

1.1 Inquadramento del lavoro

Nel campo delle costruzioni aeronautiche e spaziali è sempre più pressante l'esigenza di introdurre innovazioni atte a migliorare le prestazioni del velivolo: un strada spesso seguita per giungere a tale risultato è l'introduzione di sistemi di controllo attivi delle strutture.

In ambito aeronautico, ad esempio, è spesso fondamentale riuscire a ridurre il livello di vibrazioni all'interno della fusoliera allo scopo di migliorare il comfort dei passeggeri e dell'equipaggio; stesso discorso vale in campo automobilistico per limitare le vibrazioni prodotto dal motore e migliorare quindi l'abitabilità della vettura.

Le vie percorribili sono quelle del controllo passivo e di quello attivo.

Nel primo caso l'utilizzo di meccanismi di dissipazione dell'energia, realizzabili tramite smorzatori e di materiali compositi che posseggano un certo smorzamento intrinseco, risulta essere il più efficace metodo applicabile.

D'altra parte, lo sviluppo sempre più rapido di sistemi di elaborazione digitale ha consentito anche l'affermarsi delle tecniche di controllo attivo.

Un esempio consiste nell'utilizzo in campo aeroelastico, allo scopo di estendere l'involuppo di volo aumentando il valore della velocità di flutter e alleviando i carichi dovuti alle raffiche.

Tali sistemi però possono in genere lavorare entro limitate bande di frequenza: è quindi esigenza primaria estendere il più possibile il campo di frequenze entro cui il controllo possa operare focalizzando le ricerche sulla determinazione di quali siano gli attuatori che meglio si prestano a tale scopo.

I materiali piezoelettrici, in particolare i piezoceramici, in virtù dell'accoppiamento elettromeccanico che li caratterizza, risultano essere sicuramente tra i più promettenti: questi presentano una relativa facilità di implementazione ed uso; inoltre la loro rigidità fornisce una adeguata densità di energia ed il loro basso tempo di risposta garantisce un'alta banda passante.

Tuttavia tali materiali, tipicamente utilizzati sotto forma di piastrine applicate sulle superfici dei componenti da controllare o inseriti all'interno di laminati in materiale composito, presentano il non irrilevante problema di essere estremamente fragili e quindi di non poter essere conformati per adattarsi alle superfici curve.

In questa ottica lo sviluppo di materiali compositi attivi rappresenta il metodo migliore per eliminare le limitazioni che i materiali ceramici monolitici presentano: tramite l'utilizzo di fibre ceramiche e matrici polimeriche è possibile raggiungere altissimi livelli di integrazione con la struttura ospite, rendendo possibile una grande estensione della zona attiva con minori limitazioni sulle curvature delle superfici.

In conseguenza di ciò il presente lavoro è quindi sullo studio della tecnologia necessaria per la realizzazione di compositi in fibra piezoceramica utilizzabili come attuatori, i quali posseggano le qualità tipiche di un attuttore per poter essere utilizzato in applicazioni dinamiche, qualità riassumibili in:

- *Prestazioni*: necessità di ottenere buoni livelli di autorità di attuazione, di una attuazione estremamente direzionale e di una buona banda passante;
- *Robustezza*: necessità di ottenere attuatori più resistenti alla rottura rispetto gli attuatori piezoceramici monolitici;
- *Lavorabilità*: necessità di ottenere attuatori che presentino alte possibilità di integrazione con la struttura conformandosi anche a geometrie curve;

- *Resistenza a fatica*: necessità di ottenere attuatori caratterizzati da una vita operativa paragonabile a quella delle strutture a cui sono collegati.

Per quanto riguarda la robustezza di questo tipo di attuatori si tenga presente che il concetto stesso di composito garantisce un'elevata tolleranza alle rotture grazie al meccanismo di trasferimento dei carichi tra le fibre ad opera della matrice.

Gli obiettivi principali di questo lavoro consistono nell'identificazione di problemi caratteristici della progettazione e produzione di questo tipo di compositi, nello sviluppo di una tecnologia per la produzione che garantisca un elevato grado di affidabilità e ripetibilità ed infine nella dimostrazione della capacità di attuazione dei compositi attivi nel controllo strutturale.

