



Politecnico di Milano

Scuola del Design

Tesi di Laurea Magistrale in Design & Engineering

A.A. 2012/2013

Le Leghe a Memoria di Forma e le loro applicazioni nel settore automotive

Laureando: Luca Carlone

Relatore: Prof. Alberto Cigada

Correlatori: Prof. ssa Barbara Del Curto

Prof. Marco Meraviglia

Dott. Alberto Coda

Ringraziamenti

In primo luogo ringrazio i Docenti Cigada, Del Curto e Meraviglia, i quali mi hanno sempre indirizzato verso un percorso logico ed oculato. Con essi ringrazio inoltre il Dott. Coda il quale con la sua esperienza in SaesGetters, mi è stato d'aiuto nella parte di ricerca iniziale; con egli ringrazio anche la Prof. Pillan che invece mi ha chiarito le idee in fase di progetto.

Infine, ma non meno importanti, il mio grazie affettuoso va a familiari ed amici che a loro modo mi hanno sostenuto durante questi anni di studi.

ABSTRACT

Questa tesi nasce da un profondo interesse verso le leghe a memoria di forma e dall'intento di riuscire a sfruttare le loro enormi potenzialità, ancora non del tutto comprese fino in fondo, per coniugarle nel mondo automobilistico.

In questi mesi sia grazie alla voglia di approfondire il tema, sia grazie al contributo offerto dall'azienda SaesGetters S.p.A. con sede a Lainate (MI), sono stati analizzati al meglio gli aspetti che caratterizzano questi materiali, non solo dal punto di vista puramente tecnico e produttivo, ma anche dal punto di vista del Design e quindi nell'ottica di utilizzare un semilavorato tipico dell'ingegneria, all'interno di un progetto di disegno industriale.

Il lavoro prodotto può considerarsi un'indagine ben articolata circa il tema dei metodi e dei componenti di attivazione ad oggi presenti all'interno di un'autoveicolo. La sfida attuale è capire come poter sostituire questi congegni tradizionali con quelli a memoria di forma, producendo a parità di prestazione alcuni vantaggi in termini soprattutto di rapporto potenza/peso e compattezza.

Questa necessaria fase preliminare di ricerca è stata poi convogliata verso lo sviluppo di un progetto mirato ad aumentare la sicurezza a bordo di un veicolo in caso di tamponamento nel traffico cittadino. Così tenendo conto di alcune stringenti normative, vigenti sia in ambito europeo che internazionale, è stato ideato un sistema di protezione dal tipico trauma del "colpo di frusta" il quale si aziona solo al momento dell'incidente, grazie ad un attuatore a memoria di forma alimentato elettricamente.

Nonostante la produzione di un sistema simile risulti estremamente difficile senza conoscenze tecniche e manifatturiere, servirsi delle discipline del Design e dell'ingegneria declinate insieme, offre soluzioni valide per la definizione di un progetto, che altrimenti, sarebbe appannaggio esclusivo dell'ingegneria.

ABSTRACT

This Thesis borns from a deep interest for Shape memory Alloys and from the intent to exploit their enormous potential, not completely understood, to combine them in the automotive world.

In recent months, thanks to desire to explore the teme, thanks to collaboration with SaesGetters Inc. of Lainate (MI), were analysez as better as possible, the aspects that characterizez these materials, not only from technical and manufacturing point of view, but also from Design aspect, with the goal to use a typical engineering element within an industrial design poject.

The work can considered a well structured survey about the theme of the methods and activation components now present in a motor vehicle.

The current challenge is understanding how to replace these traditional devices with shape memory actuators, producing the same performance and some advantages expecially in terms of power/weight ratio and compacr size.

This necessary preliminary stage of research was then conveyed toward the development of a project aiming to increase the safety on board of a vehicle in case of city traffic collision. So following some european and international standards, has been developed a system of protection from a typical "whiplash injury" which is operated only at the accident time, thanks to shape memory actuator electrically powered.

Despite the production of such a system, it appears extremely difficult without techical and manufacturing knowledges, decline together the disciplines of Design and Engineering, offers valid solutions to definition a project which would otherwise be exclusive preserve of Engineering.

INDICE

Abstract	V
Indice delle immagini	XI
Indice delle tabelle	XIV
Introduzione	1
1 Cosa sono le leghe a memoria di forma ("SMA" Shape Memory Alloy)	3
1.1 Cenni storici	3
1.2 Il passaggio da Austenite a Martensite	5
1.3 Leghe a memoria di forma "a una via" e "a due vie"	13
1.4 Curva sforzo-deformazione-temperatura SMA	15
1.4.1 Superelasticità e pseudoelasticità	16
1.5 Deformazioni plastiche e training del materiale	19
1.6 La transizione di fase R	20
1.7 Leghe a base rame	23
1.7.1 Adattamento delle temperature di trasformazione	24
2 Processo produttivo delle leghe a memoria di forma	28
2.1 Fusione	28
2.2 Estrusione	30
2.3 Laminazione e trafilatura	31
2.4 Ricottura	32
2.5 Trattamenti termomeccanici	33
2.6 Post produzione	34

3	Gli attuatori	35
3.1	Gli attuatori a memoria di forma	37
3.1.1	Attuatori termici	39
3.1.2	Attuatori elettrici	43
3.1.3	Attuatori magnetici	45
3.2	Pro e contro degli attuatori SMA	47
4	Definizione di un metodo di progetto per gli attuatori a memoria di forma	49
4.1	Valutazione dell'isteresi	50
4.2	Durata a fatica	51
4.3	Processo di progettazione	52
4.4	Driver elettronico	54
4.5	Sviluppi futuri: compositi con le "SMA"	54
5	Standard di gestione della qualità per i componenti automotive	57
5.1	La normativa	57
5.2	Aree di interesse	58
6	Stato dell'arte degli attuatori SMA con applicazioni automotive	59
6.1	Area anteriore del veicolo	60
6.2	Interno ed esterno abitacolo	65
6.3	Area posteriore del veicolo	94
7	Brief di progetto	101
7.1	Individuazione aree di intervento	101
7.1.1	Il sedile: benchmarcking	102
7.1.2	Componenti e materiali presenti all'interno del sedile di un autoveicolo	105
7.1.3	Regolazioni standard e dotazioni aggiuntive	117
7.1.3.1	Sedili girevoli	124

7.2	Il colpo di frusta	129
	7.2.1 Sistemi anti colpo di frusta	131
7.3	L'Airbag	138
7.4	Attuatori a memoria di forma ad azionamento rapido	145
7.5	Caso studio	148
7.6	Concept	150
7.7	Design definitivo	152
8	Analisi dei materiali per la produzione del sistema anti colpo di frusta	155
8.1	Stima del costo di produzione	162
8.2	Conclusioni	167

Bibliografia

Sitografia

Allegati: Indice delle tavole tecniche

INDICE DELLE IMMAGINI

1. Struttura cristallina della lega equiatomica NiTi [Nichel-Titanio].
2. Grafico della temperatura in funzione della % di martensite.
3. Microstruttura di una SMA nei vari passaggi di fase.
4. Deformazione plastica nell'austenite causata dalla trasformazione in martensite.
5. Trasformazione martensitica con deformazione non vincolata del reticolo cristallino.
6. Meccanismi di deformazione per scorrimento e per geminazione dell'austenite in martensite.
7. Difetto di dislocazione nei cristalli, semipiano di atomi aggiuntivo.
8. Meccanismo di Detwinning.
9. Effetto memoria di forma "ad una via".
10. Effetto memoria di forma "a due vie".
11. Ciclo termomeccanico in un grafico sforzo-deformazione-temperatura di una lega a memoria di forma.
 - 12.1 Comportamento pseudoelastico (a sinistra), superelastico (a destra).
 - 12.2 Diversi comportamenti dell'acciaio e di una lega NiTi.
13. Deformazione plastica a seguito di un ciclo di carico.
14. Curva della resistenza elettrica sulla temperatura di una lega Ti50Ni47Fe3.
15. Raffigurazione della cella romboedrica nella transizione di fase R.
16. Effetto memoria di forma della fase R.
17. Variazione dell'isteresi dopo innumerevoli cicli termici.
18. Relazione tra la composizione e la temperatura di M_s in una lega CuZnAl.
19. Deformation behavior in polycrystalline CuAlNi Alloy.
20. Raffigurazione schematica e realistica di un forno per fusione a induzione sottovuoto.
21. Schematizzazione delle tecnologie di estrusione diretta e indiretta.
22. Schema di funzionamento della laminazione.
23. Schema funzionale di un macchinario per la ricottura.
24. Esempio di attuatore lineare elettrico con movimetazione braccio.
25. Spaccato di un attuatore elettrico.
26. Funzioni di diversi attuatori automotive suddivisi per categoria d'uso.
27. Intervalli di temperatura di trasformazione delle più comuni leghe NiTi.
28. Valvola termica con molla SMA.

29. Funzionamento schematico di un classico attuatore a memoria di forma attivato elettricamente.
30. Illustrazione schematica dei processi di deformazione nei materiali ferroelastici, ferromagnetici e ferroelettrici.
31. Test con carico costante su filo *SmartFlex 76* a memoria di forma.
32. Variazioni delle temperature di transizione di fase sotto differenti carichi applicati.
33. Tempi di attuazione e allungamenti sotto diverse intensità di corrente applicate.
34. Esempio di progettazione di un componente a memoria di forma con molla di ripristino.
35. Aree interessanti per la sostituzione dei congegni tradizionali con dei dispositivi a memoria di forma, all'interno di un'automobile.
36. Valvola a farfalla.
37. Faro fendinebbia con attuatore SMA elettrico.
38. Prima configurazione del sistema di sicurezza per il pedone.
39. Fasi di funzionamento di un congegno per il sollevamento del cofano.
40. Tergicristallo con attuatore di pressione a memoria di forma.
41. Sistema di attuazione in grado di convertire il restringimento di un filo SMA in una rotazione.
42. Veicolo fornito di due tende parasole montate sul parabrezza.
43. Vista d'insieme della tenda parasole azionata tramite un attuatore SMA.
44. Bocchetta d'aerazione con attuatore a memoria di forma integrato.
45. Supporto lombare regolabile utilizzando un materiale attivo.
46. Vista generale della rampa regolabile all'interno di un sedile d'automobile.
47. Sistema di regolazione del piano di seduta per un sedile automobilistico, attraverso l'azionamento di un materiale a memoria di forma.
48. Particolare del dispositivo per il rilascio dello schienale del sedile.
49. Sistema di sicurezza per gli impatti laterali.
50. Sistema di attuazione a memoria di forma di uno specchio retrovisore esterno.
51. Vista esplosa di un dispositivo di attuazione con elementi SMA per uno specchio retrovisore automobilistico.
52. Vista del sistema di attuazione a memoria di forma dello specchio retrovisore tramite un filo.
53. Sistema di attuazione SMA utilizzato per l'apertura della serratura di uno sportello d'automobile.

54. Strumento indicatore della carica della batteria di un'automobile, funzionante tramite un filo a memoria di forma.
55. Sistema di chiusura SMA ad elevata sicurezza.
56. Possibile configurazione di un sistema di attuazione SMA impiegato per bloccare e rilasciare la leva del cambio di un veicolo a motore.
57. Meccanismo di apertura/chiusura dello sportellino di rifornimento carburante.
58. Illustrazione del sistema di azionamento della maniglia portabagagli di un'automobile.
59. Motore con componenti SMA per convertire calore in energia elettrica.
60. Spaccato di un generico sedile per autoveicolo.
61. Piano di seduta realizzato in Polipropilene caricato fibra di vetro al 35%.
62. Porzione del cuscino di un sedile di fine anni '50.
63. Struttura a fili di alluminio con andamento sinusoidale.
64. Componenti di vario tipo solidali con il pad di poliuretano.
65. Poliestere.
66. Illustrazione del principio di funzionamento dell'Outlast.
67. Sistema di analisi della mappa di pressione sulla seduta e sullo schienale del sedile.
68. Principali regolazioni del sedile.
69. Illustrazione delle dotazioni e dei sistemi di regolazione del sedile di un'Audi Q5.
70. Illustrazione delle dotazioni e dei sistemi di regolazione del sedile di una Mercedes CL.
71. Illustrazione dell'impianto di riscaldamento della nuca.
72. Spaccato del sedile anteriore di una Mercedes classe S.
73. Air-bag responsabili della funzione massaggio nello schienale.
74. Sedile del guidatore, girevole.
75. Sedile del passeggero, girevole.
76. 77. Cuscino girevole portatile.
78. 79. Sedili per disabili.
80. Esempio di una delle piastre per sedile girevole attualmente sul mercato.
81. Nissan "FORUM".
82. Simulazione di un tamponamento.
83. Le fasi principali di un tamponamento.
84. Schema di funzionamento del sistema WHIPS progettato dalla Volvo Cars.
85. Sistema per prevenire il colpo di frusta muovendo il poggiatesta di un sedile.

- 86.1 Espansione del poggiatesta per la prevenzione del trauma da colpo di frusta.
- 86.2 Funzionamento di un sistema automatico contro gli effetti dannosi del colpo di frusta.
- 87. Diagram of geometric head restraint ratings.
- 88. Examples of adjustment positions for head restraints with locking height.
- 89. Fasi di apertura dell'airbag.
- 90. Airbag laterale.
- 91. Esempio di sensore di accelerazione con intelligenza locale.
- 92. Tempo di attivazione di un filo SMA da 0,025mm di spessore, in funzione della corrente applicata.
- 93. MigaOne™ Specifications.
- 94. Sedile e telaio corrispondente di una Fiat Grande Punto.
- 95. Concept.
- 96. Vista schematica del sistema di sicurezza anti colpo di frusta.
- 97. Vista esplosa e fasi di movimentazione del poggiatesta.
- 98. Componenti responsabili della movimentazione del poggiatesta.
- 99. Struttura attuatore SMA e gancio di bloccaggio/rilascio del sistema.
- 100. Componente di protezione esterna del cuscino con cerniera elastica.
- 101. Vista complessiva del sistema anti colpo di frusta.
- 102. Immagine schematica del processo di stampaggio per iniezione.

INDICE DELLE TABELLE

- 1. Leghe che mostrano un completo effetto a memoria di forma.
- 2. Esempi di temperature di trasformazione delle SMA Nichel-Titanio.
- 3. Tabella di Ranking 1
- 4. Tabella di Ranking 2
- 5. Tabella di Ranking 3
- 6. Tabella calcolo del costo per unità

INTRODUZIONE

Dopo un approfondito studio preliminare sulle capacità di queste straordinarie leghe metalliche a memoria di forma ("SMA" Shape Memory Alloy), si è indagato lo stato dell'arte circa le applicazioni, esistenti o sperimentali, di queste leghe applicate in campo automobilistico.

Numerosi sono gli ambiti in cui questi componenti a memoria di forma troverebbero enorme utilità: per l'aumento del comfort, come componente tecnico o meccanico, per il risparmio energetico e per l'aumento della sicurezza nel veicolo.

Anche se gli obiettivi di ciascuno di questi progetti sono diversi, hanno tutti una cosa in comune, cioè quella di sostituire gli attuatori tradizionali, presenti numerosi in un'automobile, con degli attuatori a memoria di forma. Questo perchè a parità di prestazioni vi sarebbero dei vantaggi soprattutto in termini di alleggerimento della massa complessiva del veicolo.

Queste riflessioni hanno portato successivamente, alla progettazione di un sistema che aumenta la sicurezza del passeggero in caso di tamponamento subito posteriormente, entro velocità da traffico cittadino. Il concept sviluppato è perciò quello di un meccanismo il quale grazie ad un attuttore "SMA" azionato elettricamente, riesce a muovere in avanti il poggiatesta del sedile al fine di sostenere collo e nuca del passeggero ed evitare così il classico trauma da "colpo di frusta".

1. Cosa sono le leghe a memoria di forma

Le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys "SMA") sono materiali metallici che possiedono la caratteristica di recuperare una forma preimpostata per effetto della variazione di temperatura e dello stato di sollecitazione applicato. Sono cioè capaci di subire trasformazioni cristallografiche reversibili in funzione della temperatura e del carico applicato.

Quando un componente SMA si trova al di sotto della sua temperatura di trasformazione può essere deformato abbastanza facilmente poichè possiede un basso limite elastico σ_y ; se però riscaldiamo il materiale al di sopra della temperatura di trasformazione, subentra una variazione nella struttura cristallina che causa il ritorno alla forma originaria e sviluppa una forza notevole.

In particolare questa variazione di temperatura genera una transizione di fase da una struttura cristallina *Martensitica* ad un'altra struttura cristallina *Austenitica* stabile a più alta temperatura. Questo fenomeno è noto come "*effetto memoria di forma*"¹.

Qui non si tratta del fenomeno di dilatazione che tutti i materiali subiscono se opportunamente riscaldati, queste leghe possiedono delle proprietà di variazione formale sorprendenti che vanno al di là dei comportamenti tipici di ogni famiglia materica ormai conosciuti.

Riassumendo esistono una serie di operazioni successive per imprimere l'effetto memoria di forma:

- Una forma predefinita viene fissata mediante trattamento termico.
- La lega viene raffreddata a temperatura relativamente bassa (Martensite malleabile) e deformata.
- Riscaldando nuovamente il materiale esso riacquista la forma che gli è stata fissata prima della deformazione.

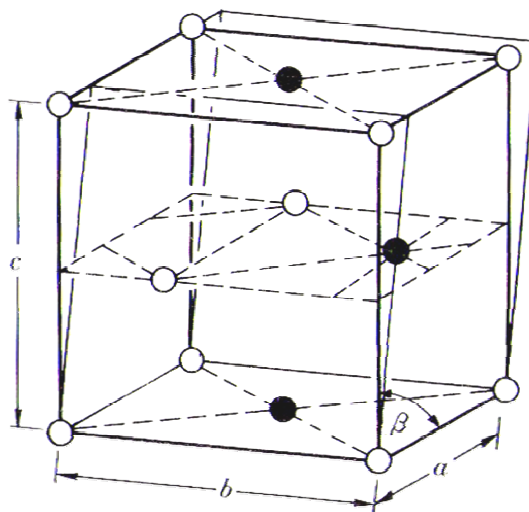
1.1 Cenni storici

I primi a scoprire la trasformazione connessa alla memoria di forma in una lega metallica furono Chang e Read nel 1932. Essi notarono la reversibilità della trasformazione del materiale sulla base di osservazioni metallografiche e di variazioni della resistività del materiale.

¹ Cfr., Teh, Y., H., *Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators*, Australian National University, p. 2, 2008.

Successivamente, un comportamento analogo fu osservato nel 1938 in una lega CuZn (ottone) al Massachusetts Institute of Technology, ma il riconoscimento ufficiale delle leghe a memoria di forma si ebbe solo una trentina di anni dopo, nel 1962, quando uno studioso di nome Buehler ed i suoi collaboratori presso i laboratori del NOL (U.S. Naval Ordnance Laboratory) scoprirono casualmente la lega a memoria di forma basata sul sistema equiatomico NiTi mentre stavano lavorando ad un progetto su un materiale resistente alla corrosione e alle alte temperature. Da allora iniziarono i primi studi su questa classe di materiali ed in particolare, sul NiTiNOL (acronimo di nichel, titanio e NOL). (fig. 1)

Nei decenni successivi, le leghe a memoria di forma divennero oggetto di notevole interesse, sia scientifico sia commerciale, tanto che un grande numero di prodotti basati proprio su tali materiali iniziarono ad essere impiegati in settori che spaziano dall'ingegneria chimica a quella meccanica, dalla medicina all'idraulica, dall'industria aerospaziale a quella automobilistica².



(Fig. 1): Struttura cristallina della lega equiatomica NiTi [Nichel-Titanio].

Grazie al loro costo inferiore rispetto alle leghe NiTi, recentemente si è assistito allo sviluppo di leghe a base rame, come le leghe ternarie CuZnAl e CuAlNi. Le proprietà di questi materiali sono

² Cfr., Virgilli, V., *Materiali a Memoria di Forma: caratterizzazioni e applicazioni nel campo dei beni culturali*, Università di Bologna, pp. 9-11, 2008.

molto diverse tra loro: le leghe NiTi, ad esempio, presentano una maggiore deformazione per l'effetto della memoria di forma (fino al 10% contro il 5% di quelle a base rame), sono più stabili termicamente, hanno un'eccellente resistenza alla corrosione e possiedono una maggiore duttilità soprattutto in fase martensitica. Inoltre, la maggiore resistenza meccanica ne permette l'utilizzo per la realizzazione di giunti meccanici e di tenuta, e la resistenza alla corrosione, nonché la biocompatibilità, fanno sì che queste possano essere impiegate in ambito biomedico, sotto forma, per esempio, di filtri anticoagulo per la circolazione sanguigna (stent) o di perni per fratture ossee ecc...

Per contro, le leghe a base rame, che saranno esaminate in seguito, oltre ad essere meno costose, possono essere fuse con più facilità ed hanno un più ampio intervallo di trasformazione. Le migliori proprietà delle leghe NiTi hanno fatto sì che queste rimanessero, comunque, le più studiate e applicate.

In tabella 1 sono riportati i dati per le leghe che mostrano un completo effetto a memoria di forma.

Alloy	Composition	M_s (°C)	Transformation Temperature Hysteresis (°C)	Type of Transformation*	Ordered or Disordered†	Volume Change
AgCd	44~49at.%Cd	-190~-50	~15	B2→M2H	ordered	-0.16
AuCd	46.5~50at.%Cd	30~100	~15	B2→M2H	ordered	-0.41
CuAlNi	14~14.5wt.%Al 3~4.5wt.%Ni	-140~100	~35	DO ₃ →2H	ordered	-0.30
CuAuZn	23~28at.%Au 45~47at.%Zn	-190~-40	~6	L21→M18R	ordered	-0.25
CuSn	~15at.%Sn	-120~30		DO ₃ →2H or 18R	ordered	
CuZn	38.5~41.5wt.%Zn	-180~-10	~10	B2→9R or M9R	ordered	-0.5
CuZnX (X=Si, Sn, Al, Ga)	few wt.% X	-180~100	~10	B2→9R or M9R DO ₃ →18R or M18R	ordered	
InTl	18~23at.%Tl	60~100	~4	FCC→FCT	disordered	-0.2
NiAl	36~38at.%Al	-180~100	~10	B2→M3R	ordered	-0.42
TiNi	49~51at.%Ni	-50~100	~30	B2→B19	ordered	0.34
FePt	~25at.%Pt	~-130	~4	L1 ₂ →ordered BCT	ordered	0.8~ -0.5
FePd	~30at.%Pd	~-100		FCC→FCT→BCT	disordered	
MnCu	5~35at.%Cu	-250~180	~25	FCC→FCT	disordered	

Tabella 1

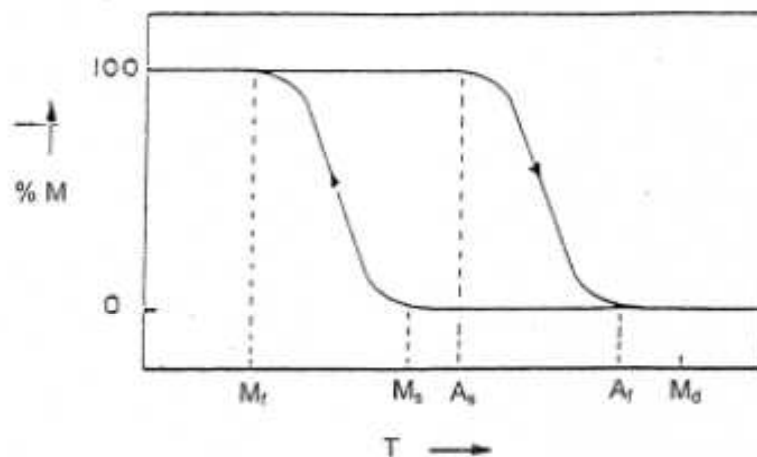
1.2 Il passaggio da Austenite a Martensite

Per capire come avviene l'effetto a memoria di forma è necessario capire la struttura cristallina delle SMA. Tutte le leghe a memoria di forma sono caratterizzate da due fasi cristalline ben distinte: la

fase a bassa temperatura è la *martensite* (fase generata), mentre la fase stabile ad alta temperatura è l'*austenite* (fase genitrice). Il motivo per il quale prevale una fase piuttosto che l'altra dipende dalla temperatura e dallo sforzo a cui il pezzo è sottoposto. È importante capire i meccanismi della trasformazione della struttura poichè le proprietà di queste leghe dipendono dalla quantità con cui una fase prevale sull'altra.

La trasformazione martensitica è di tipo non diffusivo, questo significa che il moto degli atomi avviene in modo coordinato: ovvero si assiste al movimento sincronizzato di un certo numero di atomi che da luogo al cambiamento di fase, senza che gli atomi si spostino di posizione reticolare.

È stato osservato che la trasformazione martensitica avviene ad una determinata temperatura relativamente bassa: il processo comincia alla temperatura M_s "Martensite start" e termina ad una temperatura più bassa M_f "Martensite finish". Lo stesso accade per il riscaldamento ed il passaggio ad Austenite: il cambiamento comincia ad una temperatura A_s "Austenite start" (più alta di M_s) e termina ad una temperatura molto alta A_f "Austenite finish". Inoltre l'effetto di una sollecitazione meccanica può favorire il passaggio da austenite a martensite purchè si rimanga al di sotto di una temperatura ben precisa M_D "Martensite deformation". Al contrario se viene applicato un carico al di sopra di questa temperatura M_D non avviene alcuna trasformazione di fase, ma semplicemente una deformazione del materiale³.



(Fig. 2): Grafico della temperatura in funzione della % di martensite. Si osserva come le curve del grafico in andata e ritorno non coincidano a causa delle differenti temperature di trasformazione, per questo motivo si genera un ciclo di isteresi.

³ Cfr., Brugnara, M., *Teoria ed applicazioni delle Leghe a Memoria di forma*, Università degli Studi di Trento, p. 8, 1999.

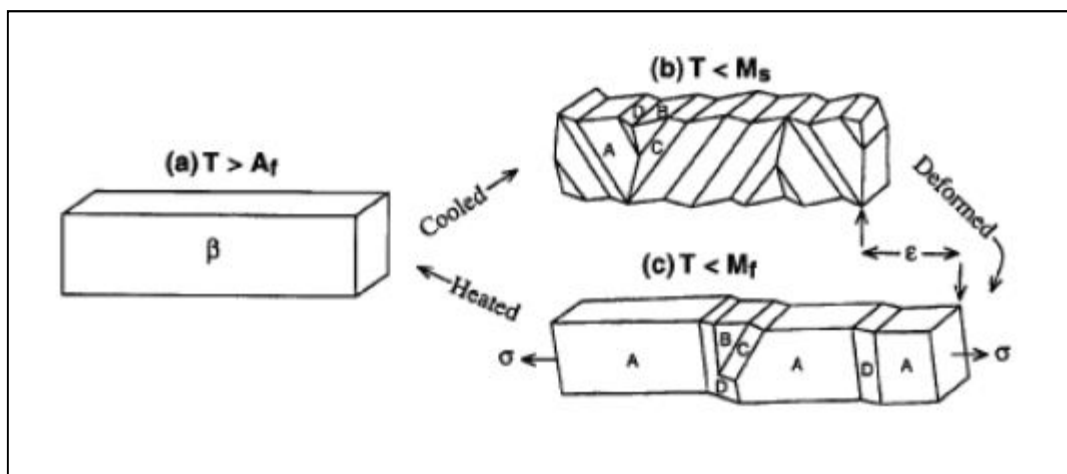
Le temperature M_s e M_f sono inferiori alle temperature A_s e A_f pertanto si ha un *ciclo di isteresi* in genere di poche decine di gradi (fig. 2), inoltre le temperature di inizio e fine trasformazione dipendono dalla esatta composizione della lega e dai trattamenti termici subiti in precedenza.

