

Leghe a memoria di forma (SMA)

La trasformazione martensitica

Effetto superelastico

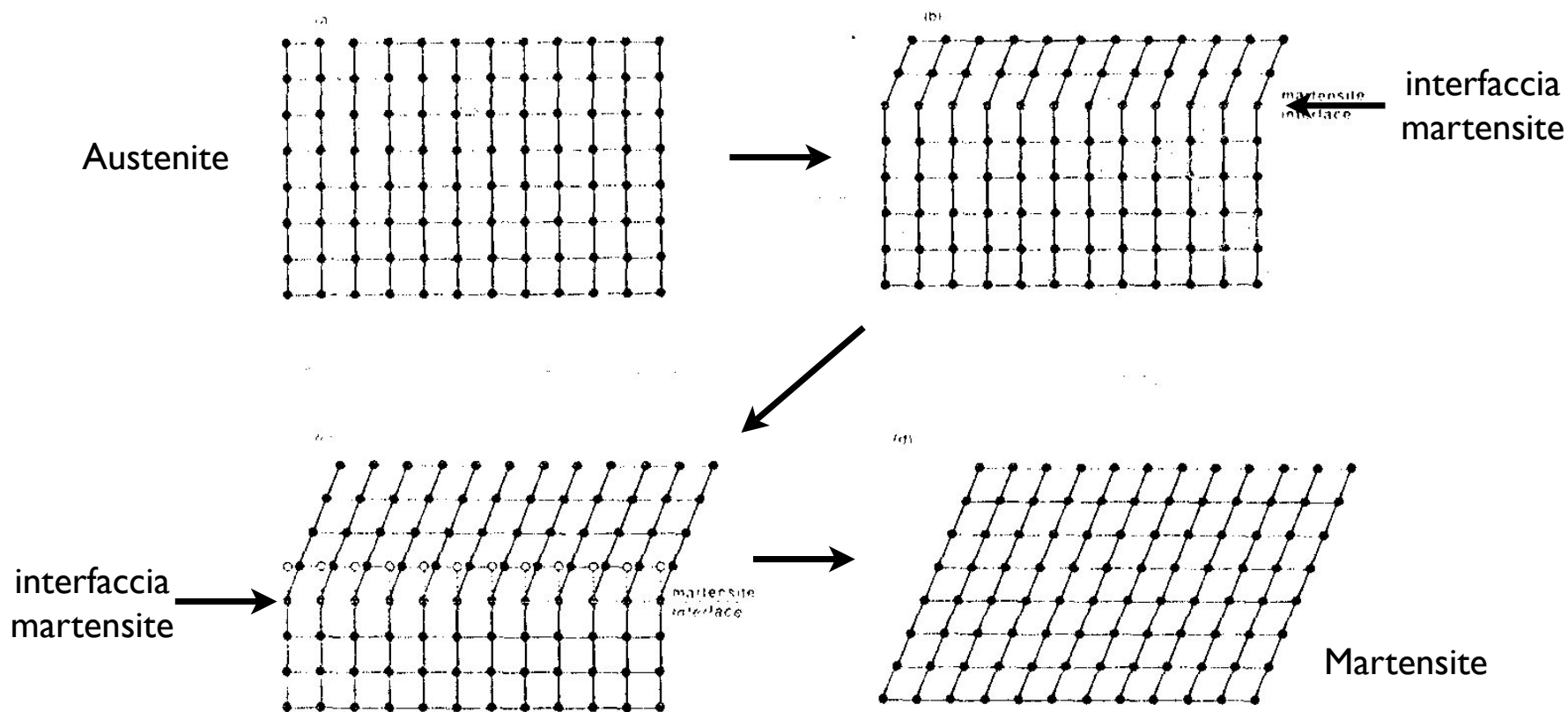
Effetto memoria di forma

Applicazioni SMA

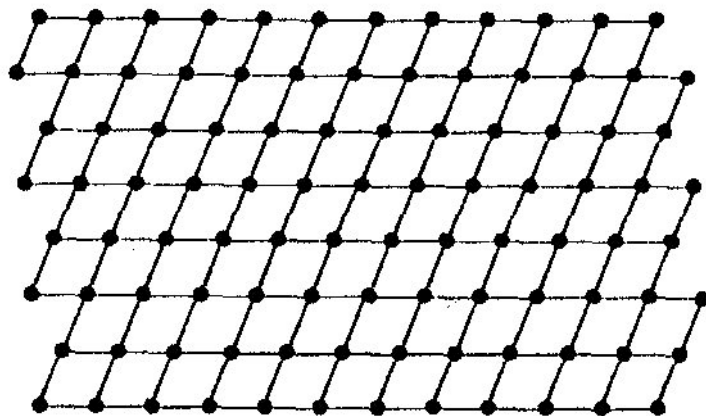
Damping e applicazioni come smorzatore di vibrazioni

La trasformazione martensitica

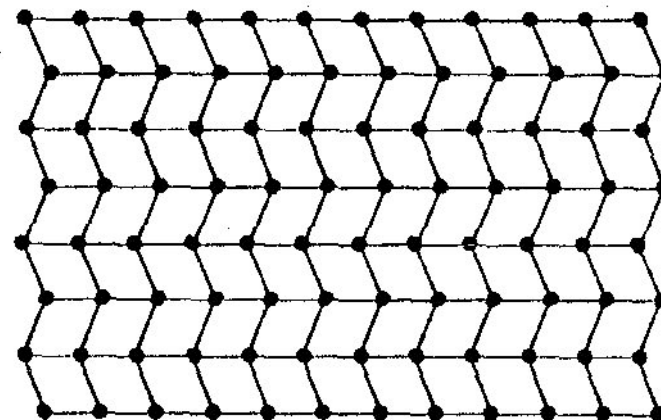
- Trasformazione displasiva, che coinvolge solo delle rotazioni e traslazioni atomiche e nessuna rottura di legame



- La trasformazione da austenite a martensite è ostacolata dalla matrice intorno che costringe il grano a mantenere la propria forma. Allora possiamo avere slip di accomodamento o twinning:



(a) Accommodation by slip

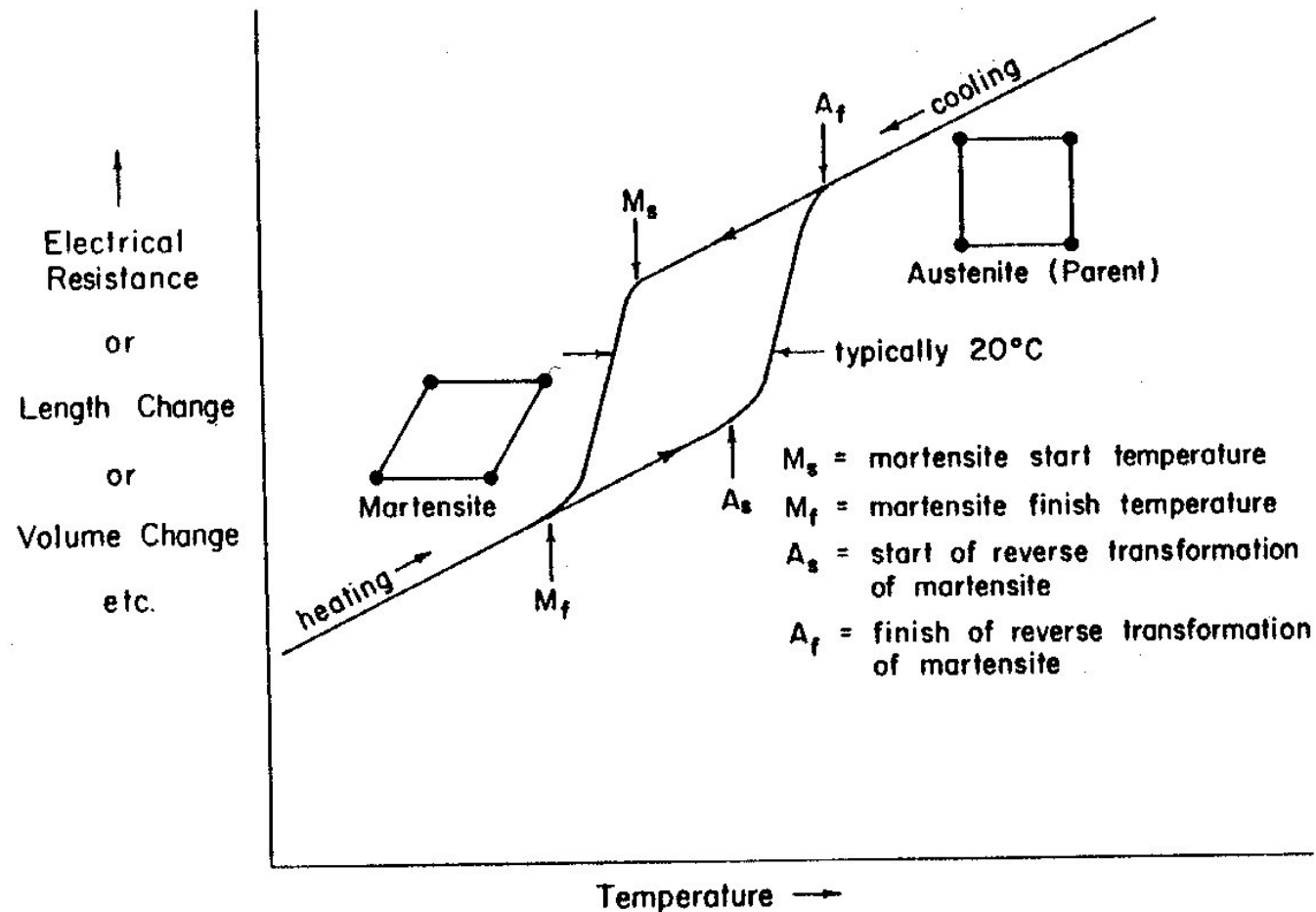


(b) Accommodation by twinning

Costrizione della matrice

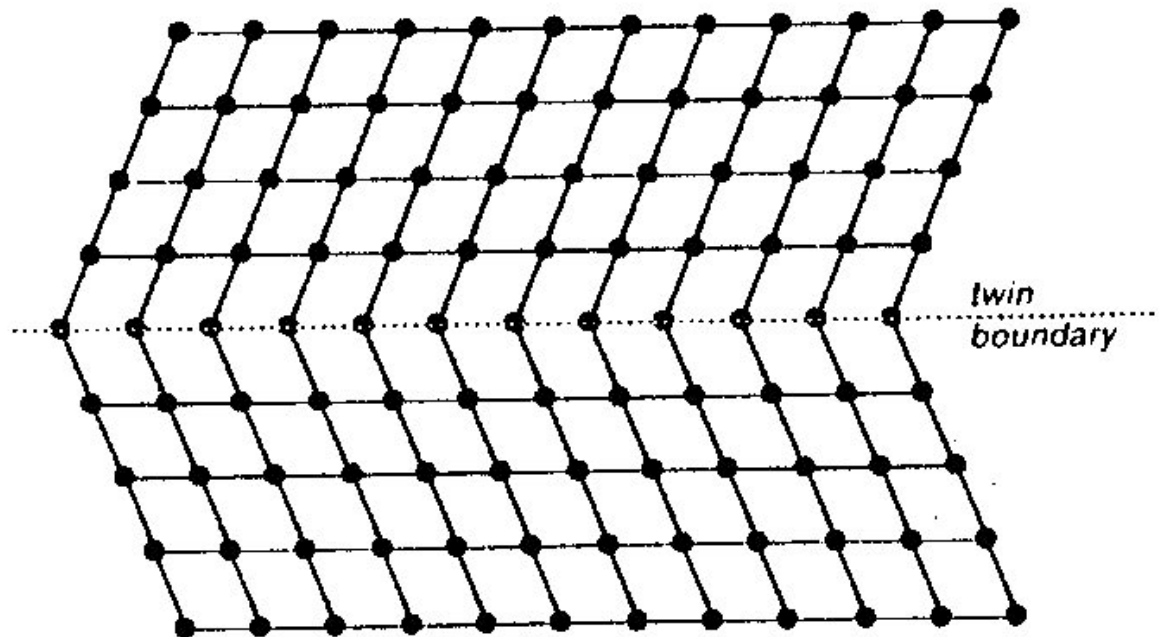
Trasformazione martensitica e proprietà

- Monitorando le proprietà si nota un'isteresi nella trasformazione



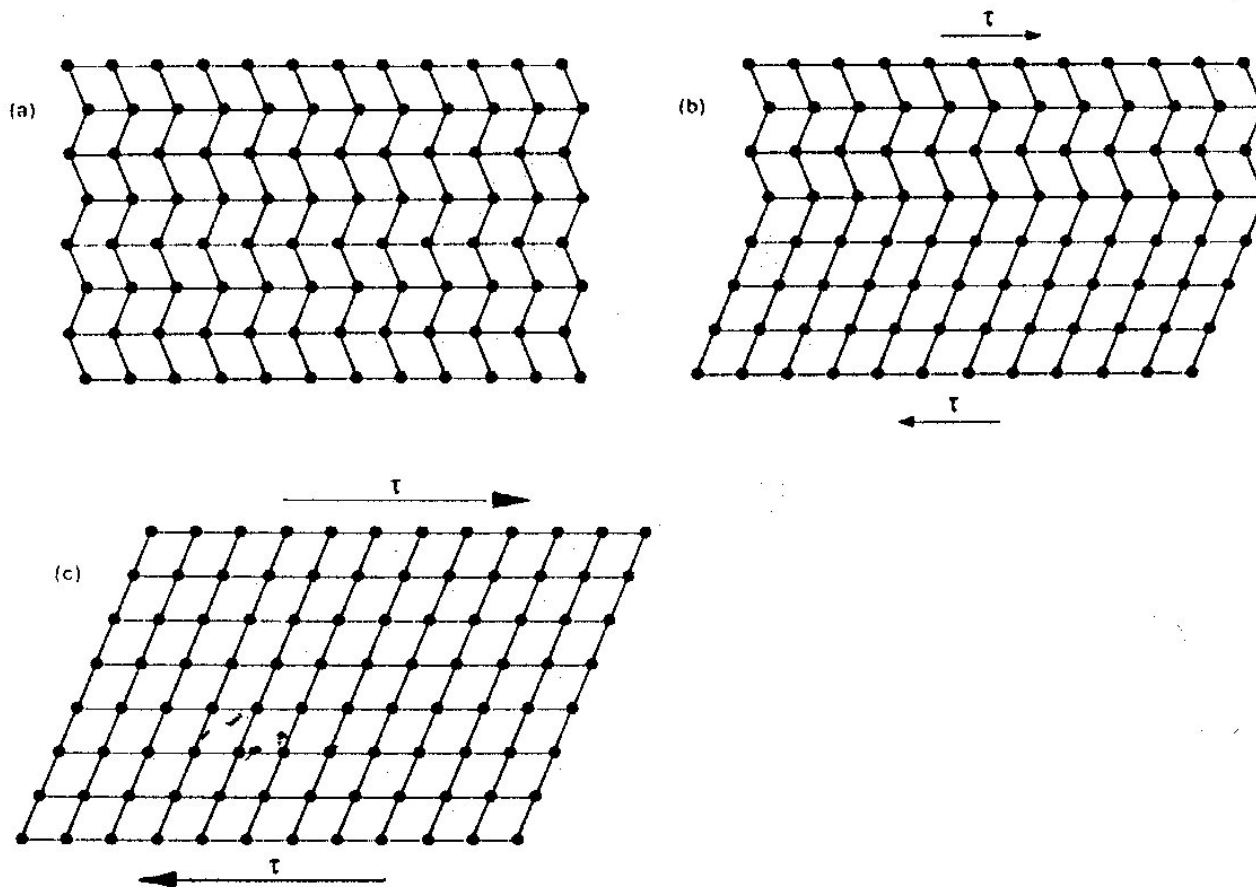
Caratteristiche del twinning

- La geminazione è una deformazione del cristallo possibile con alcune simmetrie cristalline. Il bordo di geminato divide due zone simmetriche rispetto al piano del geminato. Si ottengono per sforzo di taglio.



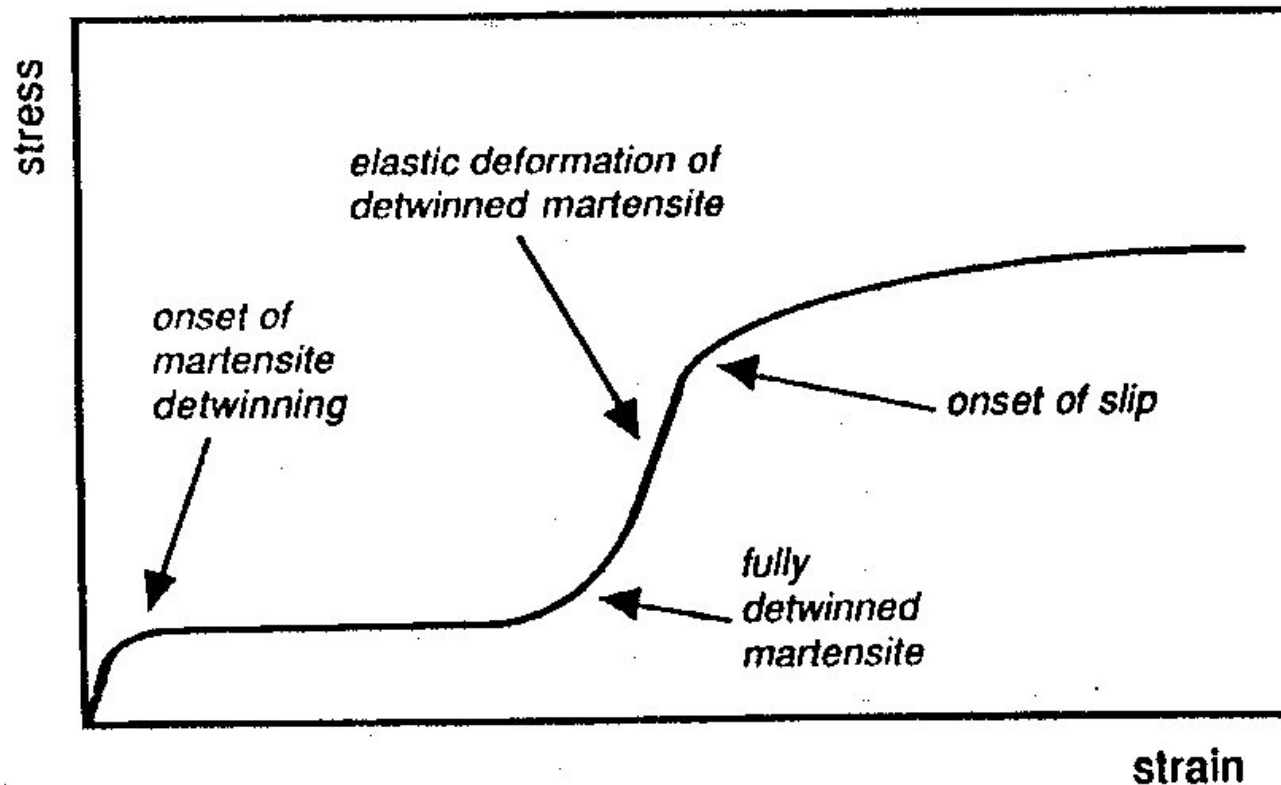
Detwinning

- Il meccanismo di detwinning permette una deformazione notevole senza slittamento dei piani (è comunque una deformazione plastica)

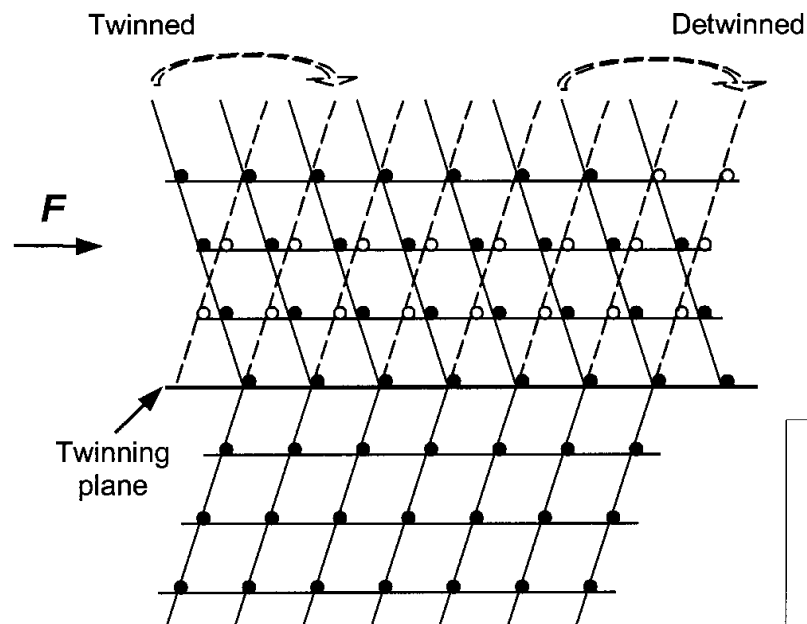


La curva sforzo-deformazione per la martensite

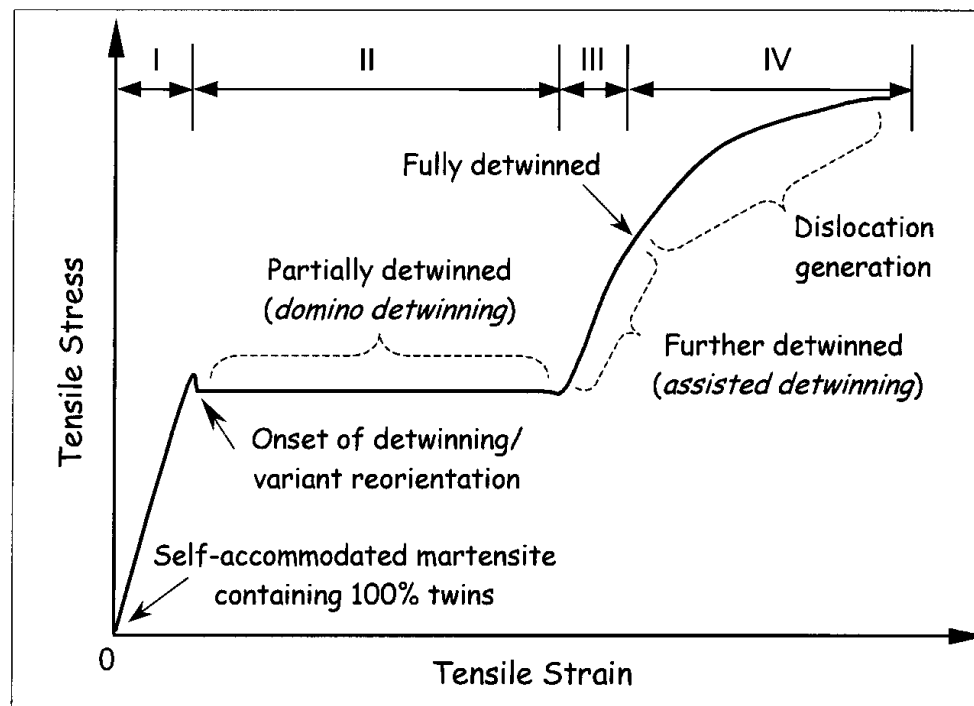
- La martensite proveniente da trasformazione austenite-martensite prima si deforma elasticamente, poi per detwinning, infine abbiamo deformazione plastica usuale per slip