1.2 Descrizione del lavoro

I capitoli 2 e 3 forniscono un'introduzione all'argomento e definiscono lo stato dell'arte, nei capitoli 4 e 5 viene sviluppato il lavoro vero e proprio di progettazione e produzione degli attuatori, infine il capitolo 6 presenta le modalità di sperimentazione e i risultati ottenuti.

Nel capitolo 2 viene presentato il concetto di materiali e strutture intelligenti ed le possibilità di impiego di tali materiali nella realizzazione di sistemi di controllo. Vengono quindi passati in rassegna le varie tipologie di *smart materials* utilizzabili nella produzione di attuatori.

Il capitolo 3 è incentrato sui materiali piezoelettrici con particolare attenzione alle ceramiche. L'attenzione è focalizzata sull'inquadramento del fenomeno della piezoelettricità e sui legami costituenti propri dei materiali che presentano tali caratteristiche. Sono anche presentate le tipologie di attuatori realizzabili utilizzando i materiali piezoceramici e la caratterizzazione dei materiali utilizzati nella produzione.

Il capitolo 4 è interamente dedicato alla progettazione di un attuttore in fibra piezoceramica: in questa fase si illustrano le scelte riguardanti i materiali utilizzati e la geometria dell'attuttore. Per ultimo viene presentato un approfondito studio sulle caratteristiche dielettriche del composito con l'ausilio di programmi per le analisi ad elementi finiti.

Il capitolo 5 è incentrato sulla produzione dell'attuatore e dei prototipi utili ad apportare migliori nella fase realizzativi.

Infine il capitolo 6 descrive le metodologie seguite per provare gli attuatori prodotti e vengono esposti e commentati i risultati delle prove, con particolare attenzione a tutti gli aspetti che hanno portato alle caratteristiche insoddisfacenti di alcuni dei compositi prodotti.

2.1 I materiali “attivi”

I recenti progressi tecnologici nel campo della scienza dei materiali combinati con le sempre crescenti richieste di sistemi di controllo attivo atti a migliorare le prestazioni di strutture, hanno portato con successo allo sviluppo di sistemi che utilizzano sensori ed attuatori avanzati.

Sfruttando le proprietà fisiche di alcuni materiali, denominati *smart materials* o *materiali attivi*, è possibile realizzare sistemi di controllo (sensori ed attuatori) dalle elevate prestazioni ed efficienza utilizzando solo una piccola parte dell’hardware necessario per i più tradizionali servomeccanismi e garantendo tempi di risposta decisamente inferiori.

Gli smart materials vengono, infatti, definiti come quei materiali in grado di reagire agli stimoli esterni, ad esempio variazioni di temperatura, applicazione di campi elettrici o sollecitazioni meccaniche, variando certe proprie caratteristiche.

I sistemi di controllo realizzati utilizzando questo tipo di materiali possono essere integrati, in modo estremamente poco invasivo, nella struttura stessa dando vita alle cosiddette *strutture intelligenti* ossia strutture che, oltre al primario compito di sopportare i carichi a cui sono soggette, hanno la capacità di reagire in modo controllato a stimoli esterni.

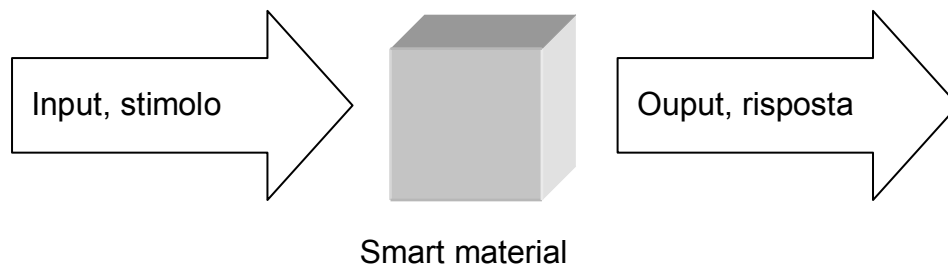


Figura 2.1

Gli elementi base per la realizzazione di queste strutture, come già detto, sono gli attuatori i sensori e le leggi di controllo che legano i due.

