31. L'ellisse è in realtà un cerchio, dato che la sezione è quadrata.

Raggio giratore principale di inerzia $\rho_x = \rho_y = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{307500 \cdot 10^4}{90000}} = 584 \text{ mm} = 58,4 \text{ cm}$.



Per l'individuazione del 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.

$$AG = BG = \frac{\rho_x^2}{250} = \frac{h}{6} = 1364,22 \text{ mm} = 13,64 \text{ cm}$$

Un'altra possibile verifica è fattibile nel punto in cui gli angolari superiori della piastra, che hanno una lunghezza di 38 cm, terminano:

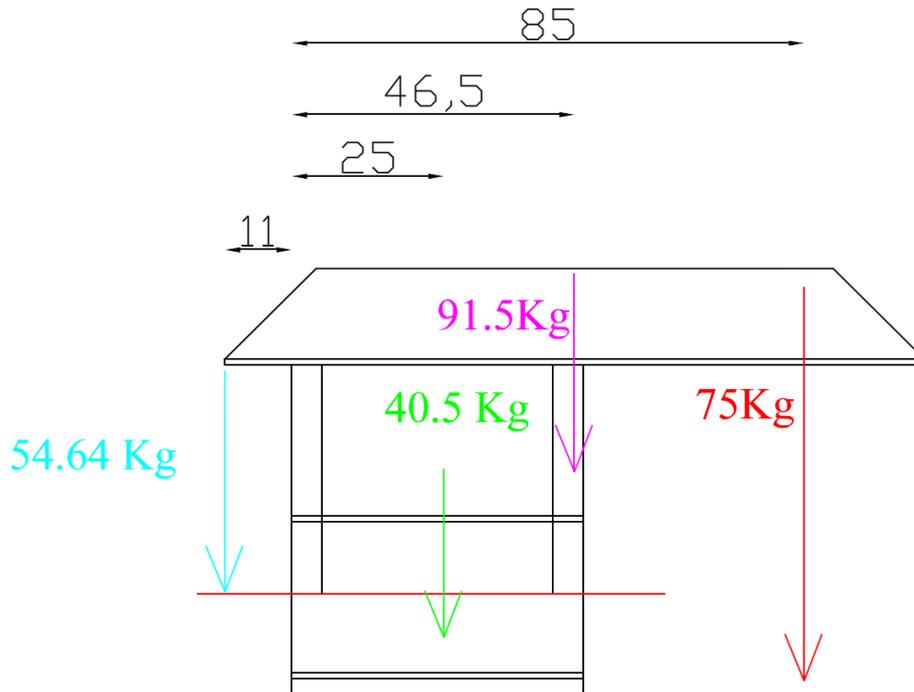


Fig.7.31 [Verifica a ribaltamento per la condizione più gravosa]

In questo caso:

$$X_G = \frac{40,5 \cdot 25 + 91,5 \cdot 46,5 + 75 \cdot 85 - 56 \cdot 11}{40,5 + 91,5 + 75 + 56} = 42 \text{ cm}$$

La distanza dal baricentro è perciò:

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

Per garantire la sicurezza anche nel caso più sfavorevole che prende in considerazione il fatto che l'intera piastra superiore rompa all'altezza degli angolari il pilastro e si distacchi, visto l'elevato valore di S ottenuto, si fa in modo che gli spostamenti avvengano in maniera lenta e controllata istante per istante; così da poter bloccare il movimento, se ce ne fosse la necessità, prima che la struttura possa cedere.

7.3 Modellazione della struttura

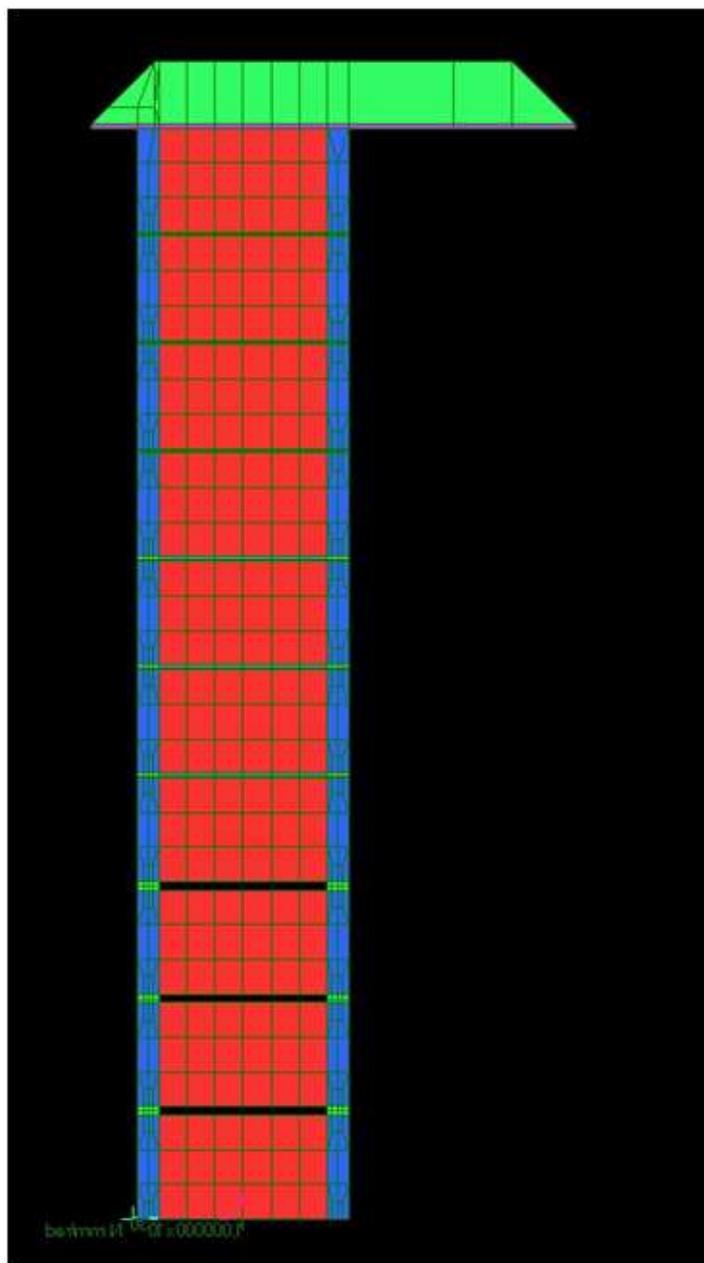


Fig.7.32 [Modello della struttura]

“Strutture Intelligenti”:

Prove sperimentali per la valutazione delle capacità di auto-adattamento su un modello di struttura muraria

Nella modellazione in Strauss è stato applicato, attraverso una rotazione di 0.5°, un cedimento all’elemento.

Valutando lo spostamento orizzontale nei vari nodi della mesh lungo l’asse si ottiene:

altezza	spost.	altezza	spost.
0	0	1413,333	14,1359
83,3333	0,7272	1496,667	15,0179
166,6667	1,4545	1580	15,8999
250	2,1817	1585	15,9528
270	2,3991	1590	16,0058
353,3333	3,1863	1673,333	16,8878
436,6667	3,9736	1756,667	17,7698
520	4,7608	1840	18,6518
540	4,9919	1845	18,7047
623,3333	5,8307	1850	18,7577
706,6667	6,6695	1933,333	19,6397
790	7,5083	2016,667	20,5217
810	7,7503	2100	21,4038
893,3333	8,6323	2105	21,4567
976,6667	9,5142	2110	21,5096
1060	10,3962	2193,333	22,3916
1065	10,4491	2276,667	23,2737
1070	10,5021	2360	24,1557
1153,333	11,3841	2365	24,2086
1236,667	12,266	2370	24,2615
1320	13,148	2453,333	25,1436
1325	13,201	2536,667	26,0256
1330	13,2539	2620	26,9076

Risulta uno spostamento dell’asse più o meno lineare lungo l’altezza con un valore in sommità di 26,9 mm.

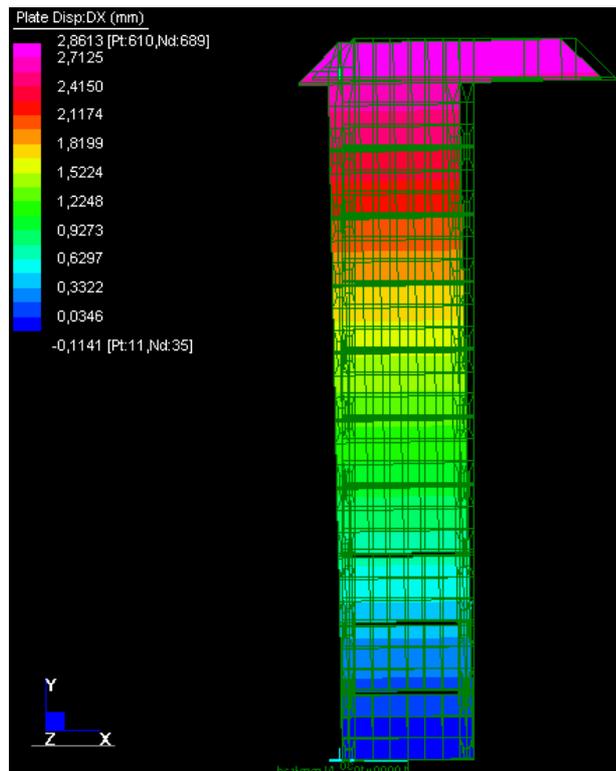


Fig.7.33 [Struttura e deformata]

Procedendo con l'analisi emerge che per recuperare la verticalità dell'asse bilanciando così la rotazione sono necessari 75 kg posti a una distanza di 60 cm dal centro del pilastro.