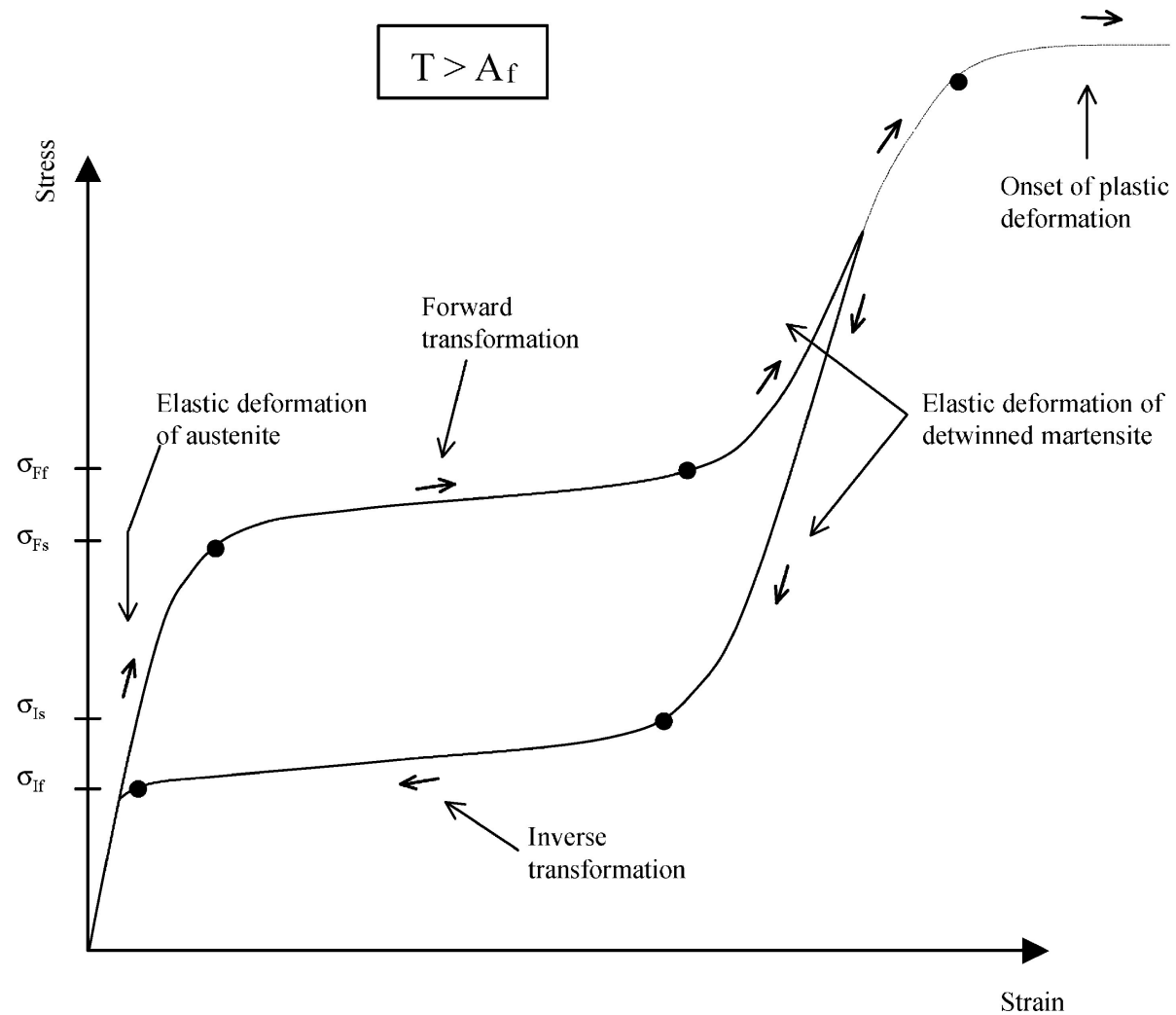
Detwinning e curva sforzo-deformazione



Martensite

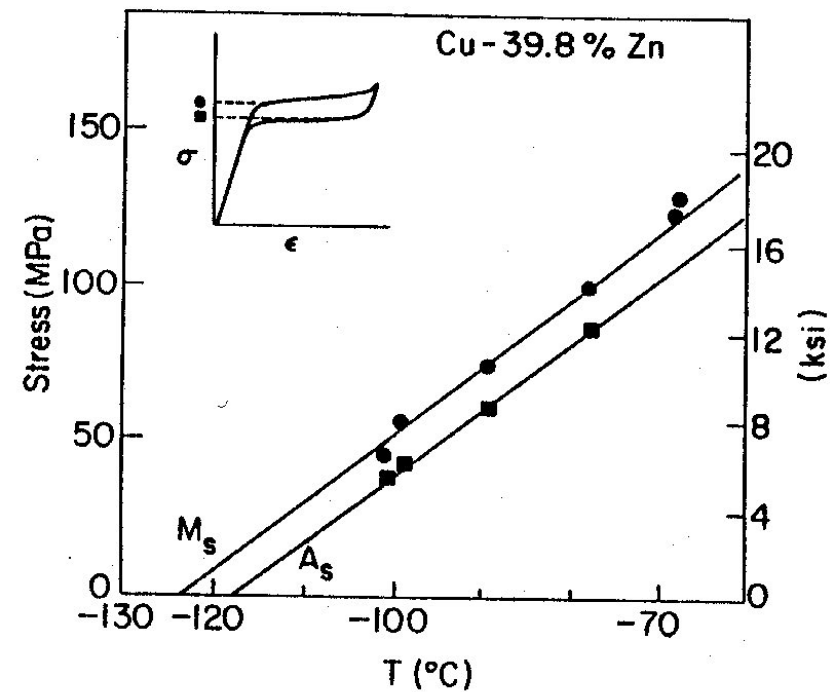
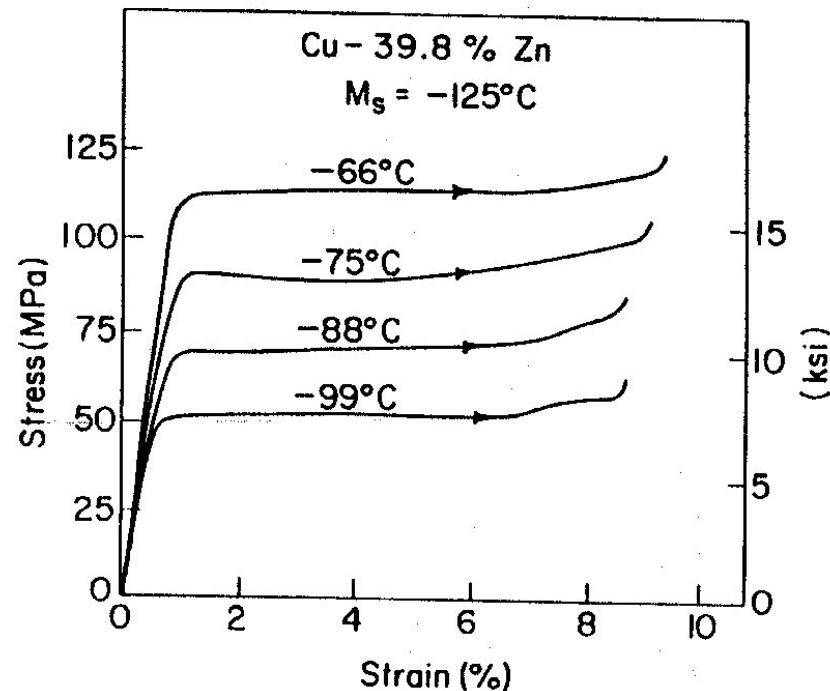


Sforzo-deformazione per l'austenite



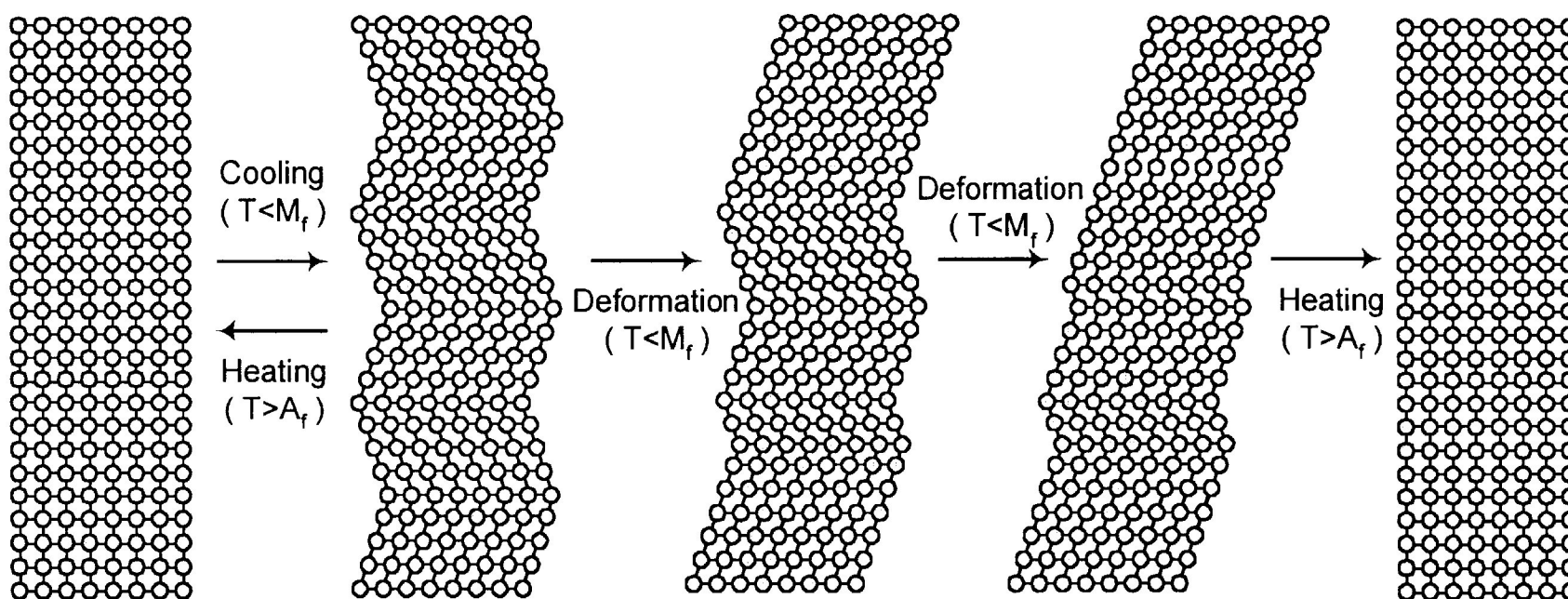
Cosa cambia nella curva con la temperatura?

- Con l'aumento della temperatura il plateau di trasformazione o detwinning (se da austenite o martensite) avviene a temperatura più elevata

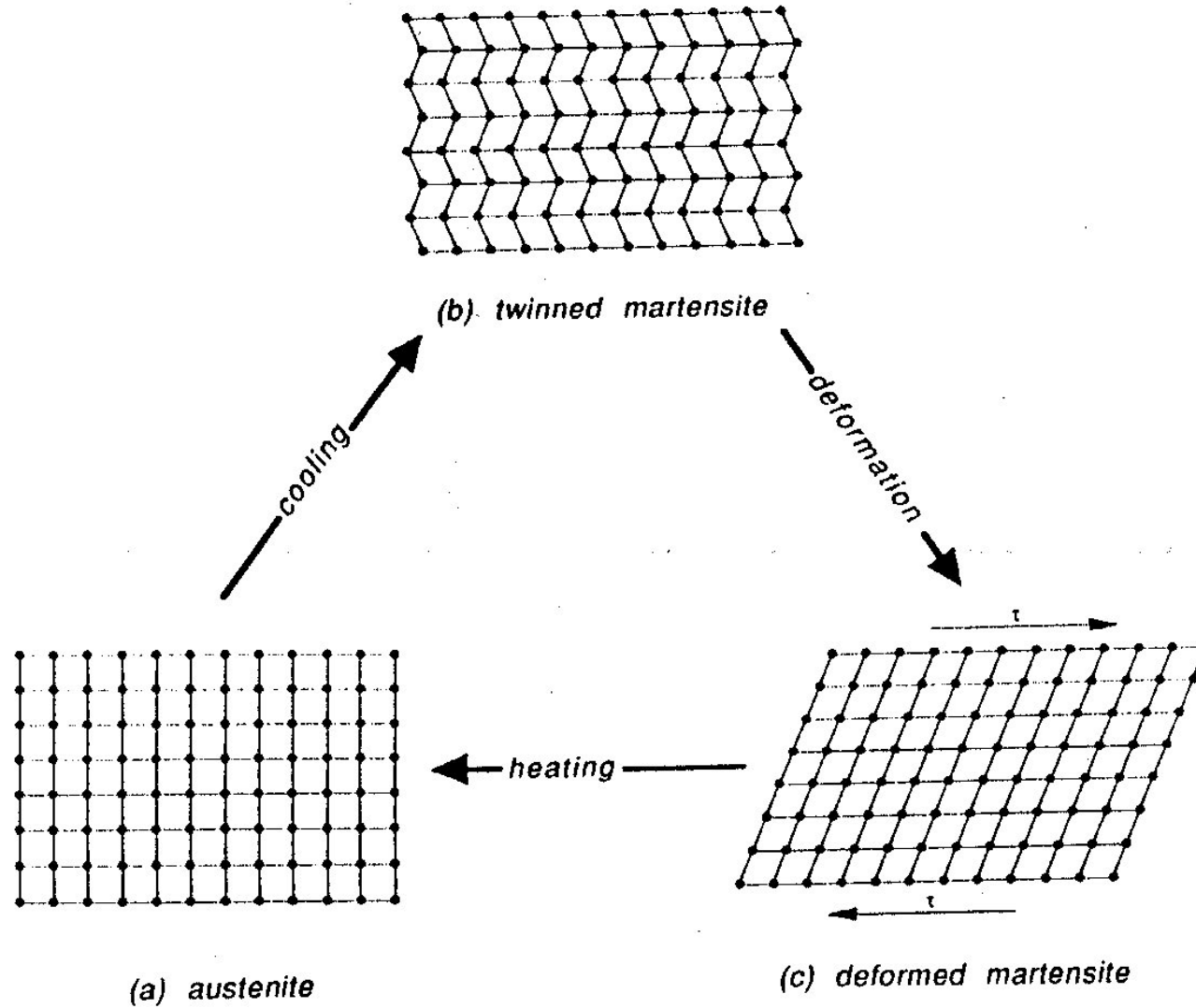


La memoria di forma

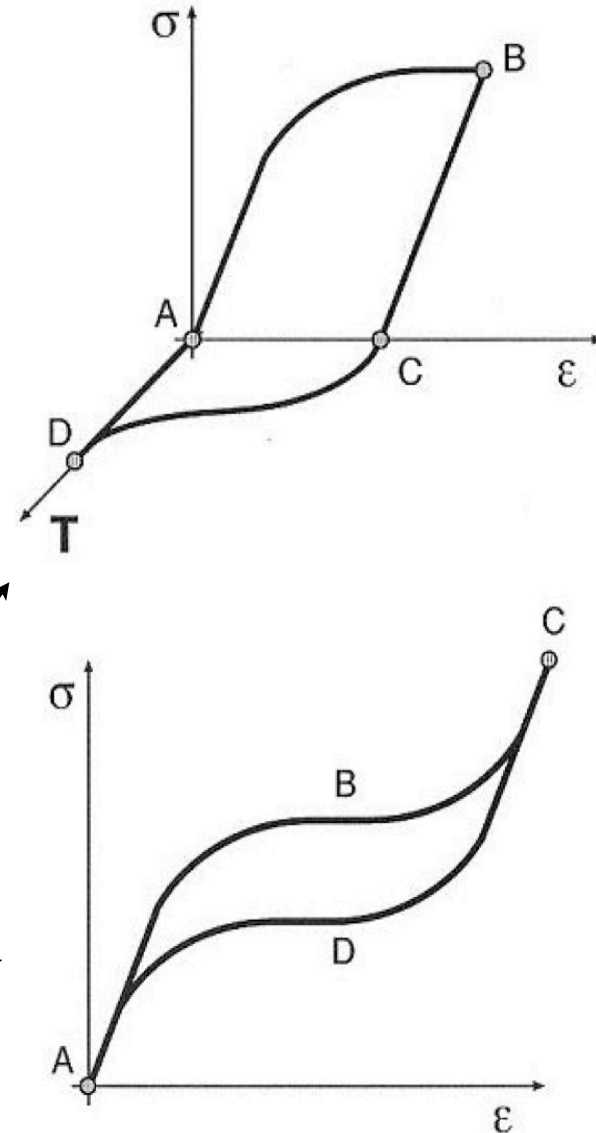
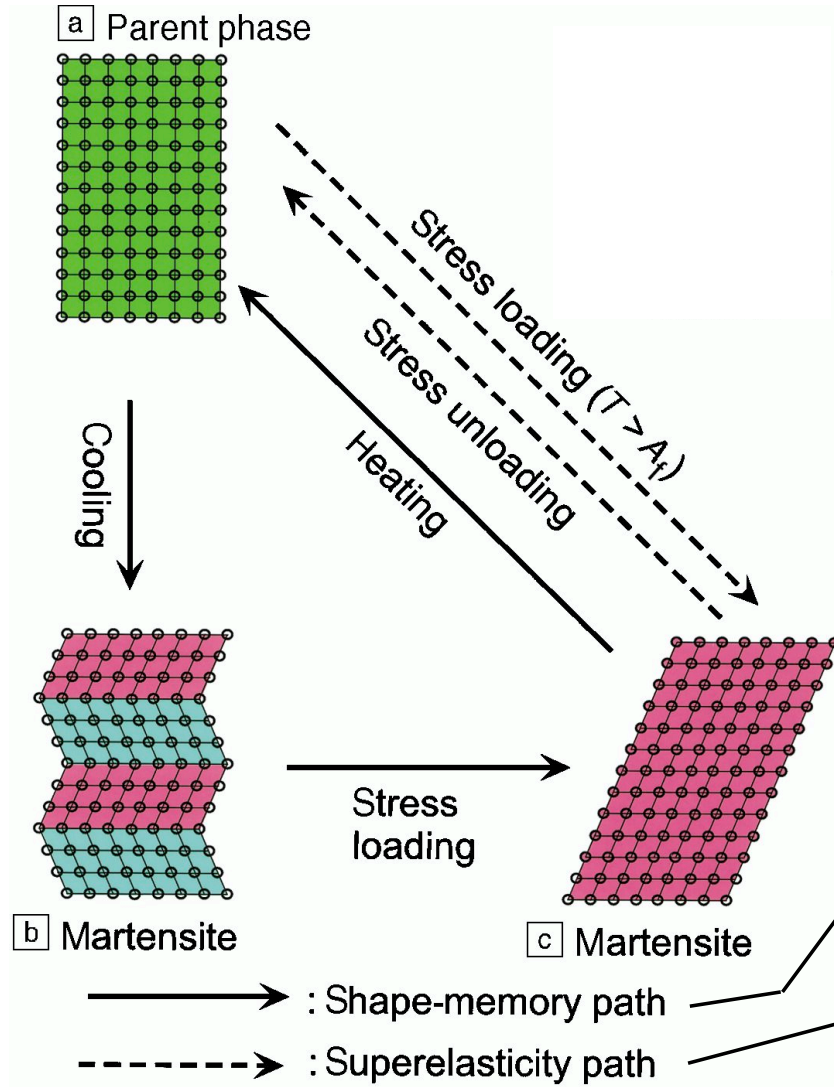
- Partiamo da austenite, raffreddiamo, deformiamo la martensite (per detwinning), riscaldiamo e ritrasformiamo in austenite. La rotazione delle celle forza i grani a tornare alla forma originale con recupero della forma iniziale del pezzo.