I sensori possono essere applicati alla superficie o inclusi nella struttura (in maniera discreta o distribuita) e devono essere scelti in modo che la loro presenza provochi le minori variazioni possibili alle caratteristiche del sistema. Il loro scopo è di monitorare la risposta del sistema compatibilmente con le leggi di controllo e devono fornire misurazioni utili a ricostruire lo stato del sistema stesso. A causa della natura delle strutture, l'utilizzo di sensori distribuiti è vantaggioso in moltissime applicazioni.

Come i sensori, gli attuatori ideali devono avere il minor peso possibile, essere relativamente non intrusivi e avere il minor effetto possibile sulla dinamica del sistema.

Possono anch'essi essere montati superficialmente o inclusi nella struttura, in modo discreto o distribuito e possono essere progettati in modo da supportare parte del carico a cui la struttura è soggetta. Gli attuatori sono atti a fornire la reazione vera e propria in funzione di ciò che i sensori rilevano e quindi la loro progettazione deve tener conto della necessità di una loro convivenza con gli altri componenti base delle strutture intelligenti.

Il meccanismo tramite cui l'attuatore provvede alla dissipazione di energia deve essere adeguato all'applicazione: per esempio in molte applicazioni aerospaziali o automobilistiche, si richiedono attuatori dal basso peso e con risposte su una larga banda di frequenze mentre nella progettazione di stabilizzatori per macchinari industriali sono richiesti attuatori in grado di fornire grandi deformazioni senza limitazioni troppo restrittive sulle frequenze d'attuazione.

In fine è fondamentale che gli attuatori siano rapidi tanto da rispondere con minimi ritardi di tempo per non destabilizzare il sistema.

Questi componenti devono anche essere in grado di svolgere diverse funzioni, per esempio in campo aerospaziale potrebbe essere necessario dover produrre vibrazioni a diverse frequenze per il controllo acustico piuttosto che per ampliare l'involuppo di volo ritardando fenomeni di flutter, attenuare danni causati da fatica oppure operare per la diagnostica e il rilevamento di danni.

Per offrire un'efficienza ottimale sarà necessario che anche le leggi di controllo siano messe a punto in modo da accordarsi perfettamente ai sensori e agli attuatori con cui devono operare, tenendo conto di fattori come discontinuità nelle rilevazioni dei sensori, non linearità del fenomeno, fenomeni di isteresi e altre proprietà degli smart materials, in modo da ottenere le prestazioni desiderate.

Una lista dei materiali utilizzati nelle strutture intelligenti include materiali piezoelettrici, elettrostrittivi e magnetostrittivi, leghe a memoria di forma e fibre ottiche, queste ultime utilizzate per la sola realizzazione di sensori.

In molti casi le proprietà dei materiali citati sono ben conosciute da molto, ma solo recentemente si è raffinata la loro conoscenza tanto da poterli utilizzare in applicazioni quali le strutture intelligenti.

2.2 Materiali elettrostrittivi

L'elettrostrizione è generalmente caratterizzata da una deformazione meccanica rilevabile nei materiali dielettrici a seguito dell'applicazione di un campo elettrico.

I materiali che presentano questo effetto in maniera più marcata sono i PMN e i PMN-PT.

Differentemente dai piezoelettrici i materiali elettrostrittivi presentano struttura e comportamento isotropo, non necessitano di una polarizzazione prima del loro utilizzo e non mostrano alcuna polarizzazione residua.

In figura 2.4 è rappresentato l'effetto di elettrostrizione su un singolo nucleo atomico circondato da una nuvola elettronica.