Infatti, anche variazioni molto piccole nelle percentuali dei vari componenti di lega possono avere effetti drastici sulle temperature di transizione che caratterizzano le trasformazioni di fase. È questa l'origine della proprietà più importante di questi materiali, vale a dire la loro progettabilità in differenti temperature di transizione di fase a seconda di esigenze definite a priori.

La trasformazione al raffreddamento austenite → martensite è reversibile: cioè dopo un successivo riscaldamento la martensite si trasforma di nuovo in austenite.

La trasformazione di fase avviene con la formazione di "laminette" chiamate *placchette lenticolari* che si formano all'interno del grano del materiale. Osserviamo il processo a livello della microstruttura esaminando perciò la lega dal punto di vista cristallografico. (fig. 3)

Nella figura 4 non viene esaminata la classica lega Ni-Ti ma una lega β a base di rame.



(fig. 3): Microstruttura di una SMA nei vari passaggi di fase. Si vedono le quattro principali tipologie di placchette lenticolari [A-B-C-D].

Fase (a)

Ci troviamo di fronte ad una struttura austenitica cubica a facce centrate, il materiale possiede una temperatura maggiore di A_f .

Fase (b)

La lega viene raffreddata a temperatura inferiore di M_s fino ad ottenere una struttura martensite complessa, cioè una *martensite termoelastica* formata da diverse laminette alternate (A-B-C-D). La caratteristica di questa struttura è quella di avere le interfacce tra le laminette (le loro superfici di contatto) connesse da legami a bassa energia. Per questo motivo tale struttura risulta in grado di subire delle variazioni geometriche modificando leggermente la temperatura, oppure applicando sforzi ridotti, generando così delle microdeformazioni.

Fase (c)

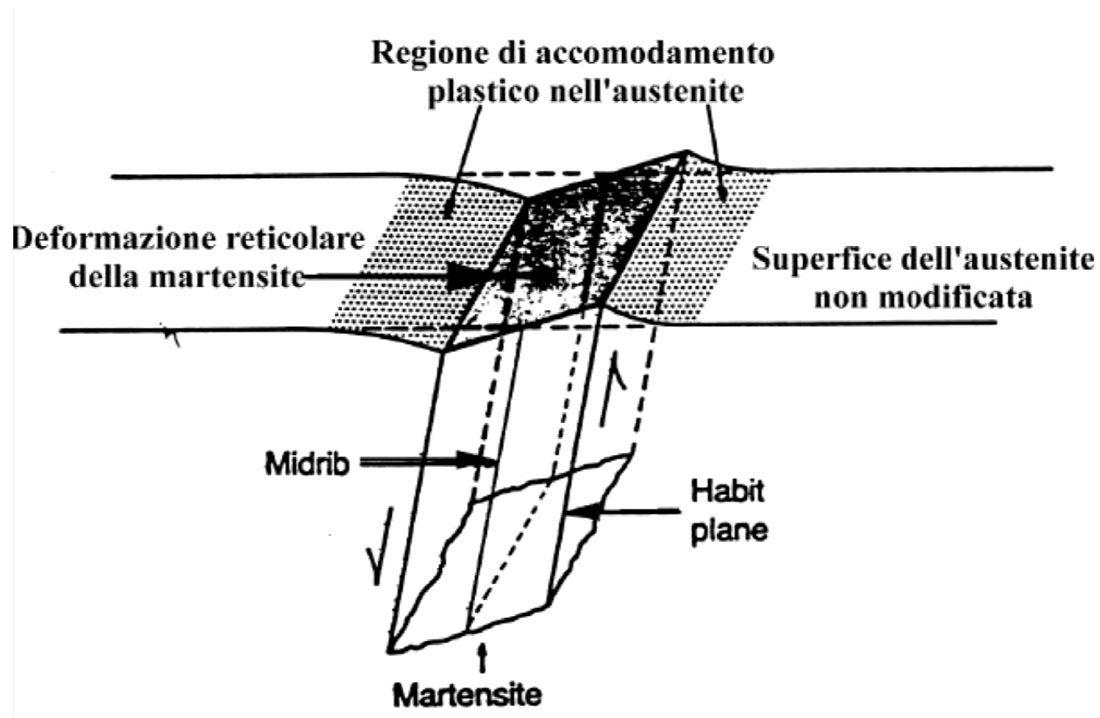
A temperatura ambiente se applico un carico e deformato plasticamente il materiale, si rende preponderante la direzione di deformazione di una delle laminette sulle altre (in questo caso risulta maggiormente evidente la deformazione di A). Questa tuttavia risulta essere un'apparente deformazione plastica, perchè avviene senza scorrimento di atomi.

Il 100% di martensite si avrà solo raggiungendo una determinata temperatura M_f . Questa non è intrinseca del materiale ma dipende da come è stato condotto il raffreddamento: se non è stato continuo si ha una stabilizzazione termica della martensite, ossia ricominciando a raffreddare occorre un certo ΔT affinché la trasformazione continui ad avanzare, abbassando così anche la M_f . La causa di questa stabilizzazione è da ricercare nella diffusione degli interstiziali che formano le atmosfere di Cottrell indurendo la matrice di austenite e sfavorendo quindi la formazione delle placchette di martensite³.

Riscaldando nuovamente la martensite si ottiene la trasformazione di fase, cioè si ritorna alla struttura austenite mediante recupero elastico della deformazione. Ciò è possibile perchè gli atomi della lega sono spostati solo in modo secondario rispetto alla loro posizione originale.

Il moto cooperativo di atomi, che porta alla trasformazione di fase, causa di fatto una deformazione reticolare. (fig. 4)

³ Ivi, p. 6.



(Fig. 4): Deformazione plastica nell'austenite causata dalla trasformazione in martensite.

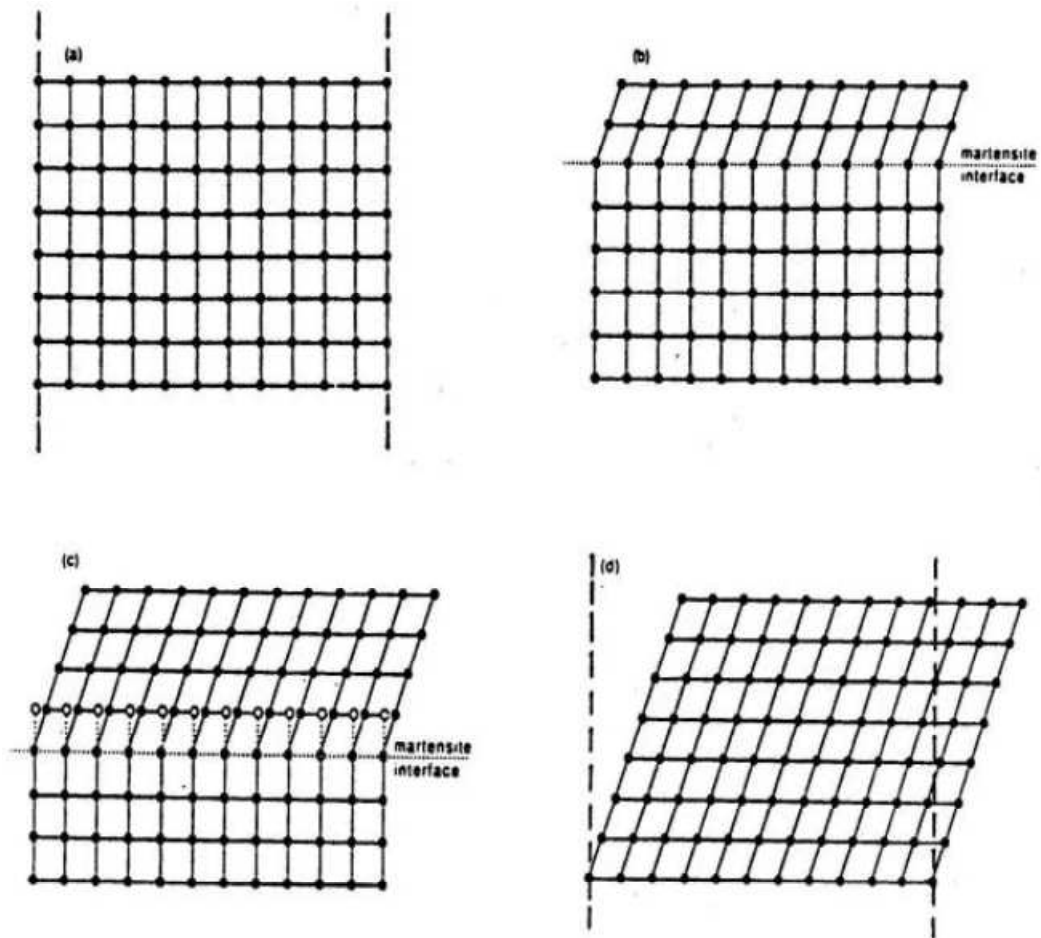
Come è osservabile in figura 4 nella matrice austenitica è presente una zona di *accomodamento plastico* della martensite.

Esistono due motivi per i quali si verifica questa deformazione plastica:

1. Durante la trasformazione esiste un piano che prende il nome di "habit plane" che rimane indistorto e non ruotato ed è proprio su questo piano che "nuclea" la martensite.
2. Austenite e martensite possiedono, come già visto prima, due reticoli cristallini ben distinti, con parametri di cella definiti. L'austenite ha un reticolo cubico facce centrate, mentre la martensite è un tetragonale distorto.

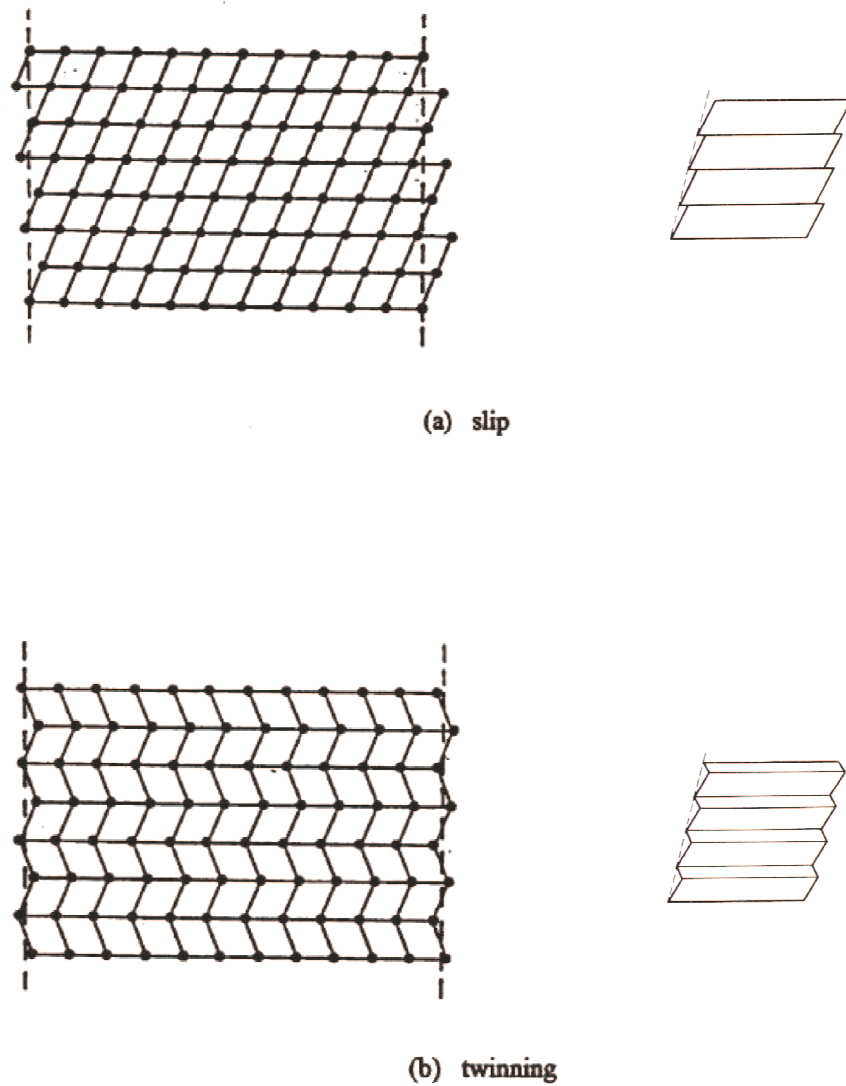
Durante la transizione di fase, le forze che nascono tra le due diverse tipologie di celle elementari, causano quelle deformazioni reticolari tra austenite e martensite.

Osservando la deformazione che la trasformazione martensitica induce nel reticolo cristallino, come si vede in figura 5, si avrebbe la tendenza a passare dalla configurazione (a) a quella (d).



(Fig. 5): Trasformazione martensitica con deformazione non vincolata del reticolo cristallino.

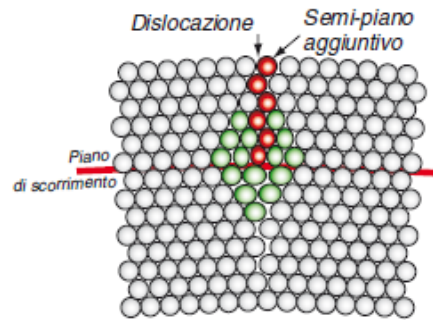
Nella realtà questa configurazione non è raggiungibile in quanto la matrice di austenite circostante vincola la deformazione del reticolo, costringendolo a mantenere la posizione originale del cristallo. La trasformazione martensitica induce quindi uno stato di sforzo che porta ad una deformazione locale attraverso due possibili meccanismi: *scorrimento* (slip) e *geminazione* (twinning). (fig. 6)



(Fig. 6): Meccanismi di deformazione per scorrimento e per geminazione dell'austenite in martensite.

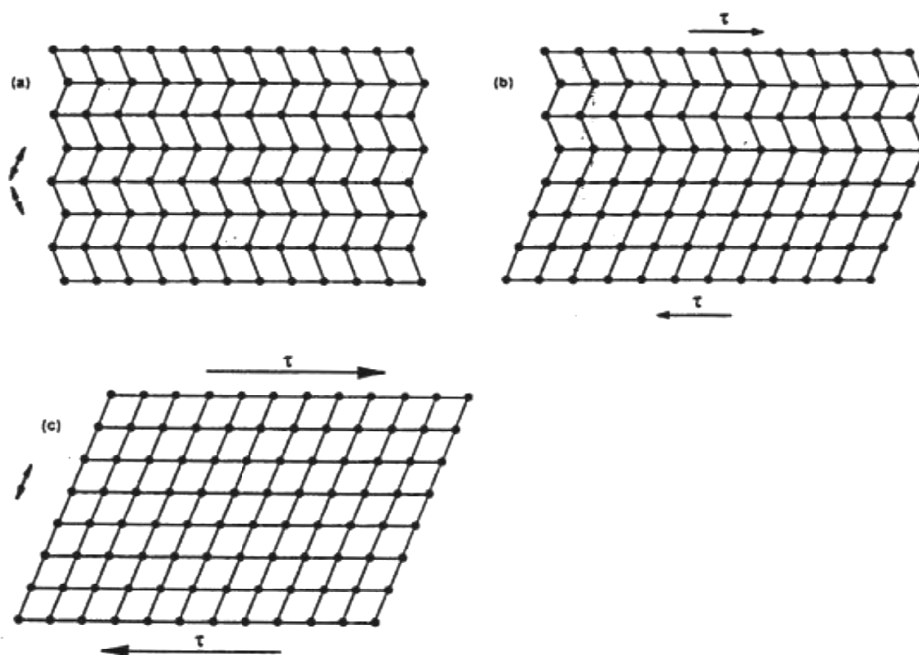
Con il meccanismo (a) di scorrimento ottengo una deformazione plastica per moto delle dislocazioni che è quindi irreversibile. Dove per *dislocazione* si intende un difetto di linea ripetuto nel reticolo del materiale, ovvero una distorsione del reticolo cristallino stesso causata dalla formazione di un doppio strato di atomi in più rispetto al cristallo adiacente⁴. (fig. 7)

⁴ Ashby, M. et al., "Un approfondimento: le origini di resistenza e duttilità", in *Materiali dalla scienza alla progettazione ingegneristica*, Milano, Casa Editrice Ambrosiana, p.120, 2009.



(Fig. 7): Difetto di dislocazione nei cristalli, semipiano di atomi aggiuntivo.

Mentre con (b) la geminazione, si formano delle placchette con orientamento cristallino diverso dalla matrice. Dato che con quest'ultimo meccanismo non si ha rottura di legami atomici, ma solo un "accomodamento", la deformazione per twinning è reversibile e in questo caso la trasformazione viene definita termoelastica. In alcune leghe questo è possibile solo per alcune configurazioni della matrice e della martensite, o può dipendere dalla formazione di geminati (aggregati cristallini). Applicando uno sforzo di taglio in presenza di martensite termoelastica è possibile mettere in moto il bordo dei geminati ottenendo una variazione di forma netta con un meccanismo chiamato *detwinning*. (fig. 8)



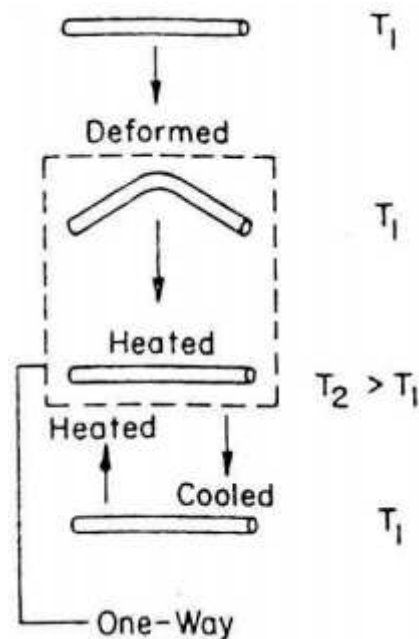
(Fig. 8): Meccanismo di Detwinning.

Questa trasformazione avviene con livelli di carico abbastanza bassi, ma il processo deve essere condotto ad una temperatura minore della M_f .

1.3 Leghe a memoria di forma "a una via" e "a due vie"

L'effetto di memoria di forma può essere di due tipi: One Way Shape Memory Effect (OWSME) cioè "ad una via" oppure Two Ways Shape Memory Effect (TWSME) ovvero "a due vie".

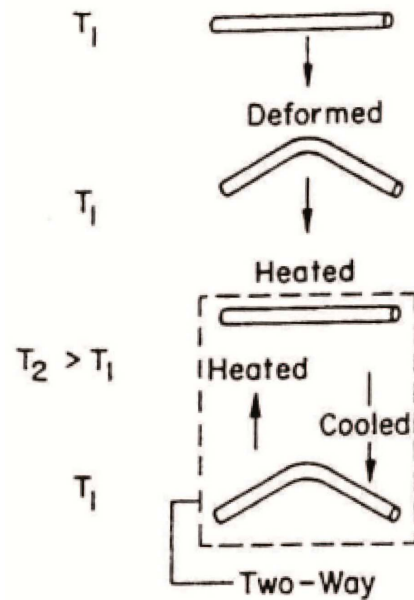
Quelle leghe che manifestano memoria di forma una sola volta, dopo un riscaldamento con $T > A_f$ sono dette ad una via, poiché si ha un ritorno alla forma iniziale che si aveva con la fase austenitica; tuttavia se si riporta nuovamente il pezzo ad una temperatura minore di M_f la configurazione macroscopica resta pressoché invariata, così per avere nuovamente l'effetto a memoria di forma bisogna agire con un'altra deformazione. (fig. 9)



(Fig. 9): Effetto memoria di forma "ad una via".

La forma da recuperare (allo stato austenitico) deve essere fissata mediante trattamento termico tra 500 e 800°C per circa 5 minuti o tra 300 e 350°C ma per tempi maggiori.

Le leghe che invece manifestano una variazione formale anche dopo un ulteriore raffreddamento al di sotto di A_f vengono chiamate "a due vie". (fig. 10)



(Fig. 10): Effetto memoria di forma "a due vie".

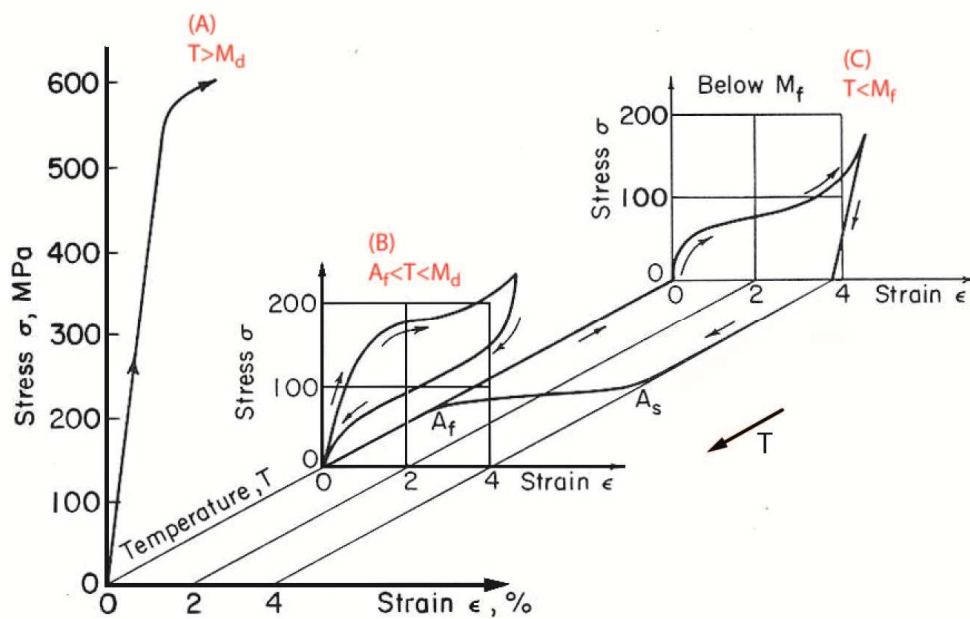
In questo caso tale proprietà non è intrinseca del materiale ma è ottenuta con opportuni trattamenti termomeccanici. Infatti mediante questi opportuni trattamenti risulta possibile indurre concentrazioni di sforzo a livello microstrutturale, che fanno in modo che le laminette di martensite, deformate dopo raffreddamento, si orientino in modo preferenziale a seguito di ulteriori riscaldamenti e raffreddamenti, determinando perciò variazioni di forma programmabili. Per tale ragione si manifesta memoria di forma ogni qualvolta che si passa da $T < M_f$ a $T > A_f$ e viceversa.

Più precisamente possiamo dire che il trattamento termico principale di una lega a memoria di forma è il *ciclaggio termico forzato della martensite*. Questo trattamento, utilizzato per ottenere un effetto di memoria "a due vie", è un passaggio molto delicato che necessita solitamente di essere determinato sperimentalmente per ogni singolo componente.

Come si è detto normalmente i pezzi vengono austenitizzati utilizzando temperature maggiori di $500\text{ }^\circ\text{C}$ e tempi di circa 5 minuti in maniera da ottenere una fase omogenea; vengono poi raffreddati bruscamente tramite getti di aria fredda oppure in acqua vincolandoli in modo tale che debbano mantenere la forma impartitagli. Questo brusco raffreddamento introduce stress termici molto elevati, soprattutto se il pezzo non è di piccole dimensioni, creando delle "dislocazioni localizzate".

Grazie a questa localizzazione la martensite si formerà seguendo direzioni preferenziali. In questa maniera è possibile ottenere un effetto di memoria di forma anche nella trasformazione austenite \rightarrow martensite³.

1.4 Curva sforzo-deformazione-teperatura SMA



(Fig. 11): Ciclo termomeccanico in un grafico sforzo-deformazione-temperatura di una lega a memoria di forma.

(A) $T > M_D$

Anche per le SMA oltre un limite elastico σ_y una deformazione plastica risulta permanente, perciò non viene recuperata.

³ Cfr., Brugnara, M, *Teoria ed...di forma*, Cit., p.13.

(B) $A_f < T < M_d$

Una deformazione induce la formazione di martensite, si determina perciò una deformazione crescente a sforzo più o meno costante. Allo scarico della forza il materiale si ritrasforma in austenite, causando contrazione del materiale esercitando uno sforzo più o meno costante ad un livello inferiore. La deformazione viene perciò recuperata senza necessità di riscaldamento, ma semplicemente rilasciando lo sforzo. Questo è definito *comportamento pseudoelastico* del materiale, che comunque vedremo meglio più avanti.

(C) $T < M_f$

In questa fase invece la deformazione plastica subita da una struttura martensitica, viene recuperata in un successivo riscaldamento che determina una nuova trasformazione in austenite.

Tabella 2: esempi di temperature di trasformazione delle SMA Nichel-Titanio

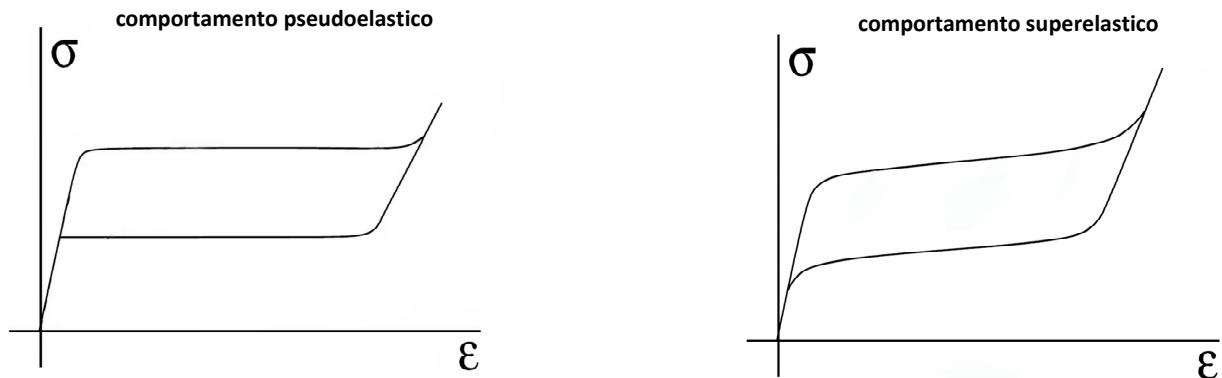
	M_s	M_f	A_s	A_f	isteresi
Lega 1	- 53	- 33	- 24	- 5	26
Lega 2	- 45	- 24	- 15	+ 7	27
Lega 3	- 3	+ 6	+ 23	+ 35	27
Lega 4	+ 24	+ 36	+ 54	+ 71	35
Lega 5	+ 59	+ 79	+ 100	+ 121	46

1.4.1 Superelasticità e pseudoelasticità

Come scrive Virgilli:

Una ulteriore caratteristica delle SMA è il fenomeno della superelasticità: se l'oggetto in questione viene sottoposto a grandi deformazioni fino a circa il 10% della lunghezza iniziale, entro un intervallo di temperature caratteristiche della particolare lega, risulta in grado di recuperarle. Quando nel diagramma sforzo-deformazione il recupero della deformazione segue

un andamento lineare, la lega viene definita *pseudoelastica* (figura 12.1 a sinistra), mentre, nel caso in cui il recupero segua un andamento non lineare, il fenomeno è chiamato *superelasticità* (figura 12.1 a destra)².