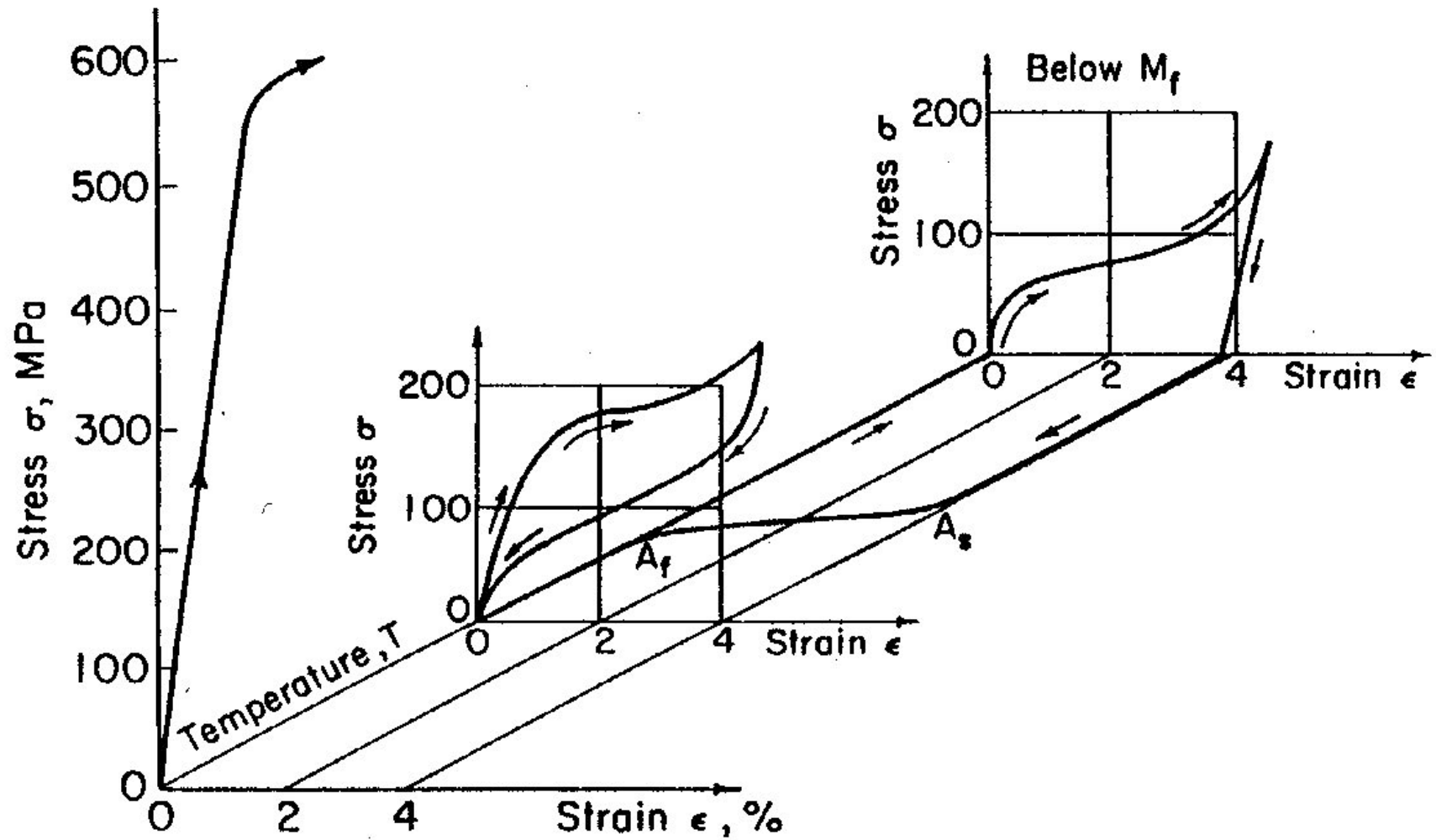
Memoria di forma in sintesi



SMA: memoria di forma e superelasticità



Curva sforzo-deformazione-temperatura



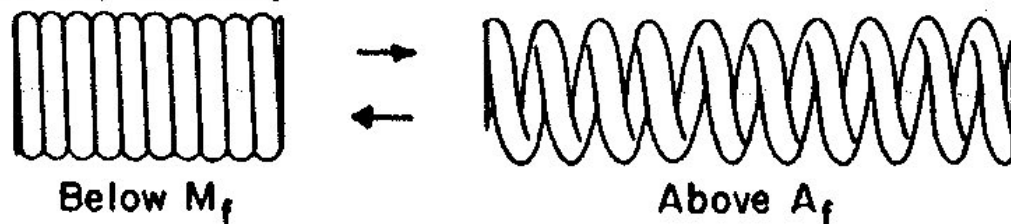
Memoria a due vie

- Memoria di forma a una via: si deforma in fase martensitica e riscaldando sopra la A_f il pezzo recupera la propria forma iniziale
- Memoria a due vie: il pezzo viene sottoposto a training in modo che a bassa e alta temperatura assuma due forme diverse stabilmente

One-way memory



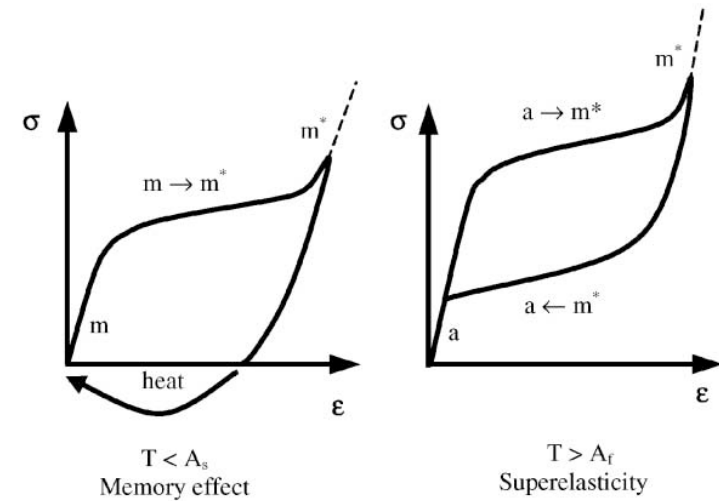
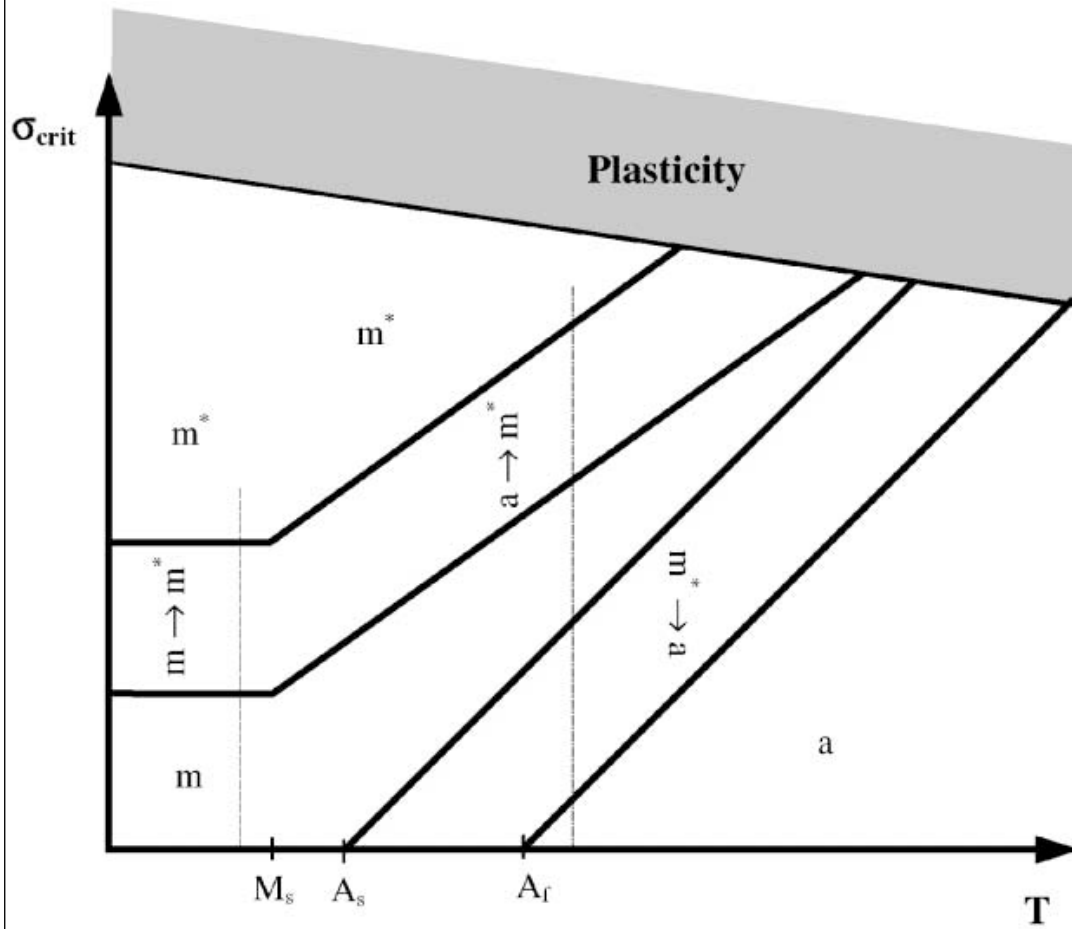
Two-way memory



Training

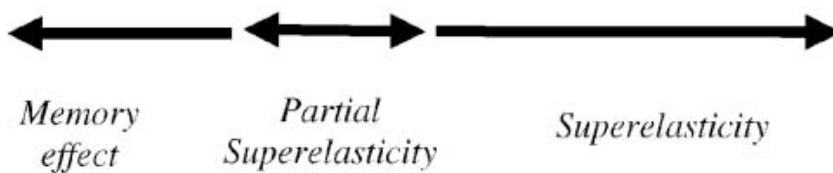
- Il pezzo viene sottoposto a cicli termici nei quali ad alta temperatura (austenite) lo si forza in una forma e a bassa temperatura (martensite) in un'altra forma
- Il ciclaggio viene portato avanti finchè il pezzo assume stabilmente le due forme.
- La memoria a due vie viene utilizzata per attuatori che facciano un determinato lavoro a seguito di aumento e decremento di temperatura sopra e sotto le temperature di trasformazione finali.

Temperatura-sforzo vs. stabilità delle fasi



NOTATIONS :

- a : austenite
- m : twinned martensite
- m^* : detwinned martensite



Tipi di leghe a memoria di forma

Alloy type	Composition	Temp. range [$^{\circ}C$]	Hyst. [$^{\circ}C$]
Ag-Cd	44/49 at. % Cd	-190 to -50	15
Au-Cd	46.5/50 at. % Cd	30 to 100	15
Cu-Al-Ni	14/14.5 at. % Al 3/4.5 wt. % Ni	-140 to 100	35
Cu-Sn	\approx 15 at. % Sn	-120 to 30	
Cu-Zn	38.5/41.5 wt. % Zn	-180 to -10	10
In-Ti	18/23 at. % Ti	60 to 100	4
Ni-Al	36/38 at. % Al	-180 to 100	10
Ni-Ti	49/51 at. % Ni	-50 to 110	30
Fe-Pt	\approx 25 at. % Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 at. % Cu	-250 to 180	24
Fe-Mn-Si	32 wt. % Mn, 6 wt. % Si	-200 to 150	100

Prprietà delle leghe Ni-Ti

Melting temperature	1300	[°C]
Density	6.45	[g/cm ³]
Resistivity austenite	≈ 100	[μΩ cm]
Resistivity martensite	≈ 70	[μΩ cm]
Thermal conductivity austenite	18	[W/(cm°C)]
Thermal conductivity martensite	8.5	[W/(cm°C)]
Corrosion resistance	similar to Ti alloys	
Elasticity Modulus austenite	≈ 80	[MPa]
Elasticity Modulus martensite	≈ 20 to 40	[MPa]
Yield strength austenite	190 to 700	[MPa]
Yield strength martensite	70 to 140	[MPa]
Ultimate tensile strength	≈ 900	[MPa]
Transformation tmperature	-200 to 110	[°]
Shape memory strain	8.5	[%]

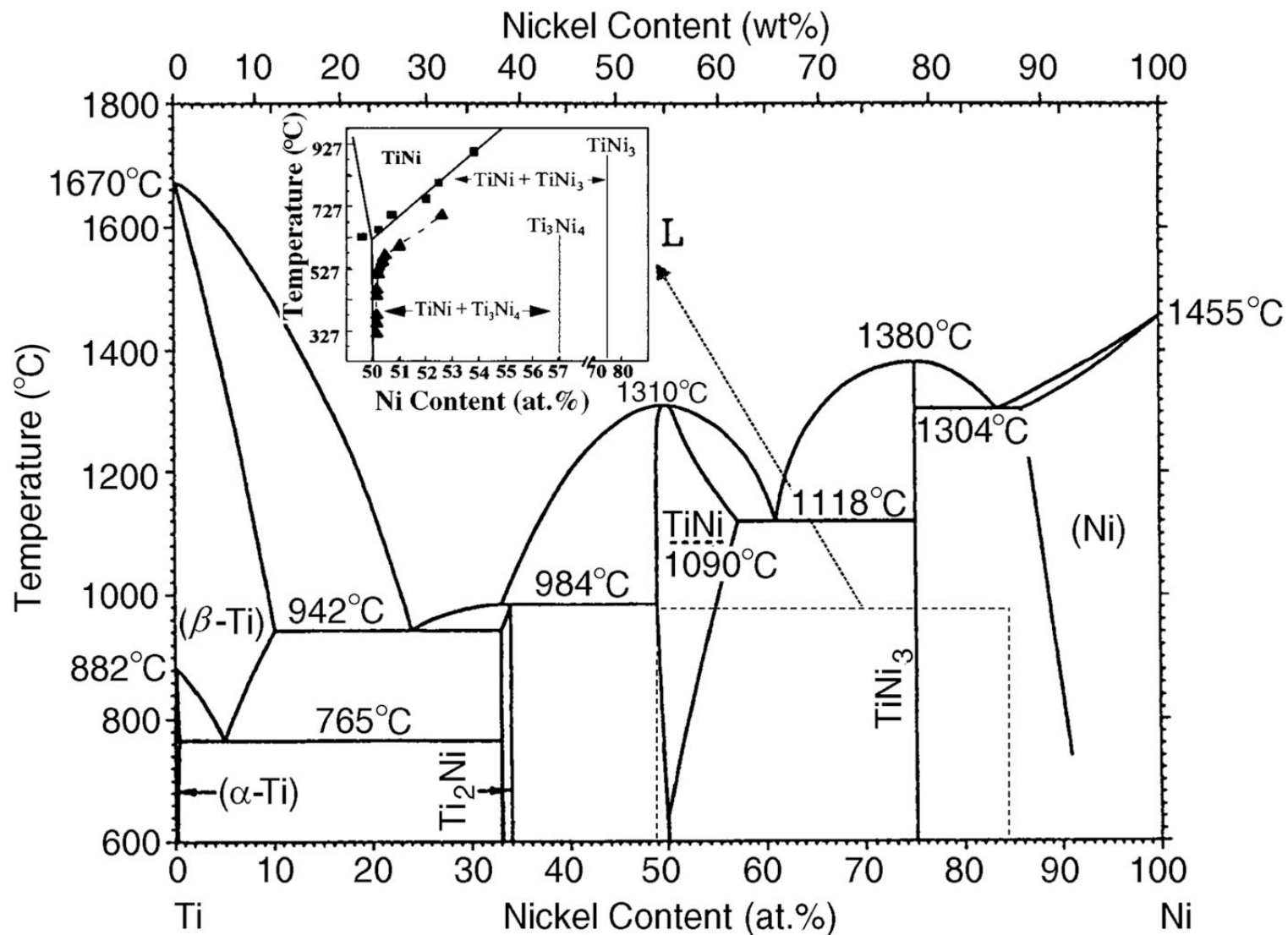
Altre leghe SMA

Alloy type	CuZnAl	CuAlNi	
Melting temperature	950 to 1020	1000 to 1050	[°C]
Density	7.64	7.12	[g/cm ³]
Resistivity	8.5 to 9.7	11 to 13	[μΩ cm]
Thermal conductivity	120	30 to 43	[W/(cm°C)]
Elasticity Modulus austenite	72 (*)	85 (*)	[MPa]
Elasticity Modulus martensite	70 (*)	80 (*)	[MPa]
Yield strength austenite	350	400	[MPa]
Yield strength martensite	80	130	[MPa]
Ultimate tensile strength	600	500 to 800	[MPa]
Transformation temperature	≤ 120	≤ 200	[°C]
Shape memory strain	4	4	[%]

Confronto NiTi-acciai

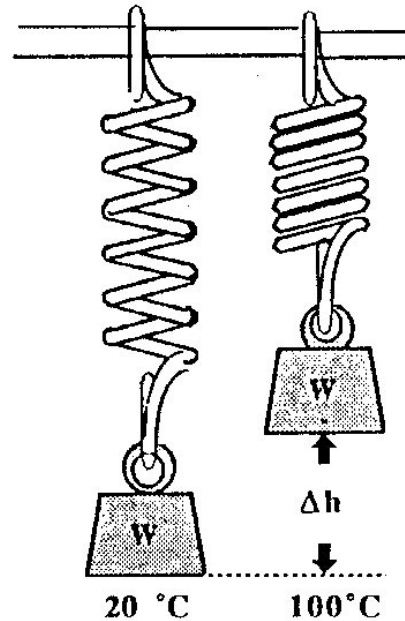
Property	NiTi SMA	Steel
Recoverable elongation [%]	8	2
Modulus of elasticity [MPa]	8.7×10^4 (A), 4×10^4 (M)	2.07×10^5
Yield strength [MPa]	200-700 (A), 70-140 (M)	248-517
Ultimate tensile strength [MPa]	900 (f.a.), 2000 (w.h.)	448-827
Elongation at failure [%]	25-50 (f.a.), 5-10 (w.h.)	20
Corrosion performance	Excellent	Fair

Diagramma di fase binario Ni-Ti



Applicazioni SMA: memoria ad una via

- L'attuatore più semplice: a bassa temperatura il peso deforma per gravità la molla nello stato martensitico (la martensite ha un modulo elastico più basso dell'austenite). Ad alta temperatura si ritrasforma e la molla recupera lo stato iniziale



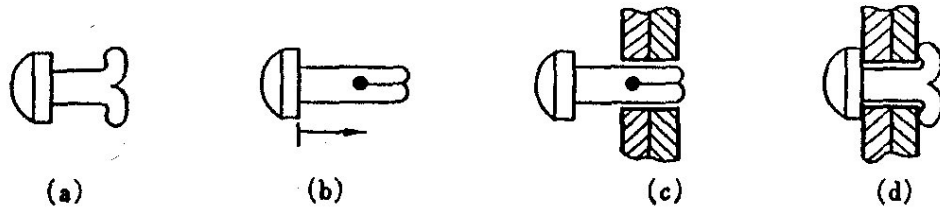
Classi di applicazione delle SMA

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Sistemi di smorzamento

Classi di applicazione delle SMA

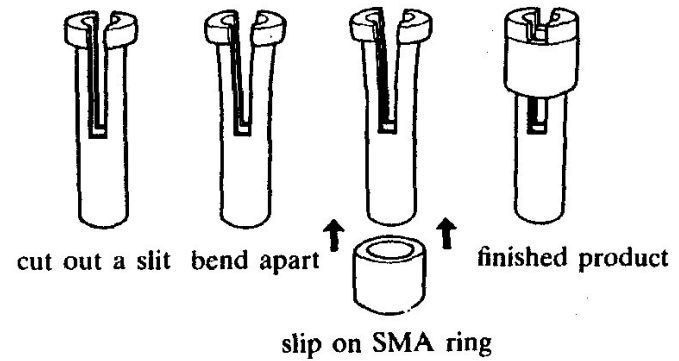
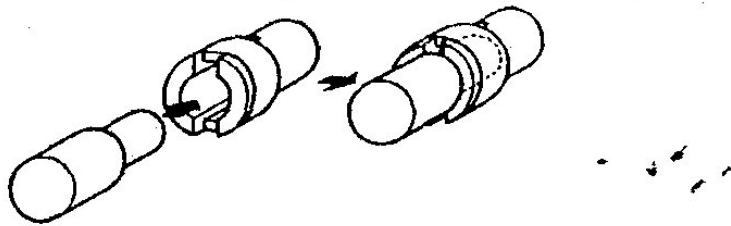
- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Sistemi di smorzamento

Applicazioni SMA: giunzioni



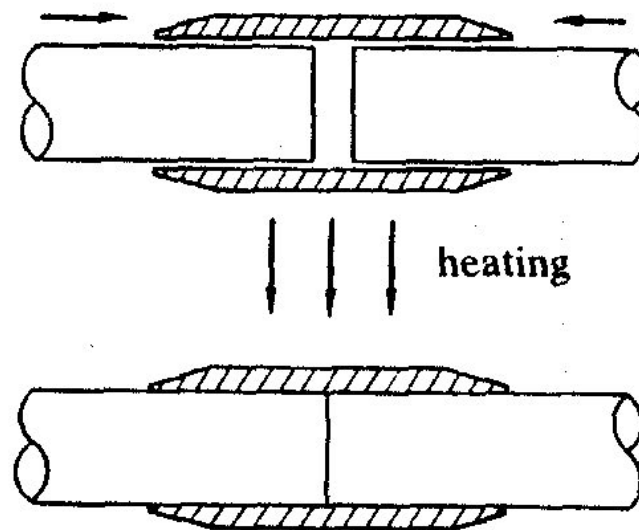
Rivetti autobloccanti

insert after cooling fasten at room temperatures.



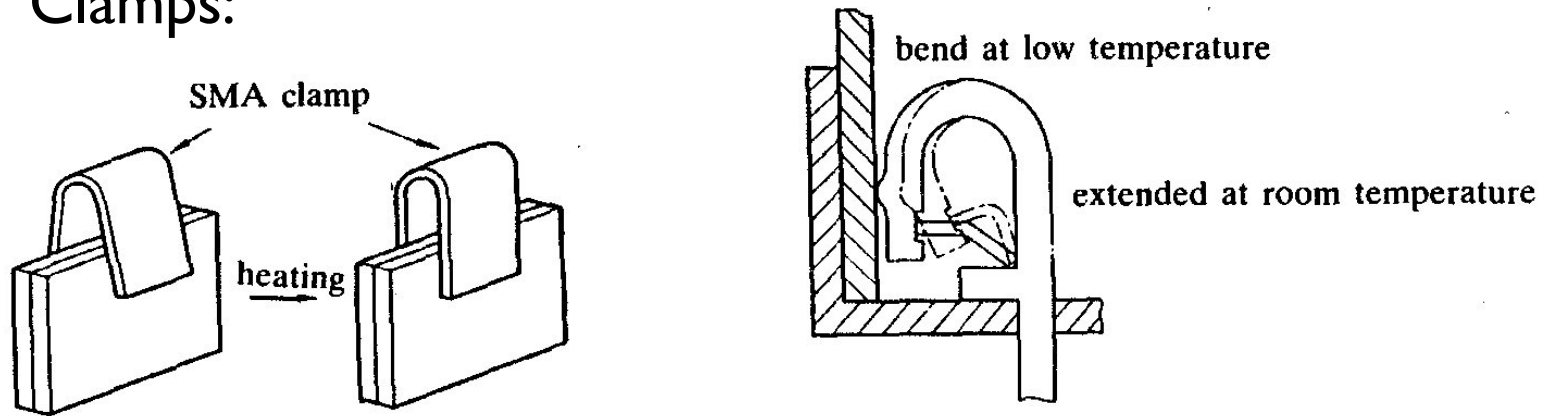
Flange di giunzione

- Si allargano in pressione
- Si applicano
- Si riscalda e si restringono applicando un carico progettabile accuratamente
- Connettori ZIF (Zero Insertion Force)

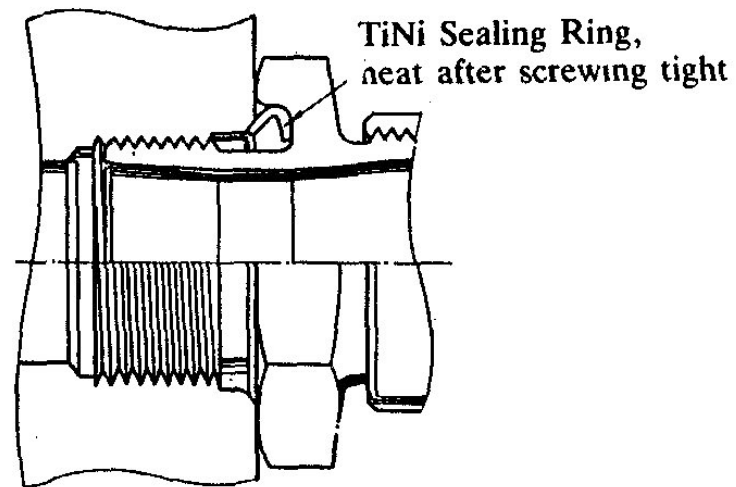


Giunzioni e anelli di tenuta

- Clamps:



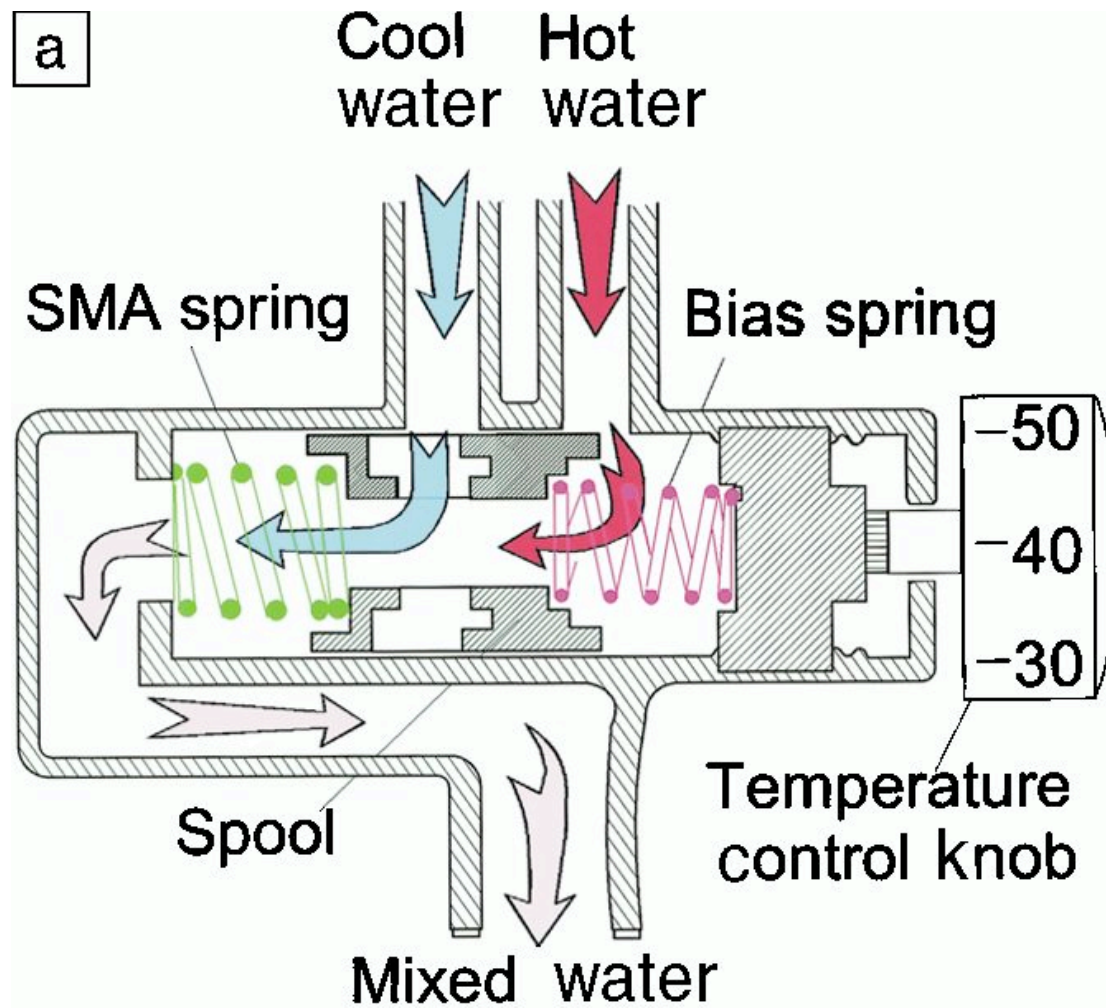
- Anelli di tenuta



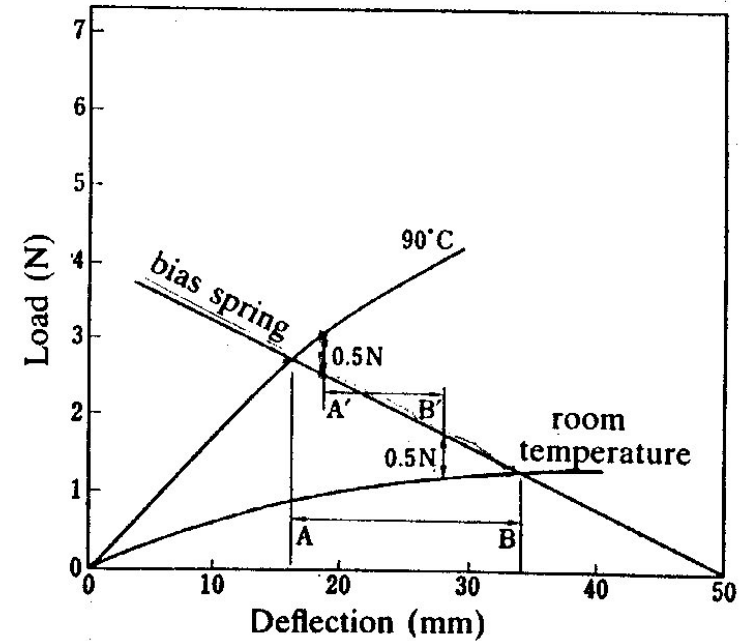
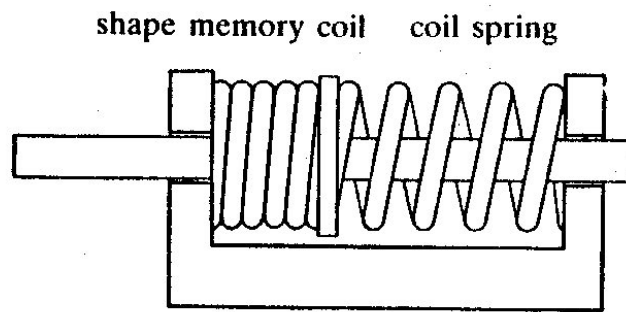
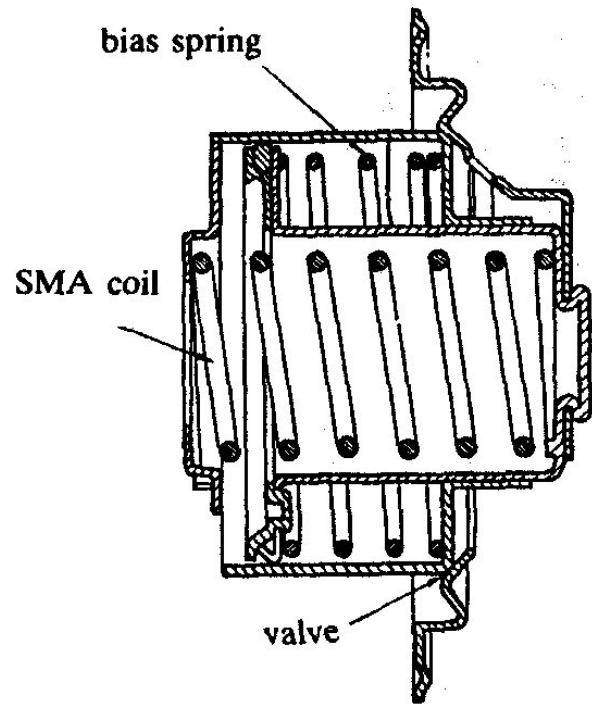
Classi di applicazione delle SMA

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- **Attuatori**
- Smart materials
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Sistemi di smorzamento

Applicazioni SMA: valvola termostatica

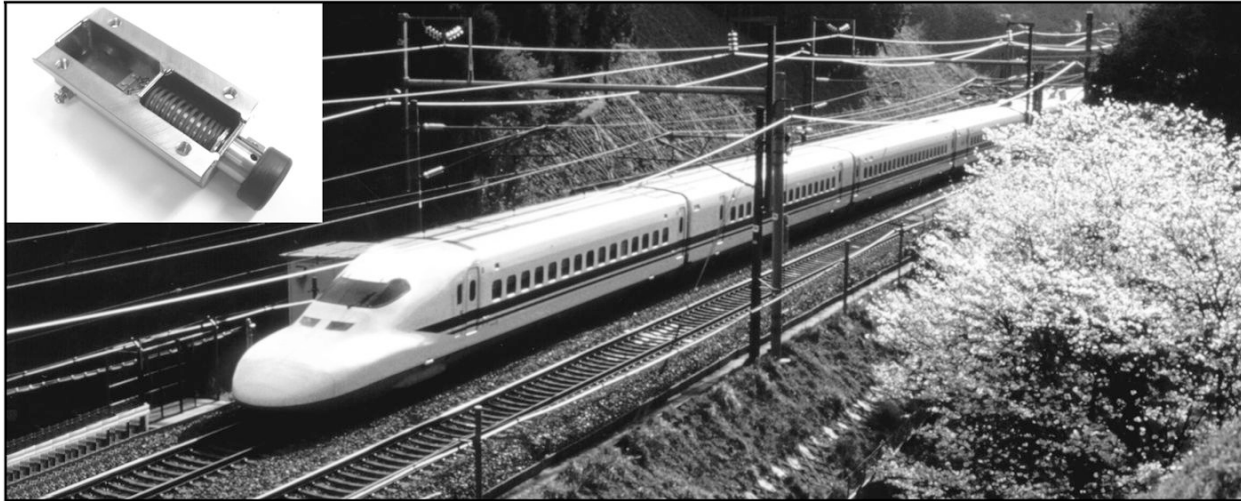


Dimensionamento dispositivo a doppia molla



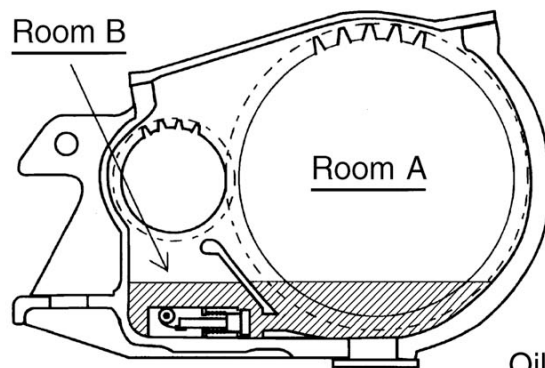
Uso delle valvole sui treni ad alta velocità

a



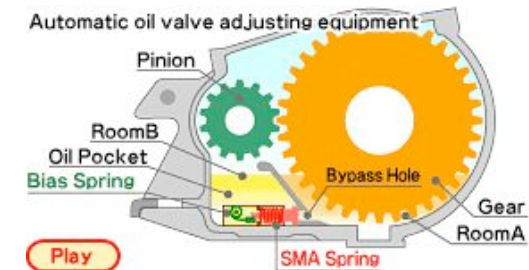
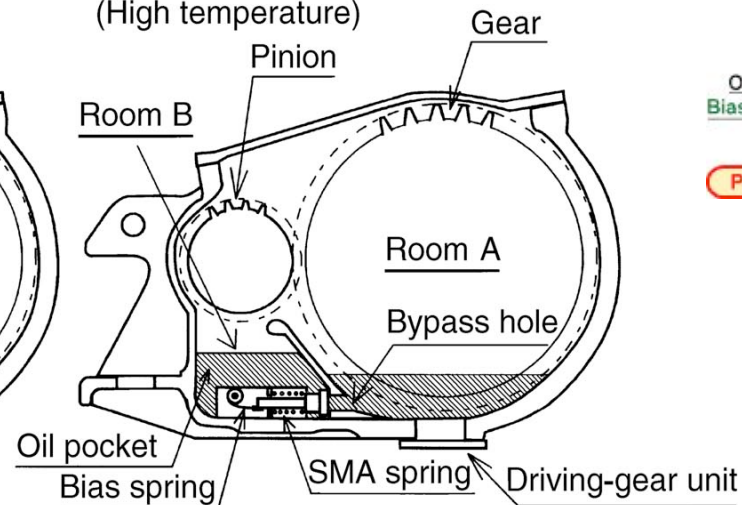
b

(Low temperature)

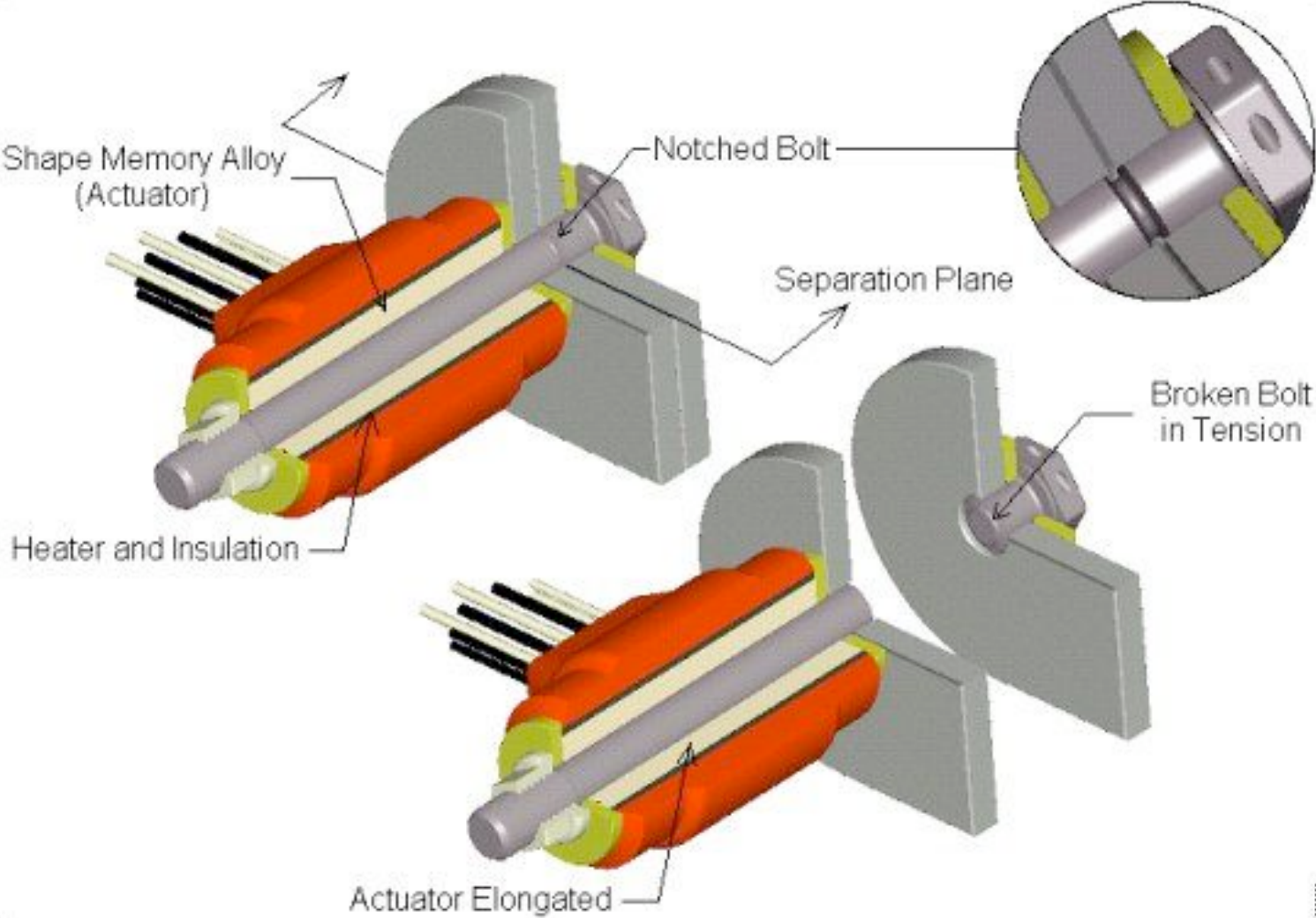


c

(High temperature)



Frangibolt system



Frangibolt specifications

Specifications

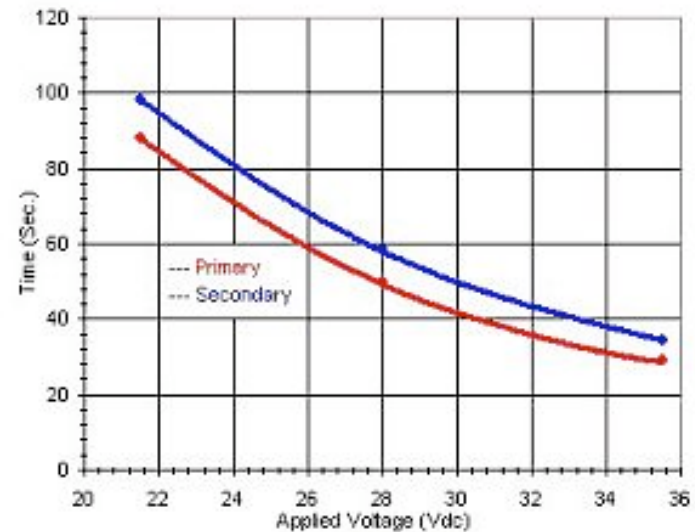
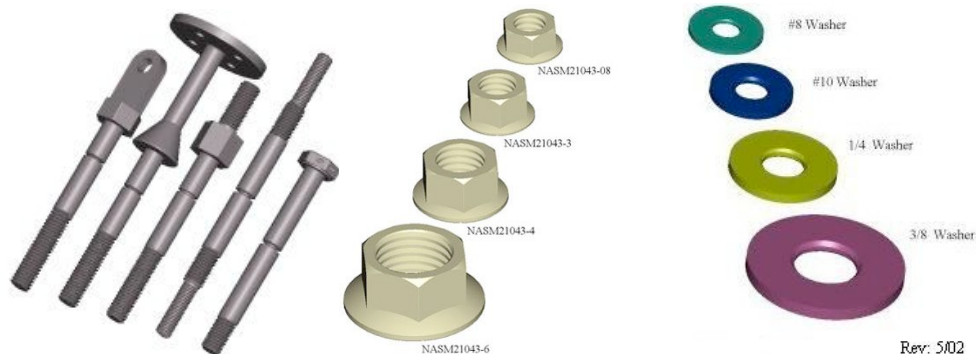
Max Load Support & Release	22,000 N	(5000 lbf)
Max Joint Length	8.25 cm	(3.25 in)
Operational Voltage	22 to 36 Vdc	
Minimum Operating Temp.	-65 °C	(-85 °F)
Maximum Operating Temp. ²	+80 °C	(176 °F)
Heater Resistance	7.0 Ohms	
Mass	100 gm	(3.53 oz)
Power Consumption	112 Watts @ 28 Vdc	
Life Cycles	60 Cycles Min.	