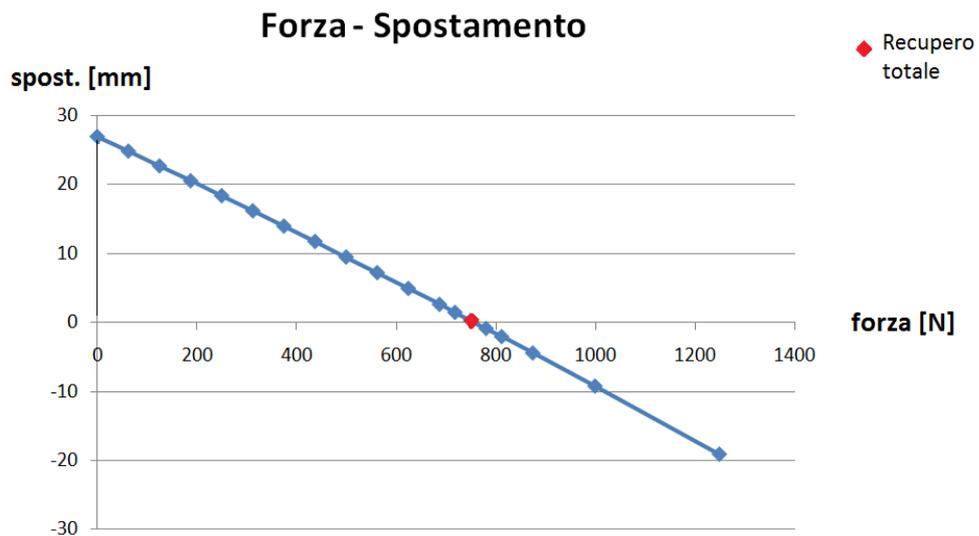


Fig.7.34 [Diagramma forza-spostamento]

N	mm
0	26,9076
62,5	24,7906
125	22,6559
187,5	20,5026
250	18,3308
312,5	16,1403
375	13,9308
437,5	11,7017
500	9,4534
562,5	7,1858
625	4,8981
687,5	2,59
718,75	1,4284
750	0,2615

Fig.7.31 [Relazione forza-spostamento]

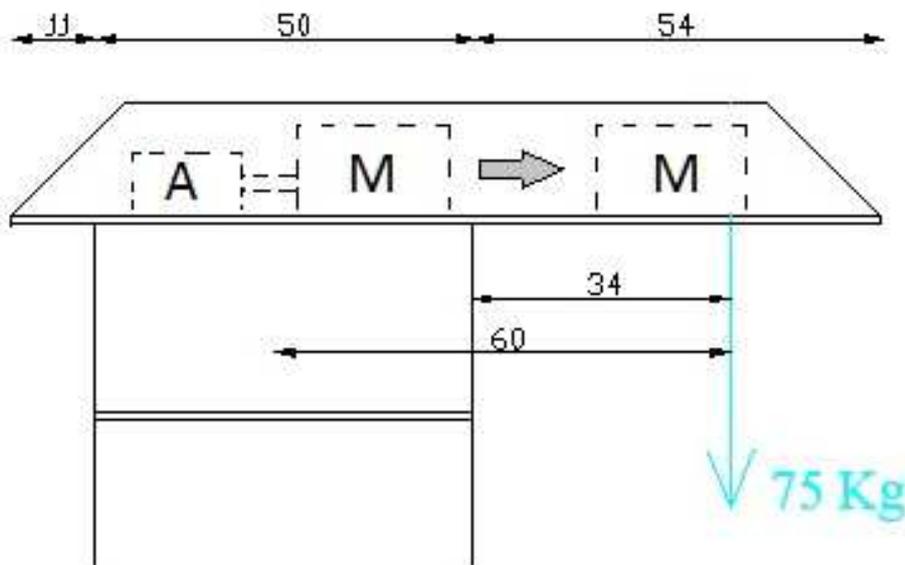


Fig.7.32 [Massa per il recupero del cedimento]

Dalla posizione dell'asse del pilastro dopo il cedimento: con in sommità uno spostamento di 26,9 mm (rappresentato nel grafico dalla retta blu), si dovrebbe dopo il completo spostamento della massa ottenere una verticalizzazione

dell’asse con il recupero di tutto lo spostamento a meno di un piccolissimo residuo in sommità (linea rossa).

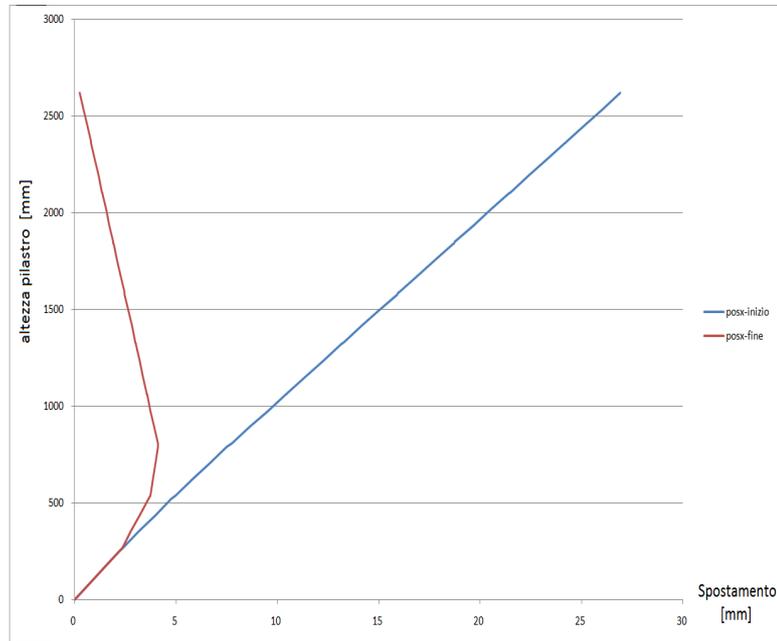


Fig.7.33 [Spostamento dell’asse]

Infatti si ottengono sempre in relazione ai vari nodi della mesh posizionati sull’asse i seguenti valori dopo il recupero con un effettivo residuo di 0,26 mm, trascurabile considerando tutte le variabili in gioco.

altezza residuo		altezza residuo	
0	0	1413,333	2,824
83,3333	0,7272	1496,667	2,6474
166,6667	1,4543	1580	2,4708
250	2,1815	1585	2,4602
270	2,3525	1590	2,4496
353,3333	2,7827	1673,333	2,2729
436,6667	3,2128	1756,667	2,0961
520	3,643	1840	1,9193
540	3,7246	1845	1,9087
623,3333	3,8523	1850	1,8981
706,6667	3,9801	1933,333	1,7212
790	4,1078	2016,667	1,5443
810	4,1008	2100	1,3673
893,3333	3,9246	2105	1,3567
976,6667	3,7484	2110	1,3461
1060	3,5721	2193,333	1,169
1065	3,5615	2276,667	0,9919
1070	3,5509	2360	0,8148
1153,333	3,3746	2365	0,8041
1236,667	3,1982	2370	0,7935
1320	3,0217	2453,333	0,6163
1325	3,0111	2536,667	0,4389
1330	3,0006	2620	0,2615

Capitolo 8: Struttura di prova

8.1 Realizzazione della struttura

I vari elementi vengono assemblati come mostrato in figura:

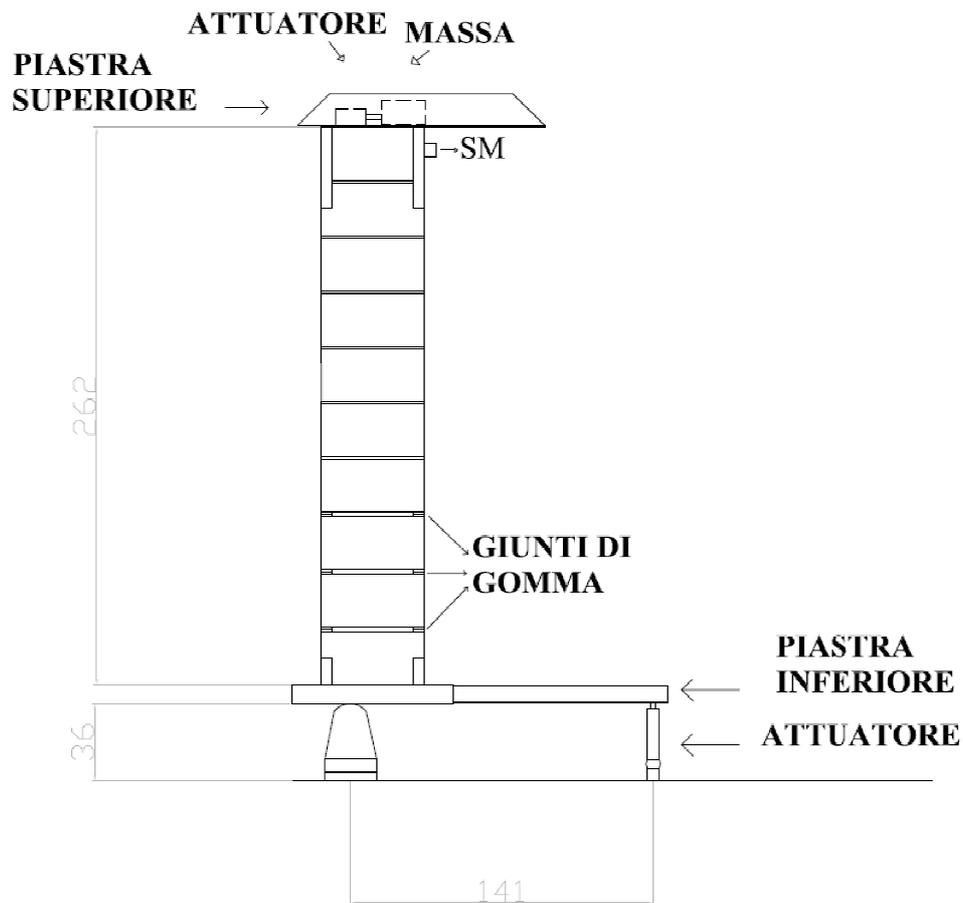


Fig.8.1 [Struttura di prova]

Il pilastro è realizzato con 10 blocchi di dimensioni $50 \times 25 \times 50 \text{ cm}^3$, 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 una altezza di 2,62 m.

Il pilastro così realizzato poggia su una piastra di acciaio, $75 \times 75 \text{ cm}^2$ e spessa 9 cm, a cui è saldato un IPE lungo 100 cm che funge da braccio.

Il tutto poggia ad una estremità su un appoggio cilindrico (alto 36 cm), e dall'altra sull'attuatore.

In sommità è disposta un'altra piastra $75 \times 115 \text{ cm}^2$, spessa 1 cm e con delle nervature alte 15 cm che ne evitano l'inflessione.

L'altezza totale è di circa 330 cm.

La struttura viene realizzata direttamente sopra la piastra, senza la necessità di utilizzare un muletto o un carroponete.