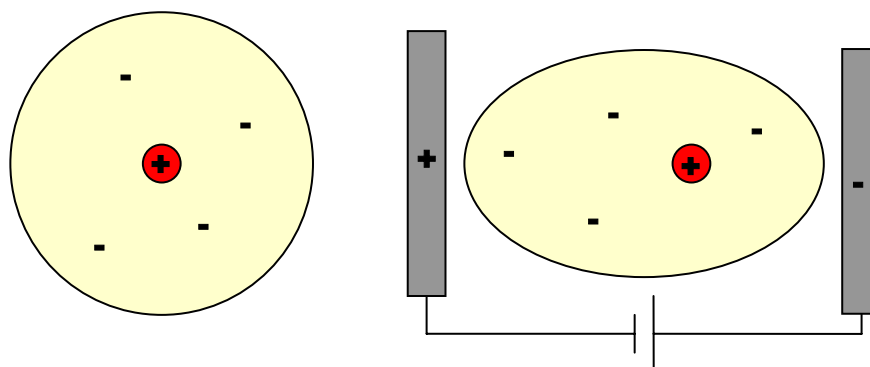


Figura 2.2 - effetto elettrostrittivo

L'accoppiamento elettromeccanico è non lineare, ma quasi quadratico a bassi valori di campo elettrico applicato e all'aumentare di questo l'allungamento prodotto tende ad un valore di saturazione.

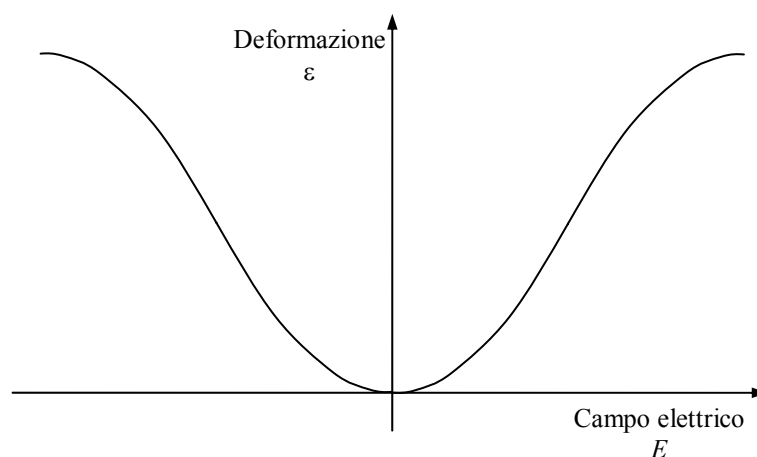


Figura 2.3 - legame campo elettrico – deformazione nei materiali elettrostrittivi

A causa della simmetria della struttura cristallina e del legame quadratico l'applicazione di campi elettrici di segno opposto non genera deformazioni opposte come nei piezoelettrici, ma si ha sempre un allungamento e mai una contrazione del materiale.

L'unico modo per ottenere un'attuazione bidirezionale è quindi di utilizzare più attuatori in direzioni opposte.

Un importante vantaggio di questi materiali è rappresentato dall'assenza di fenomeni di isteresi, invece rilevabili nei piezoelettrici, al di sopra della temperatura di Curie.

Il comportamento potendo essere considerato quadratico, o al più iperbolico, anche se non lineare permette una facile linearizzazione per poter utilizzare questo tipo di materiali in sistemi di controllo lineari.

Inoltre la relazione tra il comportamento del materiale e la temperatura è ben nota ed è quindi possibile, tramite sistematici aggiustamenti del campo elettrico applicato in funzione della temperatura, ottenere le prestazioni volute alle più svariate temperature.

Tutto ciò è ovviamente ottenibile tramite un'ottimizzazione delle leggi di controllo che gestiscono il sistema.

È sperimentalmente dimostrato che le prestazioni degli attuatori elettrostrittivi è comparabile con quelle degli attuatori piezoelettrici.

Si possono ottenere forti allungamenti e la risposta in frequenza ricopre una larghissima banda in modo da rendere questi materiali una scelta ottimale in moltissime applicazioni.

Non necessitando una polarizzazione preventiva, i materiali elettrostrittivi presentano il rilevante vantaggio di non essere affetti da invecchiamento, quindi non si rilevano decadimenti nelle prestazioni.

Inoltre, a causa della natura isotropa e non polarizzata del materiale l'utilizzo come sensore non è possibile senza l'applicazione di un campo elettrico esterno, ma l'accoppiamento elettromeccanico quadratico permette una sensibilità non ottenibile con i piezoelettrici.

Gli utilizzi più marcati di questo tipo di materiale sono in ambienti a temperatura controllata e in campi in cui è necessaria un'estrema precisione di attuazione.