Features:	Redundant Heater
	Reusable
	TC or RTD Sensor



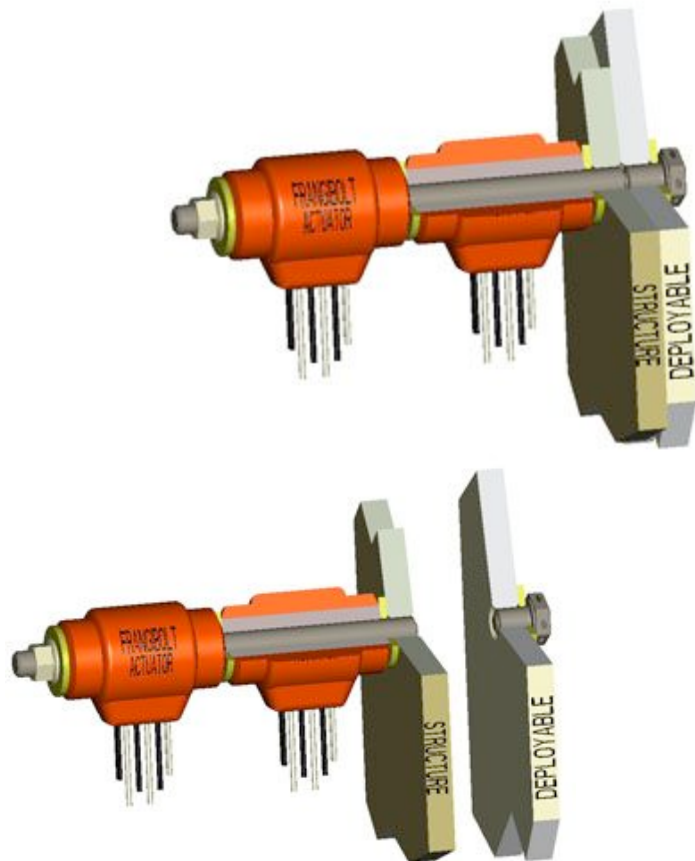
Rev. 5/02

Dimensions shown in inches

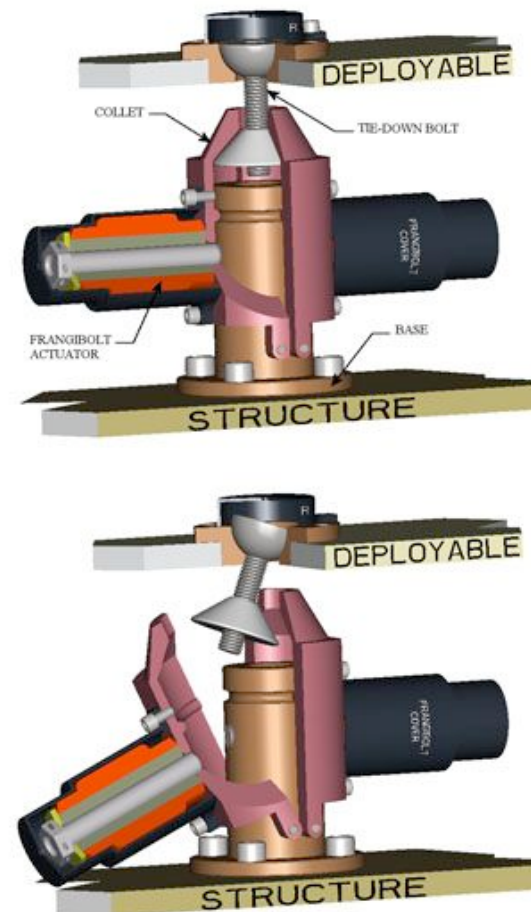


Per aumentare l'affidabilità

Utilizzo in serie

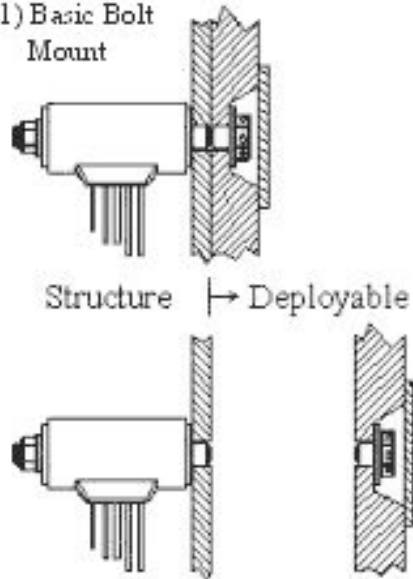


Utilizzo in parallelo

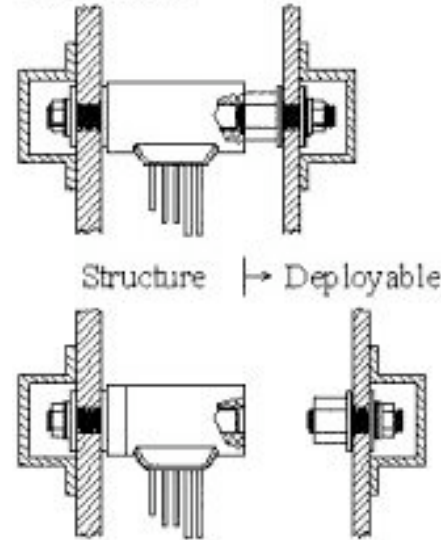


Modalità di impiego di Frangibolt

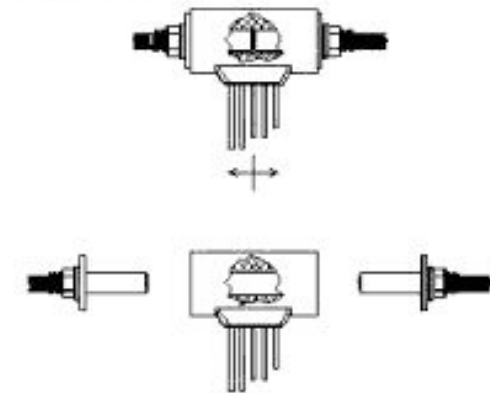
1) Basic Bolt Mount



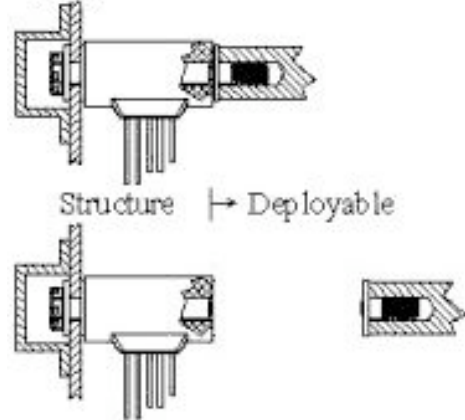
2) Lug Mount



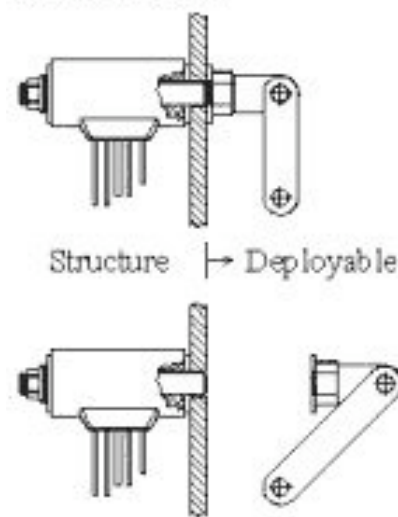
3) Tension Tie



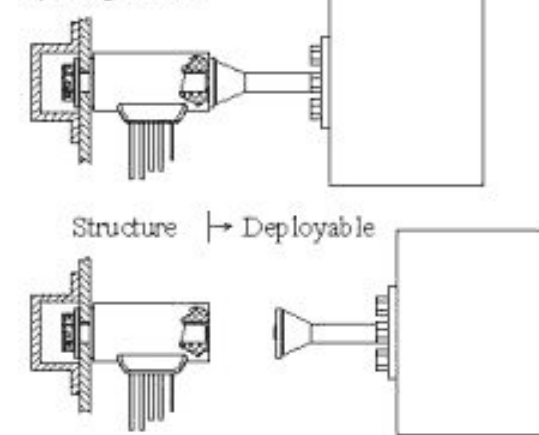
4) Coupler Release



5) Clevis Mount

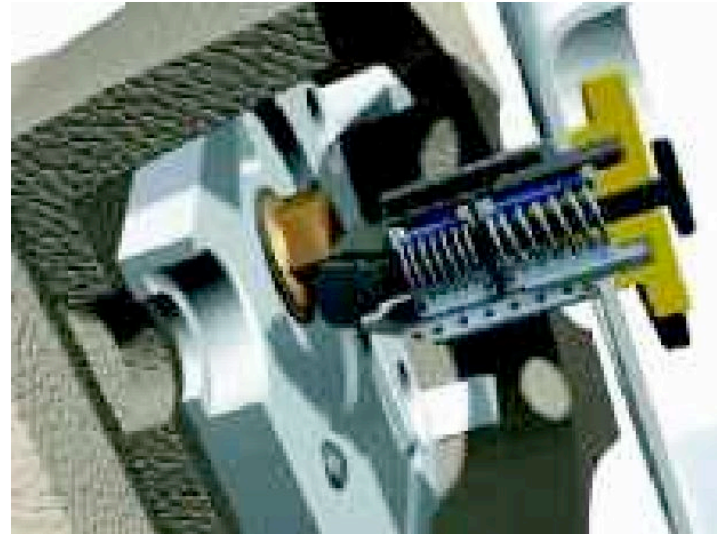


6) Flange Mount

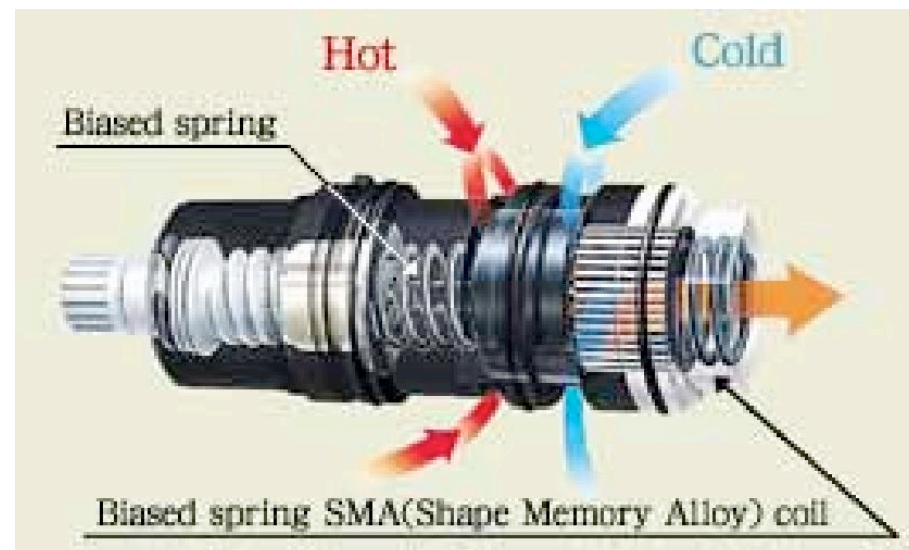


Attuatori nell'uso comune

- Sistema di aggancio/ rilascio airbag

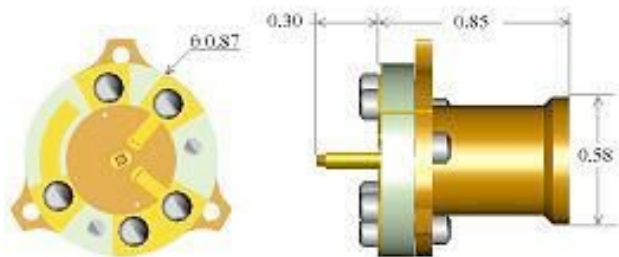
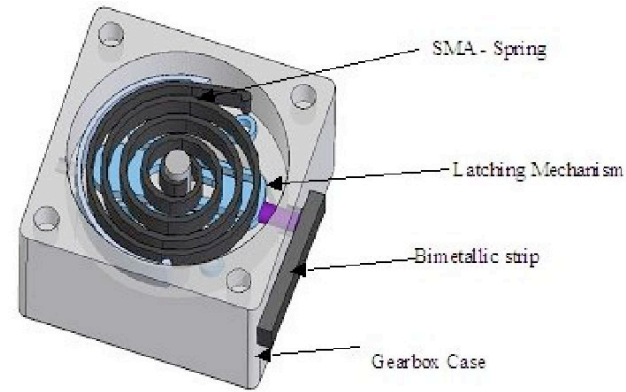


- Valvola sicurezza acqua troppo calda



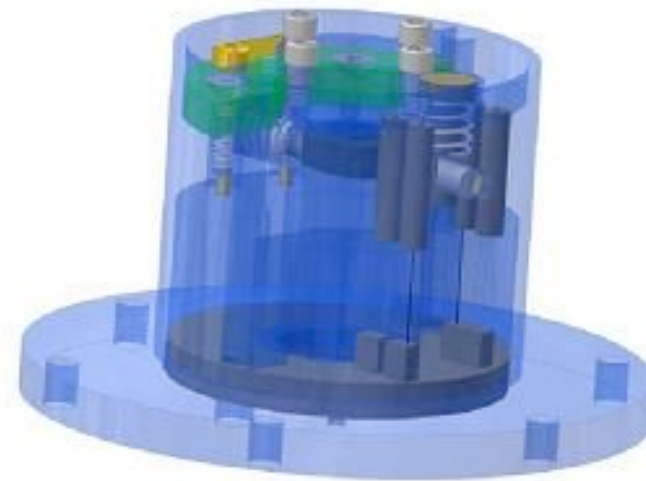
Attuatori aerospaziali

Motore rotativo azionato dalla luce e utilizzato nella missione su Marte



Pinpuller, 10 gr, forza 2.3 Kg, missione su Marte

SOC (Solar Occultation Channel), strumento Persi Alice (Plutone): apre e chiude delle chiusure a scorrimento che fanno passare o meno la luce



Caratteristiche attuatori SMA, pregi

- Semplicità del meccanismo:
 - il dispositivo può essere progettato in modo da sviluppare direttamente l'azione richiesta, senza richiedere elementi di trasmissione e collegamento.
- Funzionamento senza attrito, pulito, silenzioso, e senza generazione di scintille:
 - non richiedono l'uso di componenti ausiliari basati su attrito (ad es. ingranaggi), e quindi escludono la generazione di polveri, funzionamento senza vibrazioni e silenzioso, assenza di scintille -> adatti all'impiego con sostanze infiammabili.
- Elevato rapporto potenza/peso:
 - soprattutto per attuatori di piccole dimensioni e peso (< 100g)

Caratteristiche attuatori SMA, difetti

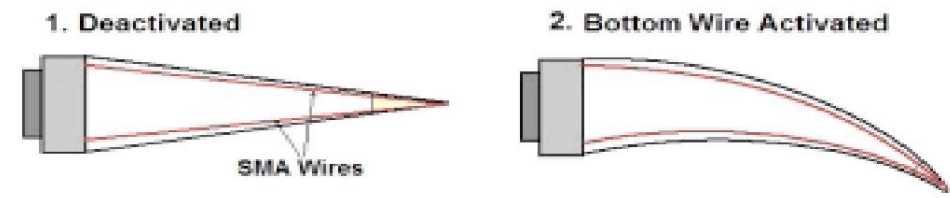
- **Bassa efficienza energetica:**
 - dipende fortemente dalla configurazione e dal tipo di deformazione; il caso più favorevole si ha con elementi filiformi caricati a tensione, in quanto opera in condizioni di sollecitazione uniformi.
 - Configurazioni che ingenerano una distribuzione dello stress non uniforme realizzano un peggiore utilizzo del materiale e quindi risultano meno efficienti.
- **Limitata banda passante (di attuazione):**
 - deriva principalmente dalla durata del raffreddamento, il riscaldamento può essere abbastanza rapido, il raffreddamento è limitato dalle capacità di smaltire il calore nell'ambiente.
- **Deterioramento e fatica:**
 - per poter realizzare un numero elevato di cicli, risulta necessario operare con livelli di deformazione e sollecitazione ridotti.

Classi di applicazione delle SMA

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- **Smart materials**
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Sistemi di smorzamento

Applicazioni come smart materials

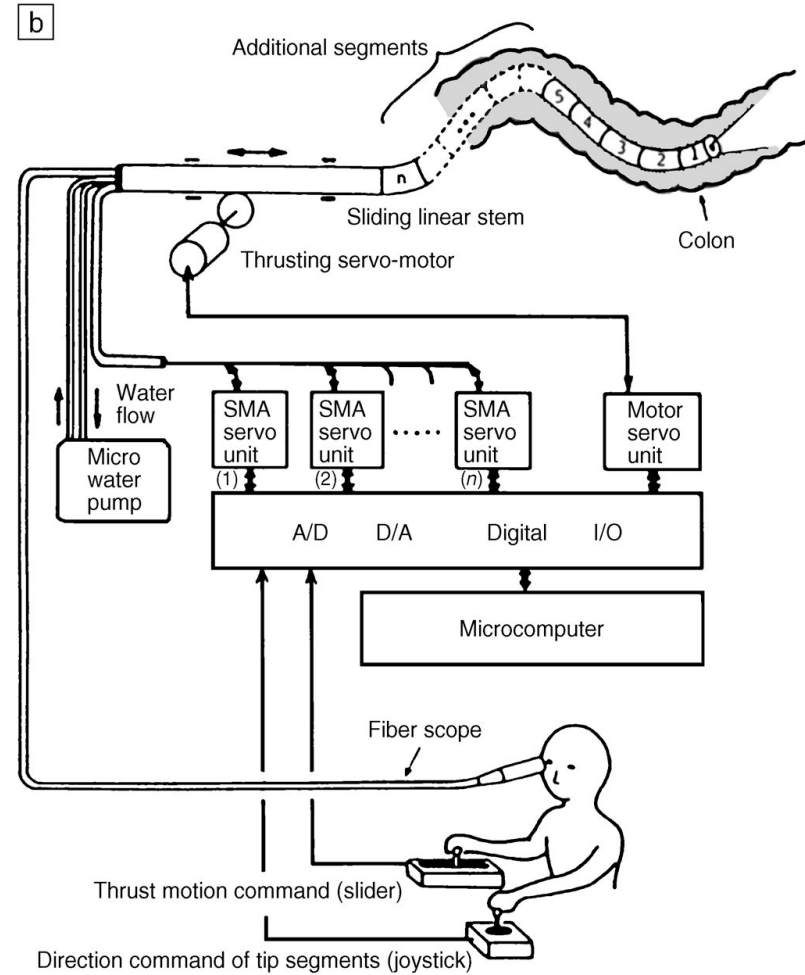
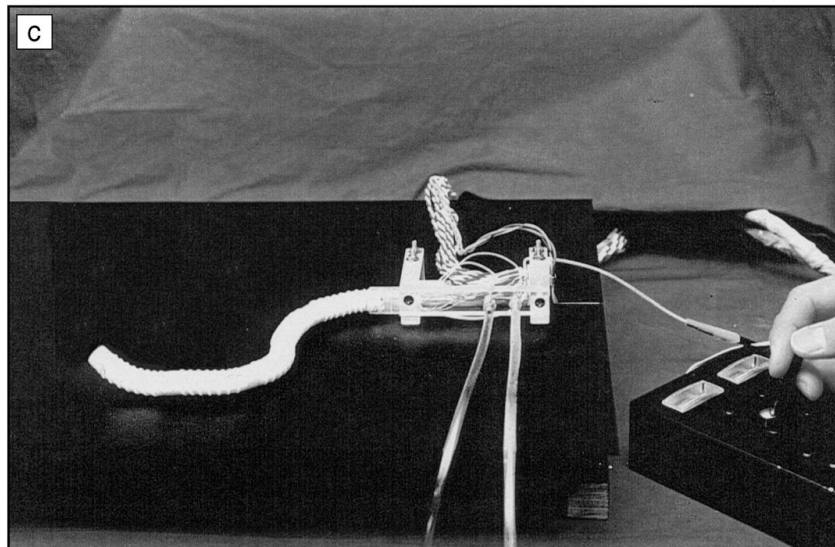
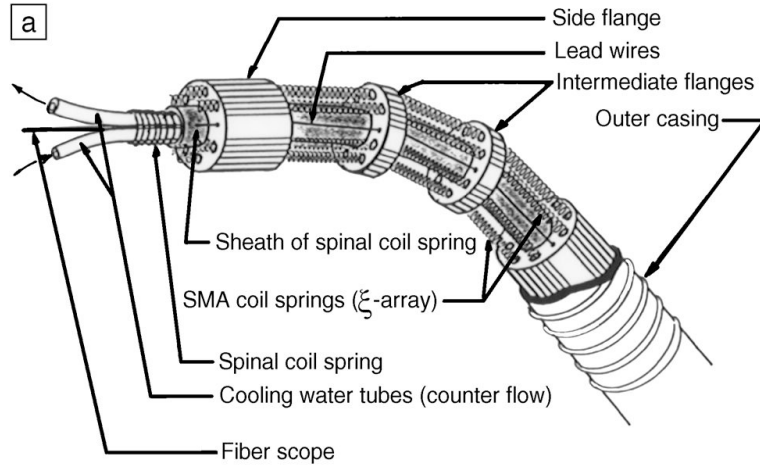
- Compositi a tensionamento attivo:
 - dei fili a memoria di forma vengono inseriti in una matrice. Se a seguito di vibrazione il materiale entra in risonanza, il filo viene riscaldato, si trasforma e mette in pretensionamento la matrice cambiandone la frequenza di risonanza
- Materiale autoriparante o resistente ad urti, rotture:
 - in caso di cricca o rottura il filo incorporato nella matrice si deforma, ma aumentando la T puo' ritornare alla forma originale riparando la matrice
- Elementi alari a controllo di forma (smart wing):
 - Compositi con fili SMA



Classi di applicazione delle SMA

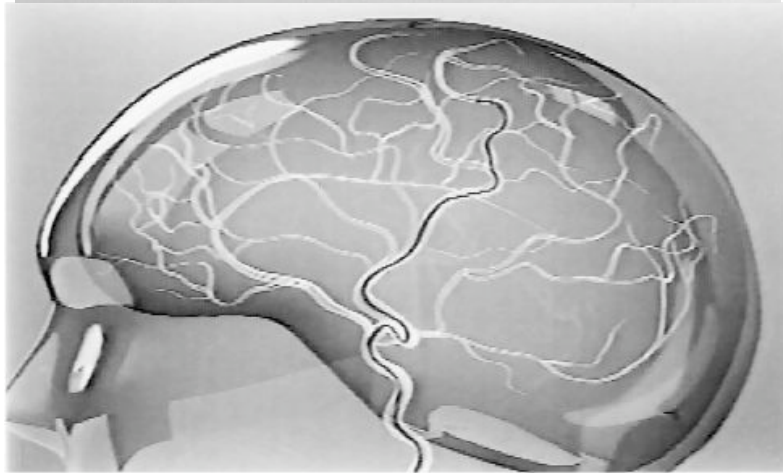
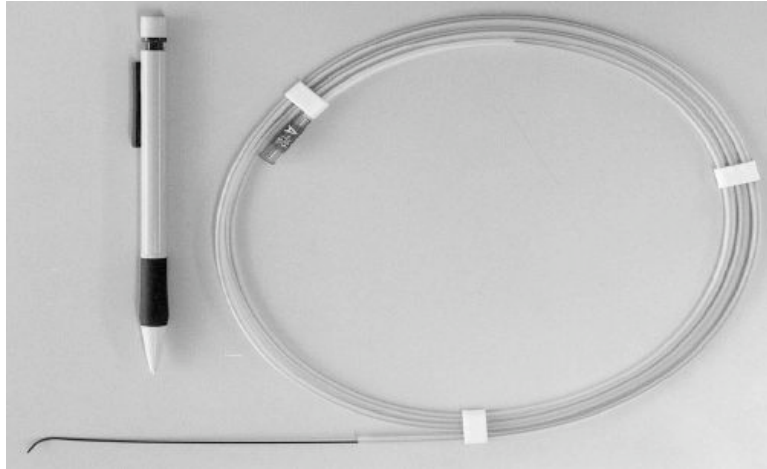
- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- **Dispositivi biomedicali**
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- Sistemi di smorzamento