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

Il tutto risulta essere un unico corpo agganciato poi ad un contrasto rigido fissato a terra posto in laboratorio già accanto alla zona adibita per la prova.

Il ponteggio realizzato con una cavalla e mezzo (altezza $180 + 90 = 270 \text{ cm}$ e larghezza 105 cm) permette di lavorare a tutte le possibili altezze in sicurezza.

Inoltre sono stati aggiunti degli elementi orizzontali nei lati del ponteggio per far sì che anche se si verificasse un eventuale sbandamento della struttura questa si possa appoggiare alle protezioni senza nessun rischio per chiunque sia nei pressi dell'area in fase di costruzione.

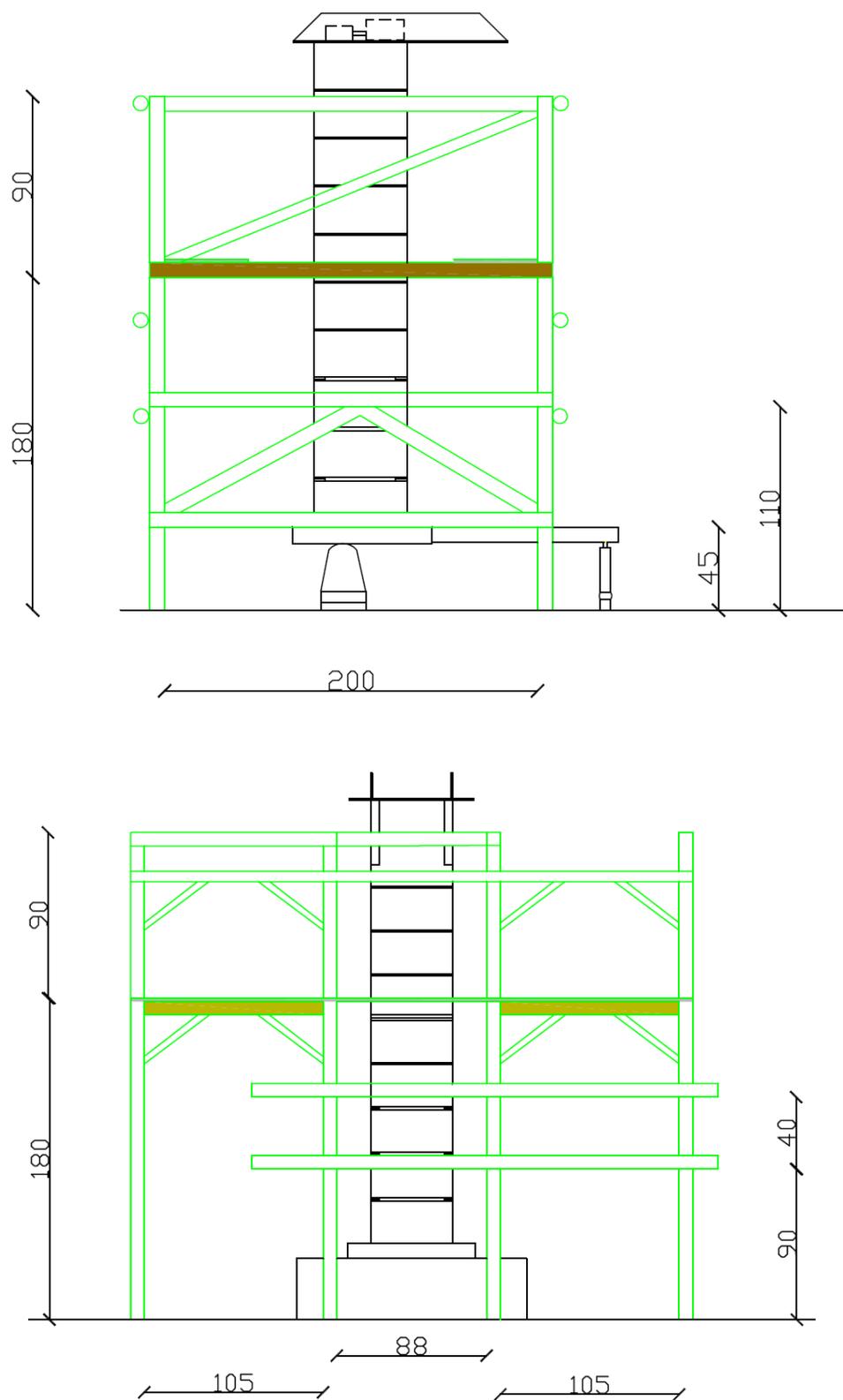


Fig.8.2 [Vista del ponteggio]

Giunti all'ultimo blocco è stata calata la piastra superiore e le varie masse di bilanciamento della piastra.



Fig.8.3 [Posizionamento della piastra superiore]

Realizzazione della massa

La massa che si deve muovere in sommità, per il recupero della verticalità dell’asse, ha un peso di 75 Kg ed è stata realizzata mediante la sovrapposizione di piastre di acciaio che vengono posizionate al di sopra di un carrello scorrevole creando un blocco unico in modo da avere la maggiore stabilità possibile.



Fig.8.4 [Carrello con massa]

Il tutto è collegato al secondo attuatore che ne regola il movimento seguendo le indicazioni fornitegli dalle misure rilevate dallo Smart Brick .

8.2 Strumentazione di misura

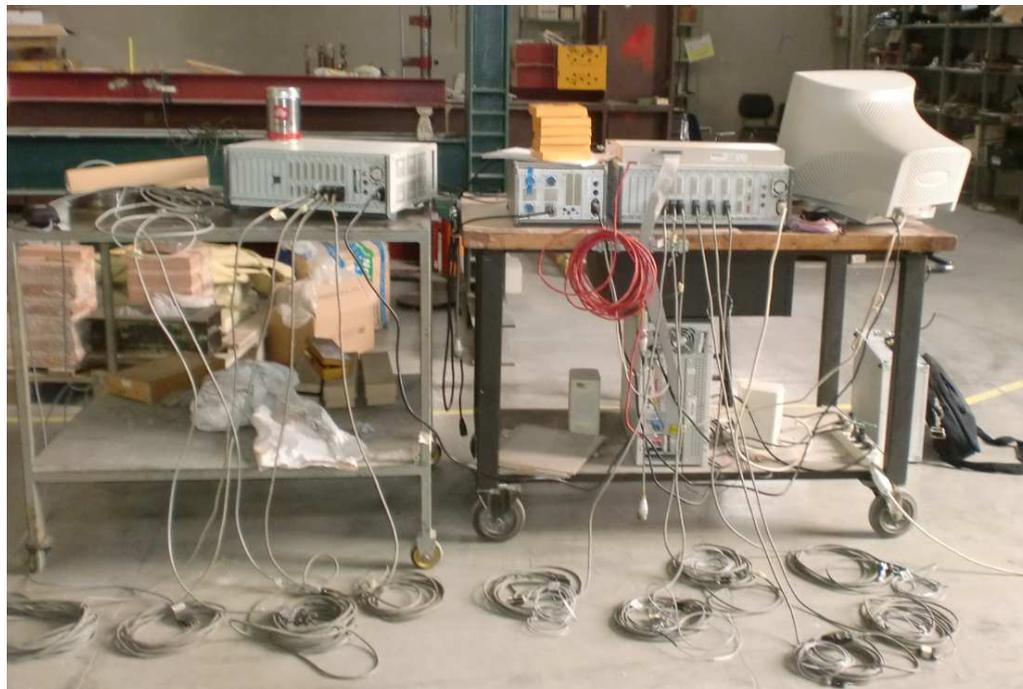


Fig.8.5 [Strumentazione di misura]

8.2.1 Trasduttori di spostamento

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



Fig.8.6 [Trasduttore di spostamento]

Il modello utilizzato in laboratorio è UB-5 con la seguente scheda tecnica:

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

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

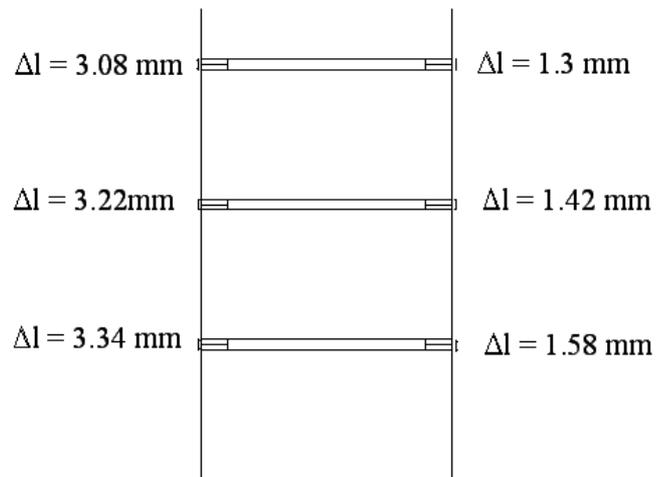


Fig.8.7 [deformazione dei giunti di gomma]



Fig.8.8 [Giunti di gomma]



Fig.8.9 [Posizionamento dei giunti di gomma]

8.2.2 LVDT



Fig.8.10 [LVDT]

Degli LVDT sono invece stati disposti lungo il pilastro a tre altezze significative:

- 121 cm
- 170 cm
- 241 cm



Fig.8.11 [Montaggio LVDT]

Un altro strumento di misura degli spostamenti è posto per avere un ulteriore controllo sull’attuatore di base.



Fig.8.12 [LVDT applicato all’attuatore inferiore]

Scheda tecnica:

Tipo		WA10	WA20	WA50	WA100	WA200
Spostamento nominale	mm	0.....10	0.....20	0.....50	0...100	0....200
Sensibilità nominale	mV/V	80				
Tolleranza	%	±1				
Tolleranza a zero	mV/V	±8				
Input di Resistenza	Ω	100 ± 10%	350±10%			
Output di Resistenza	Ω	570± 10%	680±10%			
Non linearità	%	≤ ±0.2 on ≤ ± 0.1				

È stata prima preparata la superficie in quanto, essendo irregolare, poteva creare dei problemi alla precisione dello strumento.

Una volta pulita sono stati applicati dei vetrini e agganciati al ponteggio dei bracci di supporto allo strumento stesso.