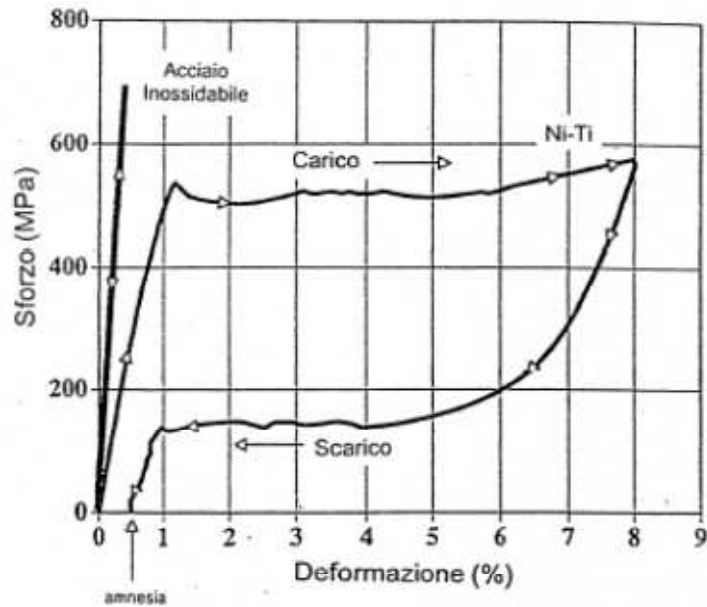
(Fig. 12.1): Curve sforzo-deformazione per un provino inizialmente in fase austenitica che si trova ad una temperatura compresa tra A_f ed M_d . Entro tale intervallo di temperatura, in virtù della trasformazione martensitica indotta per sforzo, il materiale presenta un comportamento pseudoelastico (a sinistra) o superelastico (a destra).

Risulta possibile esaltare il comportamento delle leghe "superelastiche" attraverso opportuni trattamenti termomeccanici.

A basse temperature in fase martensitica ($T < M_f$) è possibile imprimere grandi deformazioni elastiche. A temperature intermedie ($A_f < T < M_d$) in fase di scarico la lega è in grado di esercitare uno sforzo costante programmabile anche di circa 150 MPa (leghe N-Ti). (fig. 12.2)

Inoltre le leghe a memoria di forma sono caratterizzate da proprietà di smorzamento delle vibrazioni.

² Virgili, V., *Materiali...beni culturali*, Cit., Università di Bologna, p.22, 2008.



$$A_f < T < M_d$$

(Fig. 12.2): Nel grafico sforzo-deformazione sono visibili i diversi comportamenti dell'acciaio e di una lega NiTi.

Le SMA in Ni-Ti sono in grado di esercitare in fase di scarico sforzi dell'ordine dei 150 MPa. In particolare per fili di piccolo diametro, le forze esercitate sono state misurate come segue:

- 0,025 mm → 7 g
- 0,050 mm → 35 g
- 0,075 mm → 80 g
- 0,1 mm → 150 g
- 0,15 mm → 330 g
- 0,2 mm → 590 g
- 0,3 mm → 1250 g
- 0,375 mm → 2000 g

Filo "Smartflex" per attuatore, di produzione SaesGetters S.p.A.

- Spessore da 20 a 500 μm → Forza a 150 MPa da 5 a 3000 g.

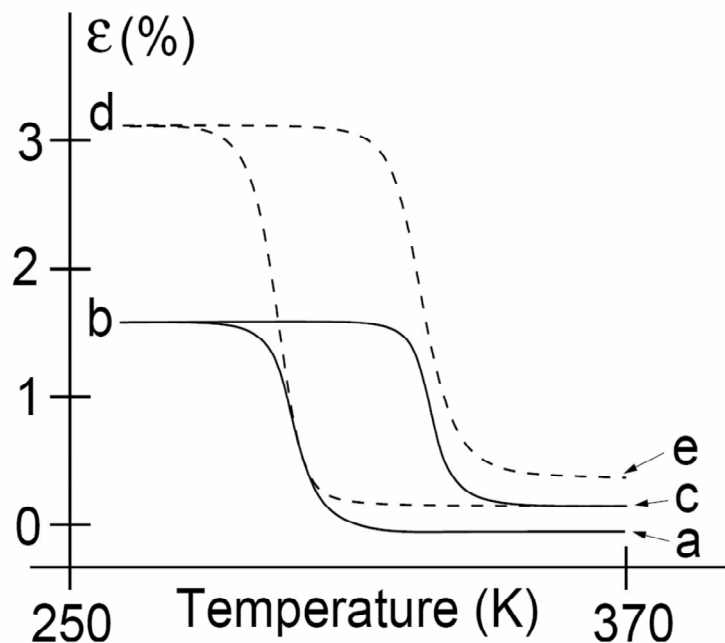
[Fonte: http://www.saesgetters.com/documents/SmartFlex%20Brochure_882.pdf]

1.5 Deformazioni plastiche e training del materiale

Nel grafico in figura 13 il materiale si trova, inizialmente, in fase austenitica nel punto **a** ed è, in seguito, portato al punto **e** mediante due cicli di raffreddamento e riscaldamento.

La differenza tra **a** e **c** rappresenta la deformazione plastica a seguito del primo ciclo, mentre la differenza tra **c** e **d** è quella a seguito del secondo. Questo accumularsi di deformazioni plastiche continua per oltre 2000 cicli e deve quindi, essere tenuto in considerazione nell'utilizzo di tali materiali. Un modo per risolvere il problema è quello di eseguire un *training del materiale*, ossia di ripetere i cicli fintanto che l'accumularsi di deformazioni plastiche non si sia stabilizzato. Questo accumulo di deformazioni plastiche influenza, infatti, in maniera assai rilevante il comportamento del materiale, le cui proprietà, quali ad esempio, le temperature di inizio e fine trasformazione di fase (sia austenitica che martensitica), continuano ad evolvere durante il processo di training. Una ulteriore conseguenza dell'accumularsi, durante il processo di training, delle deformazioni plastiche è il generarsi di sforzi interni e di asimmetrie nel materiale che introducono la formazione preferenziale di determinate varianti martensitiche.

Come conseguenza, il materiale torna a forme martensitiche "viziate" da tali sforzi ed asimmetriche, piuttosto che alla caratteristica forma twinned, quando viene raffreddato da A_f a M_f , ovviamente, in assenza di carichi applicati².



(Fig. 13): Deformazione plastica a seguito di un ciclo di carico.

² Ivi, pp. 27-28.

L'effetto della memoria di forma ad una via è caratteristica intrinseca delle SMA, invece come abbiamo visto l'effetto a due vie è una caratteristica acquisita. Tutte queste considerazioni sono fondamentali per le analisi sperimentali e la progettazione degli attuatori per le automobili.

1.6 La transizione di fase R

In determinate condizioni, durante il raffreddamento, tra la fase austenitica e la fase martensitica può apparire una fase intermedia, denominata fase R, caratterizzata da una cella romboedrica (da cui appunto il nome di fase R). Questa trasformazione, allo stesso modo di quella in fase austenitica e martensitica, è individuabile entro un intervallo di temperature R_s (romboedrica start) e R_f (romboedrica finish).

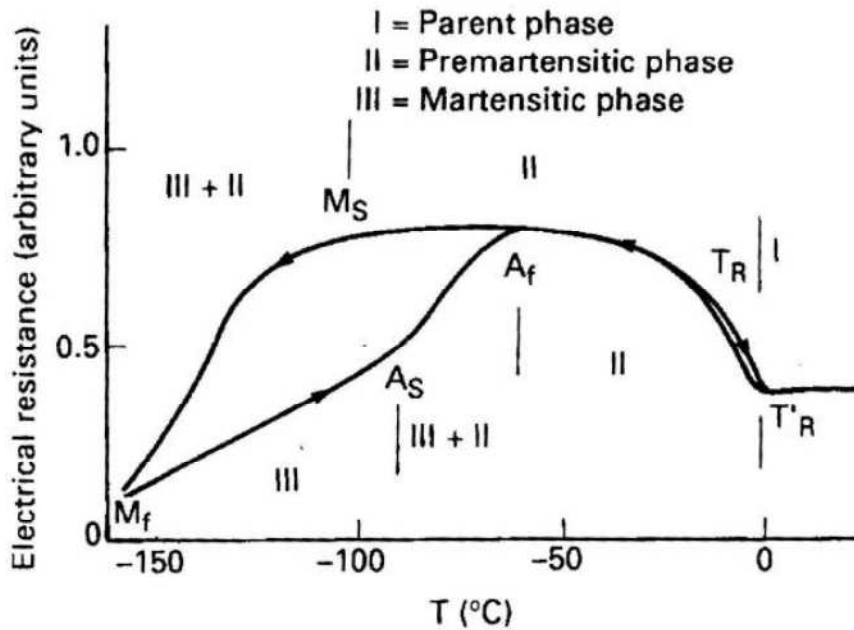
Questa fase R è una trasformazione inusuale che è stata osservata dopo un trattamento di invecchiamento a bassa temperatura (trattamento termico che conferisce durezza alla lega).

Nello specifico si ottiene un materiale che quando viene riscaldato presenta martensite ed austenite, mentre quando viene raffreddato appare anche una terza fase denominata appunto fase R.

Osservazioni sperimentali hanno dimostrato che questa trasformazione segue due strade distinte, a seconda della percentuale di Nichel presente: nel primo caso, verificato per una lega Ti-51,14 at % Ni, si ha la trasformazione da austenite a fase R ($A \rightarrow R$) seguita dalla formazione di due trasformazioni martensitiche separate dalla fase R ($R \rightarrow M_1$ e $R \rightarrow M_2$).

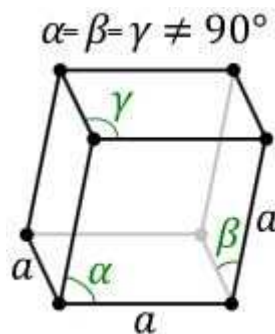
Il secondo caso, verificato per una lega Ti-50,2 at % Ni con identico trattamento di invecchiamento, presenta una trasformazione parziale $A \rightarrow R$, seguita dalla trasformazione $R \rightarrow M_1$ in competizione con la trasformazione $A \rightarrow M_2$.

Analizzando l'andamento della resistenza elettrica al variare della temperatura la presenza della fase R si trova anche in una lega Ti50Ni47Fe3. (fig. 14)



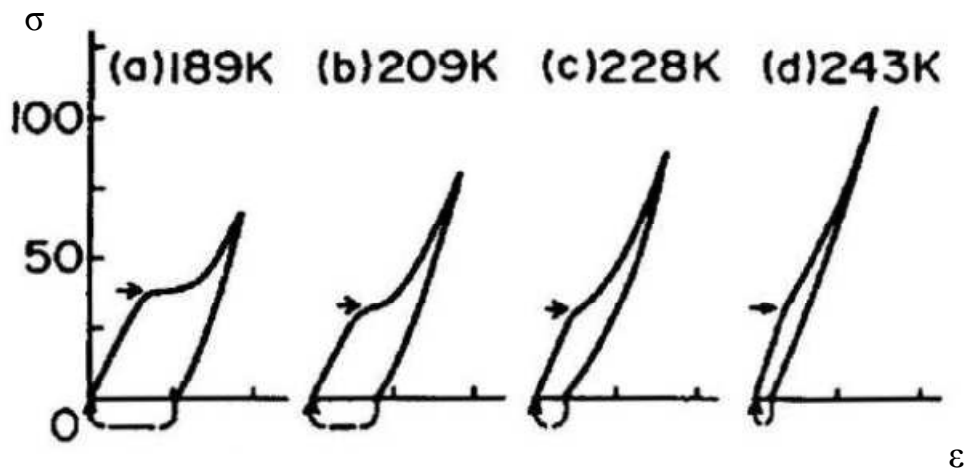
(Fig. 14): Curva della resistenza elettrica sulla temperatura di una lega $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{47}\text{Fe}_3$.

La temperatura T'_R determina l'inizio della trasformazione di fase R che termina alla temperatura T_R ; la transizione è caratterizzata da un'isteresi su un intervallo di temperatura molto piccolo, circa $1,5\text{ }^\circ\text{C}$. La variazione cristallografica che questa trasformazione comporta è una lieve distorsione dell'angolo del reticolo cristallino (fig. 15); questo indica quindi che la transizione di fase R può presentare l'effetto di memoria di forma.



(Fig. 15): Rappresentazione della cella romboedrica nella transizione di fase R .

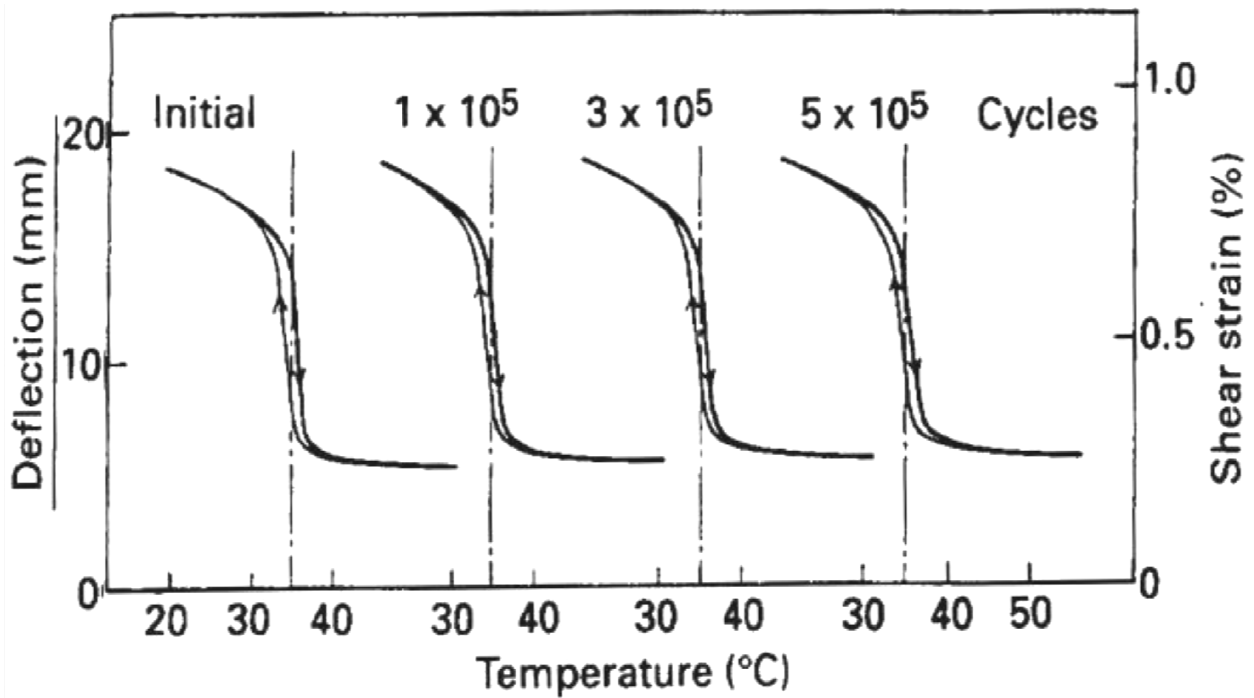
Analizzando la figura 16, dove sono riportate una serie di curve sforzo deformazione in funzione della temperatura, si nota che la deformazione permanente dopo un ciclo carico-scarico viene recuperata con un riscaldamento a temperature maggiori di T_R .



(Fig. 16): Effetto memoria di forma della fase R; La T_R viene indicata per ciascun grafico in corrispondenza della freccia orizzontale.

L'effetto memoria di forma è quindi associabile alla trasformazione di fase R; si nota inoltre che la deformazione recuperabile aumenta con il decremento della temperatura. *La massima deformazione recuperabile non supera comunque mai 1%*, valore molto minore del recupero delle leghe a memoria di forma martensitica.

Quello che rende estremamente interessante questa trasformazione è il comportamento della lega sotto condizioni di carico ciclico. In particolare osservando la figura 17 riferita sempre ad una lega Ti50Ni47Fe3, si osserva che la variazione dell'isteresi dopo 500.000 cicli termici è molto piccola.



(Fig. 17): Variazione dell'isteresi dopo innumerevoli cicli termici.

Questo risultato indica che la stabilità dell'effetto memoria di forma della fase *R* è molto maggiore che quello della fase martensitica, rendendo estremamente interessanti queste leghe per lo sviluppo di microattuatori termici³.

1.7 Leghe a base rame

Dai primi anni sulle sperimentazioni con le leghe a memoria di forma, molte altre SMA sono state scoperte: CuAlNi, CuZnAl, Fe₃Rt, NiAl, AgCd e CuSn. Tuttavia le uniche che possono essere impiegate per applicazioni pratiche, a parte le NiTi, sono le leghe a base di rame. L'attenzione intorno a queste leghe si sviluppò a partire dagli anni 70' a causa delle loro potenzialità come nuovi materiali funzionali. Queste leghe a base rame risultano disporre di molta attrattiva soprattutto dal punto di vista economico poichè il loro costo di produzione è di circa $\frac{1}{10}$ delle leghe NiTi.

³ Cfr., Brugnara, M, *Teoria ed...di forma*, Cit., pp. 16-18.

Precisamente le qualità che renderanno interessanti queste leghe nelle applicazioni pratiche sono:

- La stabilità dell'effetto memoria di forma anche sotto ripetute deformazioni e cicli termici che si verificano durante l'utilizzo
- La resistenza a fatica
- La tenacità a frattura
- La duttilità
- Fusione ed estrusione in aria
- La tecnologia per l'affinamento delle dimensioni dei grani
- Gli effetti dell'invecchiamento.

Anche per queste leghe è di fondamentale importanza analizzare il diagramma di fase e le temperature di trasformazione di fase, per identificare la giusta composizione chimica e ottenere il materiale con le proprietà desiderate.

Oltre alle leghe ternarie riportate sopra sono state testate nell'ambito manifatturiero anche alcuni materiali con il quarto elemento di lega aggiunto; si è così potuto notare che le loro proprietà non differiscono di molto da quelle delle leghe ternarie⁵.

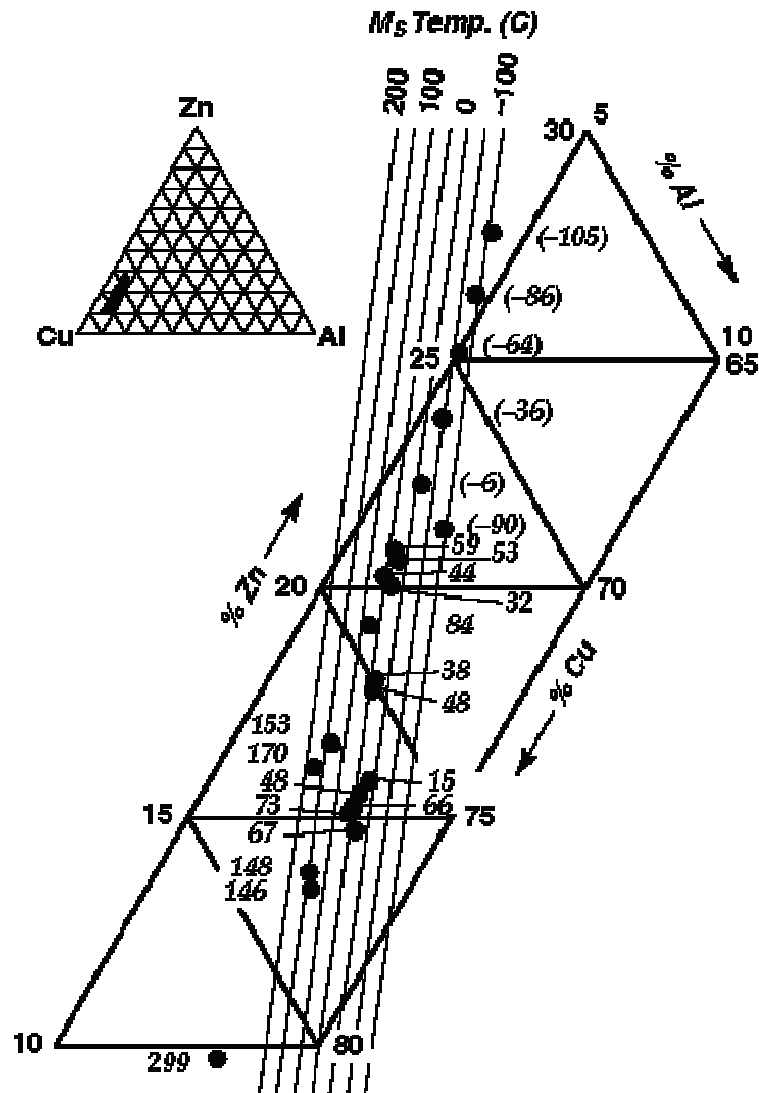
1.7.1 Adattamento delle temperature di trasformazione

Come si è ampiamente detto le temperature di trasformazione di fase delle SMA dipendono dalla loro composizione chimica e dal processo di raffreddamento subito (molto influente è la tempra). Dato che anche piccole differenze nella composizione possono indurre variazioni nella temperatura di trasformazione di centinaia di gradi, campioni di materiale con temperature di trasformazione scelte arbitrariamente possono essere ottenute controllando attentamente il processo produttivo.

Di seguito esamineremo la relazione tra la velocità di raffreddamento, la composizione e le temperature di trasformazione nelle leghe a base rame maggiormente rappresentative: la CuAlNi e la CuZnAl. La figura 18 è un esempio della relazione tra la composizione e le temperature di trasformazione per una lega CuZnAl. Il triangolo in alto a sinistra mostra le variazioni nella

⁵ Cfr. Funakubo, H., *Shape Memory Alloys, Precision Machinery and Robotics*, Vol.1, S.I., Taylor & Francis, 1987, trad. in En. Kennedy J.B., S.I., S.d., pp. 116-124.

composizione per un sistema ternario; le porzioni annerite di questo stesso triangolo corrispondono alla regione dove le temperature di trasformazione sono state misurate.



(Fig. 18): Relazione tra la composizione e la temperatura di M_s in una lega CuZnAl.

Risulta chiaramente visibile, osservando le linee parallele che intersecano il grafico, come le temperature di trasformazione possano spostarsi a causa di piccole variazioni nella composizione. Inoltre è stato osservato come queste leghe siano particolarmente sensibili alla variazione della percentuale di Al presente, mantenendo fissa la percentuale di Rame: infatti tutte le temperature di trasformazione di fase diminuiscono con l'aumentare della concentrazione di Al, sebbene l'ampiezza dell'isteresi rimanga pressochè la stessa.

Se non nella stessa misura anche la variazione della percentuale di Zn, comporta alterazioni delle temperature di trasformazione, mantenendo fissata la concentrazione di Alluminio. Anche in questo caso viene verificato che le temperature di trasformazione di fase diminuiscono all'aumentare della quantità di Zn.

Queste osservazioni dimostrano che le leghe a memoria di forma a base rame sono estremamente sensibili alle variazioni, anche molto ridotte, degli elementi di lega. Di conseguenza potrebbero essere ottenuti o meglio progettati diversi intervalli di temperature di trasformazione, alterando appunto la composizione del materiale.

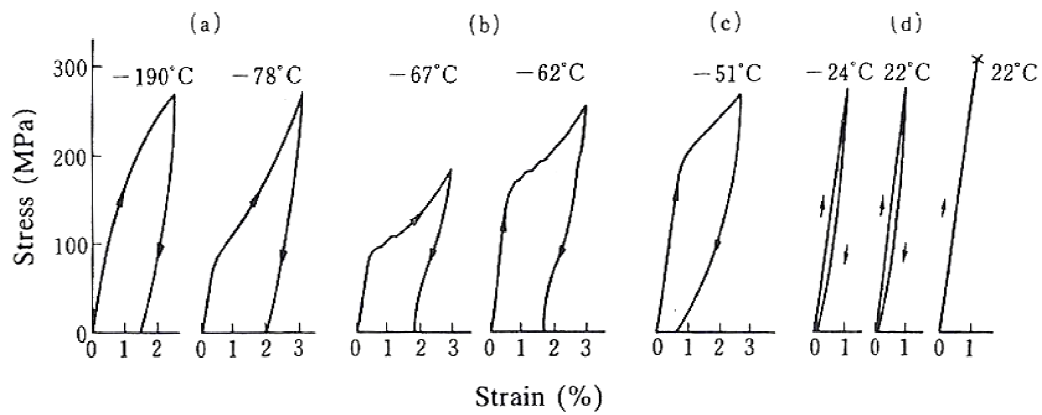
Bisogna tuttavia tener presente che nelle applicazioni concrete esiste un limite superiore per le temperature di trasformazione. Questo perchè come la temperatura di esercizio aumenta, le temperature di trasformazione variano per effetto dell'invecchiamento oppure la capacità di memoria di forma degrada. Generalmente questo limite superiore per la temperatura di trasformazione è di circa 100°C; per questo motivo le applicazioni alle alte temperature (intorno ai 200°C) restringono il campo alle leghe NiTi.

Per quanto riguarda il *comportamento a deformazione* invece le leghe ternarie a base di CuZn mostrano un comportamento simile a quello delle leghe CuAlNi. La differenza più grande riguarda lo sforzo critico che genera il meccanismo di scorrimento (slip) il quale risulta essere molto elevato nelle leghe CuAlNi, che mostrano un completo effetto a memoria di forma, oppure pseudoelasticità per sforzi superiori a 600 MPa. Dall'altro lato nei sistemi ternari a base CuZn lo sforzo critico per lo scorrimento (slip) risulta essere ad un livello estremamente più basso, cioè al di sotto di 200 MPa.

La figura 19 mostra il comportamento a deformazione di una lega policristallina di CuAlNi. Nel punto (a), nel caso di campioni policristallini, lo stato martensitico risulta essere elastico in quelle regioni in cui la temperatura si trova al di sotto di M_s , e questo indica che i movimenti delle interfacce tra le "laminette" di martensite oppure dei confini gemelli (twin boundaries) all'interno della martensite sono molto più difficili rispetto ai movimenti dei singoli campioni cristallini. Si è pensato che questo potesse essere il risultato di forze vincolari tra i grani.

Al di sopra della temperatura M_s , come si vede in (b) ed in (c), la sollecitazione necessaria per indurre la trasformazione in martensite aumenta con l'aumentare della temperatura, esclusivamente per un singolo cristallo. Ad una temperatura superiore di A_f i singoli cristalli mostrano un completo comportamento pseudoelastico, mentre la rottura della struttura policristallina avviene prima di raggiungere la sollecitazione necessaria per indurre martensite come si vede nel punto (d).

Ovviamente solo la deformazione elastica prima della rottura può essere recuperata; inoltre non si manifesta pseudoelasticità.



(Fig. 19): Deformation Behavior in Polycrystalline CuAlNi Alloy
 $M_s = -82^\circ\text{C}$, $M_f = -70^\circ\text{C}$, $A_s = -60^\circ\text{C}$, $A_f = -48^\circ\text{C}$.

In questo esempio in figura il carico di rottura è di circa 280 MPa ben al di sotto dei 600 MPa dei singoli cristalli. Questo perchè in queste leghe le cricche si propagano in corrispondenza dei bordi di grano. Proprio queste cricche sono uno dei fattori importanti che impediscono l'impiego di queste leghe nelle applicazioni pratiche⁵.

⁵ Ivi, pp. 125-128.

2 *Processo produttivo delle leghe a memoria di forma*

Il processo di *fusione a induzione sottovuoto* (VIM: Vacuum Induction Melting) è la tecnica tipica per la produzione delle SMA, specie delle leghe a base NiTi.