Memoria a due vie: sonda chirurgica

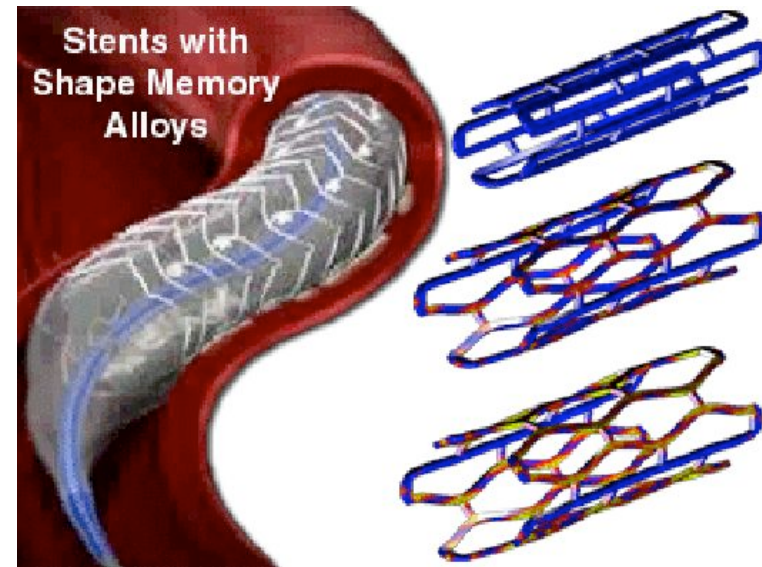


Applicazioni biomedicali

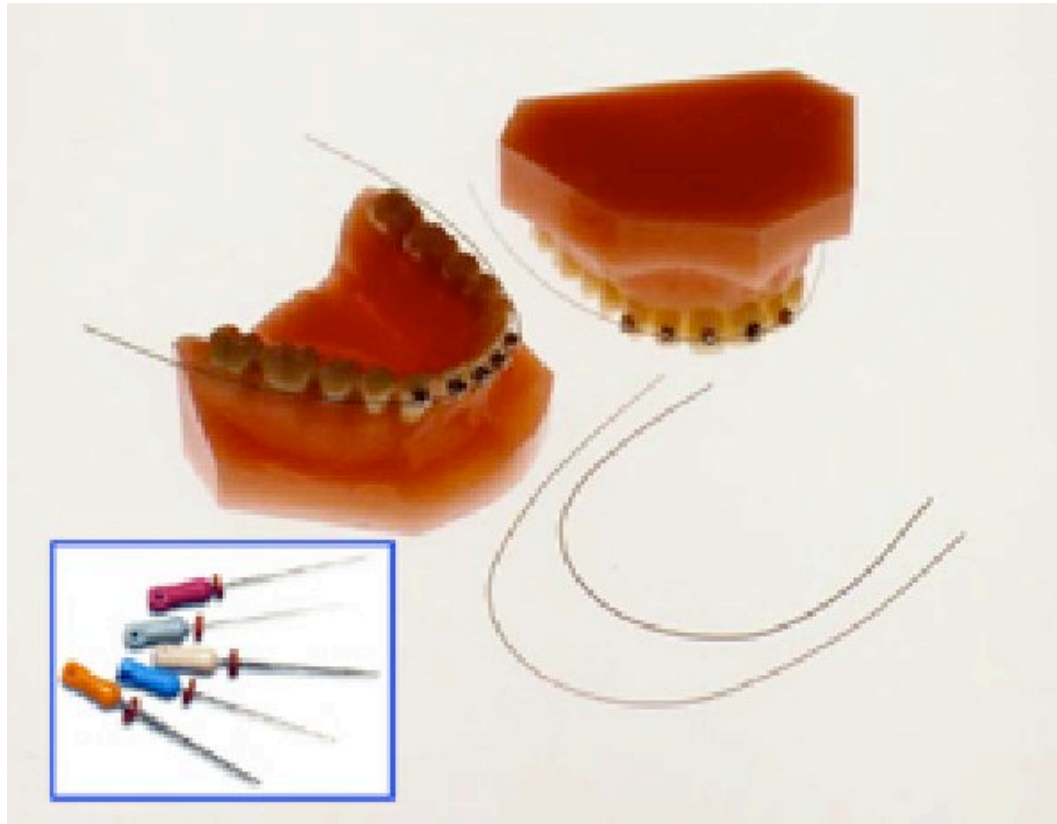
Catetere per sonda chirurgica



Stent per sostenimento vene e arterie



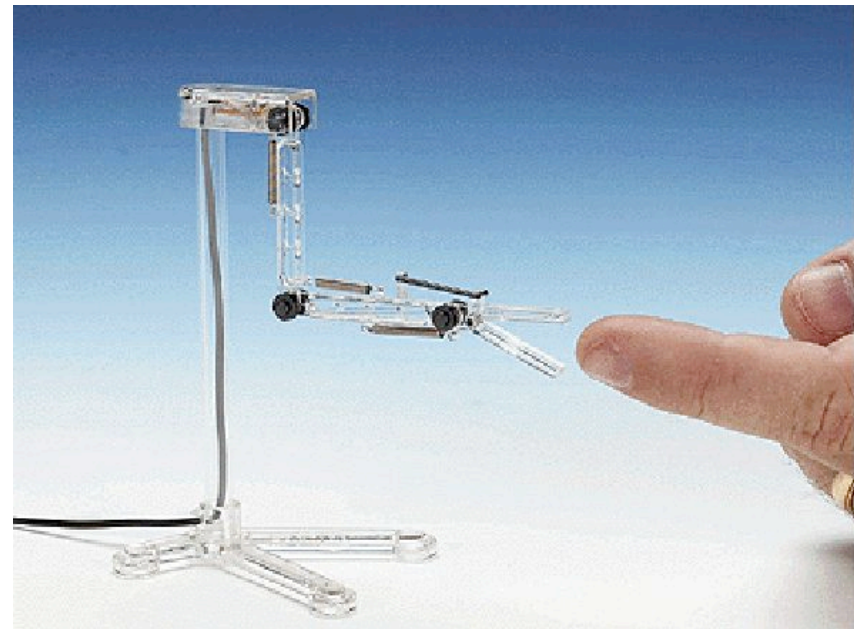
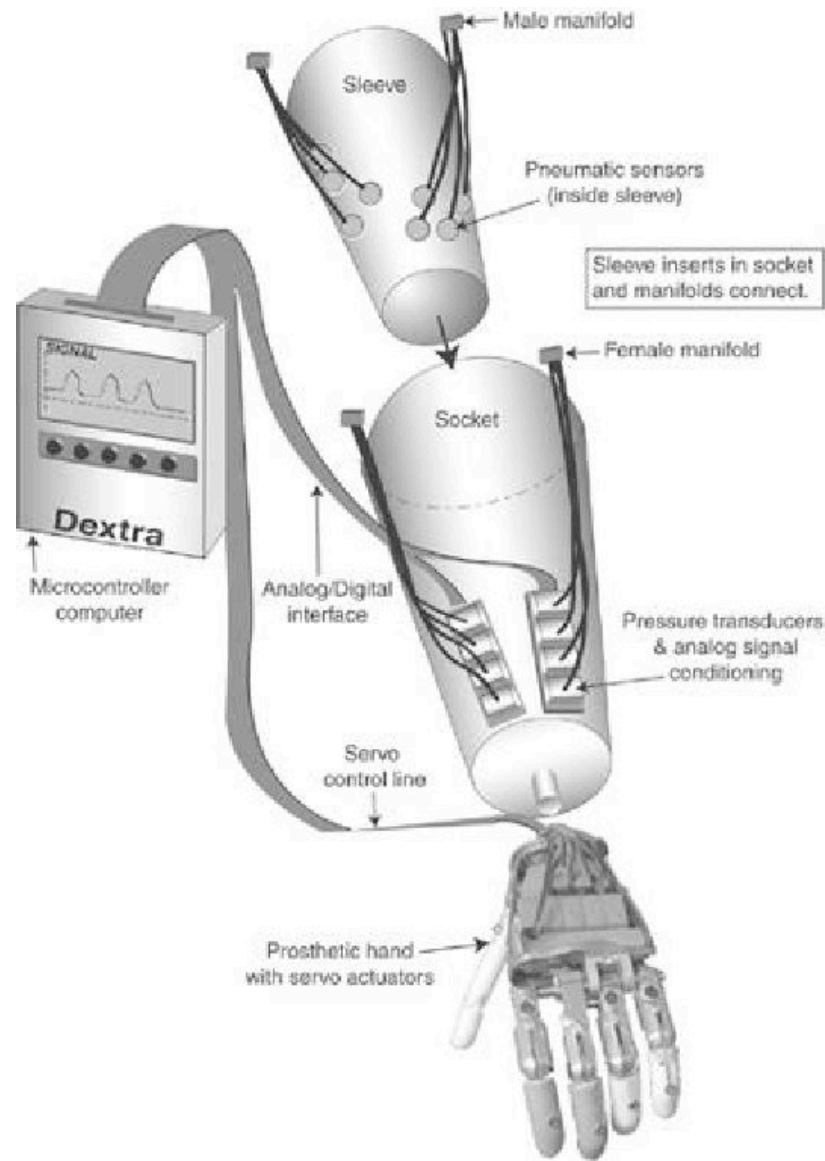
Fili per ortodonzia



Classi di applicazione delle SMA

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- Dispositivi biomedicali
- **Dispositivi micro-elettromeccanici**
- Sistemi di smorzamento

Arti robotizzati



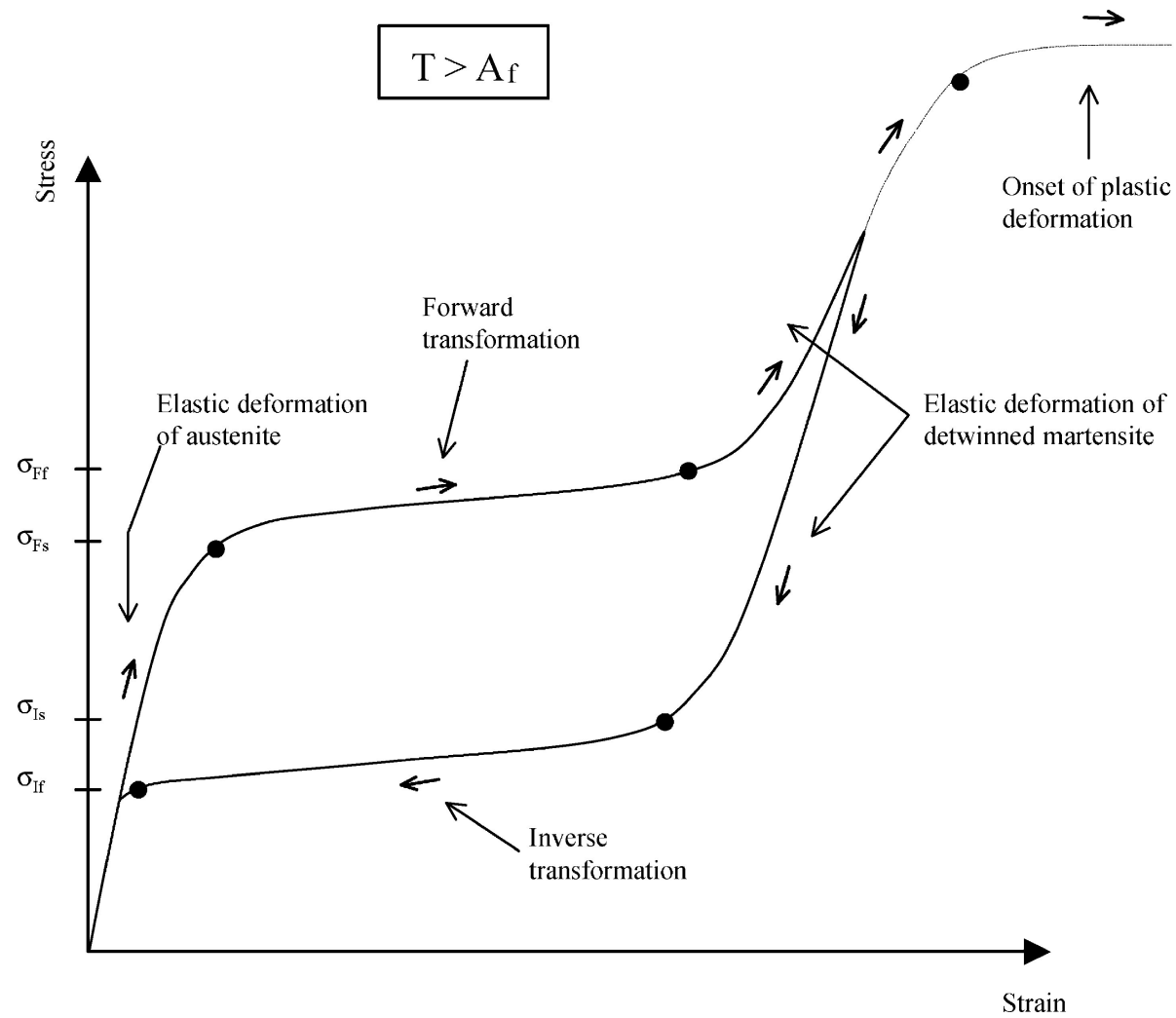
Classi di applicazione delle SMA

- Giunti, dispositivi di fissaggio e connettori
- Attuatori
- Smart materials
- Dispositivi biomedicali
- Dispositivi micro-elettromeccanici
- **Sistemi di smorzamento**

Sistemi di smorzamento?

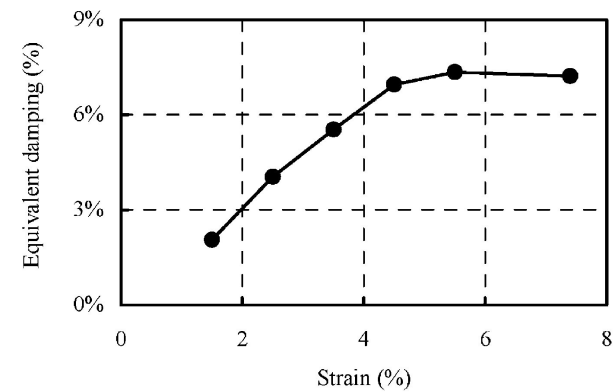
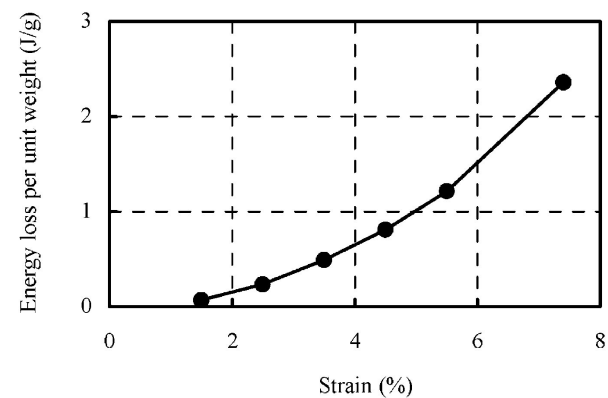
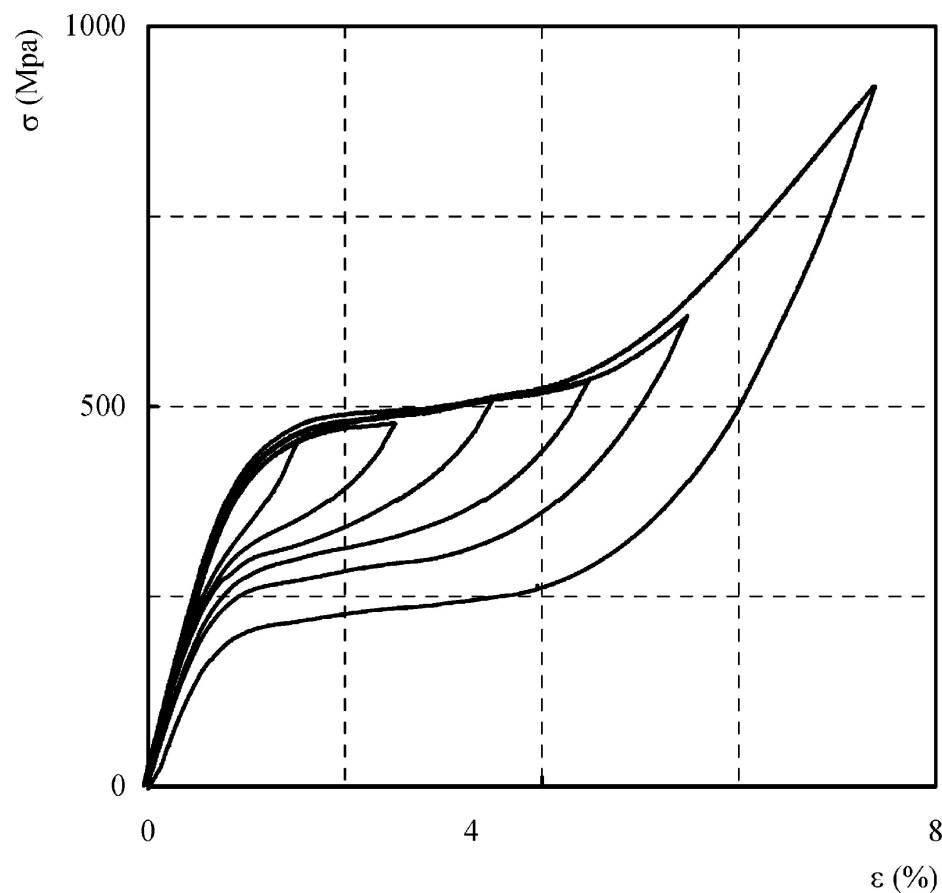


Comportamento superelastico e damping

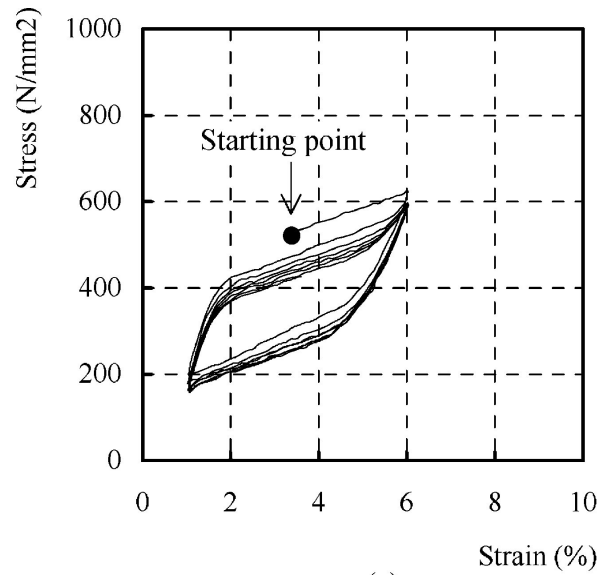


Effetto della deformazione massima

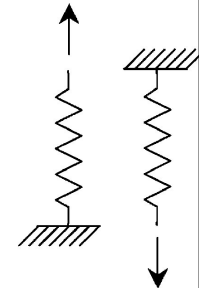
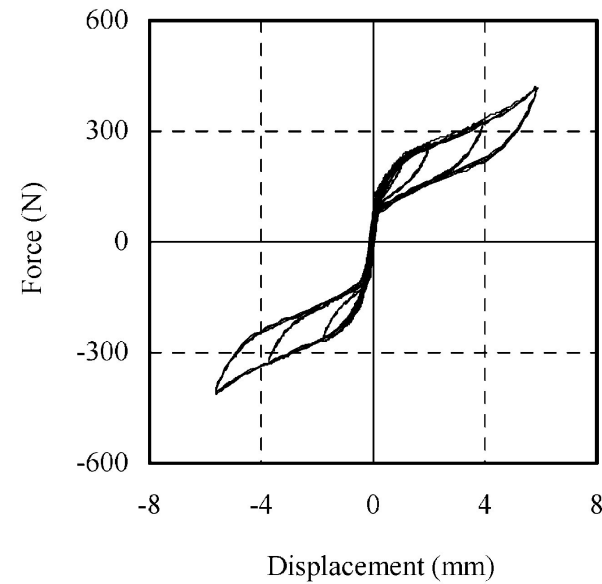
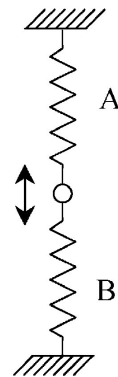
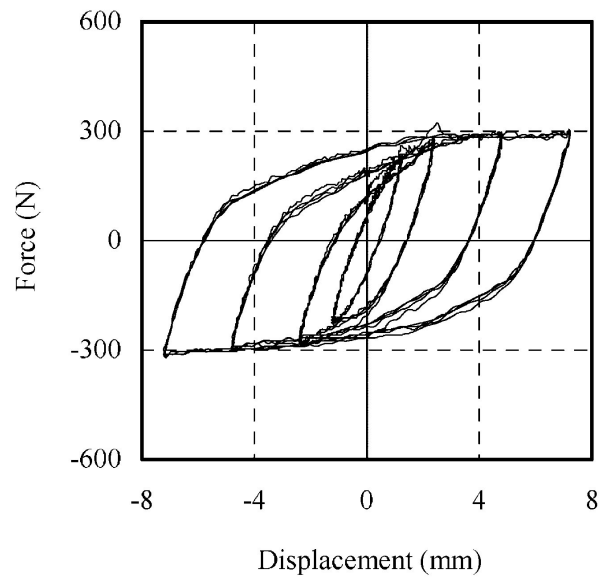
- Con la massima deformazione il damping cresce e quindi l'energia dissipata per ciclo



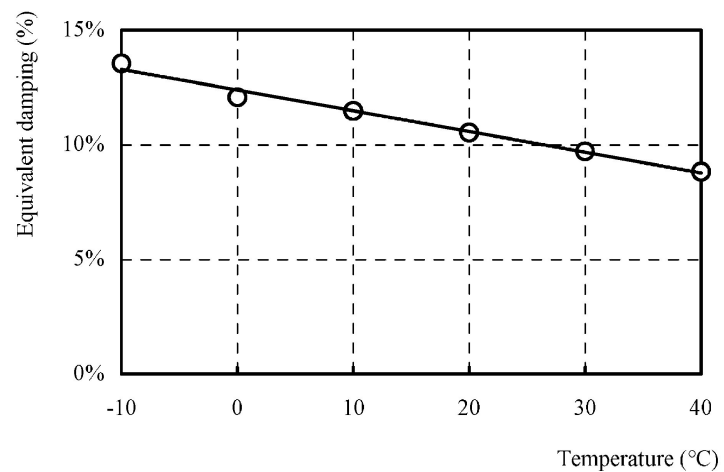
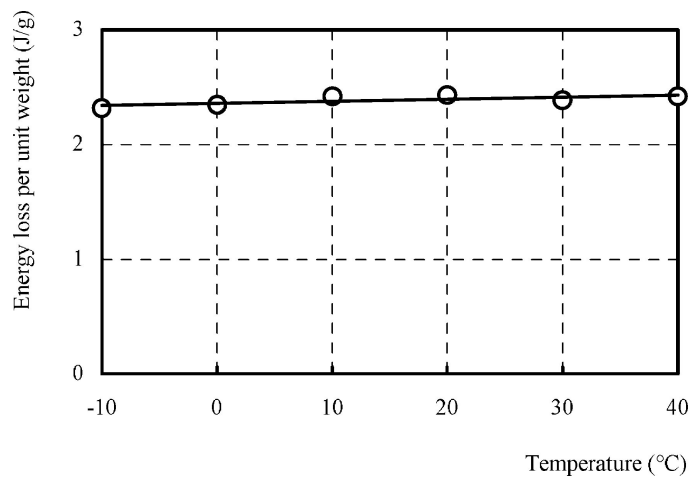
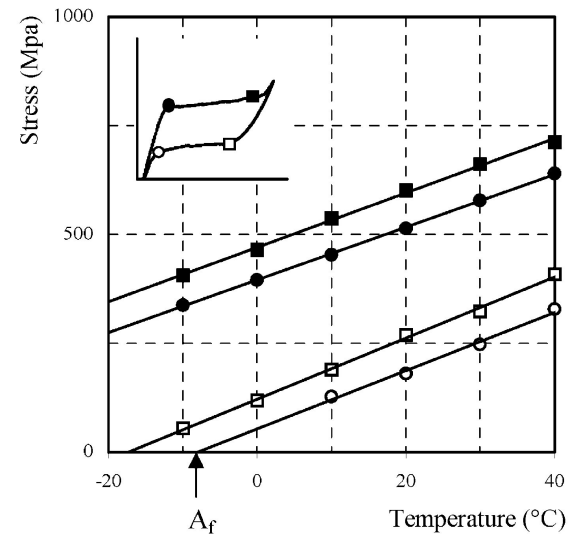
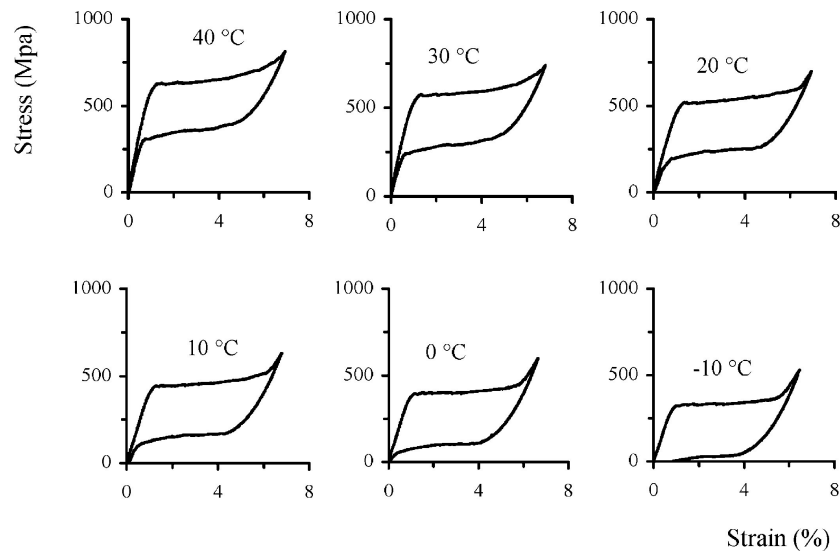
Effetto della configurazione