Fig.8.13 [Punto di misura del LVDT]

Vengono posizionati come mostrato in figura:

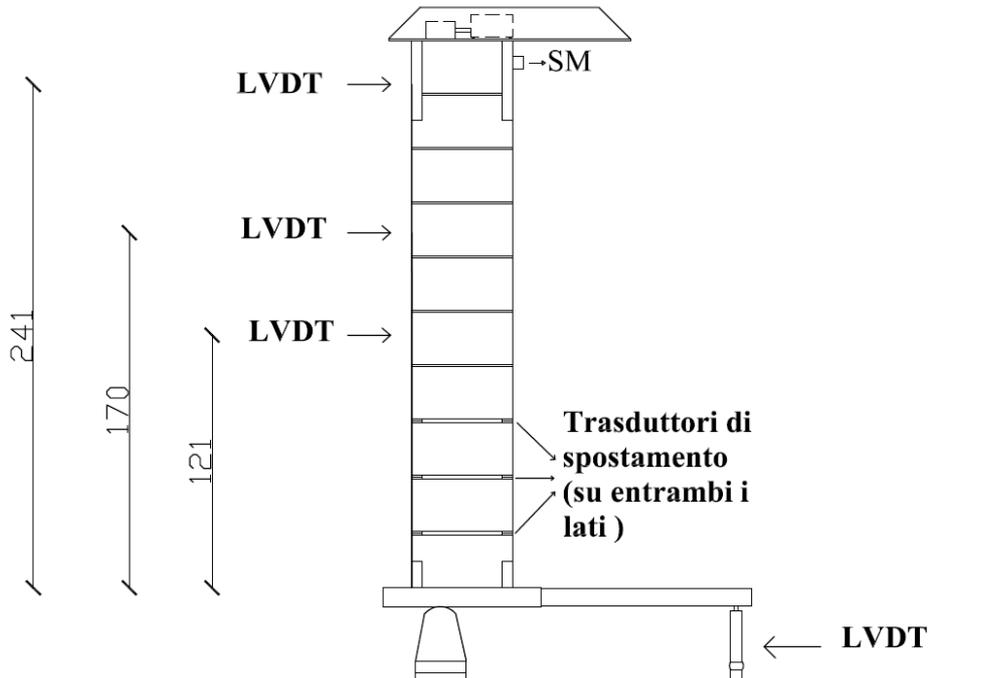


Fig.8.14 [Posizionamento degli strumenti di misura]

La gabbia ci ha permesso di installare i dispositivi di controllo in sicurezza e senza difficoltà.

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

Ciò che ci si aspetta dalla prova è che a meno di piccoli errori gli strumenti registrino gli stessi valori di spostamento orizzontale dell’asse sia dopo il cedimento sia dopo il recupero.

altezza	spost. Cedimento	residuo recupero	[mm]
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	
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	
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	

Alle quote prescelte :

- a 1210 mm corrisponde uno spostamento dovuto al cedimento di 12,2 mm con un residuo dopo lo spostamento della massa di 3,2 mm
- a 1700 mm corrisponde uno spostamento dovuto al cedimento di 17,5 mm con un residuo dopo lo spostamento della massa di 2,1 mm
- a 2410 mm corrisponde uno spostamento dovuto al cedimento di 25 mm con un residuo dopo lo spostamento della massa di 0,6 mm



Fig.8.15 [Posizionamento della piastra superiore]

8.2.3 Smart Brick

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

In più riesce attraverso un software a gestire lo spostamento dell'attuatore in sommità, così da far muovere la massa e ottenere il recupero degli spostamenti.

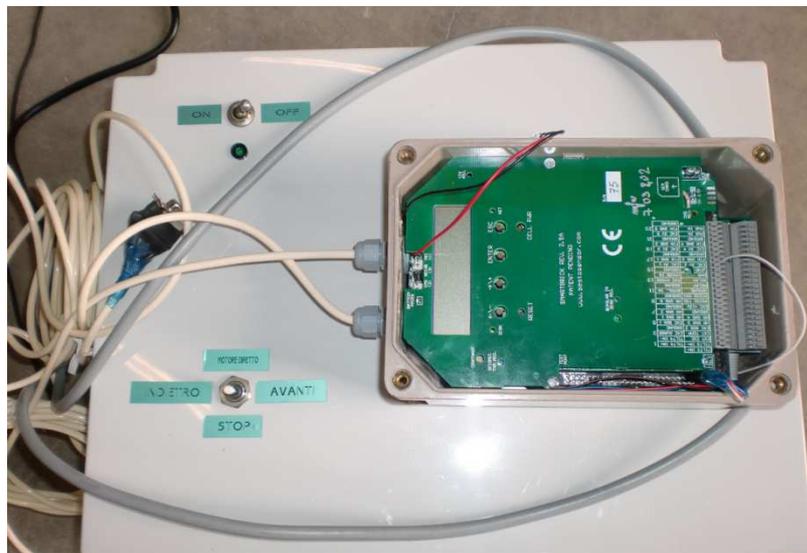


Fig.8.16 [Smart Brick e scatola di controllo]

Il sensore Smart Brick 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.

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 Smart Brick 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.

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*.



Fig.8.17 [Smart Brick]

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.

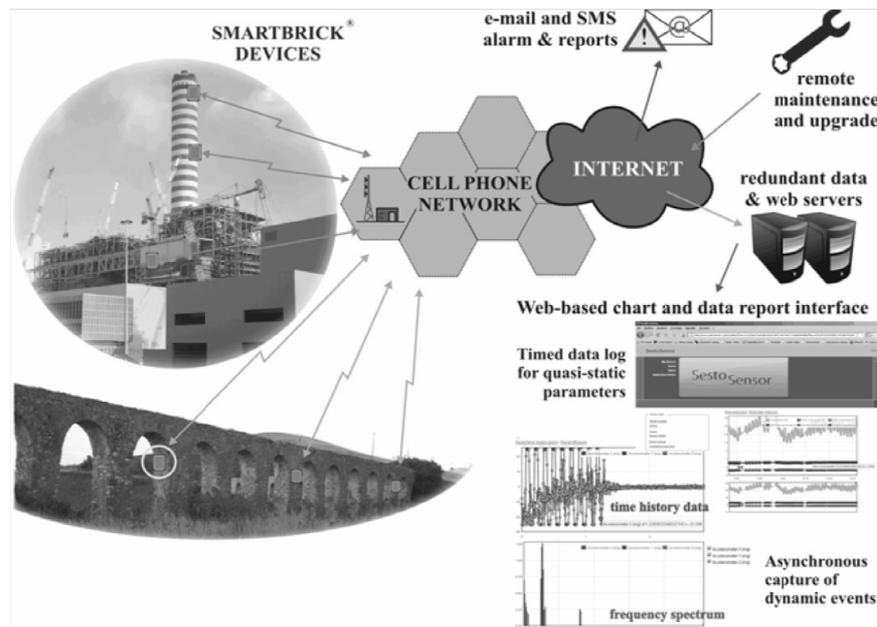


Fig.8.18 [Schema di funzionamento]

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

Caratteristiche tecniche

Connettività GPRS quadribanda		
Potenza di uscita:	2W (850-900 MHz) / 1W (1800-1900 MHz)	
Sensibilità:	-107 dBm (850-900 MHz) / - 108 dBm (1800-1900 MHz)	
Alimentazione:		
Batteria primaria:	Li-SOCl ₂ 7.2V 13000 mAh	
Batteria ricaricabile:	Pb-gel 6V 4400 mAh	
Batteria di emergenza:	Li-SOCl ₂ 7.2V 13000 mAh	
Ingresso di ricarica:	9 ÷ 24V 400mA max	
Principali funzionalità programmabili:		
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
Sensori integrati:		
Sensore di temperatura	Risoluzione:	0.1 °C
	Accuratezza assoluta:	± 1.8 °C
Inclinometro	Assi strumentati:	2 (rollio e beccheggio)
	Risoluzione:	0.001 °
	Deriva (-20 ÷ +80°C):	± 0.06 °
Accelerometro	Assi strumentati:	3
	Dinamica:	±1500mg (x, y) / ±600mg (z)
	Banda passante (-3dB):	0.2 ÷ 65 Hz
	Rumore integrale:	7 mg _{pk-pk} (opzione “Low Noise”)
Trigger sismico/impatto	Livello di soglia:	18 ÷ 150 mg _{pk} regolabile
	Banda passante (±20%):	0.4 ÷ 30 Hz
Sensore antimanomissione	Magnetico (su griglia di protezione opzionale)	

Ingressi pre-condizionati per sensori aggiuntivi:		
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
	Banda passante (-3dB):	1600 Hz
Ingresso bipolare	Risoluzione:	12 bit
	Fondo scala:	±10V
	Impedenza di ingresso:	100 kΩ
Ingressi ad alta risoluzione configurabili anche per sensori a ponte intero, ½ ponte o ¼ ponte	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 ⁶ με
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	
	Ingresso con eccitazione per anemometro ad impulsi	
Altre interfacce	Uscite di eccitazione:	5V 0.4W, Uscita 12V 12W
	Uscita di controllo:	250V (ac/dc) 150mA max
Contenitore:		
Dimensioni esterne:	125 × 185 × 100 mm	
Grado di protezione:	IP68 (protezione totale all'immersione permanente @ 1m)	
Certificazioni:	ATEX a richiesta	

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: ±1.5°C

Inclinometri incorporati:

- assi strumentati: 2 (rollio e beccheggio)
- risoluzione: 0.001°
- deriva termica tipica: $\pm 0.06^\circ$ ($-20^\circ \div +80^\circ\text{C}$)

Accelerometro incorporato:

- assi strumentati: 3 (X, Y, Z)
- dinamica: 3000mg (orizz.), 1200 mg (vert)
- banda passante @ -3dB: $0.2 \div 65$ Hz
- liv. di rumore: $< 3.5 \text{ mg}/\sqrt{\text{Hz}}$ (@ 27°C , tip.)
- freq. di campionamento: fino a 4100Hz
- campioni registrati: fino a 32786
- soglia min. trigger sismico: $< 20\text{mg}$ ($2 \div 35\text{Hz}$)

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 $0 \div 3\text{V}$ (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 $\frac{1}{4}$ 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)