Lo scopo produttivo è quello di fondere insieme metalli differenti per realizzare delle leghe.

Inizialmente adottato per soddisfare le esigenze metallurgiche di industrie specializzate, questo metodo si sta rivelando sempre più determinante nella produzione di materiali ad alte prestazioni in numerose applicazioni industriali. Le leghe ottenute attraverso il processo VIM sono utilizzate per supplire a necessità metallurgiche particolarmente severe, come nel caso di superleghe a base nichel per applicazioni in alta temperatura, acciai inossidabili per applicazioni nucleari, leghe a base di cobalto per applicazioni in campo medico, leghe a base di rame di elevata purezza e leghe magnetiche purissime ad alta permeabilità.

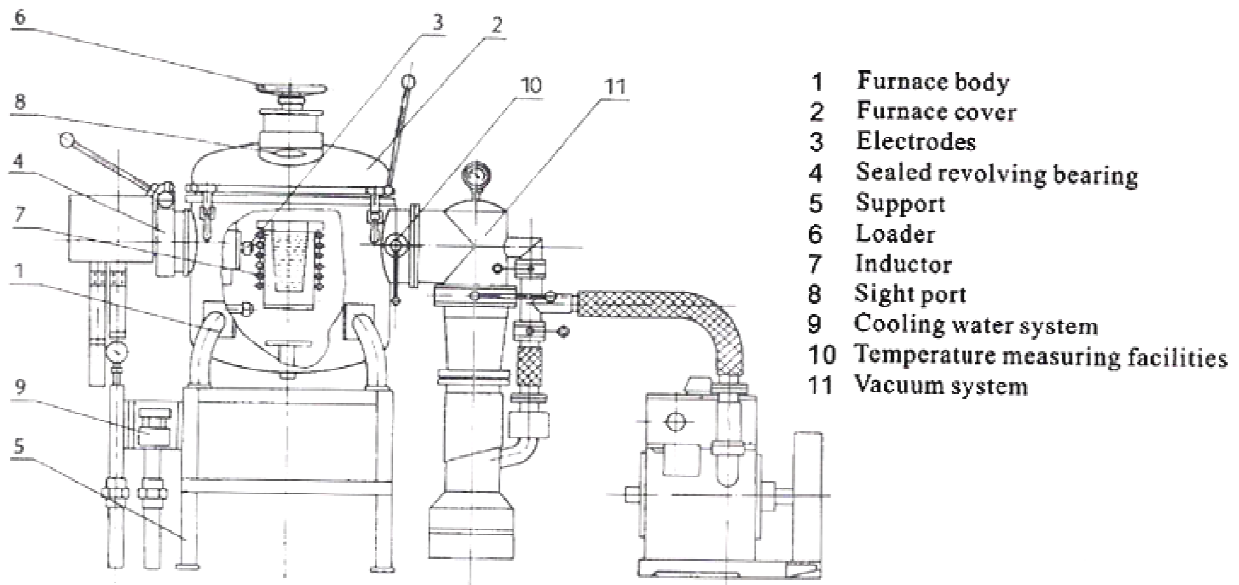
2.1 *Fusione*

Il processo VIM comporta la fusione di metalli ottenuta per mezzo di un campo elettromagnetico a induzione applicato in condizioni di vuoto. La fusione ha luogo in un forno costituito da un rivestimento refrattario o un crogiolo, solitamente realizzato in grafite, collocato all'interno di una bobina di rame a induzione, percorsa da corrente alternata a media frequenza e raffreddata ad acqua. Il gruppo forno è integralmente racchiuso in un'apposita camera in acciaio, raffreddata ad acqua, dove una serie di pompe provvedono a creare le opportune condizioni di vuoto affinché il materiale in carica possa essere fuso, ripulito da impurezze e colato sottovuoto o in atmosfera di gas inerte. (fig. 20)

Questo processo permette la purificazione di metalli e di leghe che contengono elementi con notevole affinità a certi gas, come l'ossigeno. L'effetto di agitazione magnetica del bagno di fusione innesca delle reazioni chimiche, di dissociazione e di flottazione degli elementi che agiscono rimuovendo le impurità dissolte. Ciò garantisce un eccellente grado di omogeneità della lega metallica che risulta particolarmente apprezzato a causa dell'alta influenza della composizione chimica del materiale sulle temperature di trasformazione di fase della lega stessa. Inoltre si evince

l'importanza di un'accurata fase di dosaggio degli elementi di lega, per ottenere così un prodotto finale pulito ed estremamente puro⁶.

Le condizioni di fusione e di colata vengono ottimizzate per prevenire la propagazione di crepe da solidificazione e dell'eccessivo restringimento del pezzo colato in fase di raffreddamento.



(Fig. 20)
 Raffigurazione schematica e realistica di un forno per fusione a induzione sottovuoto.

Il risultato ottenuto dalla prima colata dei metalli fusi è un lingotto il cui peso può variare tra i 4 ed i 20 Kg.

⁶ Cfr., Inductotherm Group, *Il processo di induzione per fusione sottovuoto (Vim)*, 2012, URL(<<http://www.consarceng.com/italian/pages/products.html>>), 05/07/2012.

2.2 Estrusione

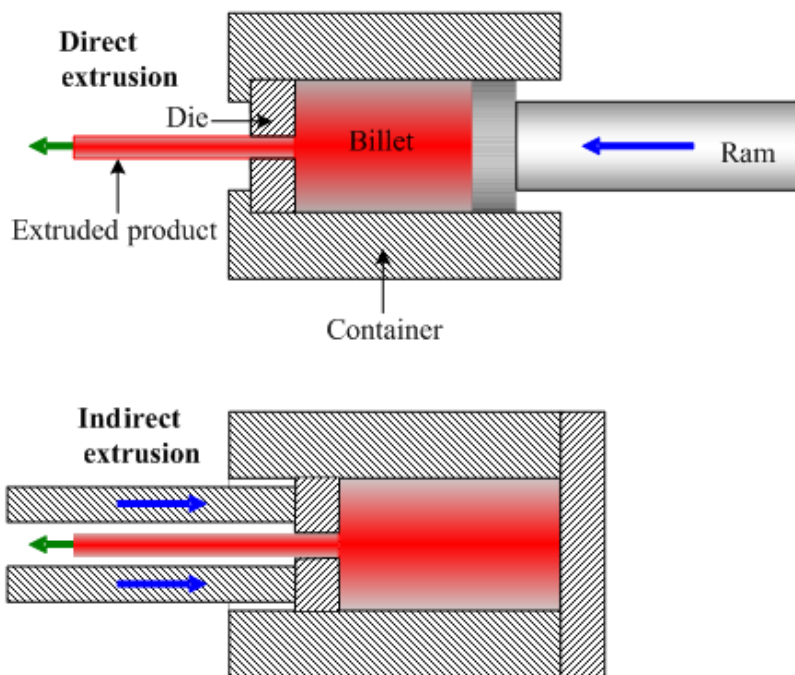
Nel caso in cui si verifichi attraverso dei test la presenza di una percentuale inaccettabile di impurezze nel lingotto, questo può essere nuovamente fuso e colato.

Invece se la qualità della lega viene giudicata buona il lingotto viene sottoposto al processo di *estrazione*, per ottenere delle barre di dimensioni più contenute rispetto al lingotto iniziale. L'estrazione avviene tramite presse sia dirette che indirette. Quella diretta avviene a temperature che oscillano tra i 950°C ed i 1050°C, inoltre i rapporti di estrusione vengono opportunamente calibrati per ottimizzare la procedura.

In questo caso il lingotto preriscaldato viene costretto da un pistone ad avanzare all'interno della pressa, successivamente viene forzato a passare all'interno di una matrice ad estrusione. Questa presenta un foro sagomato con la forma che si desidera imprimere al materiale. Si ottiene così un semilavorato di diversi metri di lunghezza sottoforma di barra.

Per l'estrazione indiretta le billette di NiTi vengono rivestite da una guaina di protezione in lega di rame e trattati a temperatura di circa 900°C.

In questo secondo caso il lingotto rimane fermo all'interno della pressa e la matrice di estrusione gli viene premuta contro, con una pressione tale da consentire la fuoriuscita di materiale sottoforma di una barra, di lunghezza maggiore e sezione ridotta rispetto a quelle di partenza.(fig. 21)



(Fig. 21): Schematizzazione delle tecnologie di estrusione diretta e indiretta.

2.3 Laminazione e trafilatura

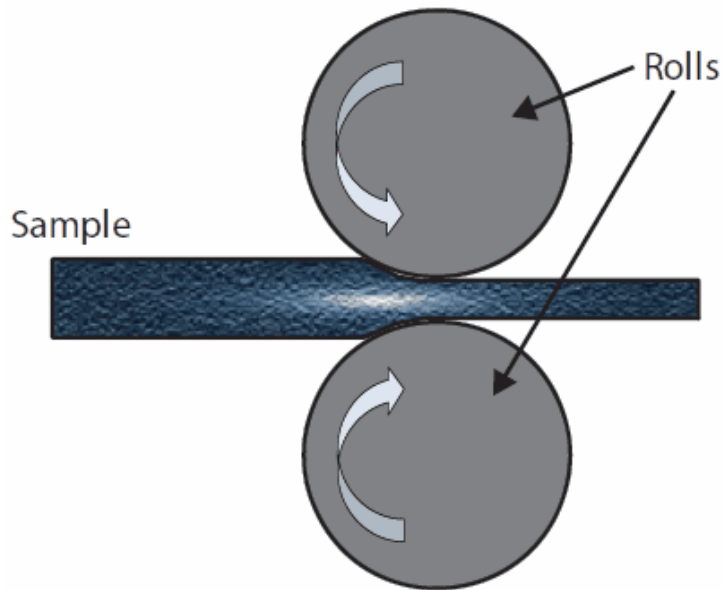
Subito dopo l'estrusione le barre ottenute vengono tagliate in misure standard e trattate in un processo di decapaggio con dei macchinari che rimuovono gli ossidi ed i residui di rame. In questa fase il materiale viene lasciato raffreddare in aria con tempi perciò abbastanza lunghi, i quali determinano la formazione di porosità, segregazioni, inclusioni e grani grossolani, che pregiudicano le caratteristiche meccaniche del materiale.

Da questo momento in poi la barra subisce una serie di trattamenti progressivi volti ad assottigiarla e a conferirle le giuste proprietà meccaniche di cui un attuatore necessita.

Si procede quindi con un primo processo di *laminazione a caldo* a circa 900°C, fino a quando non si raggiunge una sezione di 50 mm. Grazie a due o più rulli controrotanti si costringe il materiale ad attraversare uno spazio più piccolo del suo spessore con l'obiettivo perciò di assottigiarlo. Inoltre così facendo il materiale non possiede ancora le giuste proprietà, tuttavia le difettosità iniziali vengono eliminate, perchè lo sforzo di compressione esercitato dai rulli schiaccia e fonde tra di loro ogni porosità.

A questo punto l'asta di dimensioni un pò ridotte viene sottoposta alla *laminazione a freddo*, ovvero subisce un ulteriore processo di assottigliamento causato dalla rotazione di rulli, questa volta però a temperatura ambiente. Ciò determina l'eliminazione di ossidi che si formano nelle diverse fasi di lavorazione, ottenendo un materiale con grani orientati e allungati nella direzione di laminazione. Si conferiscono così le caratteristiche meccaniche desiderate poichè con il processo a freddo la struttura cristallina mantiene l'affinamento e l'orientamento dei grani. Deformando plasticamente a freddo si compie un incrudimento del materiale che acquisisce una resistenza migliore ma una duttilità minore. Questa lavorazione a freddo risulta necessaria perchè quella a caldo determina la formazione di grani grossolani di grandi dimensioni.(fig. 22)

Infine per un attuatore, il classico semilavorato ottenuto grazie ad un'ultima operazione di assottigliamento, la *trafilatura* è un filo metallico dal diametro variabile da 0,4 a 3-4 mm. Nella lavorazione di trafilatura il filo subisce dei passaggi forzati attraverso delle matrici (filiere) con dei fori di diametro progressivamente decrescente che ne riducono la sezione. Come per la laminazione il volume del filo rimane costante, dal momento che questi sono processi senza asportazione di truciolo; perciò riducendo il diametro ottengo un aumento della lunghezza del semilavorato.



(Fig. 22): Schema di funzionamento della laminazione.

2.4 Ricottura

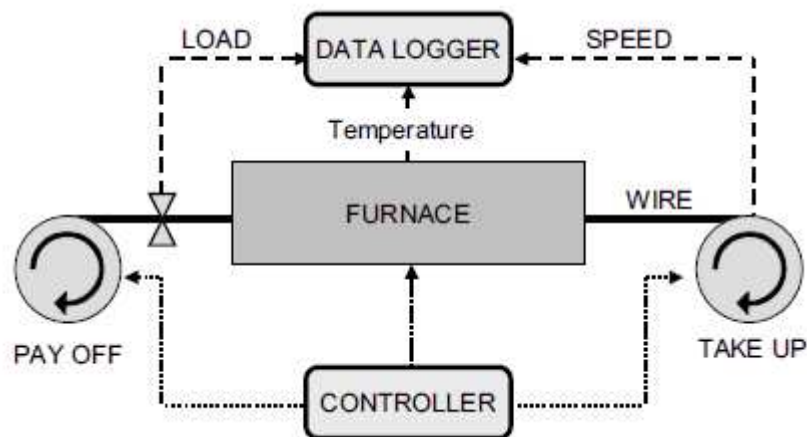
Queste aste vengono sottoposte a laminazioni successive a caldo e a freddo, con trattamenti termici intermedi di *ricottura*. Quest'ultima consente al materiale di avanzare in un forno grazie a dei nastri trasportatori, per essere scaldato ed eliminare così i difetti dell'incrudimento, lasciando poi che si raffreddi. Nello specifico questa lavorazione è composta da tre fasi:

Un preriscaldamento iniziale in cui il semilavorato passa all'interno del forno che si trova ad una temperatura compresa tra i 160°C ed i 280°C. Nel secondo step il filo viene scaldato per effetto Joule fino a 700-800 °C. Infine il filo viene bagnato nell'emulsione di ricottura per essere raffreddato e pulito; inoltre si può terminare il processo lasciando che il materiale si raffreddi completamente a temperatura ambiente oppure grazie ad un getto di aria compressa.

Questo filo non è tuttavia ancora capace di manifestare le proprietà tipiche delle leghe Nichel-Titanio e dovrà essere sottoposto ad ulteriori processi prima di essere effettivamente pronto.

2.5 Trattamenti termomeccanici

Il filo di NiTi non presenta ancora le desiderate proprietà di memoria di forma, le quali possono essere ottenute attraverso una serie di trattamenti a caldo e deformazioni a freddo. L'obiettivo è quello di ottenere un filo metallico che mostri un completo effetto a memoria di forma con una percentuale di deformazione minima recuperata del 4% con un carico costante applicato di 200 MPa per almeno 50.000 cicli di lavoro. I trattamenti termici vengono eseguiti in un range di temperature tra i 350°C ed i 600°C sotto un carico applicato tra i 50 ed i 300 MPa. Il controllo del carico di trazione, della temperatura e del tempo di ricottura sono aspetti cruciali per garantire le proprietà funzionali della SMA.(fig. 23)



(Fig. 23) Schema funzionale di un macchinario per la ricottura.

In letteratura si osserva che tra i vari training del materiale, sforzi applicati in modo costante e ciclaggi termici, sembrano essere molto efficaci al fine di realizzare leghe a memoria di forma a due vie. Inoltre insieme a questi trattamenti si è tentato di avere un controllo sulle possibili vie di deformazione della martensite⁷.

⁷ Cfr., Saes Getters S.p.A., Tuissi, A., Bassani, P., Mangioni, A., Toia, L., Butera, F., *Fabrication Process and Characterization of NiTi Wires for Actuators*, URL(<<http://www.saesgetters.com/default.aspxidPage=838>>), 19/07/2012.

2.6 *Post produzione*

Dopo il completo raffreddamento i diversi metri di filo possono essere puliti ulteriormente e avvolti in bobine o rocchetti dalle dimensioni più contenute. Successivamente da questi grandi avvolgimenti vengono tranciate delle porzioni di filo da qualche centimetro di lunghezza.

Come ultima analisi si compiono dei test di verifica delle proprietà delle leghe a memoria di forma. Nei campioni di materiale vengono così misurate la composizione, le percentuali e l'omogeneità delle impurità e le temperature di trasformazione di fase.

Viene misurata anche l'ampiezza dell'isteresi e l'intensità con cui il campione di materiale manifesta l'effetto a memoria di forma attraverso ciclaggi termici di riscaldamento/raffreddamento di 1°C/min.

Inoltre vengono compiuti dei test di resistenza a fatica, nei quali un filo di 150 mm viene fissato verticalmente ai braccetti di un macchinario che lo sottopone a trazione. Il filo viene quindi riscaldato per effetto Joule, in modo tale da poterne misurare la variazione di lunghezza durante un ciclo di riscaldamento (a circa 150°C)/raffreddamento (temp. ambiente), con un carico costante applicato di 200 MPa.

Oltre a fili e cavi i semilavorati a memoria di forma che possono essere prodotti sono:

- fogli
- dischi
- nastri
- molle

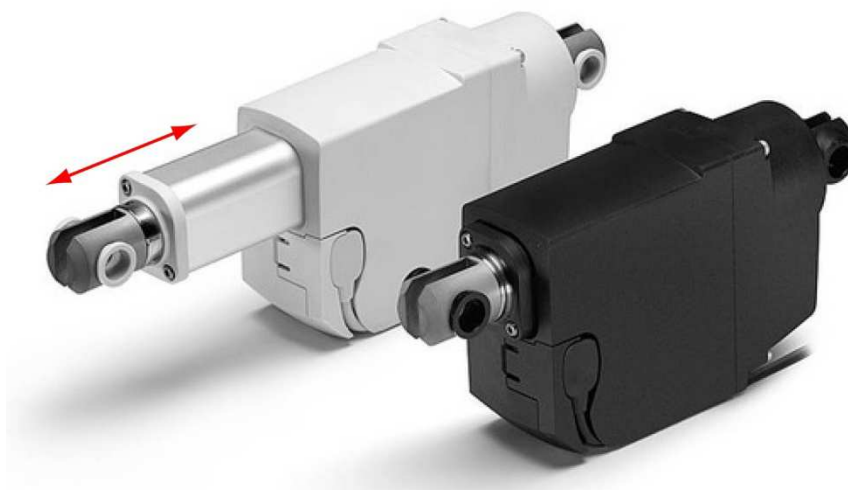
È importante ricordare che il mondo delle leghe a memoria di forma è ancora tutto da scoprire, dunque le applicazioni possibili potrebbero essere numerose ed appartenenti ai settori più disparati.

3 *Gli attuatori*

"Un **attuatore** è un meccanismo attraverso cui un agente agisce su un ambiente, dove l'agente può essere 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.

Anche un meccanismo che mette qualcosa in azione automaticamente è detto *attuatore*"⁸.

Ad oggi esistono diversi tipi di questi attuatori (Fig. 24): elettrici, elettrostatici, elettromagnetici, idraulici, oleodinamici ecc...fino a quelli che impiegano le proprietà specifiche degli "smart materials".



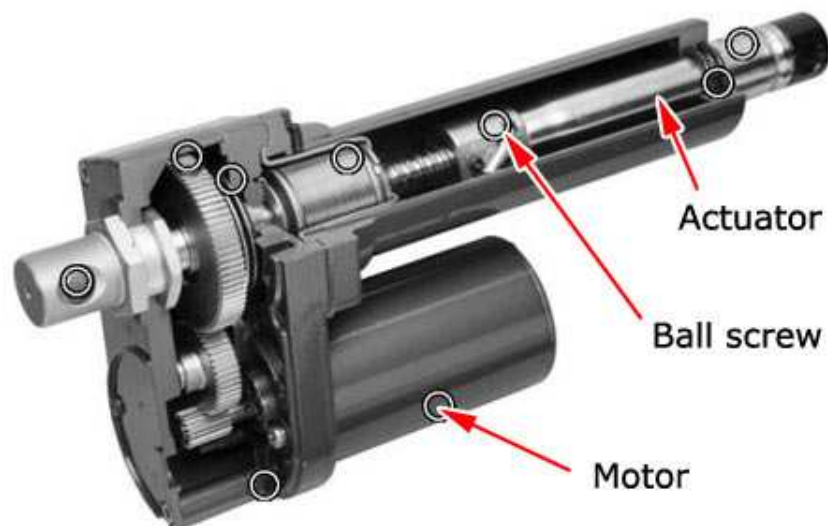
(Fig. 24): Esempio di attuatore lineare elettrico con movimentazione braccio. Produzione LINAK, modello LA23.

Relativamente alle applicazioni esistenti nelle automobili, gli attuatori in figura sopra possono essere impiegati per la movimentazione elettrica dei sedili. Infatti il tradizionale sistema manuale può essere sostituito da uno o più attuatori che regolano la distanza in orizzontale dei sedili dai comandi sulla pancia, ed in verticale dal pianale auto.

⁸ *Attuatore*, URL(<<http://it.wikipedia.org/wiki/Attuatore>>), 26/08/2012.

Funzionamento:

Il motore elettrico genera la rotazione del suo albero centrale che termina con un ingranaggio dentato; grazie ad esso vengono movimentati gli organi di trasmissione e riduzione costituiti in questo caso da altre due ruote dentate. L'ultimo ingranaggio viene accoppiato con una vite senza fine, posta internamente, la quale aziona il movimento di un pistone che perciò si estende e si contrae. Il verso di movimentazione del pistone viene determinato dal senso di rotazione del motore elettrico; infatti invertendone la polarità lo stantuffo passa da fine corsa a inizio corsa e viceversa. (Fig. 25)



(Fig. 25): Spaccato di un attuatore elettrico; si distinguono il motore in basso, gli ingranaggi di trasmissione e riduzione e lo stantuffo scorrevole.

3.1 *Gli attuatori a memoria di forma*

Con lo studio delle SMA e dell'effetto "memoria di forma" si sono aperti nuovi scenari progettuali nello sviluppo di questi attuatori che funzionano grazie alle proprietà di queste leghe.

Ci sono al momento solo due tipi di leghe a memoria di forma disponibili per le applicazioni relative agli attuatori: le leghe Cu-Zn-Al e quelle Ni-Ti.

Riguardo alle automobili sono da preferire quelle Ni-Ti poichè presentano un maggior numero di vantaggi come, elevate forze (nella fase di recupero), buona conducibilità elettrica, ampie deformazioni recuperabili, lavorabilità e resistenza alla corrosione eccellente.

Sebbene siano già stati sviluppati dispositivi di memoria di forma a due vie vengono impiegati principalmente quelli ad una via, con una forza esterna da applicare per il ripristino della forma iniziale.

La progettazione degli attuatori a memoria di forma è basata generalmente sulle differenze tra le curve sforzo-deformazione delle leghe nelle fasi austenitica e martensitica. In particolare riguardo il modulo di Young, risulta fondamentale calibrare opportunamente le temperature di transizione di fase, attraverso un preciso dosaggio percentuale degli elementi di lega, in virtù delle temperature di esercizio del dispositivo⁹.

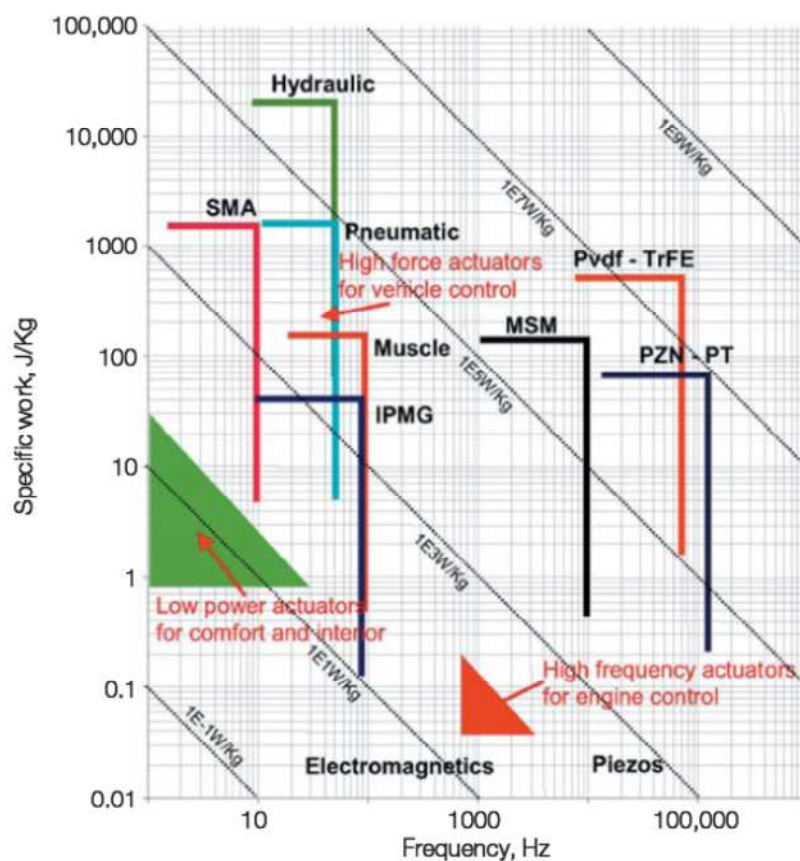
Principio base dell'attuazione a memoria di forma

Durante la trasformazione di fase martensite → austenite di recupero della forma ad alta temperatura, un elemento di materiale a memoria di forma è in grado di produrre lavoro meccanico. Infatti se ad esso viene applicata un' azione esterna che si oppone al recupero di forma, la forza di recupero e la variazione di forma hanno la stessa direzione e quindi danno luogo alla generazione di lavoro meccanico (positivo)¹⁰.

⁹ Cfr., Stoeckel, D., *Shape Memory Actuators for Automotive Applications*, in ["MATERIALS & DESIGN"], VOL. 11, 6 DECEMBER 1990, p. 302.

¹⁰ Cfr., PSTL, Ott. 2000, *Leghe a memoria di forma caratteristiche e applicazioni*, URL (<www.vincenzoarrichiello.com/pdfs/lmf-pstl.pdf>), 10/07/2012, p.15.

Attuatori a memoria di forma rappresentano un'alternativa agli attuatori elettromagnetici in una vasta gamma di applicazioni automotive. La figura 26 mostra le funzioni di diversi attuatori automotive, suddivisi per categoria d'uso, le cui caratteristiche sono all'interno dell'area coperta dalle leghe a memoria di forma¹¹.



(Fig. 26)

Le funzioni più interessanti di azionamento sono quelle relative ai componenti utilizzati meno frequentemente con movimenti non di rotazione, come specchietto retrovisore pieghevole, movimento delle "lamelle" per il controllo climatico attraverso il dispositivo di regolazione del flusso dell'aria.

¹¹ Cfr., Butera, F., *Shape Memory Actuators, for Automotive Applications*, in ["ADVANCED MATERIALS & PROCESSES"], MARCH 2008, p.37.

Questi attuatori possono essere utilizzati in due modi differenti: come dispositivi termici o elettrici.