- Si possono avere differenti configurazioni ed effetti sul damping totale

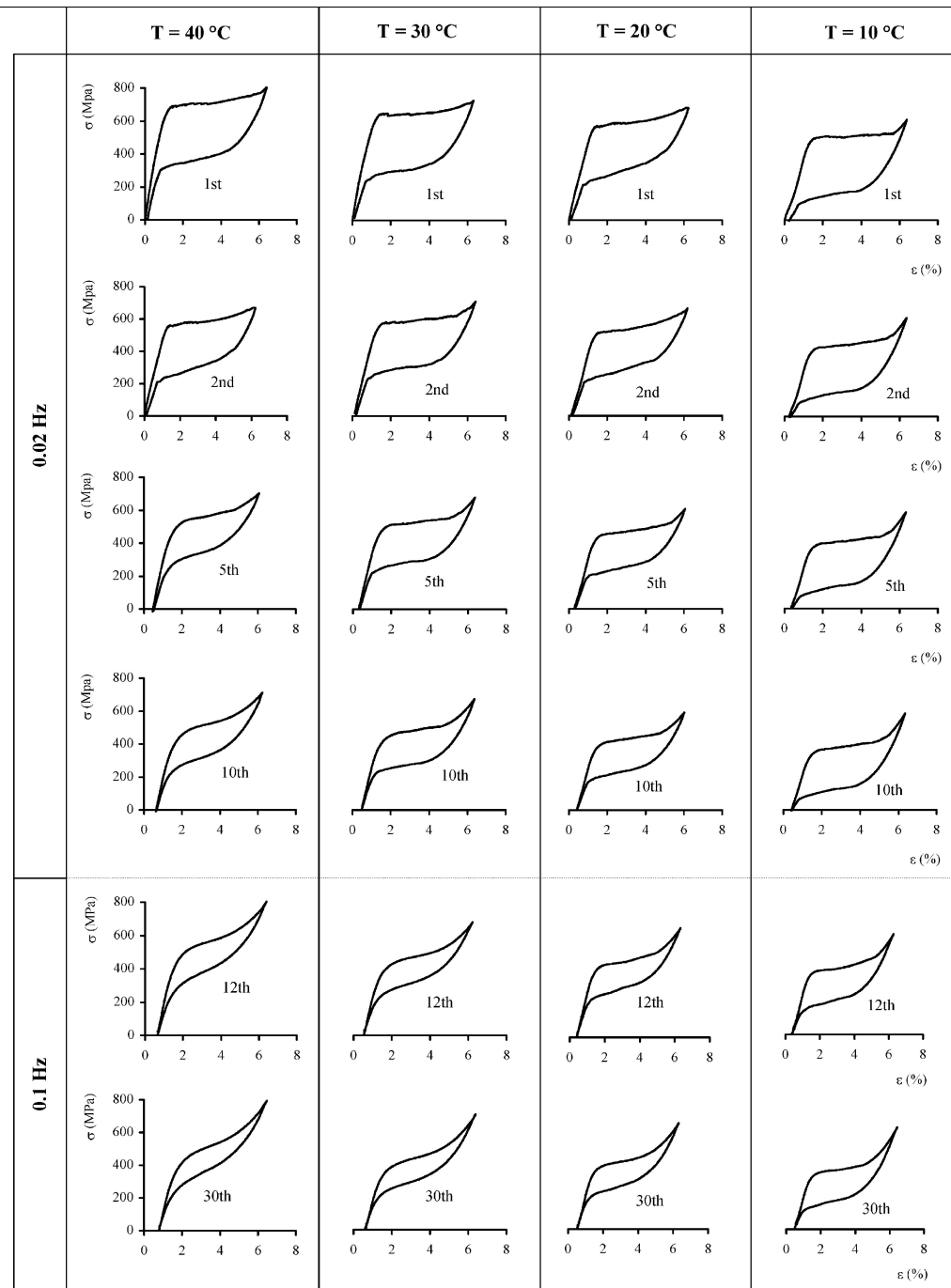


Effetto della temperatura sul damping

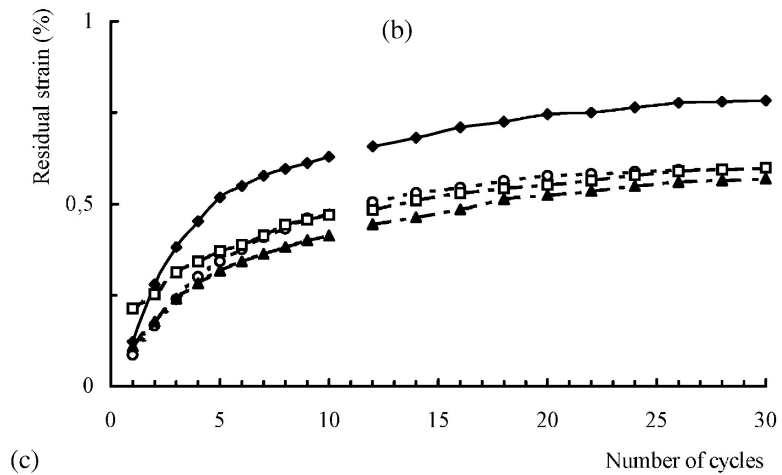
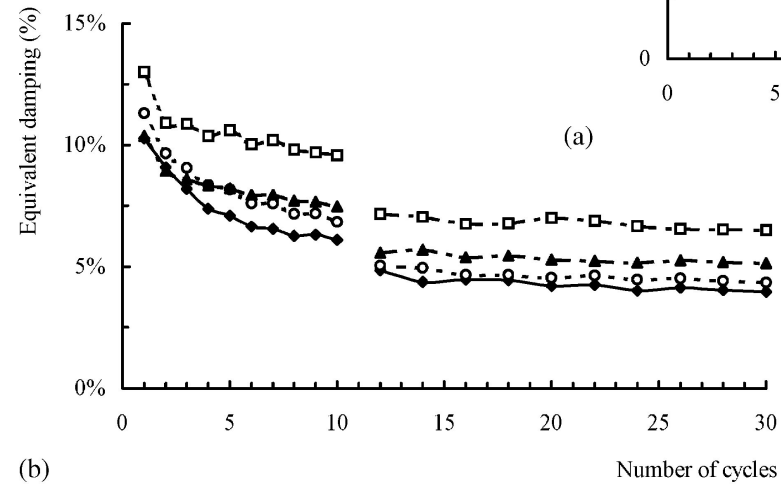
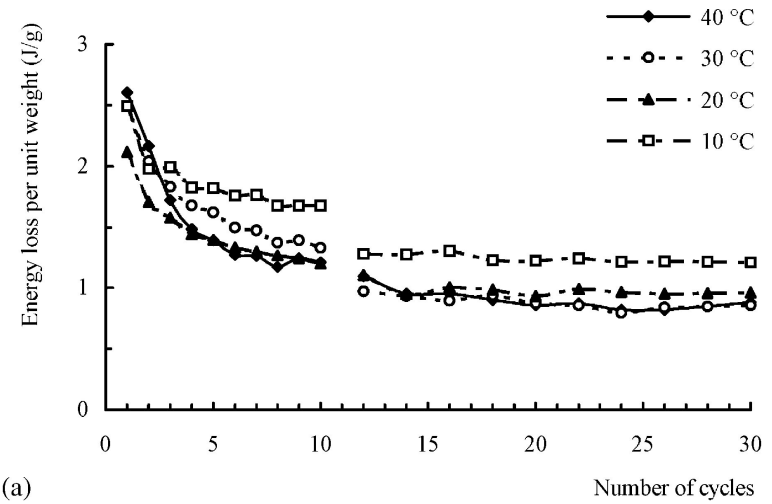


Effetto temperatura- frequenza

- Frequenze più alte permettono un recupero inferiore e diminuisce la quantità di energia dissipata

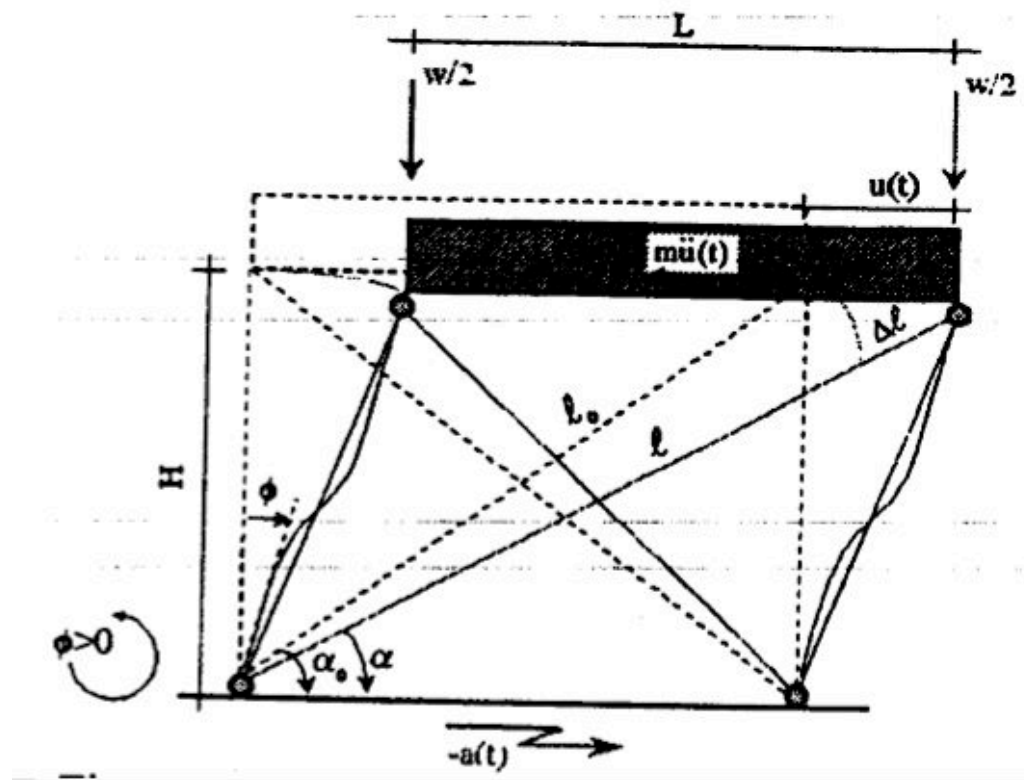


Effetto temperatura-frequenza



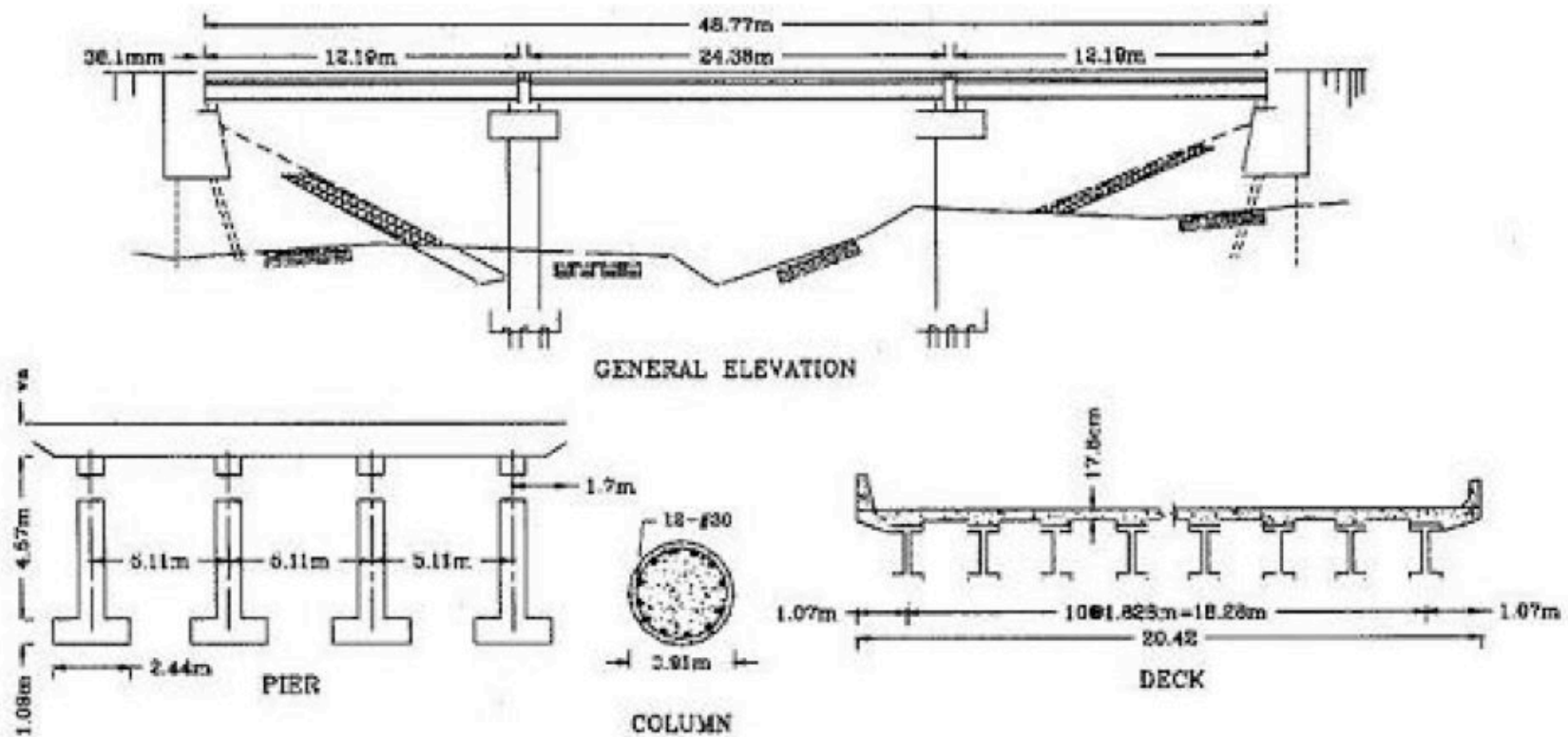
Smorzatori di vibrazione

- Studio smorzatori di Baratta e Corbi. Hanno mostrato come il sistema in SMA mostrava minori spostamenti in risposta a vibrazioni rispetto ad uno perfettamente elastico

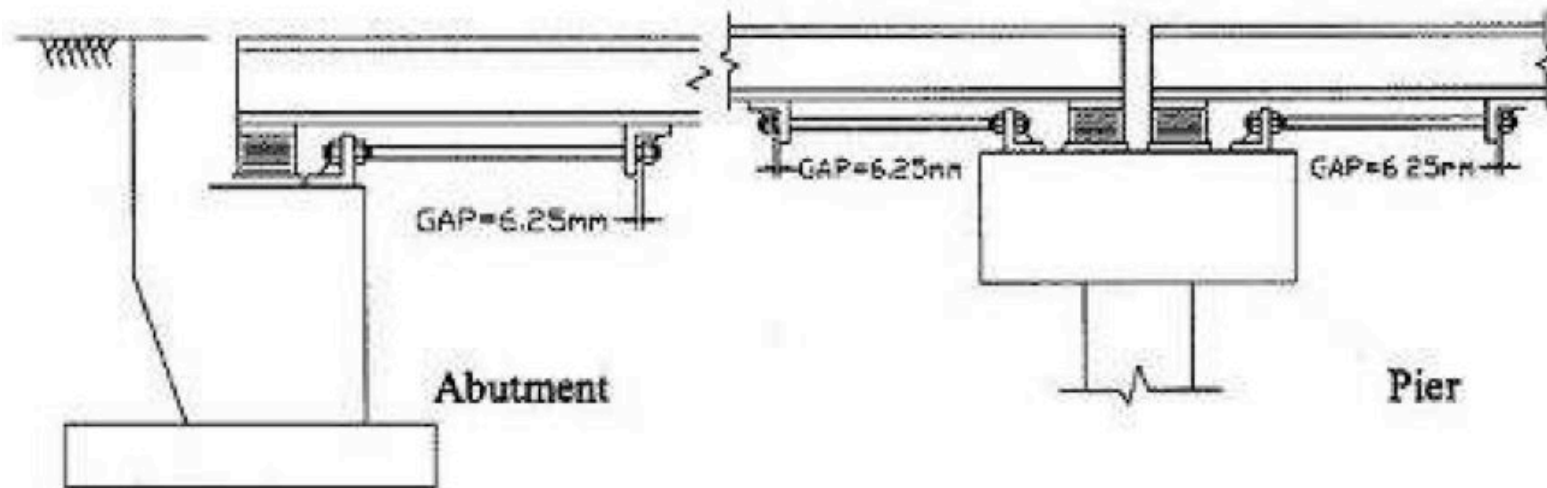


Sistemi smorzatori di De Roches

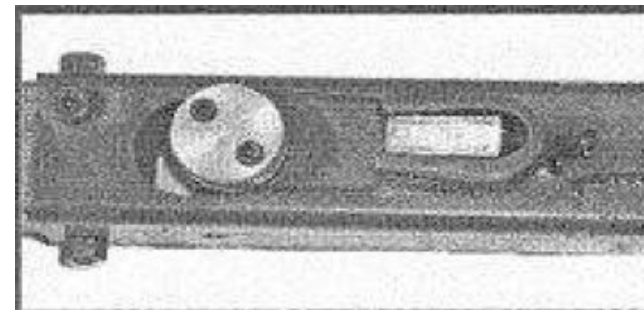
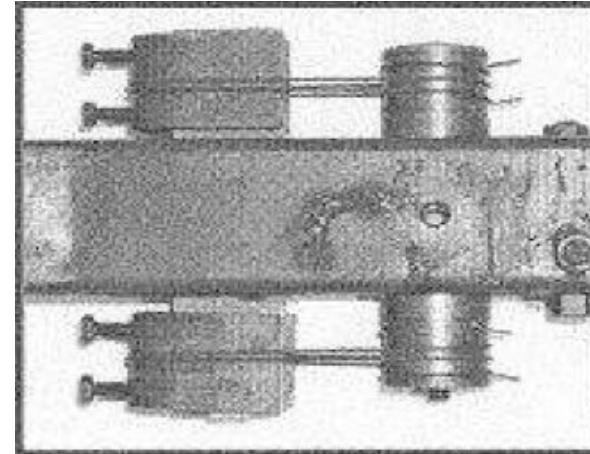
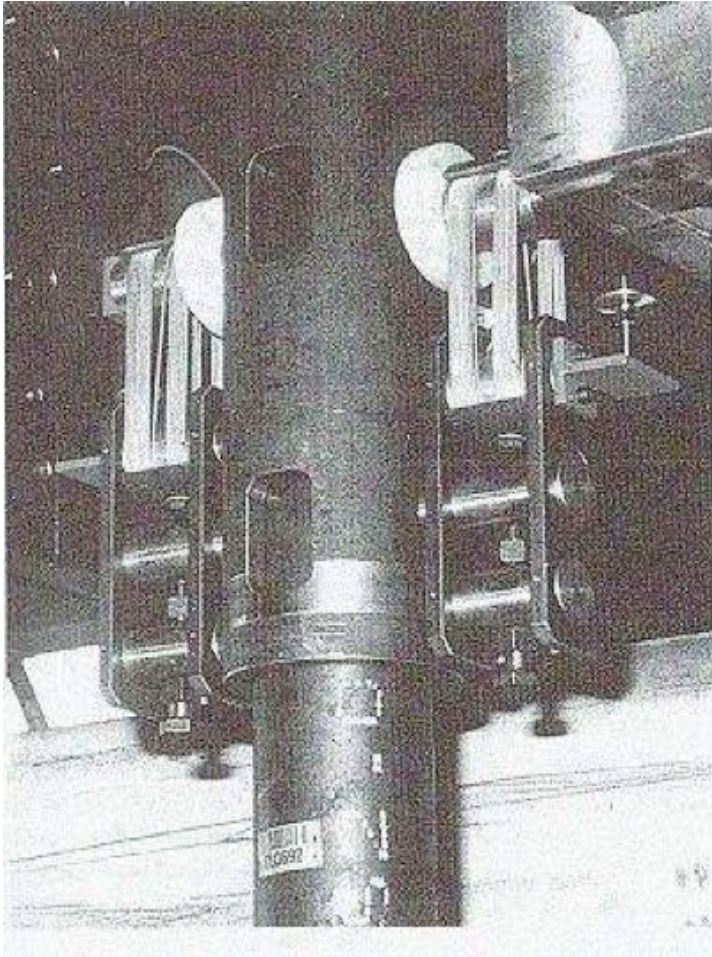
- De Roches ha studiato diversi sistemi per smorzare le vibrazioni e rinforzare le strutture contro i sismi



Sstema di rinforzo sismico di De Roches



Sistema di rinforzo di Dolce e altri



Rinforzo travi con SMA (De Roches)

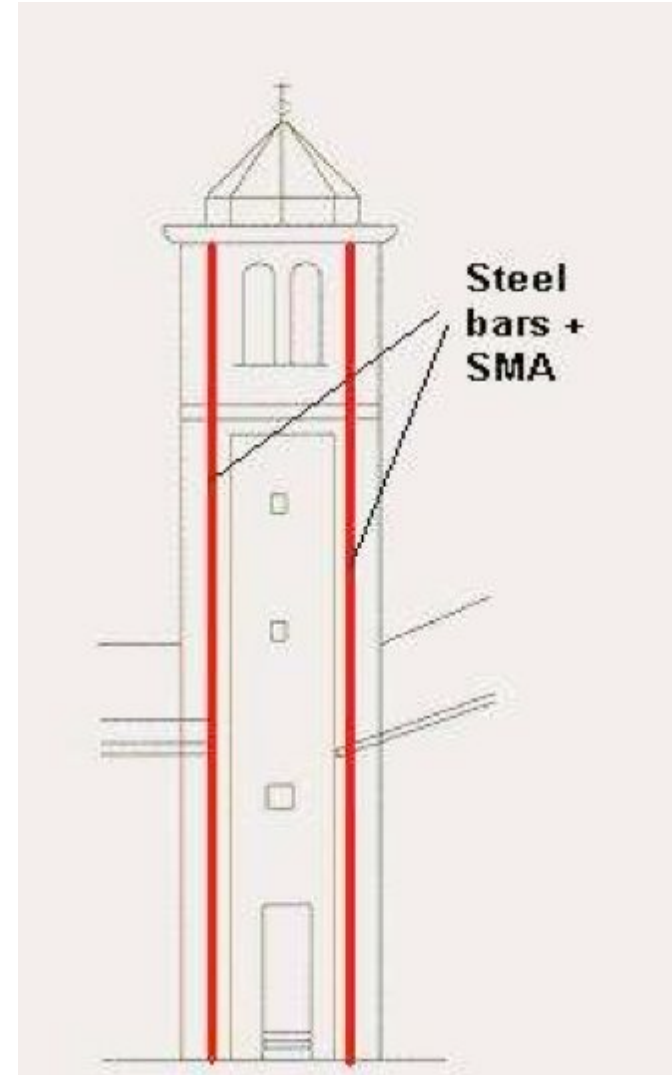


- In figura una connessione smart di trave e pilone in SMA prima e dopo applicazione di carichi in frequenza elevati. Si veda la deformazione elevata dei tondini in SMA. Dopo riscaldamenti i tondini recuperano la forma originale.