Anche in questo caso, nel progetto del sistema di controllo, deve essere considerata l'interazione dinamica tra il sensore/attuatore e la struttura in modo da ottimizzare le leggi di controllo.

Riassumendo, si possono elencare i seguenti:

vantaggi:

- quasi assenza di fenomeni di isteresi oltre la temperatura di Curie
- bassa espansione termica
- peso contenuto con conseguente basso impatto sulle prestazioni dinamiche del sistema
- natura non polarizzata del materiale che permette prestazioni superiori ai piezoelettrici
- risposta su ampia banda di frequenze

svantaggi:

- accoppiamento elettromeccanico non lineare con coefficienti dipendenti dal campo applicato
- comportamento dipendente dalla temperatura

2.3 Materiali magnetostrittivi

Il concetto di magnetostrizione è simile a quello di elettrostrizione e si esplica nella tendenza di certi materiali di deformarsi in conseguenza di un campo magnetico applicato.

Gli allungamenti ottenibili con questi materiali sono comparabili con quelli ottenibili con gli elettrostrittivi.

Il più tipico esempio di questo tipo di materiali è il Tefenol-D.

Prendendo ad esempio il provino di figura 2.6 si nota come il materiale è suddiviso in domini magnetici inizialmente orientati perpendicolarmente all'asse longitudinale.

Il numero di domini magnetici perpendicolari all'asse è aumentabile tramite una trazione preventiva del materiale.

In presenza di un campo magnetico, i domini ruotano allineandosi alla direzione del campo, che normalmente è diretto lungo l'asse longitudinale del provino, producendo un rilevante allungamento.

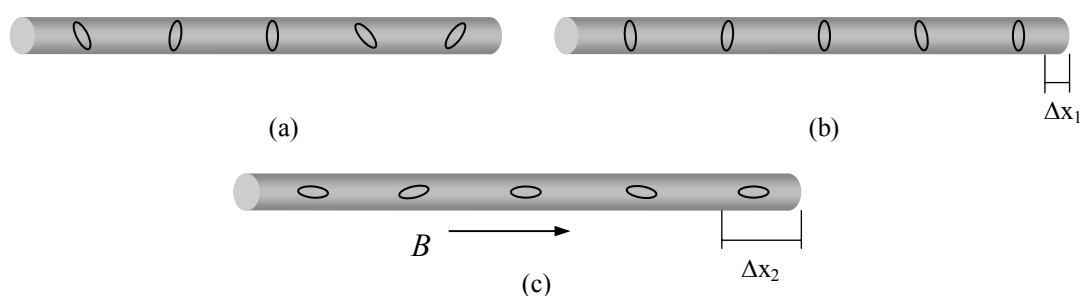


Figura 2.4 - (a) domini magnetici in un materiale magnetostrittivo; (b) orientazione dei domini nel materiale pre-deformato; (c) orientazione dei domini magnetici e conseguente deformazione a seguito dell'applicazione di un campo magnetico

Per ottenere un sensore è sufficiente misurare il campo magnetico generato in conseguenza di un allungamento applicato che provoca la rotazione dei domini magnetici.

In ogni caso l'utilizzo primario dei materiali magnetostrittivi è nella produzione di attuatori che devono fornire forti allungamenti, ma è recentemente argomento di studio la possibilità di produrre attuatori self-sensig al pari di quelli piezoelettrici.

L'accoppiamento magnetomeccanico è molto simile a quello dei materiali elettrostrittivi, fortemente non lineare per bassi livelli di campo applicato e con un valore di saturazione di allungamento raggiungibile all'aumentare del campo magnetico.