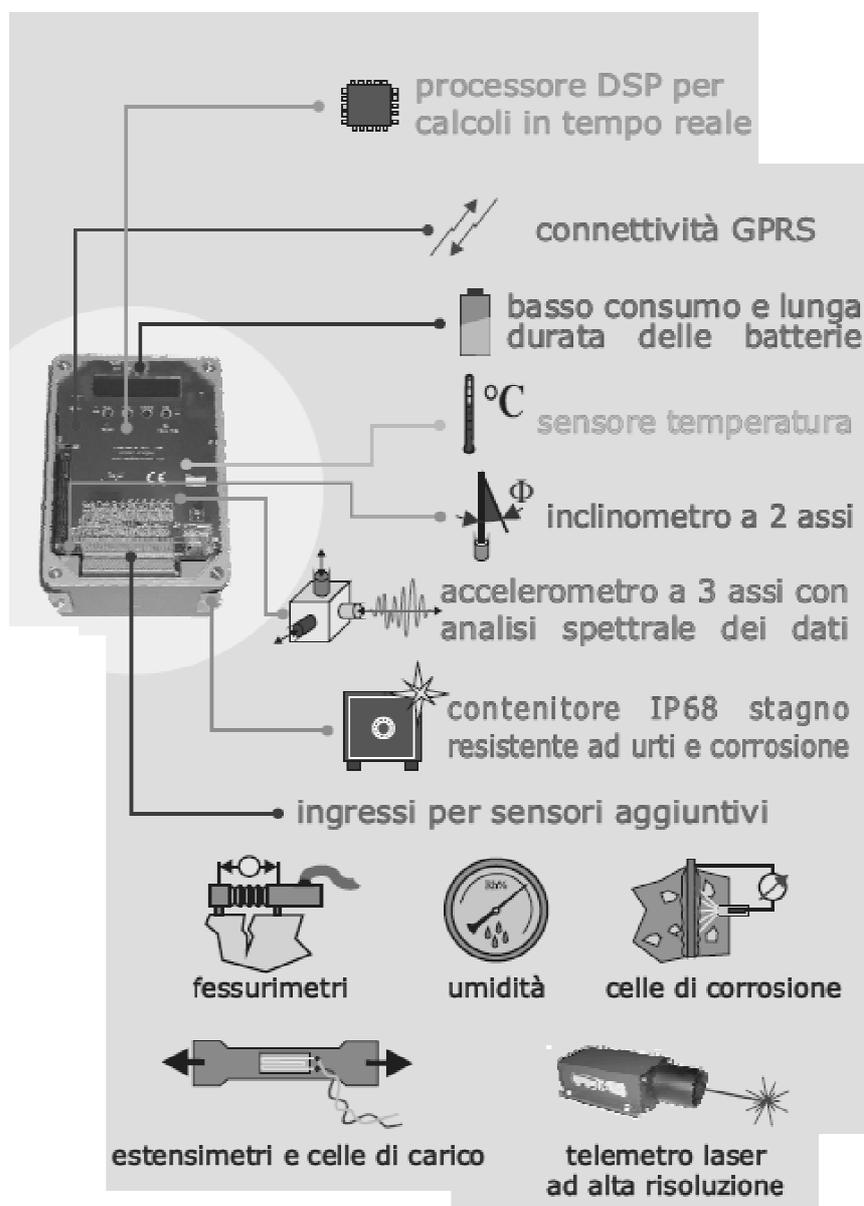




Fig.8.19 [Posizionamento dello Smartbrick sulla struttura di prova]

8.3 Struttura di prova

La struttura così assemblata risulterà pronta per la prova.



Fig.8.20 [Struttura di prova completa]

Capitolo 9: Risultati

Sulla struttura sono state fatte due prove principali:

- Nella prima si è verificato che i dati ottenuti dal modello coincidessero con la realtà, per questo si è dato tutto il cedimento previsto dagli $0,5^\circ$ in un unico step.
- Nella seconda si è applicato un cedimento in 5 step dove in ognuno si è attesa la verticalizzazione della struttura.

9.1 Prima prova

Durante la prova il pistone ha raggiunto uno spostamento di 13,565 mm con un angolo di inclinazione di $0,5424^\circ$.

Dal momento che sono stati posti tre LVDT nel blocco sovrastante i tre giunti di gomma questi ci hanno fornito, in funzione dello spostamento del pistone, lo spostamento della struttura a tre diverse quote.

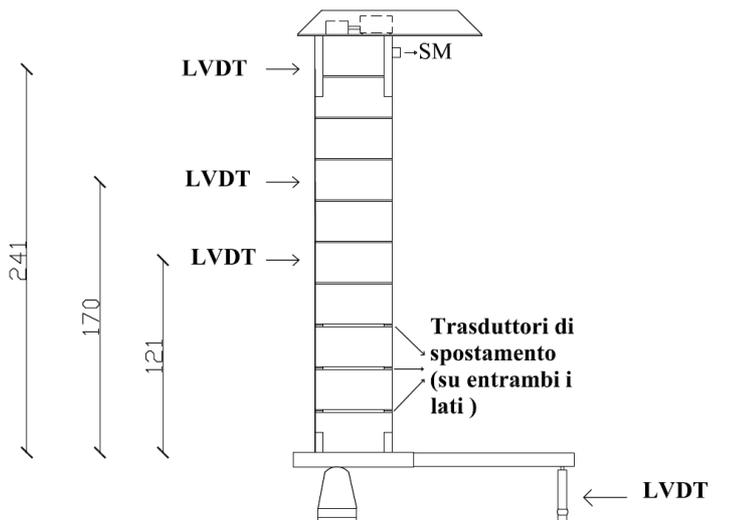


Fig.9.1 [Posizione LVDT]

Spost. Pistone		Spost A	Spost M	Spost B
mm		mm	mm	mm
0,000		0	0	0
-0,008		0,005	0	-0,00199
-0,008		0,005	0	-0,00199
-0,008		0,005	0	-0,00199
-0,008		0,005	0	-0,00199
-0,008		0,005	0,00199	-0,00199
-0,010		0,005	0	-0,00199
-0,008		0,005	0,00199	0
-0,008		0,010	0,00199	0
-0,008		0,010	0,00398	0
-0,008		0,005	0,00199	-0,00199
-0,008		0,005	0,00199	-0,00199
-0,008		0,010	0,00199	-0,00199
-0,008		0,010	0,00398	0
-0,008		0,010	0,00398	0
-0,008		0,010	0,00398	0
-0,008		0,010	0,00398	0
-0,010		0,010	0,00398	-0,00199
-0,010		0,010	0,00398	-0,00199
-0,008		0,010	0,00398	-0,00199
-0,008		0,010	0,00398	0
0,876		0,221	0,20696	0,19502
3,774		7,888	5,53419	3,85065
6,914		12,319	8,75401	6,19686
10,220		18,582	13,22355	9,09828
13,565		24,387	17,4523	10,65645

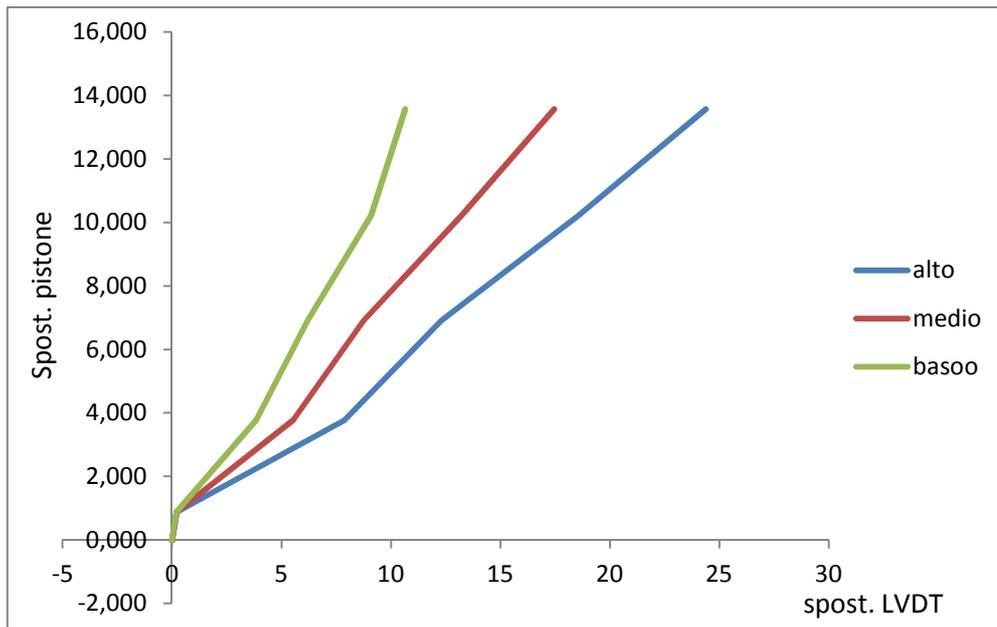


Fig.9.2 [Grafico spostamento pistone - spostamento LVDT]

È possibile confrontare perciò gli spostamenti misurati dagli LVDT con quelli dati dal modello analitico ottenuti per uno spostamento del pistone di 1,23 cm e una rotazione di 0,5°:

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

Emerge quindi una corrispondenza tra i risultati stimati e quelli ottenuti a meno di una piccola differenza dovuta al fatto che:

- l'angolo ottenuto in laboratorio era un po' differente in quanto nella realtà ottenere precisamente 0,5° era praticamente impossibile
- le incertezze e gli errori delle strumentazioni devono comunque essere tenute in considerazione.