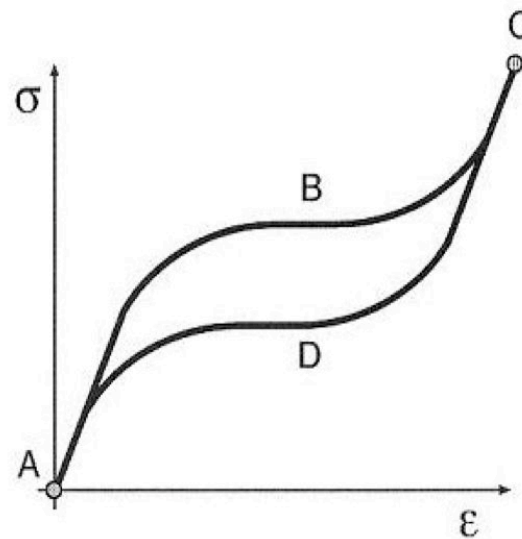
Sistema rinforzo sismico per la basilica di S. Francesco in Assisi



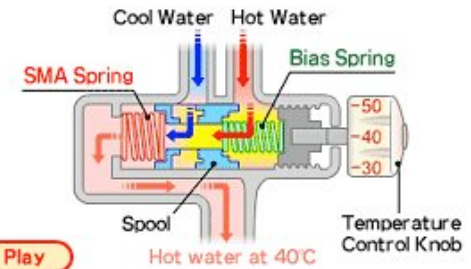
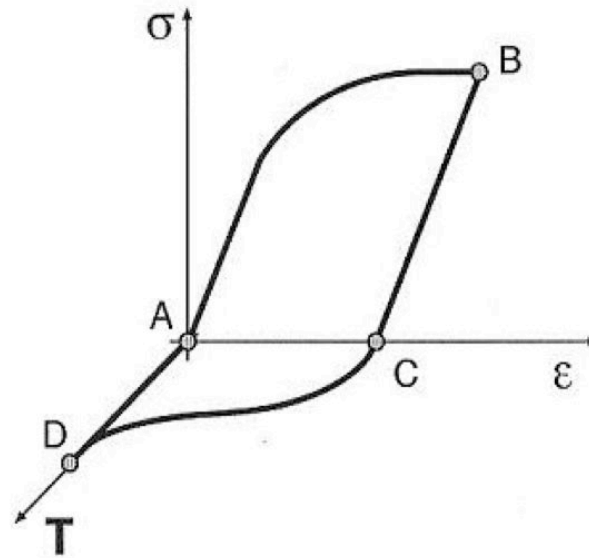
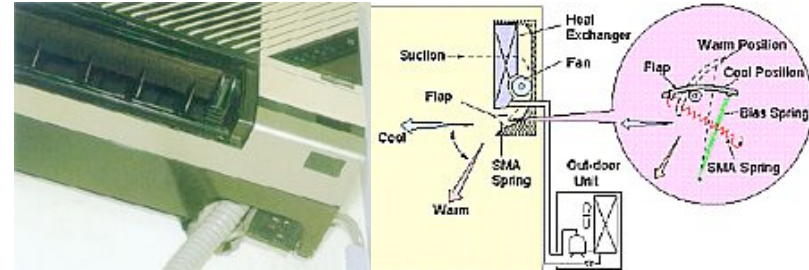
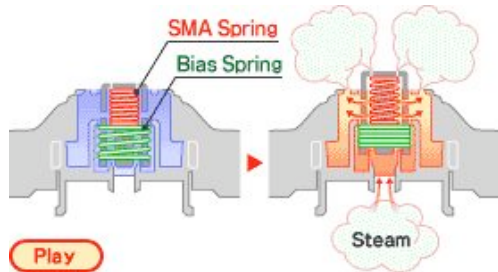
S, Giorgio in Trignano



Altre applicazioni (superelasticità)



Altre applicazioni: (memoria di forma)

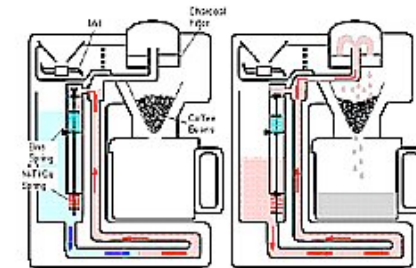
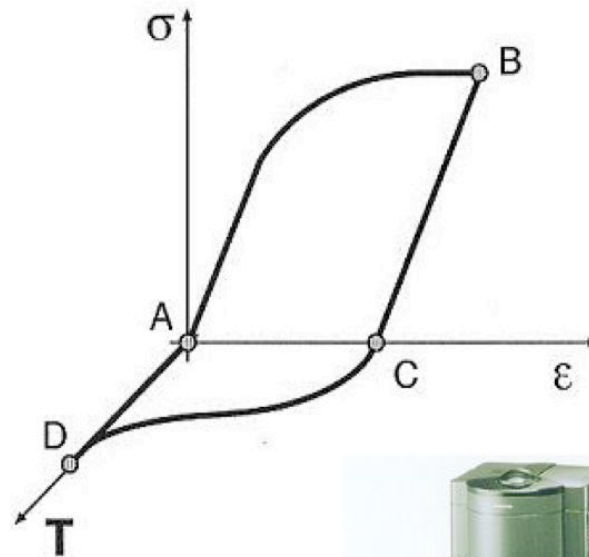
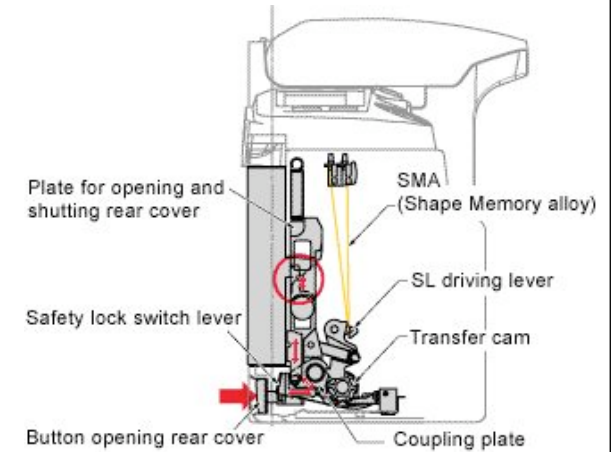
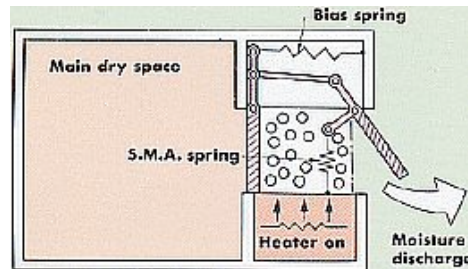


←Hot

Cold→



Altre applicazioni: (memoria di forma)

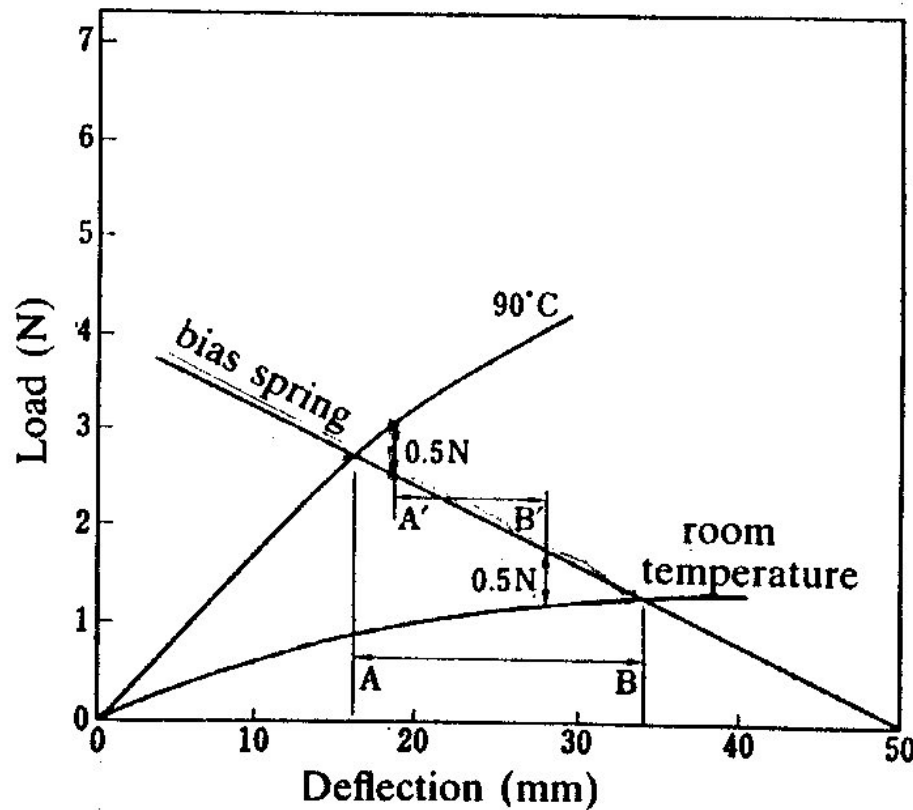
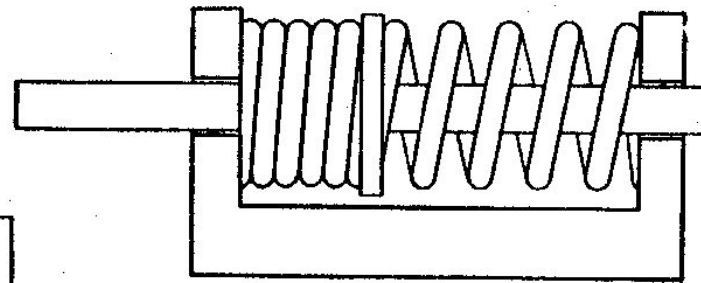


Produzione SMA

- Si utilizzano i sistemi di produzione classici per leghe titanio, dalla fusione alla colata in stampi o continuo
- La composizione viene controllata accuratamente
- Molte lavorazioni preliminari vengono eseguite in temperatura: trafilature, laminazioni a caldo etc.
- Il problema sorge con le lavorazioni a freddo e i tagli per la formatura finale:
 - Non si possono utilizzare i sistemi classici di taglio lamiera (punzoni etc.)
 - Per le lavorazioni finali vengono utilizzati tagli laser, ultrasuoni etc.
 - Si evitano i sistemi di taglio per deformazione, rottura e usura

Progettare con le SMA

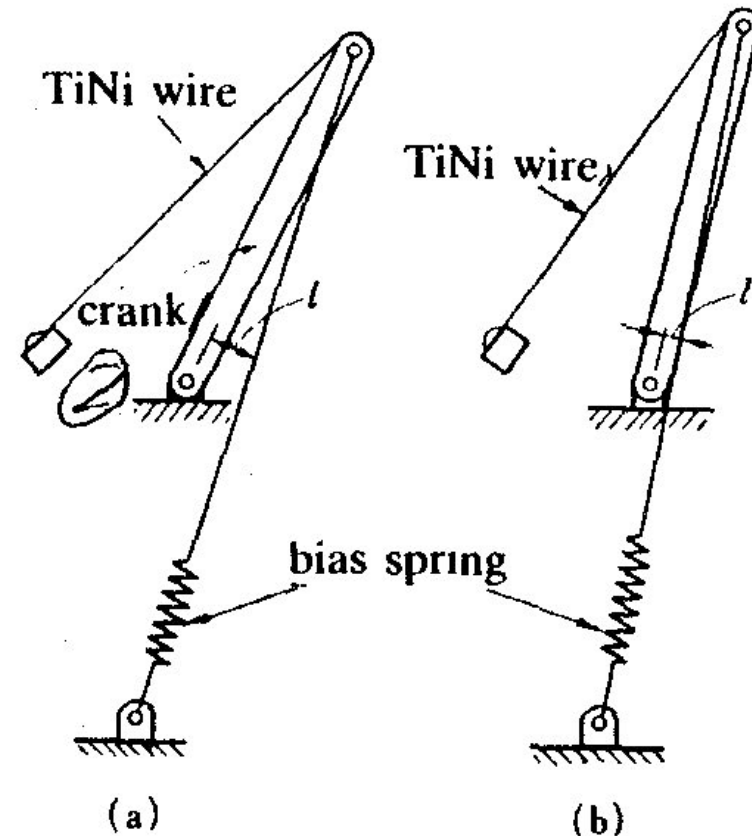
shape memory coil coil spring



Il problema sorge quando vogliamo avere una lunghezza di lavoro ampia mantenendo un carico di lavoro sufficiente

Utilizzare i momenti

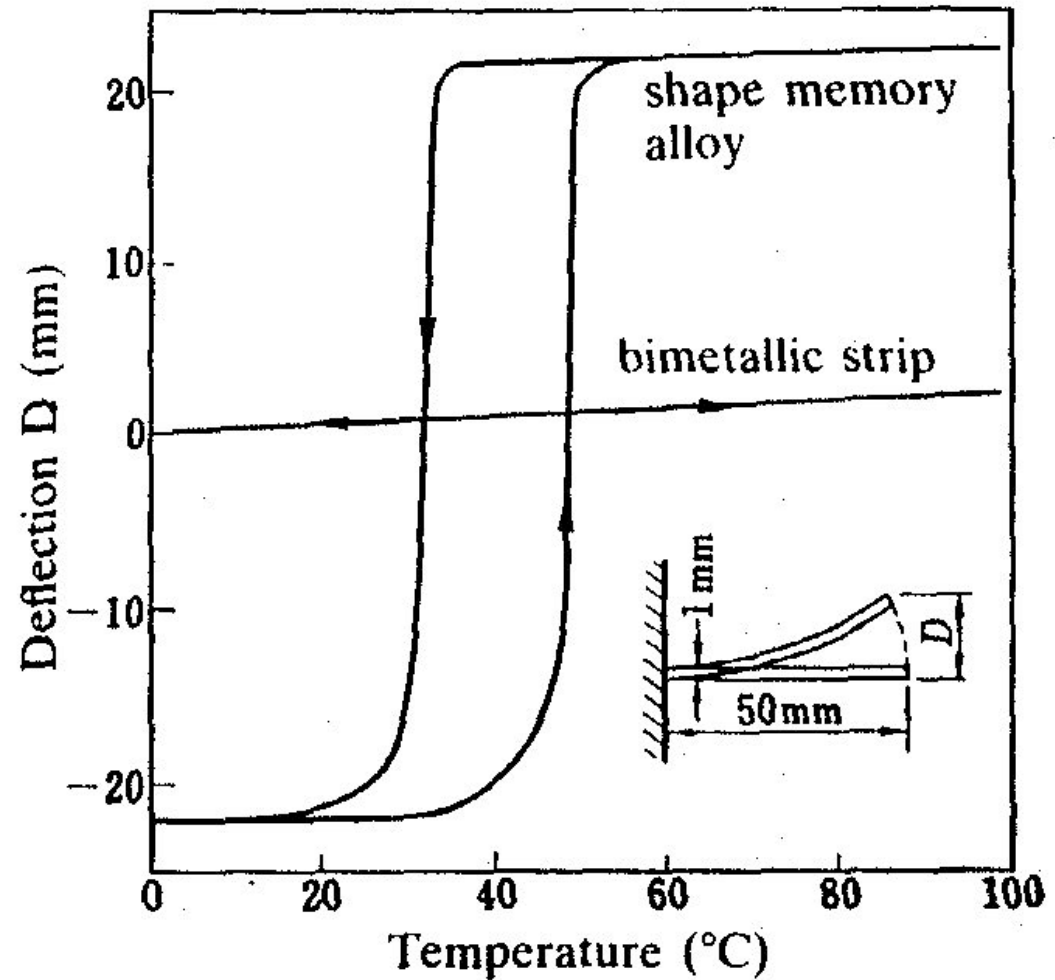
- Per estendere la lunghezza di lavoro del sistema con SMA un metodo è quello di utilizzare i momenti
- Si fa in modo che la forza per il braccio rimanga circa costante sull'arco di utilizzo



Lamine bimetalliche ed SMA

- Le SMA permettono range di lavoro molto maggiori rispetto alle lamine bimetalliche

$$\frac{D}{L^2} = K \frac{\Delta T}{t}$$



Dimensionare molle in SMA

- Le seguenti relazioni sono utili per il calcolo:

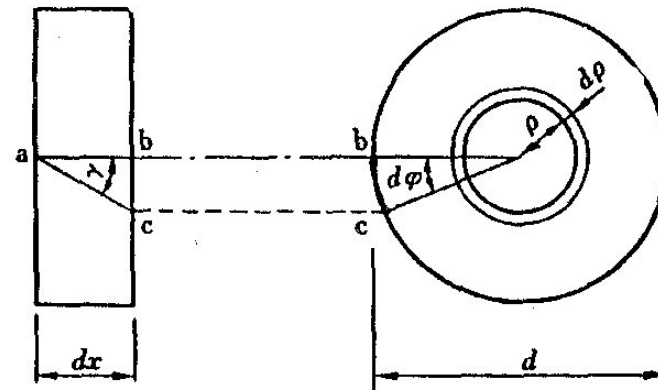
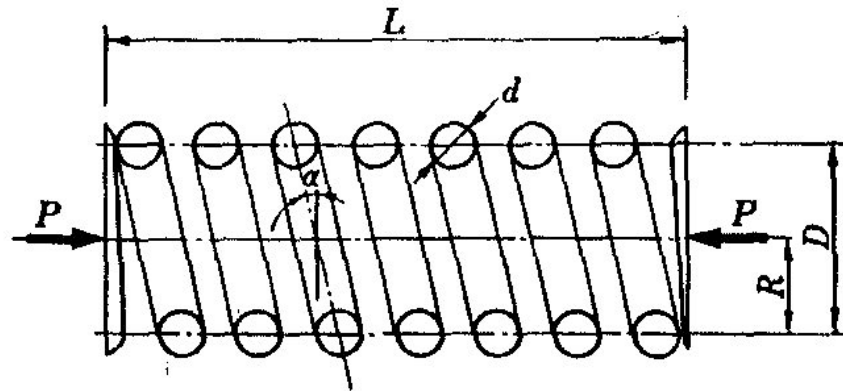
$$\tau = \frac{16PR}{\pi d^3}$$

$$\varphi = \int_0^{\pi n D} \frac{2\gamma}{d} dx = \int_0^{\pi n D} \frac{16PD}{\pi d^4 G} dx = \frac{16PD^2 n}{Gd^4}$$

$$\delta = R\varphi = \frac{64PR^3 n}{Gd^4} = \frac{8PD^3 n}{Gd^4}$$

$$\gamma = \frac{d\delta}{\pi n D^2}$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$



Fattore di correzione dello sforzo

$$\tau = \kappa \frac{16PR}{\pi d^3}$$

$$C = \frac{D}{d}$$

Wahl's formula:

$$\kappa = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$$

Rover's formula:

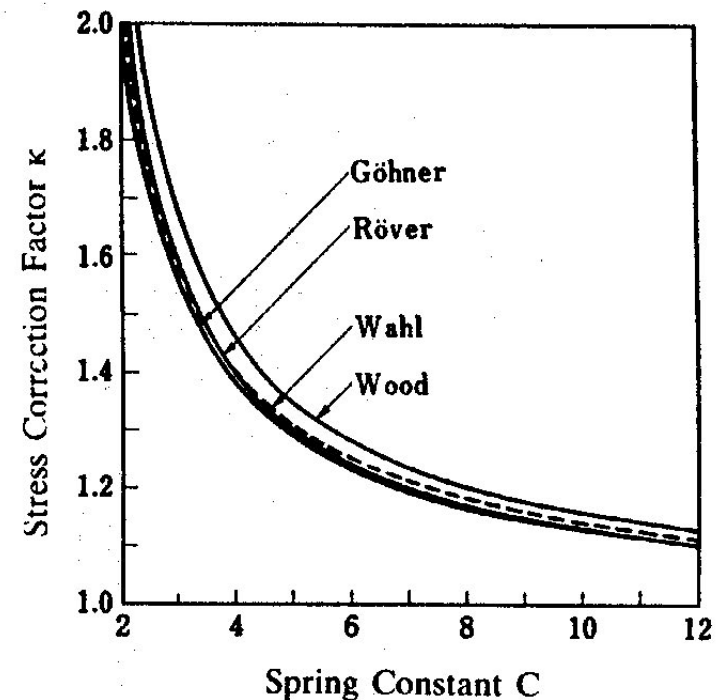
$$\kappa = \frac{C}{C-1} + \frac{1}{4C}$$

Wood's formula:

$$\kappa = \frac{C}{C-1} + \frac{1}{2C}$$

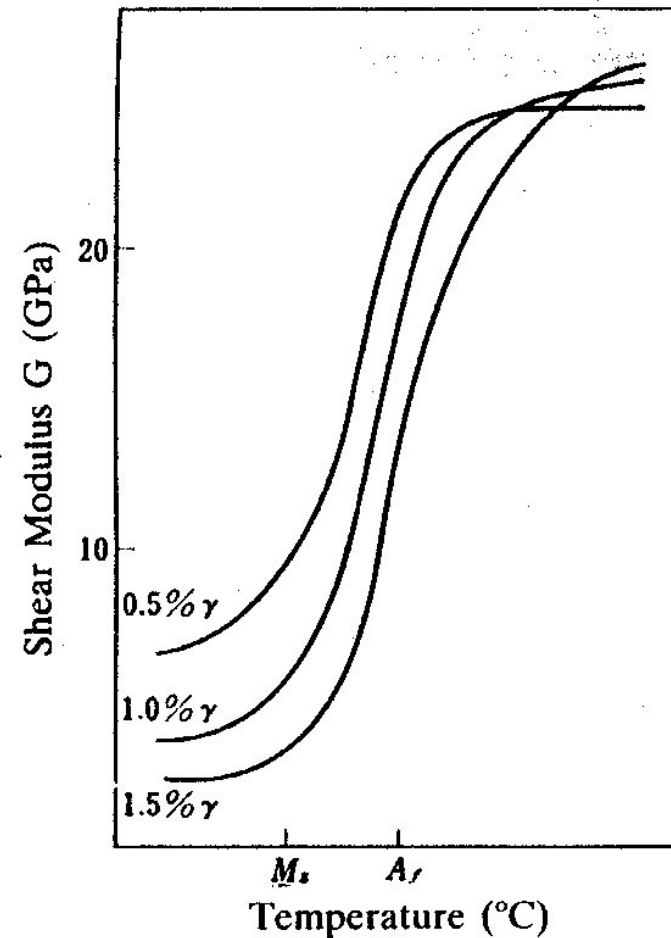
Gohner's formula:

$$\kappa = 1 + \frac{5}{4C} + \frac{7}{8C^2} + \frac{1}{C^3}$$



Procedura della costante rigidezza apparente della molla

- Il modulo di taglio della molla in NiTi varia con la temperatura
- Varia anche in funzione della massima deformazione a causa dell'interazione tra martensite, quantità di martensite che si trasforma e relazioni di parentela con la matrice
- Sopra A_f e sotto M_s G è costante



Esercizio

- Carico di 20 N
- Lunghezza di lavoro della molla: 10 mm
- Assumiamo G austenitico 25 GPa
- G martensitico 5 GPa
- $\gamma_{\max} = 1.0\%$ per assicurare una vita sufficiente alla molla
- C iniziale = 6

- Determinare le dimensioni della molla (n, D, d)

Homework ?

- Dimensionare l'anello di tenuta in NiTi in modo che lo sforzo (radiale) di compressione sul tubo interno sia pari a 200 MPa
- Dati:
 - Tubo in acciaio
 - $E = 205 \text{ GPa}$, $\nu = 0.27$
 - diametro esterno 5 cm
 - spessore 1 cm
 - NiTi da tabelle
 - lunghezza anello SMA 10 cm