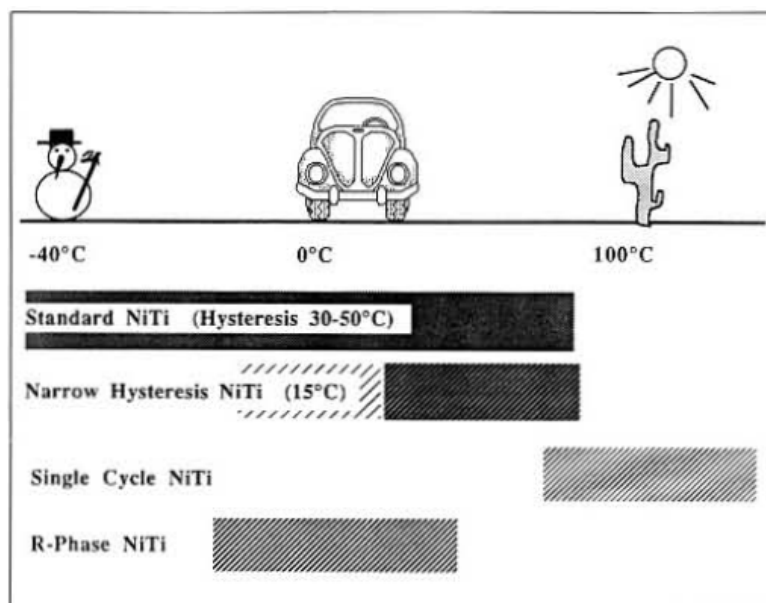
3.1.1 Attuatori termici

Gli attuatori termici combinano le funzioni di impulso e di "attuazione" rispondendo ad una variazione di temperatura modificando la loro forma e/o generando una forza.

Ci sono tre gamme di temperatura diverse, in cui gli attuatori termici sono già utilizzati o potrebbero fornire vantaggi significativi:

- $<0^{\circ}\text{C}$ prestazioni a bassa temperatura (motore, trasmissione, sospensioni, freni)
- $0-60^{\circ}\text{C}$ prestazioni di avviamento a freddo; climatizzazione
- $60-120^{\circ}\text{C}$ sistemi di raffreddamento (motore, freni); avviamento; climatizzazione
tintinnio/sferragliamento (motore, trasmissione).

La maggior parte di queste gamme di temperatura può essere coperta dalle leghe NiTi a memoria di forma oggi disponibili. Tuttavia alcune limitazioni, come intervalli di temperatura di trasformazione rispetto al numero di cicli richiesto, la larghezza di isteresi e stabilità, devono essere attentamente considerate. La figura 27 Mostra gli intervalli di temperatura di trasformazione delle più comuni leghe NiTi.



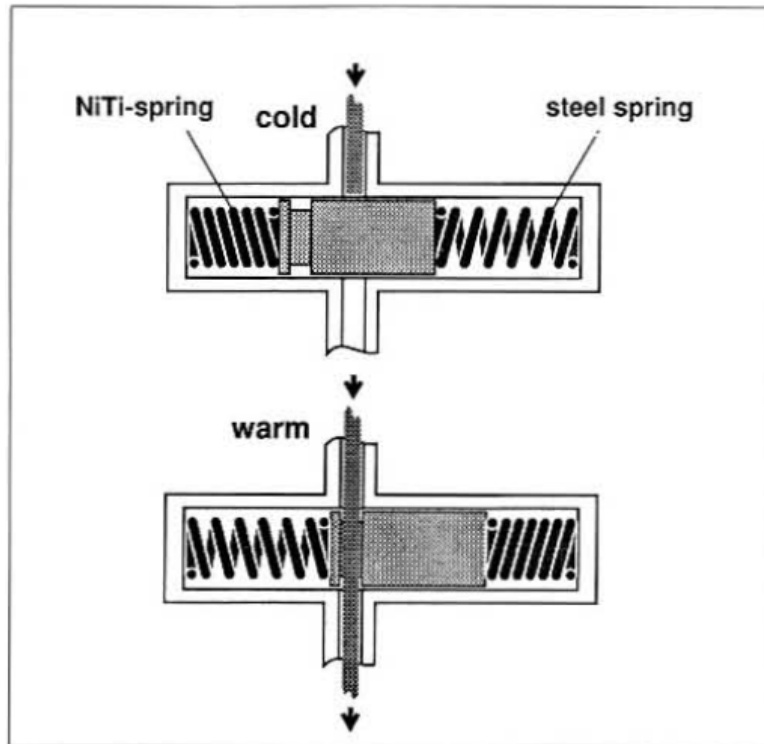
(Fig. 27)

Per applicazioni cicliche multiple, le leghe standard NiTi binarie con temperature di trasformazione da -50°C a circa $+70^{\circ}\text{C}$ possiedono buone performance. Queste leghe presentano un'ampiezza di isteresi di circa 30-50 gradi e sono ragionevolmente stabili durante il ciclaggio.

Leghe binarie con temperature più elevate di trasformazione (fino a $+120^{\circ}\text{C}$) tendono a "camminare" e, pertanto, possono essere utilizzate solo per cicli singoli o corti. Il camminare è di solito definito come amnesia accumulata; essa fa scivolare il punto zero durante l'azionamento ripetuto.

La maggior parte delle applicazioni di attuatore richiedono leghe Ni-Ti con isteresi stretta e alta stabilità dell'effetto memoria di forma. L'ampiezza dell'isteresi delle leghe Ni-Ti-Cu ternarie e quaternarie, con temperature di trasformazione da -30°C a $+70^{\circ}\text{C}$, è solo circa 15°C . Queste mostrano un'ottima stabilità anche dopo 100.000 cicli termici. Un altro importante vantaggio delle Leghe Ni-Ti-Cu è la bassa resistenza della base martensitica, che permette basse forze di ripristino e quindi un miglioramento dell'output di lavoro.

Purtroppo, attualmente leghe NiTi disponibili con temperature di trasformazione sopra 80°C non sono sufficientemente stabili per le applicazioni cicliche multiple. Tuttavia sono disponibili per applicazioni a singolo ciclo le leghe binarie e ternarie NiTi e con temperature di trasformazione fino a 150°C . Oltre ad avere le più alte temperature di trasformazione, le leghe ternarie possono fornire forze elevate in fase austenitica e martensitica. In letteratura sono presenti numerosi brevetti circa le applicazioni per attuatori termici a memoria di forma. Un esempio di successo è la valvola termica, che controlla la variazione di pressione del liquido nelle trasmissioni automatiche. Il funzionamento di questa valvola è illustrato schematicamente nella figura 28.



(Fig. 28)

Il dispositivo è costituito da un sistema molla contromolla in cui la molla è in SMA e la contromolla in acciaio. A basse temperature, in cui la molla si trova nello stato martensitico con un basso modulo di Young, la forza della contromolla in acciaio è superiore a quella della molla Ni-Ti a memoria di forma nello stato martensitico.

Di conseguenza, la molla in acciaio può comprimere quella Ni-Ti, spingendo il pistone mobile della valvola in posizione "chiusa" per questa particolare applicazione, quando la temperatura del fluido di trasmissione aumenta fino alla temperatura di esercizio, si innesca la trasformazione di fase austenitica della molla Ni-Ti a memoria di forma, che aumenta così il proprio modulo di Young.

Comincia perciò ad allungarsi (recuperando la forma impressa), superando la forza della molla in acciaio e alla fine, spinge il pistone in posizione "aperto". Questa valvola di regolazione della pressione migliora le prestazioni di avvio a freddo della trasmissione, consentendo un più agevole spostamento a basse temperature. Altre valvole a memoria di forma controllano la fase di riscaldamento delle trasmissioni automatiche, riducendo il consumo di carburante e le emissioni di smog. Altre applicazioni prevedono l'impiego di *rondelle* a memoria di forma per ridurre il rumore del cambio. Le rondelle termosensibili "Belleville", sono destinate a compensare il gioco in assemblaggio sul pignone causato da dilatazioni termiche diverse di materiali differenti, come

alluminio e acciaio, quando aumenta la temperatura. Le rondelle sono utili perché forniscono delle forze molto elevate per piccoli movimenti durante il recupero.

Poiché gli ammortizzatori convenzionali tendono ad essere troppo duri a temperature molto basse, non forniscono una guida confortevole. Questo è causato dall'elevata viscosità dell'olio nell'ammortizzatore, che di solito è bilanciato da 0 ° C a 100 ° C.

Una rondella di memoria di forma nella valvola dell'ammortizzatore, modifica la pressione a bassa temperatura compensando la viscosità dell'olio.

Ci sono molte altre aree in un'automobile, dove attuatori termici a memoria di forma possono fornire cambiamenti significativi rispetto alle tecnologie concorrenti. Alcuni dei benefici sono elencati:

- dimensioni
- forza elevata
- grande movimento
- grande lavoro in uscita
- poche parti meccaniche.

Dall'altro lato per altre applicazioni le seguenti limitazioni devono essere tenute in considerazione:

- Limiti nell'intervallo delle temperature di trasformazione
- Isteresi
- Caratteristiche non lineari.

3.1.2 Attuatori elettrici

Per applicazioni nelle automobili questi dispositivi possono essere attivati elettricamente, proprietà specifica delle leghe "Nitinol". Lo stimolo è costituito da qualsiasi tensione applicata al dispositivo, che di solito è un motore elettrico o un solenoide. Infatti essendo tale lega un conduttore è possibile realizzare il riscaldamento, non già mediante una fonte esterna di calore, bensì utilizzando l'effetto Joule. Per fare in modo che si inneschi l'attuazione per memoria di forma, bisogna riscaldare l'elemento al di sopra di A_f ; al contrario diminuendo opportunamente il voltaggio all'interno dell'elemento SMA, fino a M_f , si determina un raffreddamento e quindi deattuazione, che può avvenire perchè si tratta di un componente SMA a "due vie" oppure per la presenza di un elemento di ripristino (più probabile, es. dispositivo molla-contro molla).

Essi possono fornire interessanti vantaggi rispetto ai motori e solenoidi come:

- Dimensioni e peso ridotti.
- Funzionamento silenzioso.
- Poche parti meccaniche.

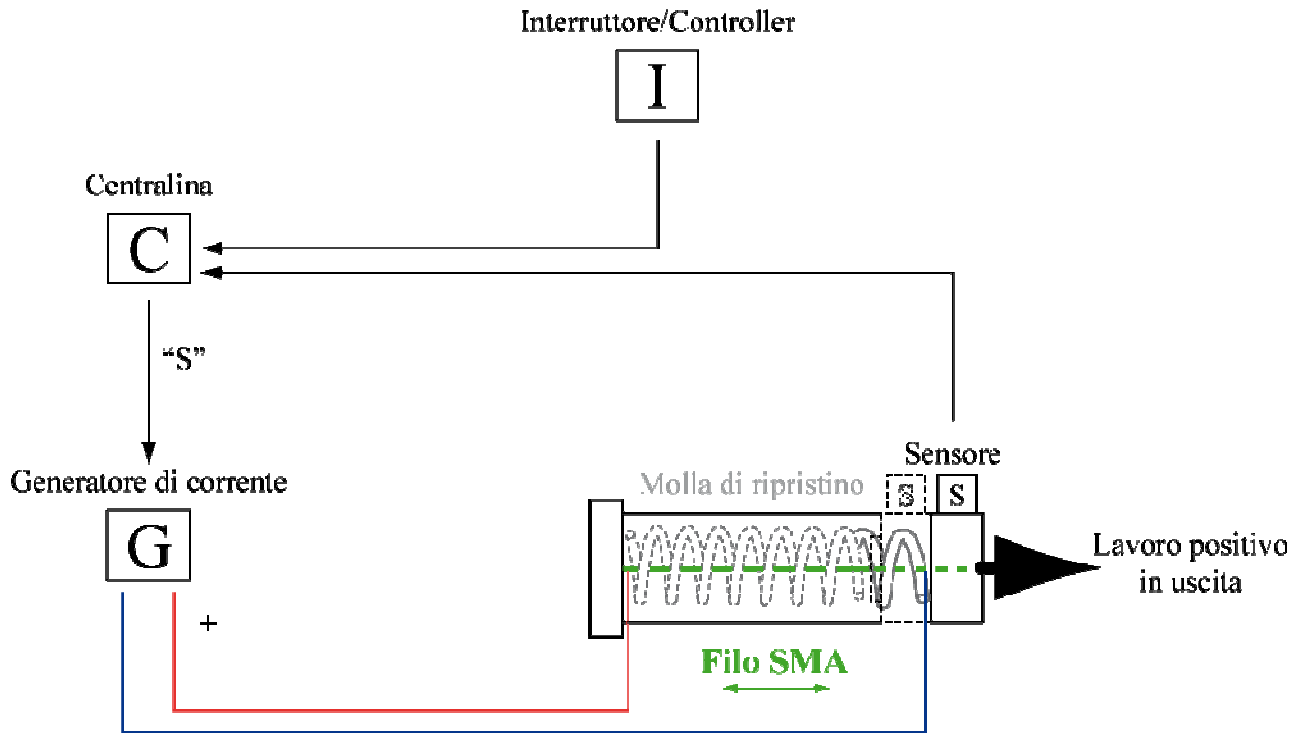
Nonostante le illimitate potenzialità sono ancora poche le applicazioni concretamente realizzate, sia per via di alcune difficoltà tecniche sia per il costo elevato delle leghe NiTiInol.

Come è stato rilevato, sia in virtù delle condizioni dell'ambiente circostante che proprie del veicolo, le temperature di funzionamento di un'automobile variano da -40°C a circa $+100^{\circ}\text{C}$, con temperature anche superiori se posizionate sotto il cofano. *Per poter funzionare correttamente a tutte le temperature, la lega a memoria di forma deve avere una temperatura M_f ben al di sopra della temperatura massima di esercizio.*

Ad oggi sono disponibili per applicazioni cicliche le leghe Ni-Ti con le temperature di trasformazione sopra circa 80°C . Leghe Cu-Al-Ni a memoria di forma hanno temperature di trasformazione alte, ma sono fragili e instabili. Leghe Ti-Pd-Ni rimangono troppo costose per le applicazioni di routine⁹.

⁹ Cfr., Stoeckel, D., *Shape... Applications*, Cit., pp. 302-306.

In figura 29 viene schematizzato il funzionamento di un classico attuttore a memoria di forma attivato elettricamente.



(Fig. 29): L'utente aziona l'interruttore I agendo sulla centralina C, la quale invia un segnale "S" al generatore di corrente; quest'ultimo alimenta l'attuttore SMA che recupera la sua forma genitrice a causa del riscaldamento da effetto Joule. In fase di de-attuazione si interrompe il passaggio di corrente, così al raffreddamento un elemento di ripristino riporta il sistema in condizione di riposo. Inoltre un sensore S solidale con la parte mobile del congegno, indica alla centralina in quale fase ci troviamo.

3.1.3 Attuatori magnetici

Esistono inoltre degli effetti di transizione di fase, su queste leghe, ottenuti grazie all'applicazione di un campo magnetico.

Infatti come afferma la Dott.ssa Rota,

<<In alcune SMA, l'applicazione di un campo magnetico genera una trasformazione martensitica, mentre la rimozione del campo stesso produce la trasformazione inversa. Tale comportamento è tipico, per esempio, delle leghe a base di ferro.

In generale, è stato osservato che un'ampia differenza di momento magnetico tra la fase martensitica e quella austenitica facilita la trasformazione indotta dal campo. In questo modo si spiega come le leghe Ni-Ti e Cu-Al-Ni, che hanno una piccola differenza di momento magnetico, non siano influenzate dal campo magnetico.

Questo tipo di trasformazioni può essere sfruttato per realizzare dispositivi magnetosensibili o termosensibili. Se la fase martensitica è ferromagnetica, c'è anche la possibilità di riorientare le varianti martensitiche, tramite l'applicazione di un campo magnetico.

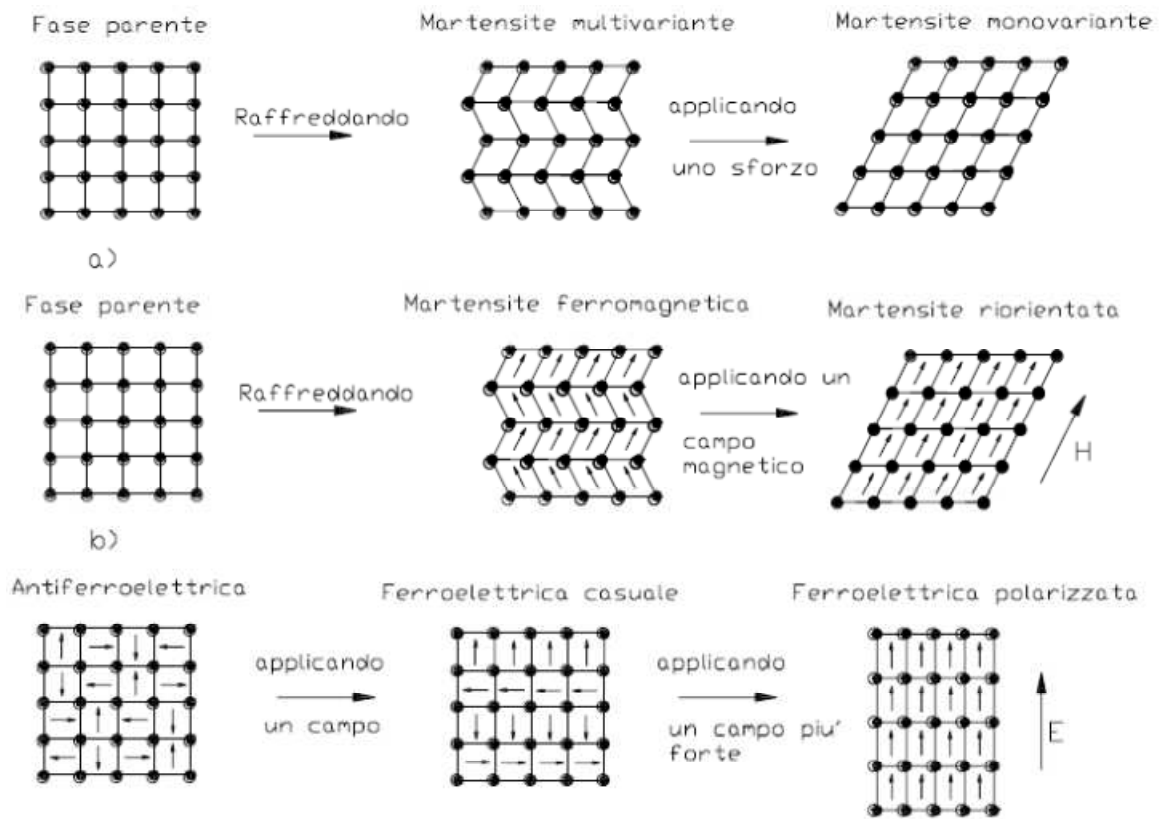
Le SMA antiferroelettriche sono caratterizzate da un'orientamento casuale del campo elettrico nelle singole celle del reticolo, a differenza delle SMA ferroelettriche, in cui tutte le celle si orientano spontaneamente in una direzione comune, coincidente con quella del campo elettrico applicato.

In entrambi questi tipi di SMA, l'applicazione di un campo elettrico genera deformazioni meccaniche. Tali deformazioni sono dipendenti dalla composizione e dall'intensità del campo elettrico, ma mostrano anche una forte dipendenza dalla temperatura.

Inoltre, altri fattori come pressione e sforzo esterni applicati e frequenza del campo elettrico influiscono sulla trasformazione e sulle deformazioni indotte.

Nella figura 30 è illustrato il procedimento di deformazione indotta da un campo magnetico ed è confrontato con quelli indotti dallo sforzo e da un campo elettrico>>¹².

¹² Rota, M., *Compositi attivi con materiali a memoria di forma*, Cit., Università degli Studi di Pavia, pp. 7-8, 2000/01.



(Fig. 30): Illustrazione schematica dei processi di deformazione nei materiali ferroelastici, ferromagnetici e ferroelettrici. (a) Trasformazione martensitica indotta dallo sforzo (geminazione e riorientamento per degeminazione). (b) Trasformazione indotta da un campo magnetico e riorientazione per degeminazione. (c) Trasformazione indotta da un campo elettrico e polarizzazione.

3.2 *Pro e contro degli attuatori SMA*

Il perchè realizzare nel settore automotive attuatori a memoria di forma che sostituiscano quelli già esistenti è da ricercarsi non tanto nel miglioramento prestazionale del congegno in sé, quanto piuttosto nell'elevato rapporto potenza/peso, nell'ingombro minimo di spazio e nella semplificazione e diminuzione degli elementi. Tutti questi fattori comportano complessivamente l'alleggerimento del veicolo che determina l'effetto finale della riduzione dei consumi, obiettivo attuale di tutte le case automobilistiche. Si deve tener presente che in un'automobile moderna ci sono più di cento attuatori impiegati per controllare le prestazioni del motore, trasmissione e le sospensioni, per migliorare la sicurezza, l'affidabilità e per aumentare il comfort di guida. Risulta difficile se non impossibile pensare di sostituire tutti gli attuatori tradizionali con quelli a memoria di forma; tuttavia per avere un'idea dei vantaggi che ne deriverebbero bisogna pensare che un attuatore tradizionale possiede un peso medio di qualche chilo e invece uno a memoria di forma può arrivare a pesare circa 100 g, dunque il risparmio in termini di massa risulterebbe notevole.

In generale i vantaggi dell'uso delle SMA come meccanismi di azionamento sono:

1. Elevato rapporto potenza/peso rispetto ai sistemi di attuatori tradizionali, il cui peso non è comparabile a quello di un attuatore a memoria di forma. Perciò questa caratteristica lo rende estremamente interessante per le applicazioni in miniatura.
2. Semplicità meccanica e compattezza; infatti un attuatore SMA utilizza solo il recupero della forma della lega e può essere azionato direttamente tramite effetto Joule. Inoltre non richiede alcun sistema di riduzione né altre parti in movimento.

Grazie a semplicità meccanica e dimensioni ridotte, subentrano altri vantaggi come impiego di materiale, costi di produzione e di manutenzione ridotti.

3. Facilità di miniaturizzazione. Un componente SMA può essere utilizzato come "attuatore lineare direct drive" i quali richiedono poca o nessuna ulteriore riduzione di movimento o amplificazione hardware.
4. Funzionamento pulito e silenzioso poichè essi non comportano attrito tra meccanismi in azione come ingranaggi di riduzione, inoltre si evita la produzione di particelle di polvere, scintille o rumore. Questi vantaggi rendono gli attuatori SMA estremamente adatti per settori quali la microelettronica, biotecnologia e biomedicale.

Oltre ai vantaggi descritti sopra, le NiTiNi possiedono altri aspetti che le distinguono dagli altri materiali SMA: grande duttilità, movimenti recuperabili più ampi, eccellente resistenza alla corrosione, temperature di trasformazione di fase stabili e alta biocompatibilità.

Nonostante i vantaggi di cui sopra, gli attuatori SMA non sono esenti da limitazioni e svantaggi:

1. Bassa efficienza energetica, dell'ordine di circa il 10%. In realtà l'efficienza è inferiore all'1% in quanto l'attuatore SMA può essere considerato un motore termico che funziona a basse temperature. Ciò significa che la conversione di calore in lavoro meccanico è molto inefficiente, poichè la maggior parte dell'energia termica viene dissipata nell'ambiente. Quindi le applicazioni SMA devono essere limitate in quelle aree dove l'efficienza energetica non è un problema.
2. Il degrado a fatica. Le prestazioni a lungo termine e l'affidabilità di questi dispositivi dipende da una serie di fattori, tra cui la massima temperatura, tensione, deformazione e numero di cicli di trasformazione raggiunto. Si deve prestare attenzione ai surriscaldamenti e alle eccessive sollecitazioni per lunghi periodi. Tuttavia i progressi fatti nello sviluppo del materiale hanno ridotto i livelli di degrado a fatica. Per esempio il "Flexinol" è stato appositamente studiato per mostrare l'effetto memoria di forma nel corso di milioni di cicli.
3. Bassa velocità e imprecisioni. Questi attuatori possiedono una risposta lenta a causa delle restrizioni di riscaldamento e raffreddamento e anche a causa dell'isteresi termica intrinseca. Il metodo comune di attuazione è il riscaldamento elettrico. Sebbene l'applicazione di voltaggi più grandi possa aumentare la velocità di azionamento, si potrebbe però danneggiare il congegno. L'ampio ciclo d'isteresi, così come la caratteristica non lineare delle trasformazioni di fase, possono rendere l'attuatore difficile da controllare con precisione¹.

¹ Cfr., Teh, Y., H., *Fast, Accurate... Alloy Actuators*, Cit., Australian National University, 2008, pp.2-4.

4 *Definizione di un metodo di progetto per gli attuatori a memoria di forma*

Le leghe a base Nichel-Titanio possiedono un sistema binario equiatomico.

Questo composto intermetallico che può essere leggermente modificato solo aumentando il tenore di Ni o di Ti (o degli altri elementi), mostra duttilità paragonabile a quella delle leghe più comuni.

Piccole modifiche di composizione consentono di modificare sia le proprietà meccaniche che le proprietà di trasformazione del sistema.

Un eccesso di Nichel, (fino a circa l'1%) abbassa fortemente la temperatura di trasformazione e aumenta la resistenza allo snervamento dell'austenite. Altri elementi frequentemente usati sono il ferro e cromo (per abbassare la temperatura di trasformazione) ed il rame (per diminuire l'isteresi e abbassare lo stress di deformazione della martensite).

Il sistema equiatomico NiTi è in ogni caso la lega standard che copre una vasta gamma di esigenze applicative; infatti, circa il 90% di tutte le applicazioni a memoria di forma coinvolgono il sistema della lega binaria pura NiTi.

Questa dimostra la migliore combinazione di proprietà, soprattutto in termini di quantità di lavoro in uscita per volume di materiale e la grande quantità di deformazione recuperabile.

L'evidente semplicità di progettazione meccanica e il numero minimo di parti in movimento è il principale beneficio come un attuttore.

In particolare, stabilizzando meccanicamente la lega binaria NiTi (filo attuttore), come realizzato da SAES Getters, si osserva un profilo molto sofisticato di proprietà. Questo articolo esamina queste proprietà in profondità per consentire agli ingegneri di progettare l'attuttore in modo che le proprietà funzionali del materiale possono essere ottimizzate e pienamente sfruttate.

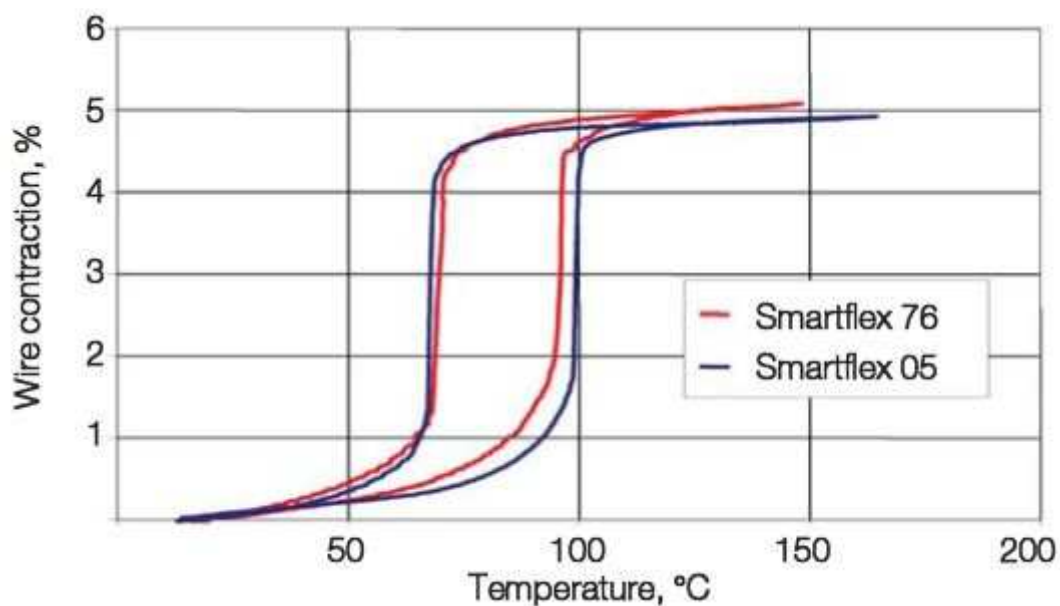
Le proprietà termo-meccaniche del filo NiTi possono essere studiate e misurate con metodi diversi. I test più comuni e utili sono quelli descritti per un filo disponibile commercialmente chiamato Smartflex 76, un filo di memoria forma di NiTi di 76 µm di spessore, con transizione ad alta temperatura.