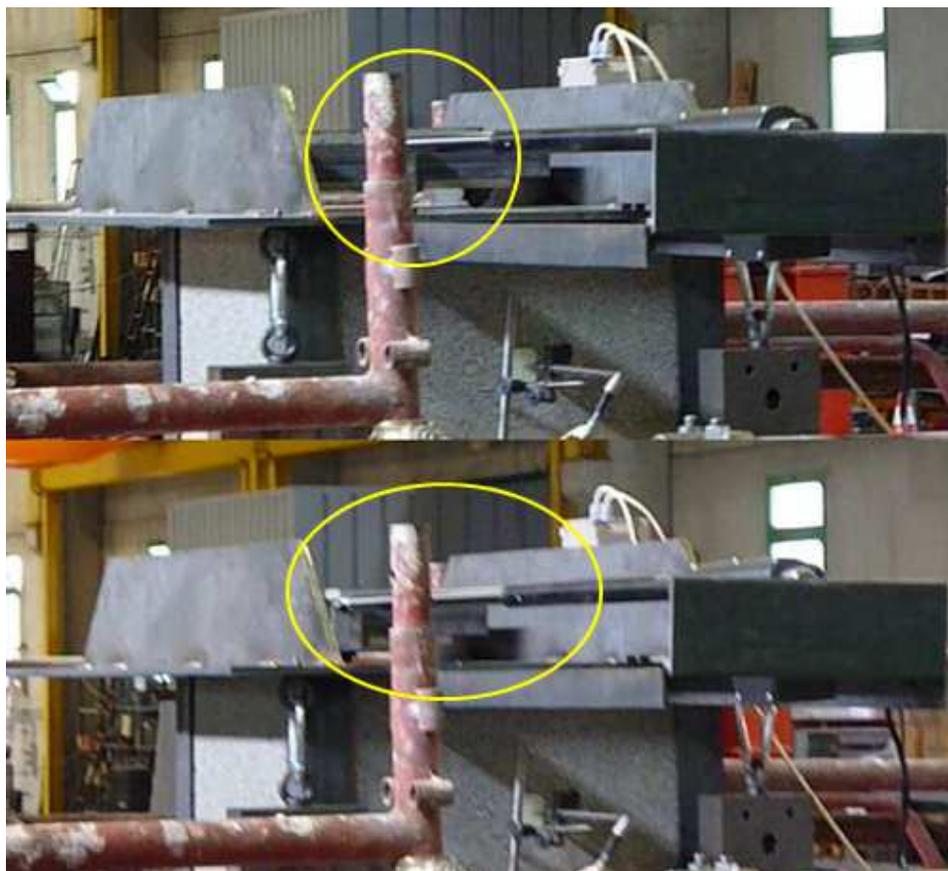


Fig.9.3 [Spostamento della massa dovuto all'attuatore]

Il valore dell'inclinazione è stato ottenuto dalle misurazioni in continuo dello Smart Brick.

POSIZIONAMENTO IN ASSE

"Inclinazione=0.0042(arcdeg); Posizione=0.0(cm) STOP "

Si nota anche che a partire da una posizione in cui la massa è centrata con l'asse del pilastro, nella quale l'attuatore è fermo; si è ottenuto il recupero totale così come previsto dal modello, a meno di incertezze, fornendo un'eccentricità di 56 cm a fronte dei 60 cm stimati.

Tutti gli ordini di grandezza previsti sono stati quindi rispettati.

```

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

Fig.9.4 [Dati forniti dallo Smart Brick]

Le altre misurazioni sono state effettuate nei due lati dei tre giunti di gomma:

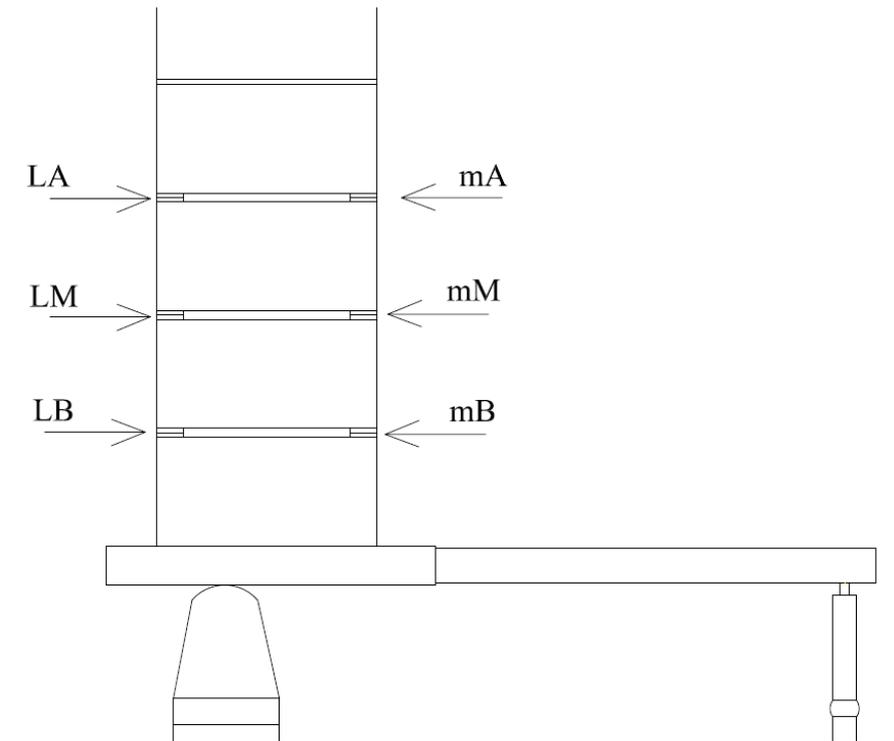


Fig.9.5 [Schema di riferimento per gli strumenti nei giunti di gomma]

- mA, mM, mB: i giunti prima si aprono a causa del cedimento e poi si chiudono per il ribilanciamento della struttura.



Fig.9.6 [Giunto in gomma compresso]

- LA,LM, LB: i giunti prima si chiudono a causa del cedimento e poi si aprono per il ribilanciamento della struttura.

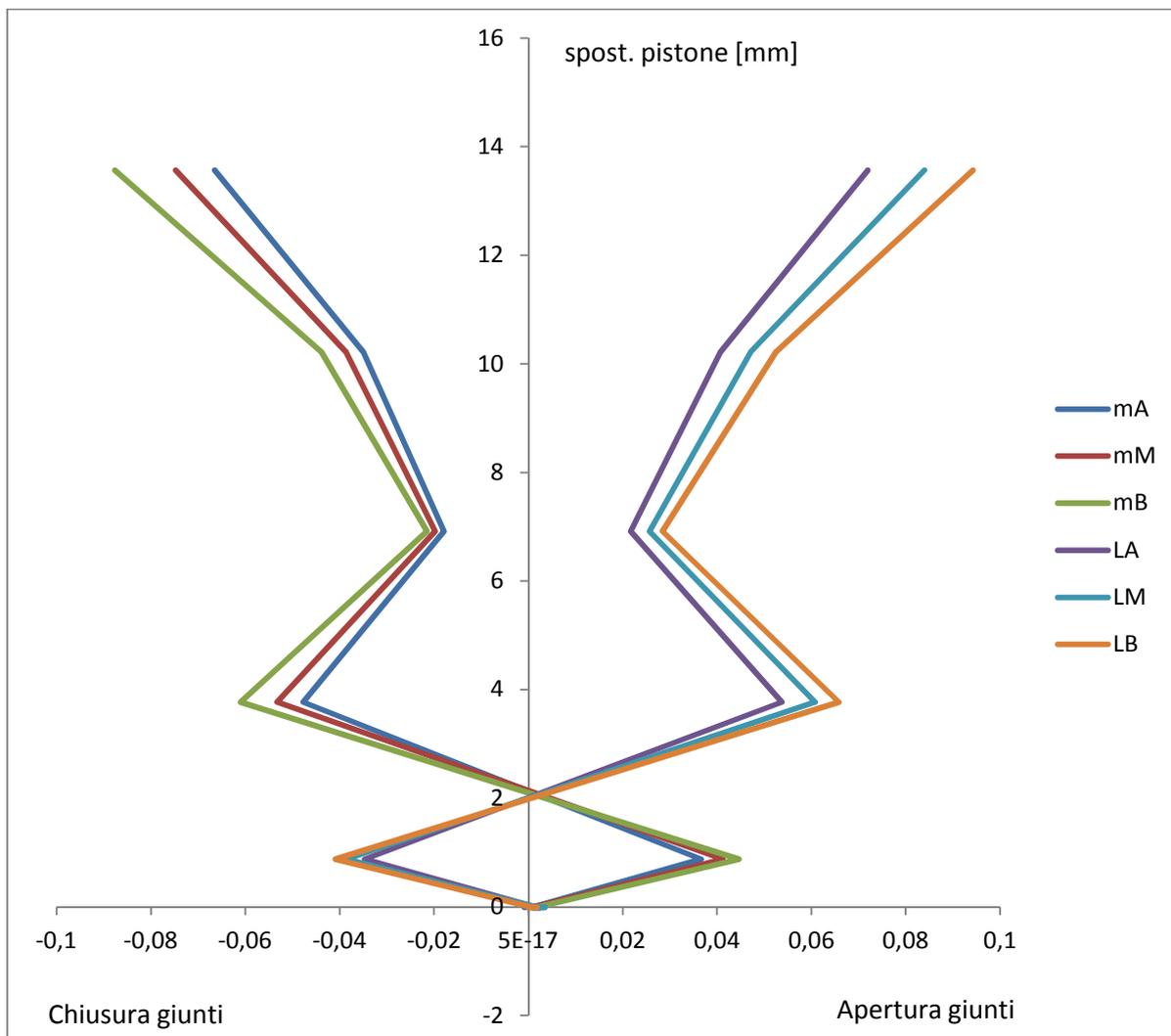


Fig.9.7 [Grafico deformazione dei giunti-spost. pistone]

I giunti sia a compressione che a trazione si sono comportati quasi in maniera simmetrica con un comportamento che non rispecchia i valori forniti dal modello, in quanto avendo applicato uno spostamento alla struttura in maniera

impulsiva hanno mostrato un comportamento meno deformabile di quello atteso.

Mostrano inoltre una oscillazione dovuta al colpo d’inerzia della struttura in risposta al cedimento improvviso e alla perdita di una situazione di equilibrio e di stabilità.

Sono riportate così le aperture e le chiusure dei giunti misurate dai trasduttori di spostamento:

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

9.2 Seconda prova

Per la seconda prova si è pensato di raggiungere un cedimento, dato dalla salita dell'attuatore inferiore, di 19,34 mm.

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

Si è così potuto raggiungere un cedimento maggiore della struttura con un grado di inclinazione complessivo alla base di $0,8^\circ$, non rischiando crolli o sbandamenti dovuti al fatto che in ogni step:

si dava il tempo alla struttura di recuperare la sua posizione di equilibrio, in modo che il baricentro cadesse sempre all'interno del nocciolo centrale d'inerzia.

Così come per l'altra prova gli LVDT hanno mostrato un comportamento simile sia durante il carico che durante lo scarico con spostamenti crescenti sull'altezza.

Questo porta a considerare la rotazione della struttura sopra i tre giunti di gomma praticamente rigida.

In ogni step si può notare lo spostamento della struttura e il recupero dato dallo spostamento della massa, con un numero complessivo di 5 step, sia durante il carico che durante lo scarico.

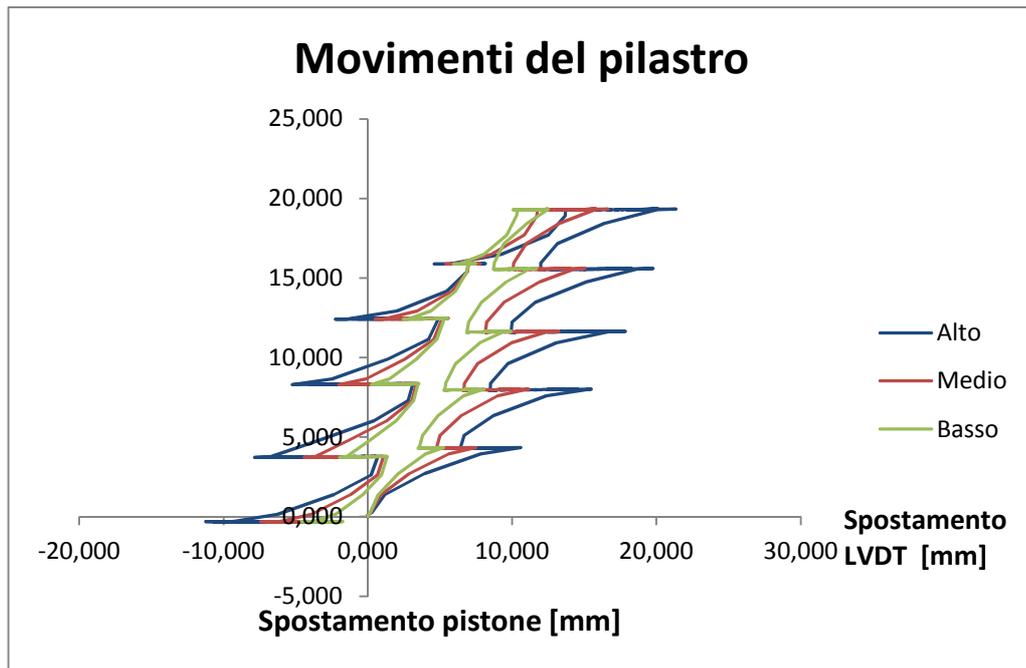


Fig.9.8 [Grafico deformazione dei giunti-spostamento pistone]

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 dove i dati ottenuti risentono dello sbandamento istantaneo del modello.

Dai dati dello Smart Brick:

```
POSIZIONAMENTO IN ASSE

"Inclinazione=0.0610(arcdeg); Posizione=-29.7(cm) STOP "

1 STEP CARICO

"Inclinazione=0.1742(arcdeg); Posizione=-29.9(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=-0.1739(arcdeg); Posizione=-28.7(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1523(arcdeg); Posizione=-27.1(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1292(arcdeg); Posizione=-25.8(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1143(arcdeg); Posizione=-24.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.0937(arcdeg); Posizione=-23.3(cm) STOP "
"Inclinazione=-0.0737(arcdeg); Posizione=-23.2(cm) STOP "

2 STEP CARICO

"Inclinazione=-0.3290(arcdeg); Posizione=-23.1(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2536(arcdeg); Posizione=-21.9(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2538(arcdeg); Posizione=-20.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2354(arcdeg); Posizione=-19.3(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2156(arcdeg); Posizione=-17.9(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2030(arcdeg); Posizione=-16.5(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1847(arcdeg); Posizione=-15.2(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1655(arcdeg); Posizione=-13.9(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1411(arcdeg); Posizione=-12.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1268(arcdeg); Posizione=-11.2(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.0998(arcdeg); Posizione=-9.8(cm) STOP "
"Inclinazione=-0.0943(arcdeg); Posizione=-9.8(cm) STOP "
"Inclinazione=-0.0888(arcdeg); Posizione=-9.8(cm) STOP "

3 STEP CARICO

"Inclinazione=-0.1176(arcdeg); Posizione=-9.8(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2779(arcdeg); Posizione=-8.4(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2617(arcdeg); Posizione=-7.0(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2421(arcdeg); Posizione=-5.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2186(arcdeg); Posizione=-4.4(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2063(arcdeg); Posizione=-2.8(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1896(arcdeg); Posizione=-1.5(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1674(arcdeg); Posizione=-0.2(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1439(arcdeg); Posizione=1.1(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1172(arcdeg); Posizione=2.7(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.0919(arcdeg); Posizione=4.0(cm) STOP "
"Inclinazione=-0.0849(arcdeg); Posizione=3.9(cm) STOP "