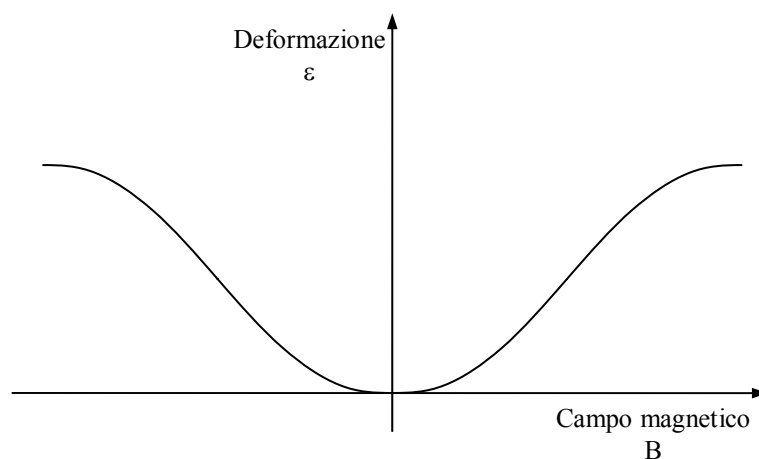


Figura 2.5 - legame campo magnetico - deformazione nei materiali magnetostrittivi

In questo caso non è però utilizzabile un modello costitutivo quadratico, ma si preferisce approssimare l'andamento utilizzando funzioni sinusoidali.

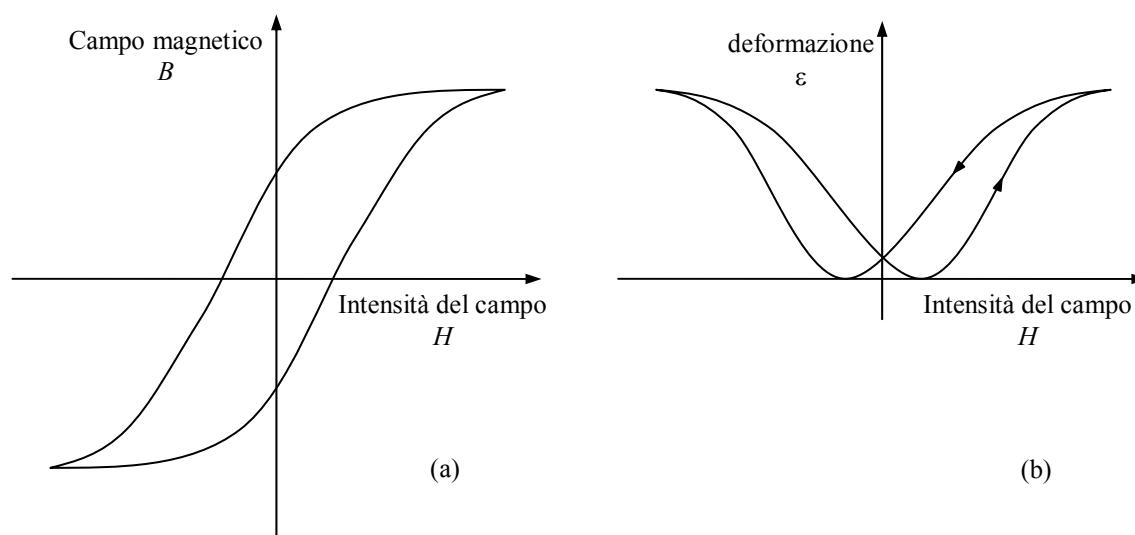


Figura 2.6 - (a) effetto isteresi nel legame intensità del campo - campo magnetico; (b) legame intensità del campo - deformazione

Il fenomeno di isteresi nel legame tra il campo magnetico B e l'intensità del campo H , comporta anche un fenomeno di isteresi nel legame tra l'intensità del campo e l'allungamento prodotto.

Nell'utilizzo di attuatori/sensori magnetostrittivi si deve tener conto della loro dimensione e peso che spesso sono significativi, contribuendo alla dinamica del sistema al contrario dei piezoelettrici ed elettrostrittivi.

Se le dimensioni, la non linearità e l'isteresi rappresentano delle sfide rilevanti nella progettazione di sistemi di controllo con elementi magnetostrittivi, gli enormi allungamenti ottenibili e le rilevanti forze prodotte da questo tipo di attuatori, rappresentano degli ovvi e irrinunciabili vantaggi in alcune applicazioni.