4.1 Valutazione dell'isteresi

In questo test, il filo viene sottoposto a un carico costante e la deformazione è misurata durante un profilo di temperatura controllato.

La figura 31 Mostra l'output test per lo Smartflex 76 sotto lo sforzo costante di 300 MPa. Come illustrato nel grafico, possono essere raccolte alcune informazioni importanti, come ad esempio la massima corsa e le temperature di transizione di fase.

La corsa massima del filo è intorno al 5%; M_f a 65 ° C e A_s a 96 ° C.



(Fig. 31): Test con carico costante su filo *SmartFlex 76* a memoria di forma.

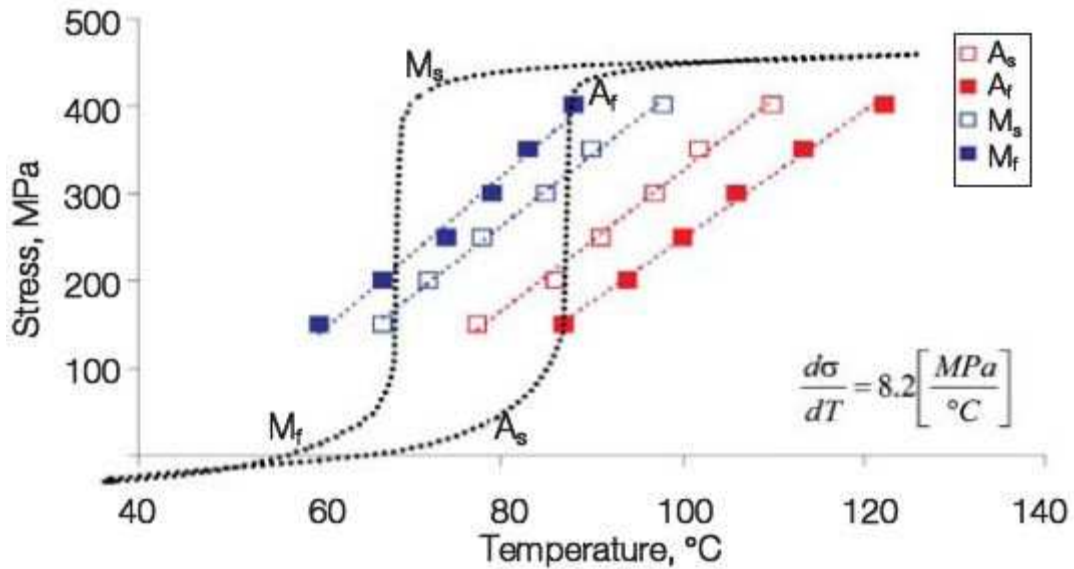
Il carico applicato è un importante fattore che influenza le prestazioni di filo, come mostrato in figura 32. La martensite (M) aumenta la temperatura di trasformazione austenite (A) con il carico.

Le temperature di trasformazione di fase del filo sono ovviamente i parametri fondamentali.

Il principale problema relativo alla prova di isteresi è la durata, perché un singolo ciclo tra 15 e 150 ° C con un tasso di 1 ° C/min dura più di quattro ore.

Un altro problema è la lunghezza massima utilizzabile: In un sistema di isteresi tipico, possono essere analizzati solo campioni di circa 100-150 mm. Per questo motivo, SAES Getters ha sviluppato e brevettato un nuovo metodo di caratterizzazione in cui viene eseguito il controllo di

qualità sulla lunghezza totale del filo prodotto, per garantire le prestazioni termo-meccaniche del componente NiTi.



(Fig. 32): Variazioni delle temperature di transizione di fase sotto differenti carichi applicati.

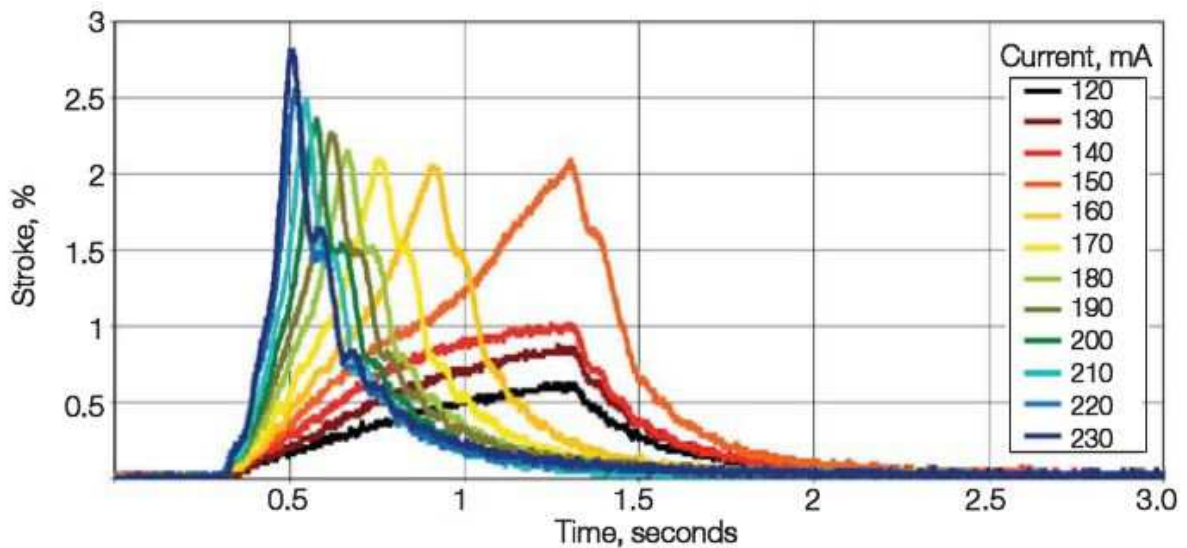
4.2 Durata a fatica

Un'altra caratteristica molto importante che definisce l'idoneità del filo per una specifica applicazione è la stabilità dell'effetto memoria di forma sottoposto a cicli di fatica. Durante questi test il filo è sottoposto a cicli di azionamento elettrico sotto un carico applicato costante. Questo consente di capire il comportamento a fatica del filo all'interno di un intervallo di condizioni di funzionamento estremamente ampio, poichè la durata del filo è fortemente condizionato da:

- riscaldamento dovuto al passaggio di corrente
- tempo di azionamento
- carico applicato
- corsa (allungamento) richiesta.

I fili a memoria di forma "Smartflex 76" sono stati testati con una corrente di circa 170 mA sotto un carico costante di 325 MPa ed un controllo della corsa dell' 1%. Sotto tali condizioni i campioni sottoposti a verifica sono sopravvissuti più a lungo di 1 milione di cicli.

E' stato anche possibile effettuare cicli "one-shot" al fine di valutare le correnti, i carichi applicati e gli effetti di una corsa prefissata sui tempi di attivazione.(fig 33)



(Fig. 33): Tempi di attuazione e allungamenti sotto diverse intensità di corrente applicate.

Dal grafico sopra si osserva che i tempi di attivazione elettrica sono inversamente proporzionali all'intensità di corrente applicata. In ogni caso si identifica il picco massimo di ogni curva come momento in cui l'attivazione è completata; perciò risulta chiaro che nonostante la bassa tensione applicata, i tempi di attivazione superano di poco il secondo.

4.3 *Processo di progettazione*

Il primo step per sviluppare un componente attivato da un attuatore a memoria di forma ottimizzato in termini di performance, dimensioni, costo, affidabilità consiste in un'analisi di funzionamento e nella definizione delle caratteristiche necessarie. Successivamente viene selezionata la lega e progettato l'elemento attivo.

In virtù di:

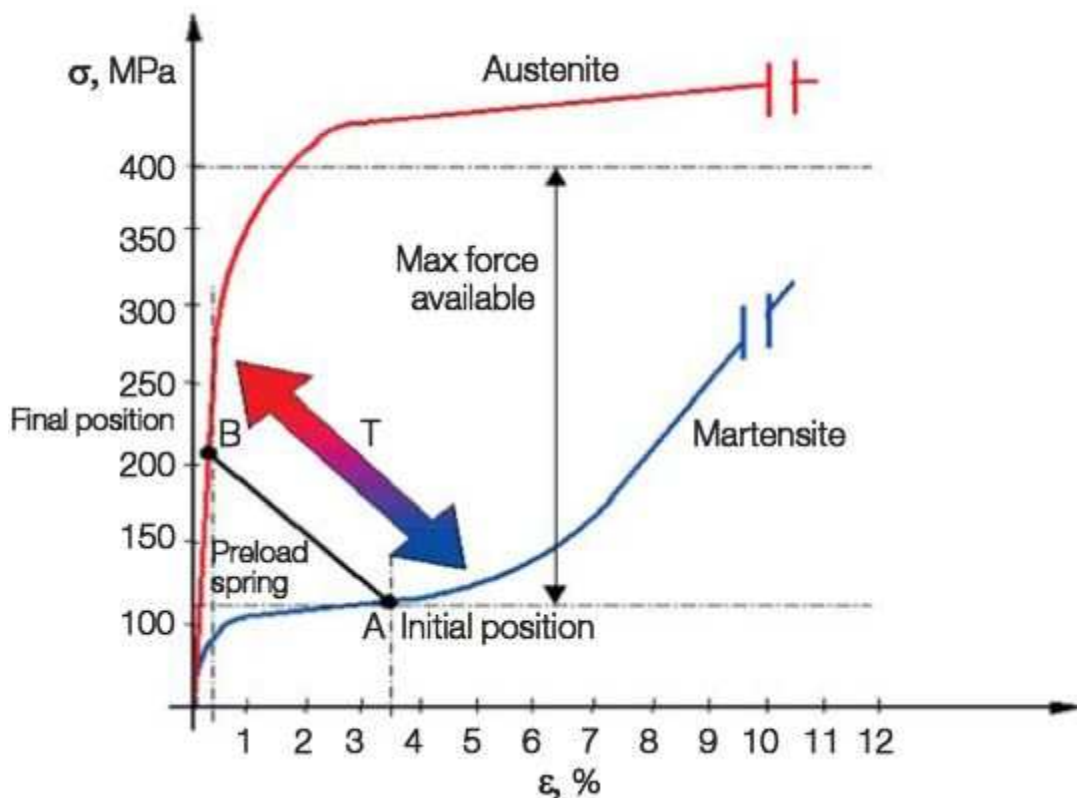
- forza
- movimento (allungamento recuperabile)
- numero di cicli richiesti.

Vengono stabiliti i valori di voltaggio e deformazione del materiale sia nella fase martensitica che in quella austenitica.

Sulla base del digramma sforzo-deformazione specifico della lega in questione, viene ricostruita la "storia di carico" dell'attuatore riuscendo a ridimensionare ogni fase di pre-carico.

ESEMPIO (fig. 34): Progettazione di un elemento SMA con una molla precaricata di "ripristino".

Si verifica una deformazione del componente a memoria di forma, provocata dalla molla, di oltre il 3,5% nella fase martensitica con uno sforzo iniziale di circa 110 MPa. Durante il riscaldamento l'elemento SMA passa nella fase austenitica seguendo le caratteristiche della molla. A questo punto il componente recupera la deformazione iniziale, meno una piccola frazione, a causa dell'elasticità dell'austenite. A trasformazione di fase conclusa lo sforzo finale si aggira intorno ai 210 MPa.



(Fig. 34): Esempio di progettazione di un componente a memoria di forma con molla di ripristino.

Durante il passaggio di fase da martensite ad austenite, l'elemento è capace di sviluppare la forza massima che corrisponde al massimo livello di sforzo raggiunto dalla zona elastica del materiale. Questa rappresenta la forza massima disponibile durante l'attivazione.

Nella fase di raffreddamento, l'elemento viene deformato nuovamente dall'azione della molla, che ritorna nella sua condizione iniziale pronta per altre successive attivazioni.

In questo modo, l'elemento è progettato per effettuare in sicurezza un elevato numero di cicli prima di raggiungere il limite di snervamento e rottura meccanica.

Dopo aver selezionato il materiale e progettato l'attuatore, il componente NiTi viene caratterizzato. La fase di solito successiva è la progettazione dei controlli elettronici.

Per il fissaggio meccanico, le condizioni termiche e meccaniche dell'elemento non devono essere alterate, al fine di prevenire situazioni critiche come concentrazione degli sforzi, scambio termico inefficiente tra l'elemento SMA e l'ambiente.

Attualmente il sistema più efficace di fissaggio è ancora "l'aggraffatura" meccanica.

4.4 Driver elettronico

Per aumentare il livello prestazionale richiesto e garantire una lunga durata del dispositivo è importante sviluppare driver elettronici in grado di fornire corretti livelli di potenza per l'elemento a memoria di forma, per il controllo del calore fornito e dell'attuazione.

A questo scopo, un sistema di controllo del feedback, che in base alla potenza meccanica gestisce la potenza elettrica fornita, è il modo migliore per controllare la trasformazione della lega a memoria di forma. Questo sistema di controllo è importante per evitare surriscaldamenti del materiale che potrebbero risultare fatali per l'attuatore.

4.5 Sviluppi futuri: compositi con le "SMA"

Le evoluzioni future possono essere descritte secondo fasi successive, coinvolgendo differenti livelli di integrazione e quindi di redesign dei componenti. Il primo step è quello di sostituire i motori elettrici tradizionali con singoli attuatori. Soluzioni successive si basano su componenti SMA integrati all'interno di dispositivi, parzialmente riprogettati, a scomparsa all'interno della matrice di un materiale composito; ciò presuppone che vengano eliminate le parti esterne dei meccanismi.

Quest'ultima soluzione rappresenta la maggiore innovazione per la progettazione di componenti automobilistici¹¹.

L'integrazione delle SMA con altri materiali funzionali o strutturali può portare a materiali compositi intelligenti, in grado di sfruttare le funzionalità delle singole materie prime, per ottenere risposte multiple, proprietà ottimali e per adattare le loro caratteristiche a cambiamenti ambientali.

Le leghe a memoria di forma disponibili in commercio possono essere facilmente fabbricate in varie forme, come fibre, fili, nastri, particelle e pellicole sottili, rendendo così possibile la realizzazione di una grande varietà di compositi ibridi, con procedimenti di fabbricazione tradizionali. Sono stati progettati e realizzati sia compositi rinforzati in modo continuo, con fibre o pellicole, sia compositi rinforzati in modo discontinuo, con particelle o scaglie, in cui le SMA possono costituire il rinforzo o la matrice a seconda dei casi.

Nella maggior parte delle soluzioni, si è prodotto un materiale composito con SMA che costituiscono il rinforzo all'interno di una matrice polimerica, questo grazie alla semplicità del processo produttivo rispetto ad altri materiali compositi. Si realizzano compositi sia con resine termoindurenti che con quelle termoplastiche.

Le **resine termoindurenti** sono caratterizzate da un processo di indurimento irreversibile, per effetto di reazioni chimiche di polimerizzazione, a volte accelerate da riscaldamento, che determinano la formazione di una struttura chimica reticolare tridimensionale.

le **resine termoplastiche**, invece, rammolliscono per effetto del riscaldamento e induriscono quando si raffreddano, seguendo processi reversibili, ripetibili più volte.

Più recentemente, l'interesse ingegneristico per la fabbricazione di compositi intelligenti si è indirizzato verso l'utilizzo di **matrici metalliche o di silicone**. Il progetto di questo tipo di compositi è basato sulla differenza di coefficiente di espansione termica tra la matrice e le fibre (il coefficiente è molto maggiore nelle fibre); questo comporta che, se il composito è fabbricato a temperature elevate e poi raffreddato alla temperatura ambiente, si generi uno sforzo residuo termico che può essere di compressione o di trazione; una compressione residua ha effetti benefici sulle proprietà meccaniche, come per esempio tensione di snervamento e resistenza alla frattura.

Nel caso di compositi rinforzati con fibre di SMA, le fibre si accorciano in seguito al cambiamento di temperatura, inducendo una precompressione nel composito e contribuendone quindi alla resistenza a trazione.

¹¹ Cfr., Butera, F., *Shape Memory... Applications*, Cit., pp.37-40.

Molto meno diffusi nelle applicazioni commerciali sono i compositi in cui le SMA costituiscono la matrice, rinforzata con particelle di altri materiali, generalmente ceramica o materiali magnetostrittivi.

La presenza di **particelle ceramiche in una matrice di SMA** può dar luogo a un composito che presenta densità minore e resistenza, rigidità, durezza e resistenza all'abrasione maggiori. Rispetto ai comuni compositi di ceramica e metallo, i compositi di cui si parla presentano una maggiore capacità plastica, a causa della trasformazione martensitica indotta dallo sforzo, che può ridurre la concentrazione di sforzi interni e quindi ostacolare la rottura del materiale.

Per quanto riguarda i compositi rinforzati con **particelle magnetostrittive**, si ottiene un materiale con effetto a memoria di forma ferromagnetico, che combina le caratteristiche delle SMA e dei materiali magnetostrittivi¹².

¹² Cfr., Rota, M., *Compositi ... memoria di forma*, Cit., Università degli Studi di Pavia, pp. 19-26, 2000/01.

Il settore automobilistico richiede i massimi livelli di qualità, produttività e competitività per i propri prodotti, oltre al loro continuo miglioramento. Per raggiungere questo obiettivo, molti produttori di veicoli richiedono ai propri fornitori che si attengano alle severe specifiche tecniche delineate in uno standard di gestione della qualità per il settore automobilistico, noto come *ISO/TS 16949:2009*.

Questa è quindi la normativa alla quale anche i componenti SMA per il settore automobilistico devono obbedire per essere conformi alle specifiche produttive internazionali.

5.1 La normativa

La specifica tecnica ISO/TS 16949:2009 (rientra nel più ampio campo della ISO 9001:2008 relativa ad i sistemi di gestione della qualità) è stata sviluppata dall'International Automotive Task Force (IATF), per incoraggiare il miglioramento sia della *catena di fornitura* che del processo di *certificazione*. Di fatto, per la maggior parte dei principali produttori di veicoli, la certificazione a fronte di questa specifica costituisce un requisito obbligatorio per rimanere sul mercato.

Questa specifica allinea e sostituisce gli standard esistenti di USA, Germania, Francia e Italia per i sistemi di qualità del settore automobilistico, definendo i requisiti del sistema qualità per le fasi di progettazione/sviluppo, produzione, installazione e assistenza di tutti i prodotti correlati al settore automobilistico. Dopo la prima pubblicazione nel marzo 1999 e la revisione del 2009, attualmente esistono oltre 25.000 certificati emessi in 80 Paesi e sistemi economici.

L'obiettivo di questa specifica tecnica è lo sviluppo di un sistema di gestione della qualità comune per tutti, che prevede un miglioramento continuo attraverso la prevenzione dei difetti e la riduzione degli scarti nella catena di fornitura. Inoltre, insieme ai vigenti requisiti specifici per il cliente, definisce le caratteristiche fondamentali per il sistema di gestione della qualità per tutti coloro che vogliono ottenere questa certificazione.

Si vuole infine evitare che vengano svolte verifiche multiple di certificazione e fornire un approccio comune ad un sistema di gestione della qualità per la produzione automobilistica e dei pezzi di ricambio.

Tale sistema di gestione della qualità è specifico per ogni azienda, poichè risulta influenzato da:

- Il suo ambiente organizzativo, i cambiamenti ed i rischi connessi a tale ambiente
- Le sue diverse esigenze
- I suoi obiettivi specifici
- I prodotti che fornisce
- I processi che impiega
- La sua dimensione e struttura organizzativa.

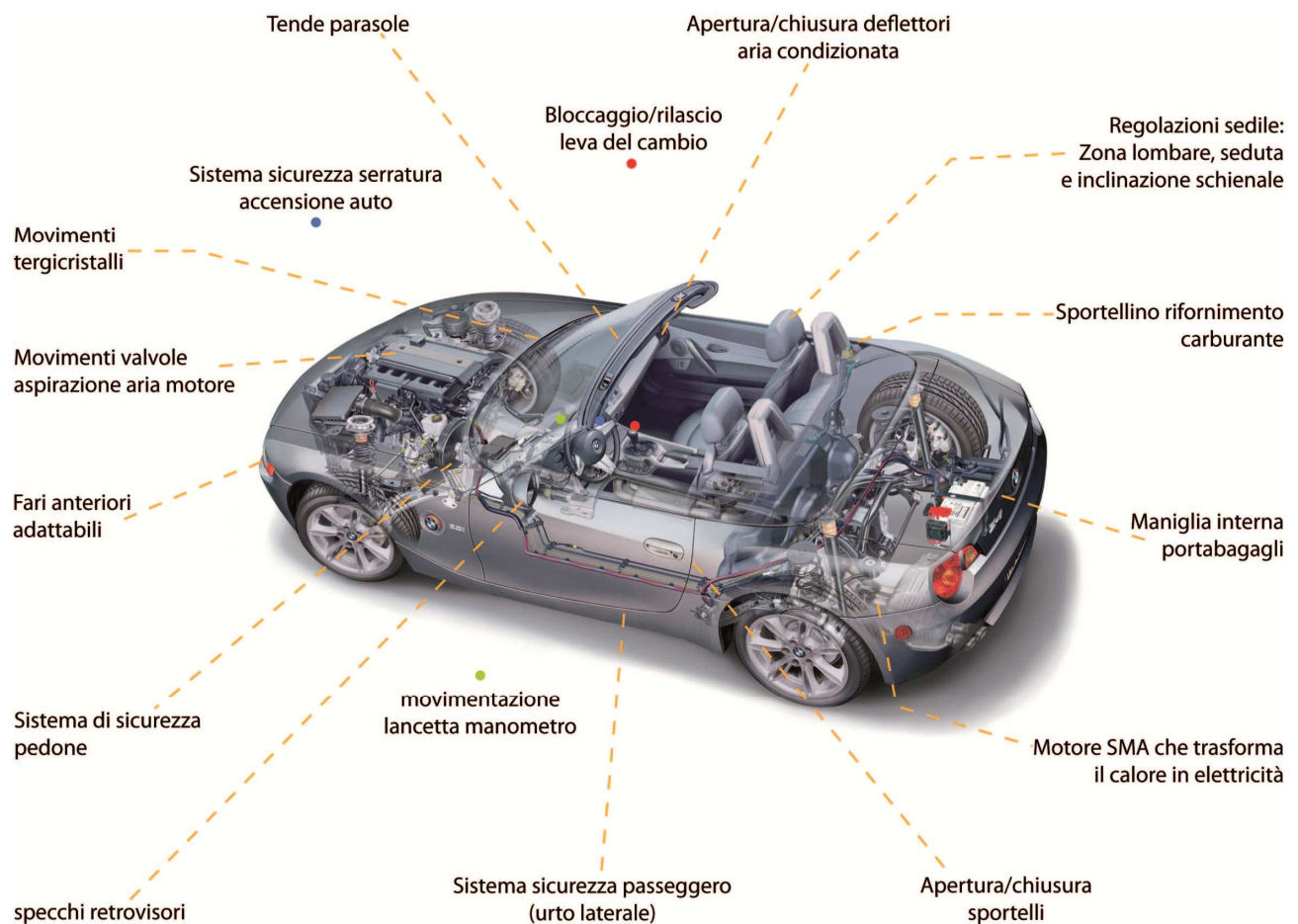
5.2 *Aree di interesse*

La ISO/TS16949:2009 è rivolta a tutti i tipi di aziende che si occupano di forniture automobilistiche, dai piccoli produttori alle grandi multinazionali con più sedi situate in tutto il mondo.

Le organizzazioni che intendono entrare nel mercato automobilistico devono attendere di essere annoverate tra i potenziali fornitori di un cliente del settore automobilistico per poter procedere con la certificazione per questa specifica¹³.

¹³ Cfr., BSI.Italia, URL(<<http://www.bsigroup.it/it/Servizi-di-valutazione-e-certificazione/Sistemi-di-gestione/Standard-e-schemi/ISOTS-16949/>>), *ISOTS-16949*, 03/10/2012.

In letteratura sono presenti numerosi congegni SMA integrati all'interno di sistemi già esistenti; di seguito si riportano un'illustrazione (figura 35) che indica le zone di potenziale applicazione di queste leghe in un veicolo, con alcuni esempi sia di concept sperimentali che di documenti brevettuali ufficiali.



(Fig. 35): Illustrazione che indica le aree di un'automobile interessanti per la sostituzione dei congegni tradizionali, ad oggi in uso, con dei dispositivi a memoria di forma che svolgono le stesse funzioni. I pallini di colore verde, blu e rosso indicano delle applicazioni molto particolari.

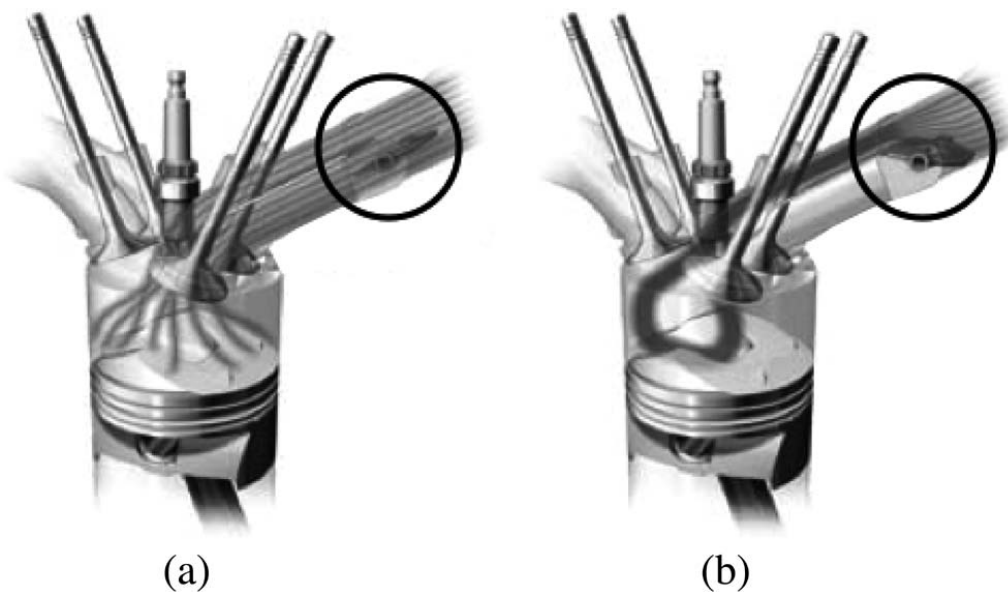
Progettazione di un attuatore in lega a memoria di forma per una valvola di un'automobile.

La presente invenzione riguarda un microattuatore realizzato in lega a memoria di forma, responsabile dell'azionamento di un flap (valvola a farfalla/deflettore) all'interno di un collettore di aspirazione dell'aria per i motori a combustione interna.