4 STEP CARICO

"Inclinazione=-0.2830(arcdeg); Posizione=3.9(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2819(arcdeg); Posizione=5.4(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2579(arcdeg); Posizione=6.7(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2404(arcdeg); Posizione=8.1(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2269(arcdeg); Posizione=9.4(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.2053(arcdeg); Posizione=10.8(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1869(arcdeg); Posizione=12.3(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1668(arcdeg); Posizione=13.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1402(arcdeg); Posizione=15.0(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.1125(arcdeg); Posizione=16.6(cm) MOVE forward "
"Inclinazione=-0.0864(arcdeg); Posizione=17.9(cm) STOP "
```

POSIZIONE AL TERMINE DEGLI STEP DI CARICO

"Inclinazione=-0.0990(arcdeg); Posizione=29.8(cm) STOP "

1 STEP SCARICO

"Inclinazione=0.1796(arcdeg); Posizione=28.5(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1786(arcdeg); Posizione=27.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1768(arcdeg); Posizione=26.2(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1490(arcdeg); Posizione=25.0(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1708(arcdeg); Posizione=23.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1643(arcdeg); Posizione=22.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1419(arcdeg); Posizione=21.0(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1277(arcdeg); Posizione=19.6(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1175(arcdeg); Posizione=18.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1037(arcdeg); Posizione=16.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.0832(arcdeg); Posizione=15.4(cm) STOP "

2 STEP SCARICO

"Inclinazione=0.2796(arcdeg); Posizione=15.4(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1941(arcdeg); Posizione=14.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1853(arcdeg); Posizione=12.8(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1805(arcdeg); Posizione=11.5(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.2034(arcdeg); Posizione=10.1(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1902(arcdeg); Posizione=8.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1808(arcdeg); Posizione=7.2(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1678(arcdeg); Posizione=5.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1381(arcdeg); Posizione=4.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1240(arcdeg); Posizione=3.5(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1076(arcdeg); Posizione=2.0(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1071(arcdeg); Posizione=0.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.0864(arcdeg); Posizione=-0.5(cm) STOP "
"Inclinazione=0.0891(arcdeg); Posizione=-0.4(cm) STOP "
"Inclinazione=0.0813(arcdeg); Posizione=-0.7(cm) STOP "

3 STEP SCARICO

"Inclinazione=0.2492(arcdeg); Posizione=-0.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.2254(arcdeg); Posizione=-1.8(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.2083(arcdeg); Posizione=-3.3(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1915(arcdeg); Posizione=-4.9(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1928(arcdeg); Posizione=-5.7(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1891(arcdeg); Posizione=-7.2(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1833(arcdeg); Posizione=-8.8(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1775(arcdeg); Posizione=-10.0(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1584(arcdeg); Posizione=-11.1(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1296(arcdeg); Posizione=-12.6(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1107(arcdeg); Posizione=-14.0(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.1170(arcdeg); Posizione=-15.4(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.0848(arcdeg); Posizione=-16.8(cm) STOP "

4 STEP SCARICO

"Inclinazione=0.6317(arcdeg); Posizione=-16.8(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.3367(arcdeg); Posizione=-18.2(cm) MOVE backward "
"Inclinazione=0.2638(arcdeg); Posizione=-19.4(cm) MOVE backward "



Fig.9.9 [Spostamento pilastro dopo il cedimento]

Anche per quanto riguarda i giunti di gomma dai 5 step viene mostrato un comportamento regolare sia durante il carico che lo scarico:

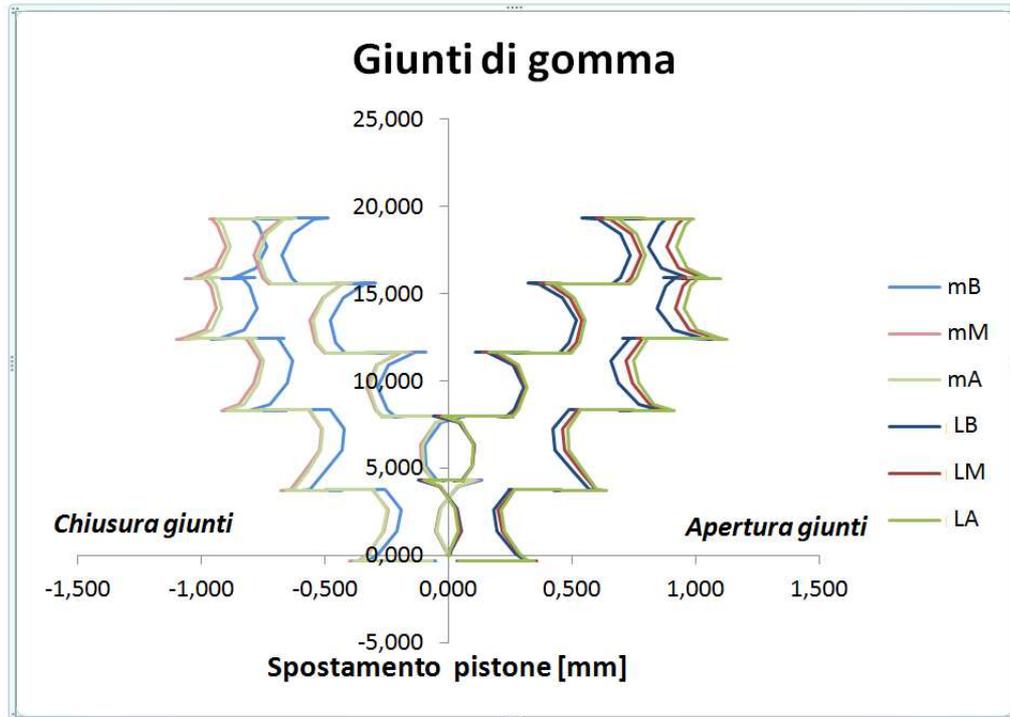


Fig.9.5 [Grafico deformazione dei giunti- spostamento pistone]

Capitolo 10: Conclusioni

Dalla modellazione e dalla verifica di essa in laboratorio è così emerso che:

- I valori attesi sono stati riottenuti a meno di piccoli errori.

Gli obiettivi del lavoro svolto miravano a far sì che si riuscisse a modellare una struttura con elevata deformabilità, riuscendo poi a realizzarla in laboratorio e che dai risultati ottenuti sperimentalmente si trovasse riscontro nella realtà.

Inoltre l'idea era quella di realizzare una struttura che riuscisse ad auto-adattarsi a quelle che possono essere considerate condizioni di squilibrio che con il tempo possono divenire critiche o eventi eccezionali istantanei.

In piccolo è quello che è stato fatto in quanto la struttura, sottoposta a un cedimento istantaneo considerevole nel primo caso o a cedimenti minori ma continui nel tempo nel secondo caso, è riuscita da sola attraverso un monitoraggio continuo e ad attuatori capaci di correggere tutto ciò che modificava la condizione di partenza ad auto-adattarsi e a salvaguardare se stessa da crolli, ribaltamenti....

Nel lavoro appena affrontato la correzione è avvenuta in seguito al cedimento, in realtà il miglior risultato ottenibile sarebbe progettare una struttura che in contemporanea alla fonte di disturbo si auto-adatti.

Questo al giorno d'oggi applicato alla realtà ha enormi costi ma sicuramente, con l'avanzare della ricerca, l'idea di avere strutture capaci di auto-analizzarsi e “ripararsi” da sole porterebbe a un minor lavoro di monitoraggio e ripristino dei danni, minor rischio per l'uomo e al raggiungimento di un nuovo tipo di struttura all'avanguardia: una “Struttura Intelligente”

Bibliografia

[1] XXXVII CONVEGNO NAZIONALE, 10-13 SETTEMBRE 2008, UNIVERSITÀ DI ROMA “LA SAPIENZA”

“Sviluppo concettuale di un dispositivo innovativo per attuatori ed elastomeri dielettrici”

G. Bersellia, R. Vertechyb, G. Vassurac e V. Parenti Castellid

[2] “Materiali funzionali: Smart and Functional Materials”

L. Lutterotti - Materiali funzionali - anno 2006-2007

[3] “Le Smart Structures: la nuova frontiera dell'isolamento sismico intelligente”

Francesco Salvatore Onorio on August 31

<http://www.strutturista.com/2010/08/le-smart-structures-la-nuova-frontiera-dellisolamento-sismico-intelligente/>

[4] “Nuovi attuatori per la robotica”

Paolo Belluco - Politecnico di Milano

[5] “Smart structures: Sperimentazione mediante attuatori e sensori innovativi”

Tesi di Laurea Ing. Alessio Giammarruto

[6] “Corso di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici”

Prof. Antonio Licciulli

[7] Conferenza Internazionale 25-26 aprile, 2002, Miami, Florida, USA

Sfide e opportunità per la gestione e la tecnologia

“Modalità di applicazione delle strutture e sistemi Smart in costruzione”

[8] “ Intelligent structures based on the improved activation of shape memory polymers using Peltier cells”

Smart Mater. Struct. 19 (2010) 055022 (15pp)

[9] “ Prestazioni e durabilità del calcestruzzo leggero con argilla espansa per usi strutturali”

L. Coppola*, S. Collepardi, Enco Engineering Concrete - Spresiano (TV)
P. Bellinzona, Laterlite Spa - Rubbiano (PR)

[10]

<http://catalog.linak.com/Linak/ITALIAN/DATASHEET/Attuatorilineari/AttuatorelineareLA31CSchedatecnicait/?Page=1>

[11]

http://www.linak.it/corporate/pdf/ITALIAN/DATA%20SHEET/Attuatore%20lineare_LA35_Scheda%20tecnica_it.pdf

[12] Corso di “materiali innovativi e riabilitazione strutturale”

Prof. Giovanni Pascale

[13] Corso di “diagnostica”

Prof. Giovanni Pascale

[14] “Superelastic SMA–FRP composite reinforcement for concrete structures”

Nicholas Wierschem and Bassem Andrawes

Smart Mater. Struct. 19 (2010) 025011 (13pp)

[15] “Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge”

Xin Lan¹, Yanju Liu², Haibao Lv¹, Xiaohua Wang¹, Jinsong Leng¹
and Shanyi Du¹

Smart Mater. Struct. 18 (2009) 024002 (6pp)

[16] “Proceedings of European Conference on Macromolecular Physics, Structure development upon polymer processing” Physical aspects, Guimaraes, Portugal, sept 24-28, 2000, published by European Physical Society, Series Editor: R.M. Pick, Managing Editor: C. Bastian, Vol. Editor, A.M. Cunha, vol.24I, p.33-34

ADAPTIVE COMPOSITE MATERIALS PROCESSING

[17] “Fibre-optic sensors and smart structures: Developments and prospects”

D. Uttamchandani

[18] “Smart composites with embedded shape memory alloy actuators and fibre Bragg grating sensors: activation and control”

Smart Mater. Struct. 14 (2005) 457–465

[19] “Design and testing of novel piezoceramic modules for adaptive thermoplastic composite structures”

Smart Mater. Struct. 18 (2009) 045012 (7pp)

[20] “Recovery stresses generated by NiTi shape memory wires”

David Vokoun and Rudy Stalmans

Department of Metallurgy and Material Engineering, KULeuven, De Croylaan 2, B-3001 Belgium

[21] “The use of shape memory alloys for passive structural damping”

P Thomson, G J Balas and P H Leo

Smart Mater. Struct. 4 (1995) 36-42,

[22] “Intelligent Repair of Existing Concrete Structures”

Joan R. Casas,* Gonzalo Ramos

Civil Engineering Department, ETSI Caminos, UPC C. Gran Capitan s/n.

Modulo C1. 08034 Barcelona, Spain

Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 17 (2002) 43–52

[23] “Smart structure for suppression of mode I and II crack propagation in

CFRP laminates by shape memory alloy TiNi actuator”

Hidehiko Kimura a,*, Yoshiaki Akiniwa b, Keisuke Tanaka b, Hiroshi Tanaka c, Yayoi Okumura d

International Journal of Fatigue 28 (2006) 1147–1153

[24] “Smartbrick[®]: the autonomous and self-sufficient building block for smart structural health monitoring networks”

Ing. Filippo Bastianini

Ringraziamenti

Ringrazio per prima cosa il Professor Pascale per l'aiuto fornito in tutti questi mesi...

L'Ingegnere Bastianini che ha curato la parte elettronica della tesi...

Il tecnico di laboratorio Roberto Carli che con molta pazienza ci ha seguiti nella realizzazione della parte sperimentale...

E tutti coloro che hanno collaborato per la realizzazione di questo lavoro...

Ringrazio i miei genitori e mia sorella che in tutti questi anni hanno sempre creduto in me e mi hanno sostenuta in quello che è stato, per ora, il percorso più importante della mia vita, se oggi posso dire di aver realizzato il primo vero grande traguardo è solo grazie a loro e se da oggi posso cercare di costruirmi un futuro è ancora solo grazie a loro...

Ringrazio la persona che mi sta accanto ogni singolo giorno e che sopporta ogni mio stress e sfogo... la persona che continuerà a starmi accanto anche quando tutto questo sarà finito... che fa parte della mia vita... che ne farà parte per sempre... perché lui è tutta la mia vita... Davide...

Ora vorrei ringraziare le persone che mi hanno accompagnata in questo percorso, che possono capire tutto quello che ho passato e che ricorderanno, spero per sempre, tutto quello che abbiamo passato insieme...

*“Dicono che ciò che desideri,
arrivi quando meno te lo aspetti...
Io non ti stavo cercando eppure ti ho trovato...
e oggi non sarebbe lo stesso se non fosse mai successo... “*

Questa frase vale veramente per tutte le splendide persone che ho avuto l'onore di frequentare, conoscere e...

che piano piano sono entrate nel mio cuore e l'hanno riempito di affetto e di
amicizia....

Se mi guardo indietro e penso a questi ultimi due anni... non posso non pensare a tre persone speciali...

Tre amicizie completamente diverse e proprio per questo tutte importanti....

Grazie a Diego... Dal primo momento che ti ho conosciuto abbiamo passato ogni singolo giorno insieme tra chiacchiere, risate, scherzi.... Sei l'amico con cui sorridere e non avere filtri... quello con cui puoi dire tutto quello che pensi, che ti aiuta sempre nel momento del bisogno (e spesso ho avuto bisogno!!!!) e che ti fa capire che ti vuole bene..... l'amico ideale...

Grazie a Fizz... Una persona complessa proprio come il nostro rapporto... fatto di allontanamenti e avvicinamenti... un rapporto sempre riservato e mai plateale... molto nostro... che però non ha fatto altro che legarci ancora di più... sai quanto ti voglio bene e quanto sei importante nella mia vita ora... e quanto lo sarai sempre...

Grazie a Gin... Una di quelle sorprese che ti capitano poche volte nella vita... quando non cerchi più persone a cui legarti così tanto... ecco che piano piano

sei riuscito ad entrare nella mia vita... brontoli brontoli ma alla fine mi accontenti sempre... sembri tanto duro e cinico ma in fondo sei un tenerone... sempre attento e protettivo... il mio fratello maggiore....

Un ringraziamento particolare alla Vero che in questi ultimi anni mi è stata sempre accanto ed è l'unica che si è sopportata tutti i miei sfoghi... e i momenti difficili....

Grazie ad Anna e Miki che dall'inizio mi sono sempre state vicine e anche se in questi ultimi due anni non siamo state sempre insieme so che le cose non sono cambiate.

Grazie alla Vale, Mattia, Paolino, Simo, Ronni, Cristiano... e a tutte le risate che mi avete fatto fare....Grazie a tutti voi...

Non credevo di poter conoscere delle persone così speciali....

Grazie per aver reso i miei anni all'università come quelli che in futuro guarderò con un sorriso sul volto, che guarderò con nostalgia ripensando a tutti i bellissimi momenti passati insieme...

Grazie...

Annina