Concludendo tali materiali presentano i seguenti:

vantaggi:

- allungamenti forze ottenibili decisamente superiori di quelle ottenibili con attuatori piezoelettrici e elettrostrittivi

svantaggi:

- relazioni costitutive fortemente non lineari e significativo effetto di isteresi
- attuatori/sensori di dimensioni e peso non trascurabili che influiscono sulla dinamica del sistema a cui sono applicati

2.4 Leghe a memoria di forma

Questo tipo di leghe (SMA, Shape Memory Alloys) presenta la marcata capacità di subire enormi deformazioni e recuperare la forma precedente la deformazione senza subire alcuno snervamento o deformazione plastica.

Questa caratteristica è dovuta alla capacità del materiale di subire una trasformazione a livello del grano cristallino in presenza di uno sforzo o una variazione di temperatura applicati.

Questo passaggio è anche funzione della storia del materiale.

Il più popolare tra questi materiali è il Nitinol, utilizzabile in componenti ad alte prestazioni con una deformazione recuperabile fino al 6%, valori estremamente superiori a quelli dei materiali piezoelettrici in cui non si supera lo 0,1%.

Oggi è ben nota la fenomenologia della trasformazione rilevabile nelle SMA: il cambiamento di temperatura causa la trasformazione della struttura cristallina del materiale, in genere si rileva il graduale passaggio da martensite ad austenite tramite il riscaldamento (e viceversa raffreddando)¹.

¹ Si definisce il punto M_s come la temperatura a cui inizia la trasformazione da austenite a martensite ed M_f come quella a cui il passaggio di fase è completamente avvenuto. Analoghe definizioni valgono per i punti A_s ed A_f .

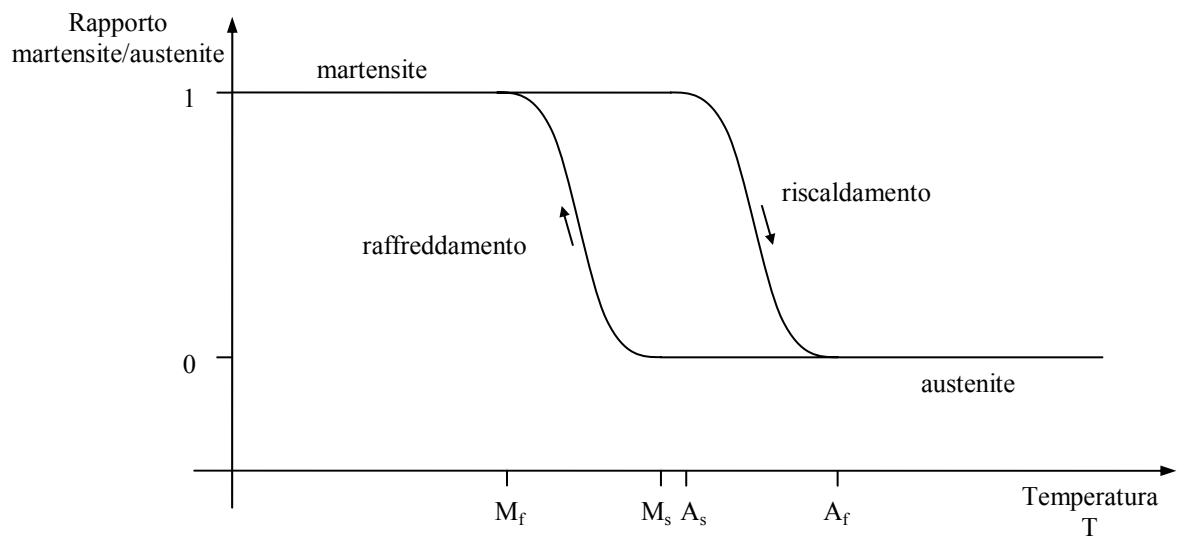


Figura 2.7 - passaggio di fase al variare della temperatura

Questo fenomeno spiega la possibilità di recuperare deformazioni: se il materiale è nello stato austenite e vi viene applicato un carico tale da produrre una deformazione, la struttura cristallina inizia a passare gradualmente allo stato martensite; durante questa trasformazione lo sforzo interno varia relativamente poco, ma microscopicamente di nota un' apparente deformazione plastica.

Se il materiale è a $T > A_f$ durante la fase di carico la martensite è instabile e togliendo il carico di ha un completo recupero della deformazione.