Più precisamente questa valvola a farfalla deve ruotare all'interno del collettore, per consentire o meno l'ingresso del flusso d'aria, orientandosi parallelamente ad esso oppure ortogonalmente chiudendone perciò il passaggio.(fig. 36)

L'apertura e la chiusura della valvola è gestita da una coppia di molle a memoria di forma programmate per lavorare in maniera contrastante: ovvero quando la prima molla genera un lavoro in fase autentica, la seconda è in fase di riposo martensitico. In questo modo è come se questo flap fosse gestito da un interruttore termosensibile che tuttavia funziona automaticamente grazie ad un sistema di alimentazione elettrica che accelera le fasi di attivazione dei componenti SMA.

Quando il sistema rileva la necessità d'aria da immettere nel motore, la prima molla viene attivata contraendosi (dilatando la sua antagonista), perciò il perno a cui è connesso ruota la valvola in posizione aperta. Al contrario nel momento in cui la quantità d'aria entrata è sufficiente per la combustione, la centralina interrompe il passaggio di corrente sul primo componente SMA fornendola invece alla seconda molla, la quale allo stesso modo si contrae richiudendo la valvola.



(Fig. 36): Valvola a farfalla a lavoro: (a) immissione libera del flusso dell'aria. (b) fase di chiusura della valvola per arrestare il flusso d'aria in ingresso.

I grandi vantaggi dell'utilizzo di questo sistema di azionamento sono:

- grande rapporto potenza/peso
- dimensioni d'ingombro minime
- riduzione e semplificazione del congegno di attuazione in sè.

D'altrocanto esistono anche degli svantaggi tipici dei dispositivi SMA rispetto agli attuatori elettrici/pneumatici normalmente utilizzati per questi compiti:

- tempi di risposta maggiori
- consumo di energia superiore.

Tuttavia in questo documento viene anche riportata una fase di sperimentazione e test di perfezionamento dell'attuatore a memoria di forma che ha portato a ridurre il divario dei tempi di risposta, rispetto agli attuatori tradizionali¹⁴.

Dispositivo di regolazione temperatura dell'aria aspirata per motori a combustione interna

Questi dispositivi sono realizzati tipicamente mediante termoattuatori a paraffina, l'utilizzo di una molla SMA permette di migliorare il tempo di risposta e la precisione di regolazione¹⁰.

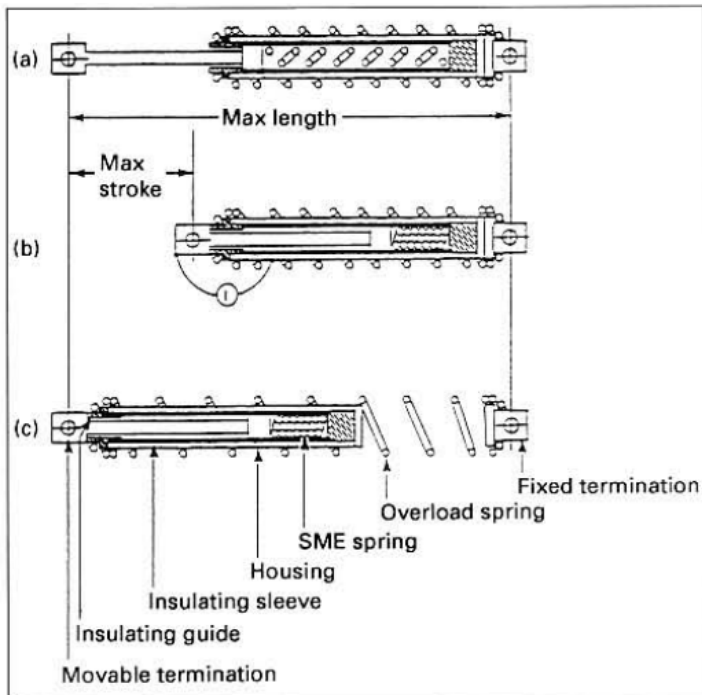
¹⁴ Cfr., Bellini, A. et al., *Mechatronic Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps: A Case Study*, in [IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS], VOL. 56, NO. 7, JULY 2009.

¹⁰ Cfr., PSTL, Ott. 2000, *Leghe ... applicazioni*, Cit.,

URL (<www.vincenzoarrichiello.com/pdfs/lmf-pstl.pdf>), 10/07/2012, p.15.

Il dispositivo di apertura del faro antinebbia

Una molla a memoria di forma è collegata in serie con la lampada. Accendendo il proiettore fendinebbia passa la corrente elettrica della lampada attraverso l'attuatore, che si riscalda, si contrae allo stato austenitico e aziona il movimento di lamelle che lasciano così filtrare la luce. Una molla di "reset" chiude la feritoia quando la lampada è spenta. Nella figura 37 viene illustrato l'attuatore con una molla sovraccaricata integrata.



(Fig. 37): Faro fendinebbia con attuatore SMA elettrico.

La zona dove si trovano i fendinebbia è solitamente molto ben ventilata, così che la temperatura bassa di trasformazione dell'attuatore (-65°C) non risulta essere un problema.

Attuatori a memoria di forma per un sistema di sicurezza per i pedoni ^[15,16]

Nel corso degli anni i congegni di sicurezza a bordo del veicolo per tutelare il passeggero nell'abitacolo sono aumentati e migliorati nell'efficacia. Tuttavia, secondo recenti studi, il tasso di mortalità dei pedoni coinvolti in incidenti d'auto è molto alto. Per questo è nata la necessità di equipaggiare le automobili con sistemi di sicurezza che, in caso d'incidente, proteggano anche coloro che non occupano il veicolo.

Il sistema in questione prevede che il cofano del veicolo venga dotato di due potenti molle, attivate da un dispositivo di rilascio a memoria di forma, in risposta all'urto frontale rilevato da alcuni sensori.

Queste molle sono montate sulle traverse del telaio all'interno del vano motore, in prossimità dell'abitacolo e non verso la parte anteriore dell'autoveicolo.

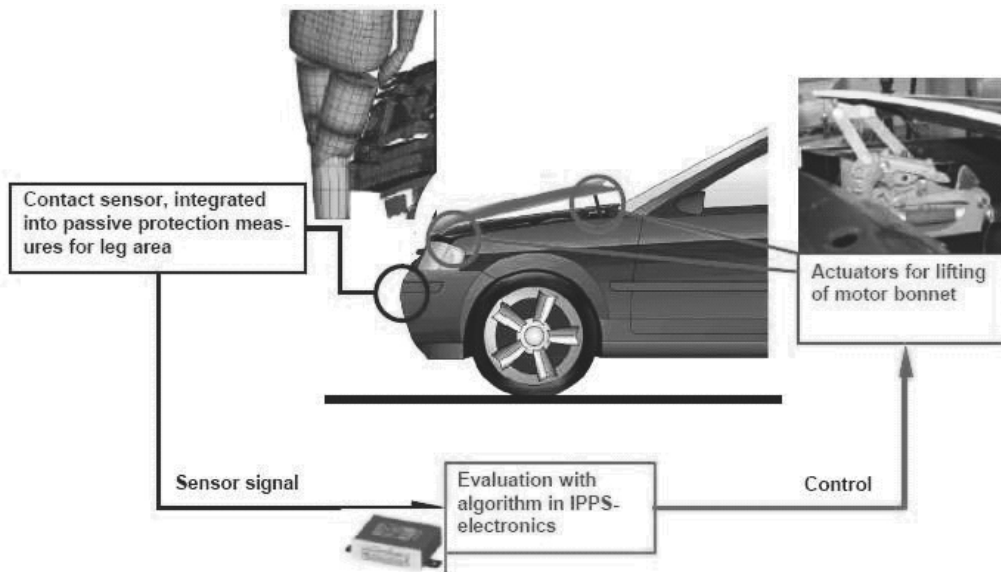
In caso di un impatto i sensori inviano un segnale ad una centralina che provvede tempestivamente a fornire la giusta alimentazione elettrica al dispositivo di rilascio. Questo è costituito da una coppia di fili Nichel-Titanio a memoria di forma che quando vengono riscaldati si attivano in modo da contrarsi, facendo ruotare dei ganci che normalmente mantengono in compressione le molle. Queste vengono perciò svincolate distendendosi bruscamente, permettendo al cofano di sollevarsi posteriormente di diversi centimetri, abbassando progressivamente la sua parte anteriore. (fig. 38-39)

In questo modo il cofano si trasforma in una sorta di "scudo protettivo" per il pedone al quale si evita di arrivare ad urtare la testa contro il parabrezza, a seguito di un impatto frontale.

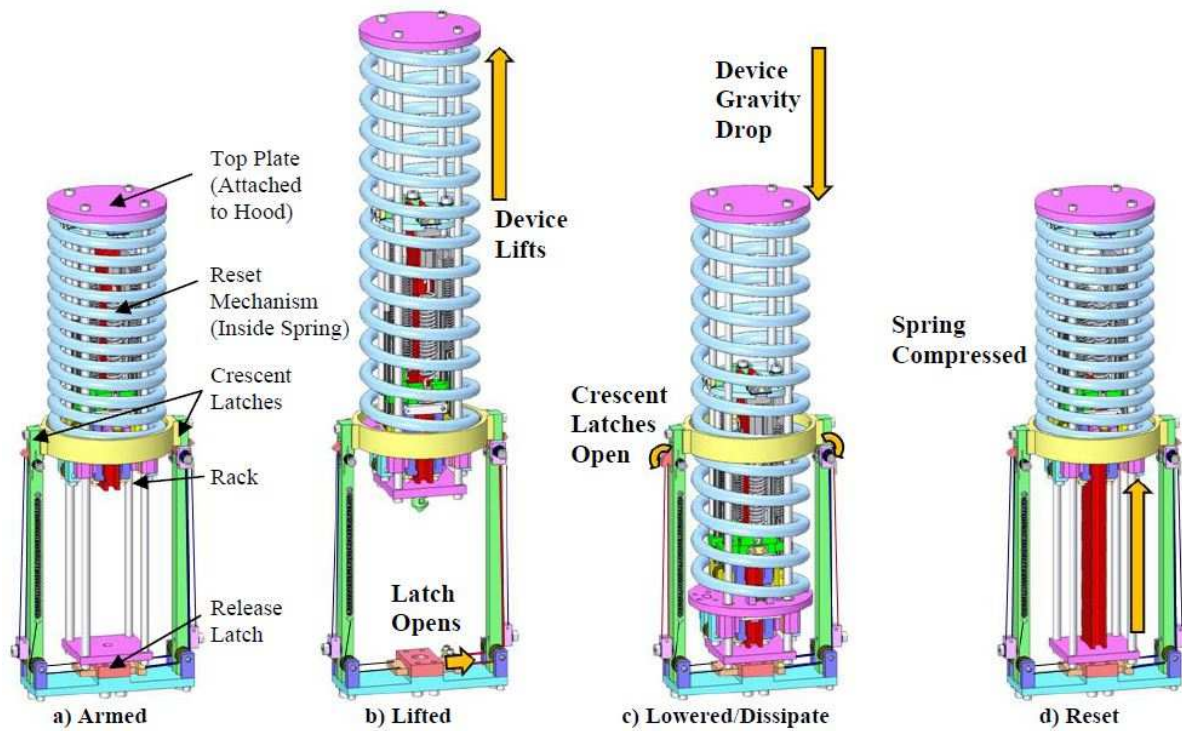
Sono stati compiuti alcuni studi di perfezionamento di questo dispositivo accompagnati da crash test virtuali in laboratorio. Questi hanno dimostrato che la conformazione di questo congegno di rilascio a memoria di forma è più efficace e veloce di un precedente sistema composto da leveraggi incernierati azionati con coppie di fili SMA.

¹⁵ Cfr., Strittmatter, J. et al., *Long-time Stability of Shape Memory Actuators for Pedestrian Safety System*, in [Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering], Vol. 34, Issue 1, May 2009.

¹⁶ Cfr., Barnes, M., B. et al., *Shape Memory Alloy Resettable Spring Lift for Pedestrian Protection*, in [Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies], Proceeding of SPIE Vol. 6930, 2008.



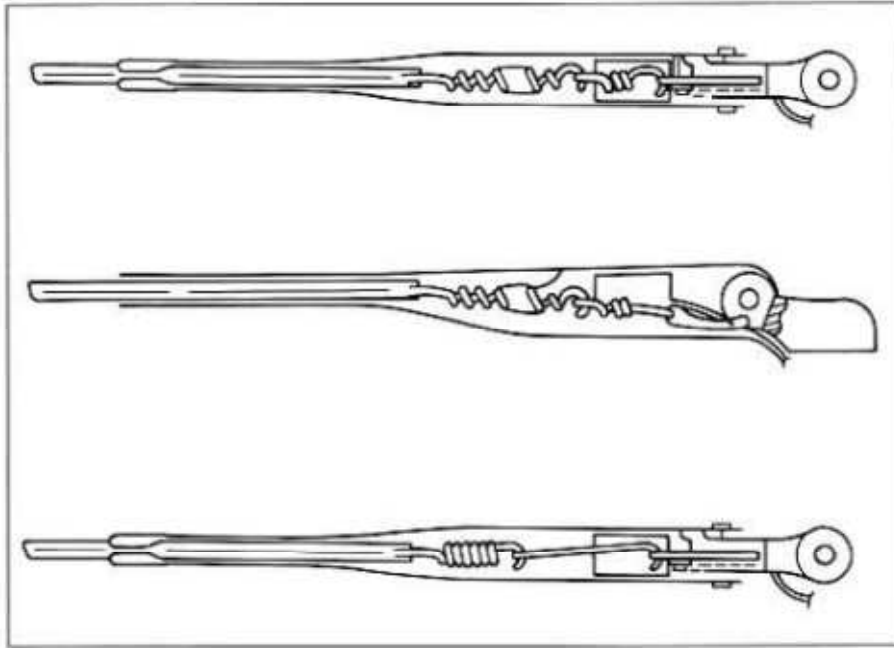
(Fig. 38): Prima configurazione del sistema di sicurezza per il pedone.



(Fig. 39): Fasi di funzionamento di un congegno per il sollevamento del cofano, tramite una molla che viene rilasciata e riportata nella sua condizione di riposo grazie ad un attuttore a memoria di forma.

Tergicristalli

Attuatori di memoria di forma potrebbero fornire una soluzione elegante per aumentare la pressione tra spazzole e parabrezza ad alta velocità. La figura 40 mostra disegni differenti che incorporano una molla o un filo Ni-Ti di trazione nel braccio tergicristallo⁹.



(Fig. 40): Tergicristallo con attuatore di pressione a memoria di forma.

Tuttavia, ci sono seri problemi quando la temperatura ambiente si avvicina alla temperatura di trasformazione della lega di memoria di forma, per esempio quando l'auto è parcheggiata al sole. In questo caso, l'attuatore di memoria di forma potrebbe auto-azionarsi o non ripristinarsi.

⁹ Cfr., Stoeckel, D., *Shape... Applications*, Cit., p. 307.

European Patent Specification: Meccanismo di bloccaggio per prevenire la rotazione e/o la traslazione di un perno, che comprende un mezzo di rilascio a memoria di forma, CRF Società Consortile per Azioni¹⁷

Questo congegno è stato progettato per svolgere funzioni di attuatore azionato elettricamente capace di trasformare un movimento lineare in una rotazione, senza l'usilio di ingranaggi dentati. Viene ritenuto particolarmente adatto per la movimentazione di piccoli componenti mobili all'interno di un'automobile, come ad esempio:

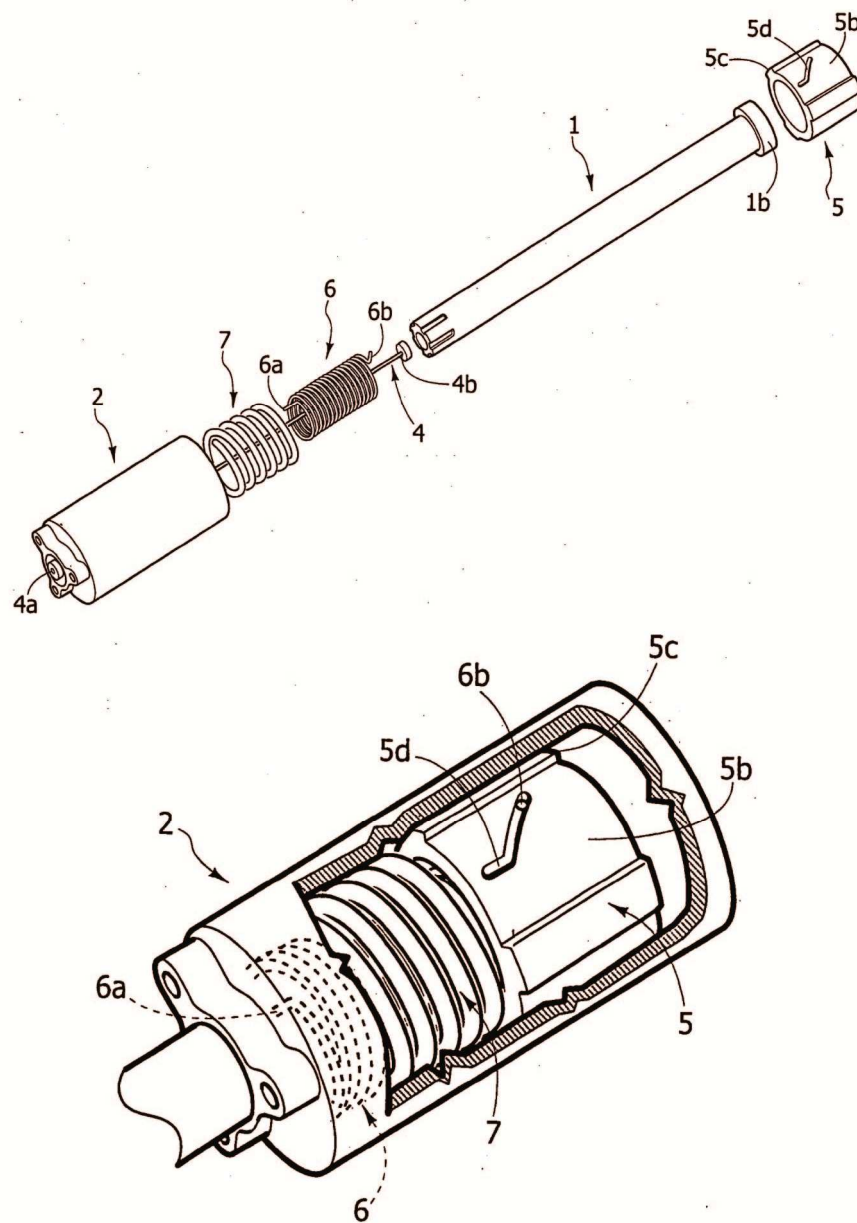
- Coperchio per l'accesso ad un vano nel cruscotto
- Sportello del bracciolo
- sportellino d'accesso al tappo del serbatoio del carburante
- braccio di articolazione mobile di una tenda parasole.

Questo attuatore appare come un braccio cilindrico composto esternamente da due elementi principali che possono scorrere l'uno rispetto all'altro. Sull'estremità di diametro inferiore si deve connettere il componente da movimentare. All'interno della parte di dimensioni maggiori di questo braccio sono alloggiato in modo concentrico due molle; inoltre un filo metallico a memoria di forma mantiene serrate le diverse parti di questo attuatore passando all'interno delle molle stesse.

Al momento del passaggio di corrente elettrica il filo SMA si surriscalda entrando nella fase austenitica, diminuisce perciò la sua lunghezza e tende a far comprimere le molle. La più piccola di queste possiede le estremità piegate ad "L" per collegare due componenti diverse; nel più piccolo di questi componenti è stata ricavata un'asola opportunamente sagomata 5d che permette la rotazione del braccio dell'attuatore.(fig. 41)

Il sistema funziona come un interruttore: perciò fino a quando il filo a memoria di forma viene alimentato da corrente, questi elementi manterranno (ad esempio) lo sportello del bracciolo nella posizione aperta; quando si interrompe il passaggio di corrente il filo si raffredda e perdendo la sua forza austenitica viene riportato nella sua condizione di riposo, grazie al ritorno elastico delle molle. In questo modo lo sportello viene richiuso.

¹⁷ Cfr., Biasiotto, M. et al., *Locking Device for Preventing a Rotation and/or an Axial Movement of a Pin, Including Shape Memory Releasing Means*, 06/07/2007, European Patent Specification EP 2 012 029 B1, CRF Società Consortile per Azioni.



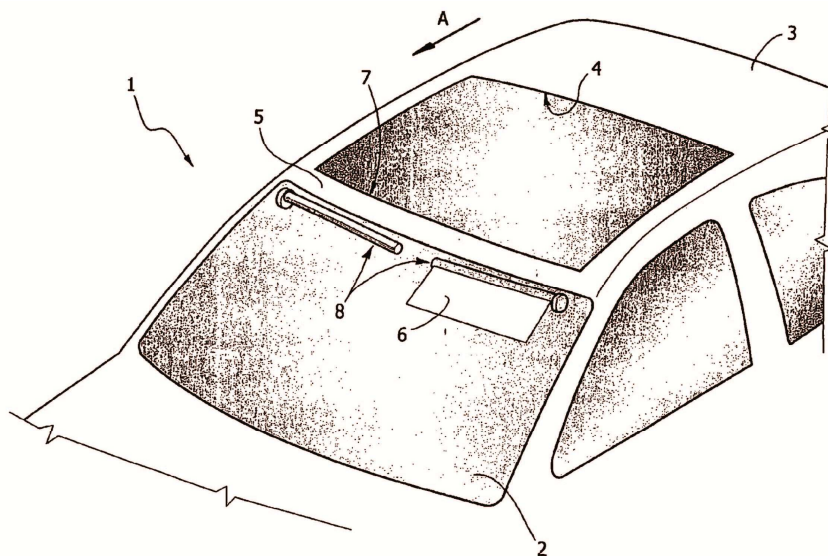
(Fig. 41): Sistema di attuazione in grado di convertire il restringimento di un filo SMA n°4 in una rotazione grazie all'azione di due molle.

United States Patent: Dispositivo parasole per veicoli a motore, con attuatori a memoria di forma, CRF Società Consortile per Azioni¹⁸

La presente invenzione riguarda un dispositivo parasole per automobile che si compone di una tendina regolabile, attraverso un attuttore a memoria di forma, tra una posizione di riposo e una operativa rispetto ad una struttura di sostegno.

Il veicolo a motore può essere equipaggiato con uno oppure due dispositivi parasole, progettati rispettivamente per essere utilizzati dal guidatore e dal passeggero al suo fianco.(fig. 42)

Lo scopo è di realizzare un congegno con un attuttore a memoria di forma semplice, dalle dimensioni contenute, efficiente e silenzioso durante il funzionamento.



(Fig. 42): Veicolo fornito di due tende parasole montate sul parabrezza.

L'attuttore è costituito da un componente a forma di elica o di spirale metallica in lega Nichel-Titanio, alimentato da corrente elettrica.

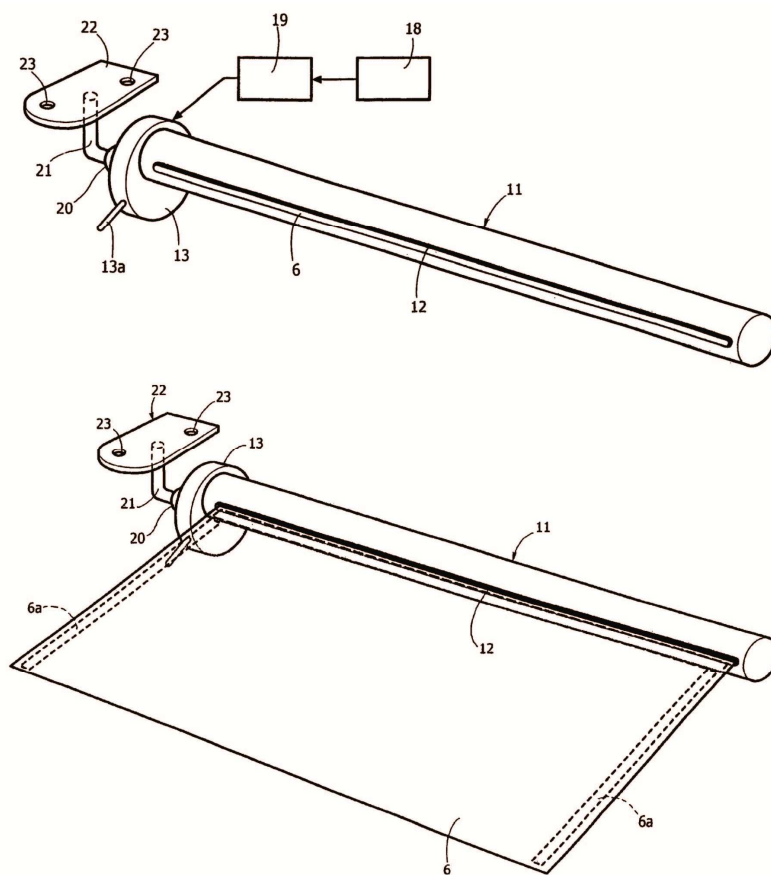
L'azionamento della tendina viene controllato dall'utente tramite un pulsante che trasmette il segnale ad una centralina che fornisce anche energia elettrica al componente SMA.

¹⁸ Cfr., Alacqua, S. et al., *Sunshade Device for Motor-vehicles, with Shape Memory Actuators*, 02/11/2010, United States Patent n° US 7, 823, 955 B2, CRF Società Consortile per Azioni.

Sottoposto al surriscaldamento per effetto Joule, tale componente provoca la rotazione di un disco connesso con un rocchetto, intorno al quale è avvolta la tendina parasole realizzata in tessuto.

In questo modo la tenda viene srotolata e sostenuta in posizione operativa da due strisce metalliche che possiedono un'opportuna rigidezza, tale da poter sia svolgere funzione strutturale che flettersi per assecondare l'avvolgimento in fase di riposo.

Risulta utile poter mantenere estesa la tenda senza il continuo passaggio di corrente. Questo significa che bisogna associare al disco azionato dal componente SMA, dei mezzi elastici che tendono a riportarlo in una posizione che si oppone ad un dispositivo di bloccaggio (che "ferma" il sistema in condizione operativa). Questa disposizione è tale per cui, una successiva attivazione temporanea dell'elemento e memoria di forma, provoca la disattivazione del suddetto dispositivo di bloccaggio e il ritorno del sistema in condizione di riposo.(fig. 43)



(Fig. 43): Vista d'insieme della tenda parasole azionata tramite un attuttore SMA; in alto in posizione di riposo e in basso in quella operativa, con la tenda sorretta da strisce metalliche 6a.

United States Patent: Apparecchiatura con attuatore a memoria di forma integrato per regolare il flusso d'aria in un condotto, in particolare per impianti di climatizzazione in autoveicoli, CRF Società Consortile per Azioni¹⁹

Il sistema comprende una bocchetta di aerazione di un veicolo, composto da diverse lamelle "veneziane" (o deflettori) orientabili attraverso un attuatore elettrico a memoria di forma.