Se invece $T < A_f$ dopo lo scarico si ha un'ampia deformazione residua che in ogni caso può essere completamente recuperata semplicemente fornendo calore al materiale, questo effetto è ciò che comunemente viene indicato come "memoria di forma": il materiale deformato possiede la capacità di tornare alla propria forma iniziale.

Il recupero può essere libero, vincolato o controllato.

Nel primo caso non si ottiene alcun effetto di attuazione, nel secondo caso il materiale è impossibilitato a recuperare le proprie dimensioni originali quindi si ha la nascita di alti livelli di sforzo interni e nell'ultimo caso si ha in parte il recupero della forma originale ed in parte la nascita di sforzi interni a causa della limitazione imposta nel recupero stesso.

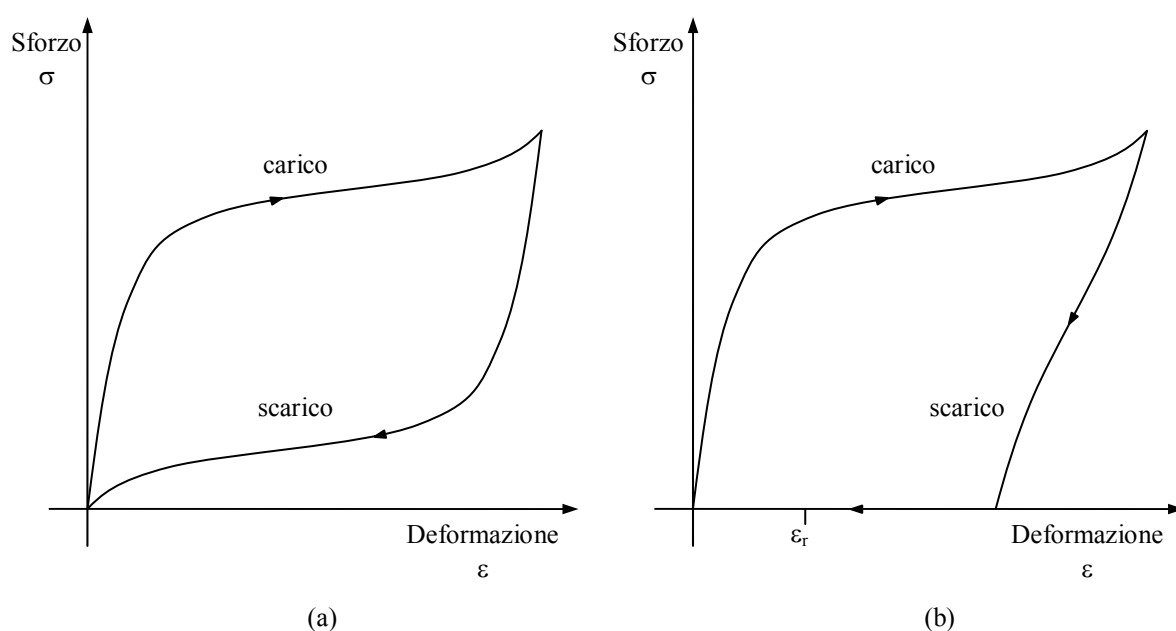


Figura 2.8 - (a) pseudoelasticità: ciclo d'isteresi sforzo-deformazione ($T > A_f$); (b) effetto "memoria di forma": deformazione residua ϵ_r ($T < A_s$)

Per questa particolarità, fibre di lega a memoria di forma sono tipicamente utilizzate come attuatori distribuiti se inseriti in pannelli di composito.

In questo caso queste fibre metalliche vengono pre-caricate e deformate a bassa temperatura nello stato martensite e poi annegate nella matrice per fornire un recupero della deformazione una volta riscaldate.

Gli utilizzi di un tal materiale possono essere svariati, sia come puro attuatore che come sensore/attuatore.

Oggi il vero ostacolo allo sviluppo nell'utilizzo delle SMA sta nella mancanza di un buon modello dinamico del loro comportamento essendo difficoltosa la modellazione del comportamento non lineare di un materiale che permette grandi deformazioni.