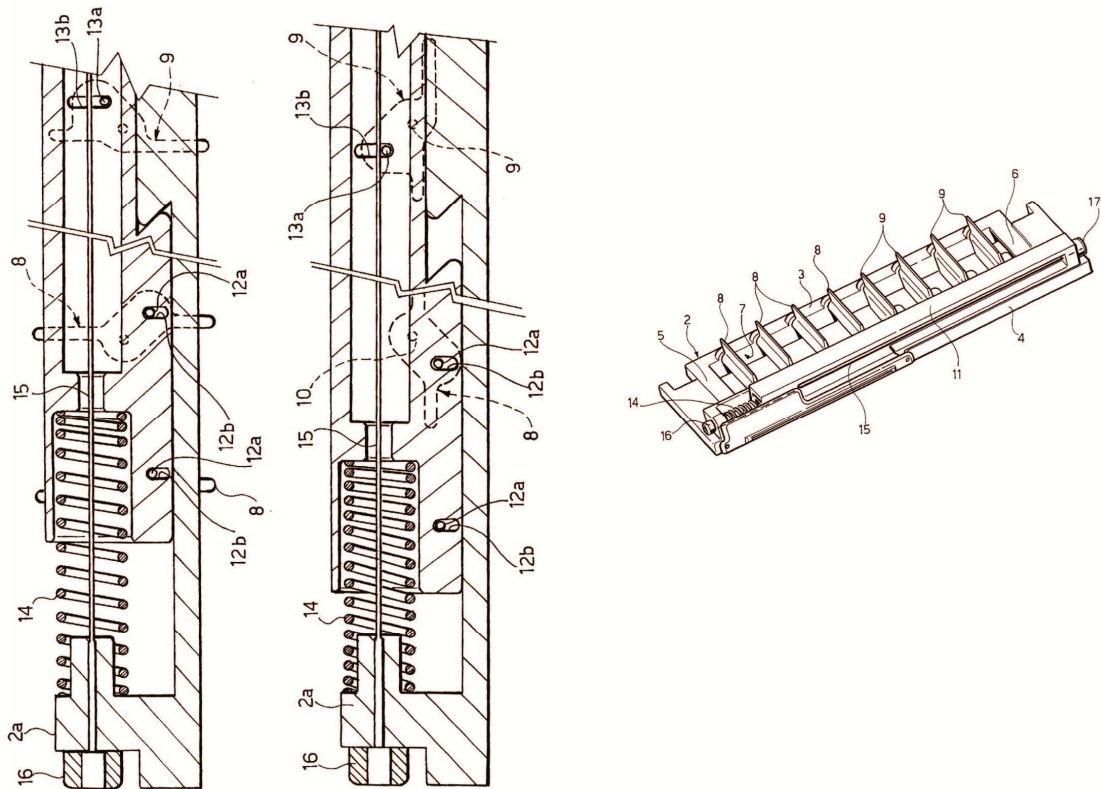
Più precisamente questo meccanismo è stato studiato come un interruttore, ovvero consente di porre queste lamelle in posizione "tutte aperte" o "tutte chiuse" senza posizioni intermedie.

L'attuatore responsabile della movimentazione delle lamelle è un tipico filo Nichel-Titanio integrato nella struttura portante della bocchetta.

Quando si desidera il passaggio d'aria, l'attuatore rimane in fase di riposo, ovvero i deflettori della bocchetta sono configurati in posizione aperta quando il congegno non viene azionato. Ciò è possibile perchè il filo a memoria di forma è soggetto all'azione della forza di richiamo di una molla, che possiede una rigidità maggiore del filo SMA in fase martensitica. Quando invece si desidera interrompere il flusso d'aria una centralina invia un segnale ad un generatore che a sua volta fornisce corrente elettrica al filo SMA. A questo punto il filo si riscalda per effetto Joule ed assume la conformazione austenitica, comincia così a recuperare la forma originaria restringendosi e tirando con sé (facendo ruotare) anche le lamelle che sono connesse ad esso attraverso un sistema di fermi e leveraggi. In questa fase tutte le lamelle sono poste in posizione chiusa impedendo così il passaggio del flusso d'aria.

Inoltre un sensore viene collegato con la parte mobile della struttura della bocchetta di aerazione al fine di "informare" sempre la centralina in quale fase si trovino le lamelle. In questo modo la gestione degli impulsi elettrici viene affrontata senza errori, favorendo al contrario il corretto funzionamento del sistema di attivazione.(fig. 44)

¹⁹ Alacqua, S. et al., *Apparatus with Integrated Shape Memory Actuator for Regulating a Flow of Air in a Conduit, Particularly for Air-conditioning Systems in a Motor Vehicles*, 10/09/2002, United States Patent n° US 6,446,876 B1, CRF Società Consortile per Azioni.



(Fig. 44): Nelle sezioni del sistema di attuazione con filo a memoria di forma (15), si osserva a sinistra la molla di richiamo che vince la forza del filo SMA ponendo le alette in posizione "tutto aperto"; a destra il filo SMA surriscaldato recupera la sua forma restringendosi, comprimendo la molla di richiamo e costringendo la chiusura delle alette, impedendo così il passaggio del flusso d'aria. Spostata sulla destra si vede un'immagine complessiva dell'intera bocchetta.

United States Patent: Supporto lombare regolabile utilizzando un materiale attivo, GM Global Technology Operations²⁰

La presente invenzione si riferisce alla regolazione del supporto lombare di un sedile di automobile, attraverso un sistema di attuatori realizzati con un "*materiale attivo*".

Il supporto lombare viene incorporato all'interno del sedile per conferirgli capacità strutturale e sostegno al passeggero.

Come qui viene indicato il termine "*materiale attivo*" include ogni materiale o composito che mostra un cambiamento reversibile di una sua proprietà fondamentale (ad esempio chimica o fisica), quando sottoposto ad un impulso esterno.

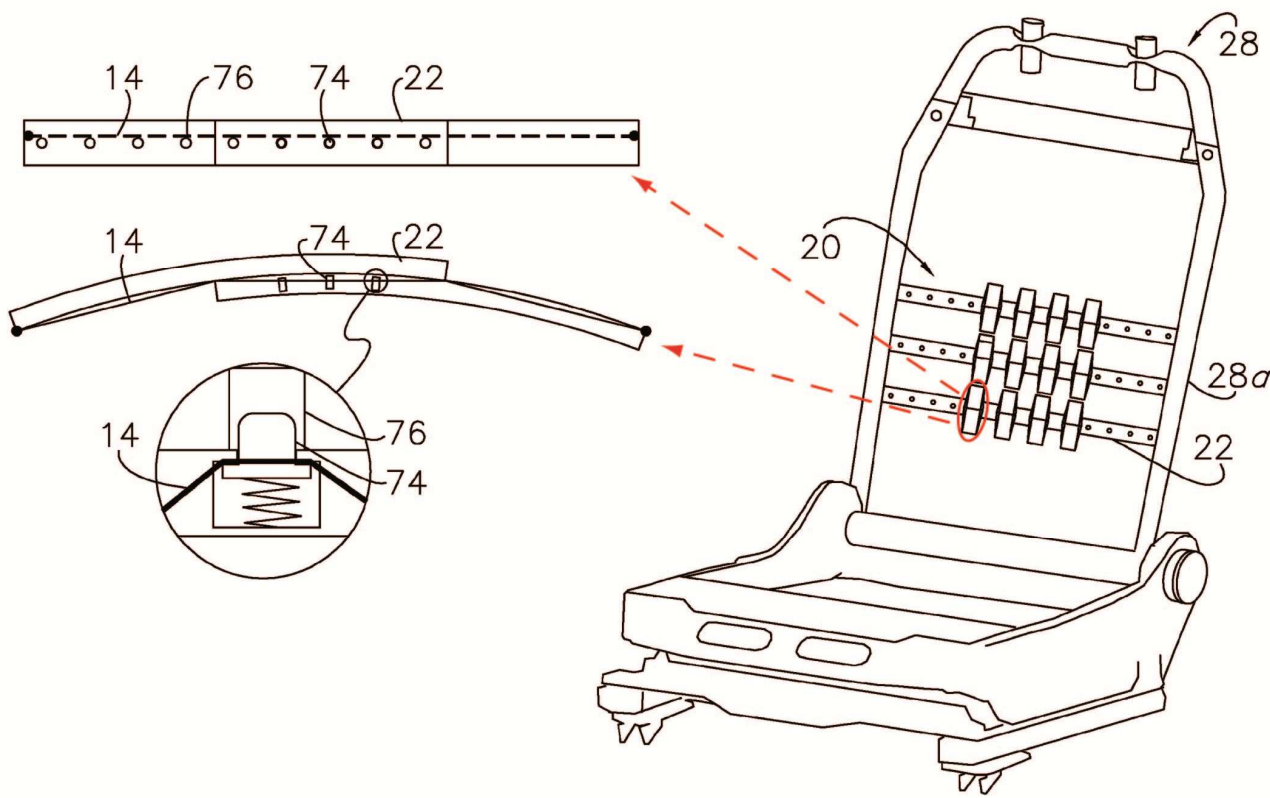
Nello specifico l'attuatore in questione è composto da un filo SMA azionato elettricamente, il quale è connesso alle estremità di due placchette metalliche incurvate che sono state progettate per scorrere l'una sull'altra.

Quando il passeggero aziona il comando predisposto sul cruscotto del veicolo, una centralina alimenta elettricamente il filo a memoria di forma, che scaldandosi si restringe esercitando una forza tale da far scorrere e incurvare maggiormente le placchette metalliche. Inoltre è stato previsto un sistema di arresto di queste placchette che funziona con un elemento a pressione che raggiunta la giusta posizione viene spinto da una molla ad entrare nella sua sede di bloccaggio.

Quindi prevedendo una serie di questi congegni montati all'interno del sedile, sulle staffe del telaio, si può far gonfiare o sgonfiare la zona lombare dello schienale per ottenere maggiore o minore supporto. Nella prima configurazione l'imbottitura di rivestimento dello schienale viene costretta a deformarsi conferendo progressivamente maggiore sostegno lombare; Al contrario un altro comando interrompe il passaggio di corrente permettendo a delle molle di riportare il sistema nella sua posizione di riposo. Ciò è possibile poichè raffreddandosi i fili SMA entrano nello stato martensitico, che non è più in grado di sostenere la forza di richiamo delle molle.(fig. 45)

In questo documento brevettuale sono inoltre presenti diverse varianti dello stesso congegno di regolazione sopra descritto, tuttavia in questa sede non verranno esaminati tutti.

²⁰ Cfr., Lawall, P., J. et al., *Manipulable Lumbar Support Utilizing Active Material Actuation*, 15/03/2011, United States Patent n° US 7, 905, 547 B2, GM Global Technology Operations.



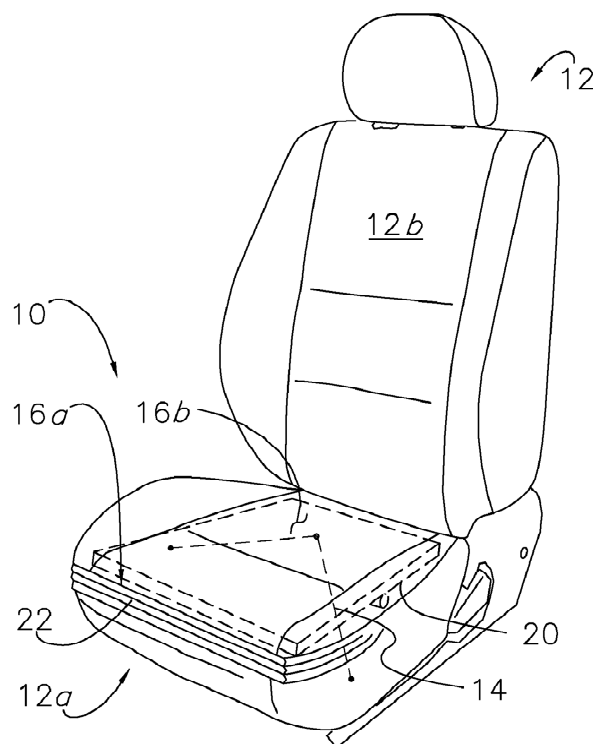
(Fig. 45): Nella figura viene illustrato il congegno di attuazione che permette la regolazione del sostegno sulla zona lombare dello schinale del sedile. Osserviamo nell'ingrandimento il sistema di arresto a pressione e più in alto le placchette incurvate responsabili del rigonfiamento della zona lombare.

United States Patent: Rampa del sedile regolabile utilizzando l'azionamento di un "materiale attivo", G M Global Technology Operations²¹

La presente invenzione è una rampa regolabile attraverso un attuatore realizzato con un materiale a memoria di forma, che lavora per modificare l'inclinazione del piano di seduta del sedile.

La rampa è incorporata all'interno del piano di seduta per fornire un miglioramento dell'ergonomia e del comfort, inoltre presenta un angolo minimo d'inclinazione per sostenere meglio l'utente.

(fig. 46)



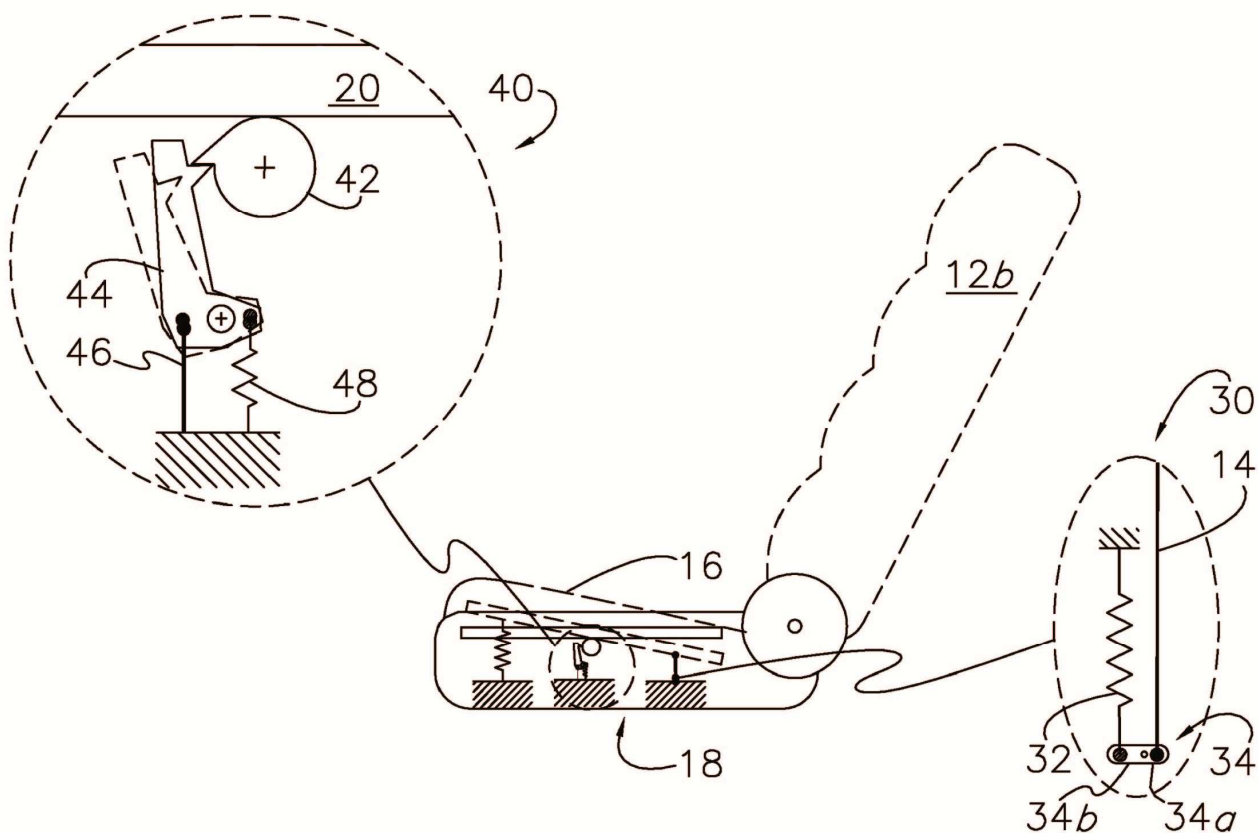
(Fig. 46): vista generale della rampa regolabile all'interno di un sedile d'automobile.

Nello specifico quest'angolo d'inclinazione è definito per evitare l'effetto "submarining" e cioè in condizioni di urto o decelerazione improvvisa questa rampa dissipa una porzione di energia che altrimenti si scaricherebbe sul passeggero del sedile, evitando così di farlo scivolare al di sotto della cintura.

²¹ Cfr., Lawall, J., P. et al., *Adjustable Seat Ramp Utilizing Active Material Actuation*, 24/01/2012, United States Patent n° US 8, 100, 471 B2, GM Gloal Technology Operations.

Sono state studiate delle opportune inclinazioni della rampa per favorire il comfort in normali condizioni d'uso e altre inclinazioni utili per condizioni di sicurezza, come in un incidente.

Quando l'utente aziona un preciso comando un impulso elettrico raggiunge l'attuatore SMA 14, riscaldandolo e facendolo restringere. Questo permette che la rampa si inclini perchè su un'estremità è solidale con il filo a memoria di forma stesso. Una volta raggiunta una posizione prestabilita un congegno di bloccaggio con un dente d'arresto impedisce ulteriori movimenti della rampa e protegge la struttura dal sovraccarico.(fig. 47)



(Fig. 47): Sistema di regolazione del piano di seduta per un sedile automobilistico, attraverso l'azionamento di un materiale a memoria di forma.

Quando invece si vuole riportare la rampa all'inclinazione originaria, si interrompe la corrente sull'attuatore principale 14 e si alimenta invece il filo SMA 46, che grazie alla sua contrazione rilascia il sistema di bloccaggio, consentendo alla molla di richiamo di riportare la rampa nella sua posizione di partenza.

European Patent Application: Dispositivo di sgancio per un componente di un sedile di un veicolo a motore, composto da un attuatore a memoria di forma, C.R.F. Società Consortile per Azioni²²

La presente invenzione riguarda un dispositivo di sbloccaggio per un componente responsabile della movimentazione dello schienale di un sedile per un veicolo a motore.

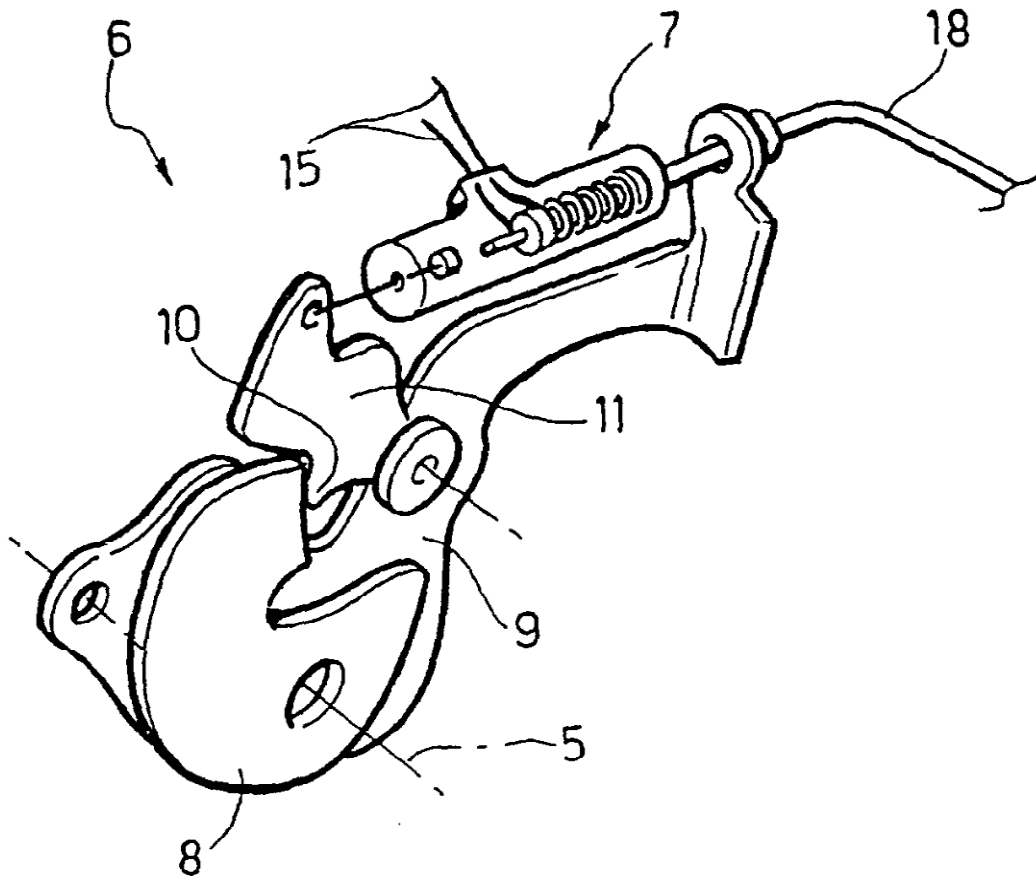
Tale sistema viene montato sul telaio del sedile tra seduta e schienale ed il suo scopo è quello di abbassare lo schienale del sedile anteriore automaticamente, quando occorre accedere ai sedili posteriori.

L'attuatore è rappresentato da un filo SMA Nichel-Titanio alimentato da corrente elettrica, il quale possiede una molla di richiamo necessaria per riportare il dispositivo nella fase di deattivazione.

Azionando un tasto sul sedile, viene trasmessa corrente elettrica al filo a memoria di forma che si surriscalda fino a contrarsi generando un lavoro. Perciò riducendo la propria lunghezza il filo costringe una leva, solidale con esso, a ruotare intorno al proprio asse, la quale svincola un sistema di bloccaggio che consente allo schienale di essere ribaltato, grazie all'azione di una coppia di molle che richiamano lo schienale verso il piano di seduta.

Il dispositivo di attuazione a memoria di forma può essere azionato sia elettricamente, con un comando collegato direttamente all'impianto elettrico del veicolo, oppure meccanicamente per mezzo di un cavo flessibile controllato da una leva. Il sistema di movimentazione manuale esiste perchè se dovesse mancare l'alimentazione elettrica per un qualsiasi motivo si riesce comunque a ribaltare il sedile.(fig. 48)

²² Cfr., Alacqua, S. et al., *A Release Device for a Component of a Motor Vehicle Seat, Including a Shape Memory Actuator*, 23/03/2005, European Patent Application EP 1 513 773 A1, CRF Società Consortile per Azioni.



(Fig. 48): Particolare del dispositivo per il rilascio dello schienale del sedile. In questa immagine con il blocco attivo. Il filo a memoria di forma che ha funzione di attuttore, scorre all'interno di una guaina protettiva 18.

Sistemi di sicurezza intelligenti²³.

Questo dispositivo sperimentale serve ad evitare che i montanti del telaio dell'abitacolo di un'automobile si deformino eccessivamente in caso di impatto laterale all'altezza degli sportelli.

Infatti quando un veicolo subisce incidenti frontali o sulla parte retrostante, queste si deformano accartocciandosi, dissipando parte dell'energia accumulata nell'impatto smorzando così la violenza dell'urto subito dagli occupanti dell'auto. La deformazione di queste parti è stata studiata per motivi di sicurezza, in modo tale da preservare le condizioni dell'abitacolo e quindi l'incolumità dei passeggeri in caso d'incidente.

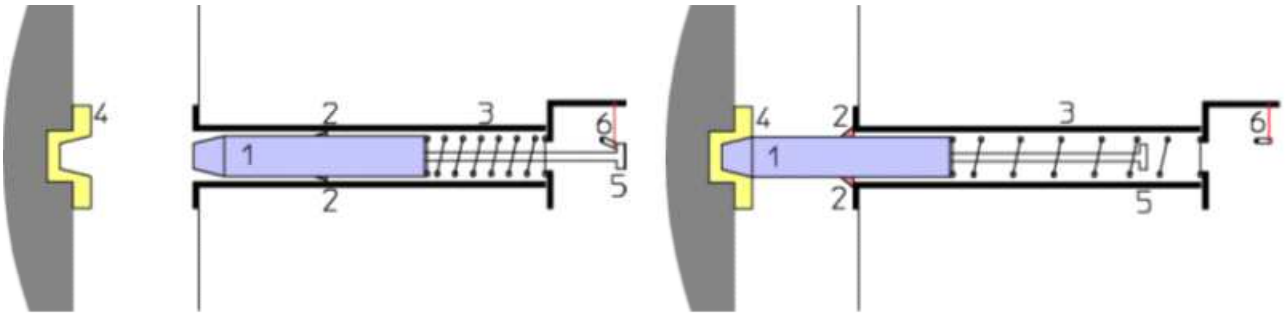
Al contrario nel caso di un urto laterale non si può contare su tale sistema poichè gli unici componenti che separano i passeggeri dall'esterno sono gli sportelli. Test in laboratorio hanno infatti dimostrato che in questo tipo di incidenti le lamiere possono piegarsi andando a formare una vera e propria trappola per le persone all'interno del veicolo, rendendo difficili le operazioni di soccorso.

Perciò è stato progettato un sistema di sicurezza così composto:

Un cilindro d'acciaio saldato tra il telaio del sedile e il montante laterale del veicolo (posto perpendicolarmente tra sedile e sportello) contiene al suo interno un perno d'acciaio pieno solidale con uno stantuffo che, grazie ad un sistema d'arresto, mantiene il perno stesso in posizione di riposo grazie ad una potente molla tenuta in compressione. Il sistema d'arresto è costituito da una leva di bloccaggio movimentata da un filo metallico a memoria di forma azionato elettricamente. Questo in caso di incidente si accorcia sollevando la leva che rilascia lo stantuffo e fa scattare violentemente la molla, la quale spinge il perno fuori dal cilindro verso un'apposita sede ricavata sul montante laterale del veicolo. Infine un secondo sistema di bloccaggio assicura che il perno non ritorni all'interno del cilindro.(fig. 49)

In questo modo il perno resiste in parte allo sforzo di compressione esercitato su quella zona del telaio, evitando che venga completamente deformata a causa dell'impatto.

²³ Cfr., Mayer, Ch., *Final Report for the Work on "Intelligent Safety Systems" (SP 6)*, European Funded Project n° FP6-PLT-506503, 07/07/2009.



(Fig. 49): Sistema di sicurezza per gli impatti laterali. A sinistra il filo SMA 6 mantiene il sistema in condizione di riposo; sulla destra invece il filo rilascia la leva di bloccaggio facendo muovere il perno verso la sua posizione d'esercizio (nella sede 4).

Inoltre una rete di sensori di movimento è stata applicata tutt'intorno all'autoveicolo in modo tale da inviare l'impulso elettrico al filo SMA qualche istante prima dell'impatto. Infatti questo dispositivo di sicurezza risulta efficace proprio se riesce ad anticipare il momento dell'urto effettivo. Per questo si è dovuto calibrare opportunamente i sensori sulla distanza minima che preannuncia quindi l'incidente. Ovviamente il congegno non deve assolutamente essere attivato nelle normali condizioni d'utilizzo del mezzo, quindi in caso di traffico.

United States Patent: Specchio retrovisore esterno per automobile con sistema di attuazione a memoria di forma, CRF Società Consortile per Azioni²⁴

L'invenzione si riferisce ad uno specchio retrovisore esterno per automobile, montato vicino al finestrino, composto da uno specchio fornito di una base, un supporto capace di poter oscillare, ed un interruttore il quale controlla l'energia elettrica fornita a tre fili a memoria di forma, collegati al supporto oscillante, al fine di orientare lo specchio.

Il sistema di attuazione è perciò costituito da tre fili SMA Nichel-Titanio che da un lato sono alimentati elettricamente attraverso una leva/interruttore, dall'altro sono connessi ad un supporto circolare capace di ruotare.

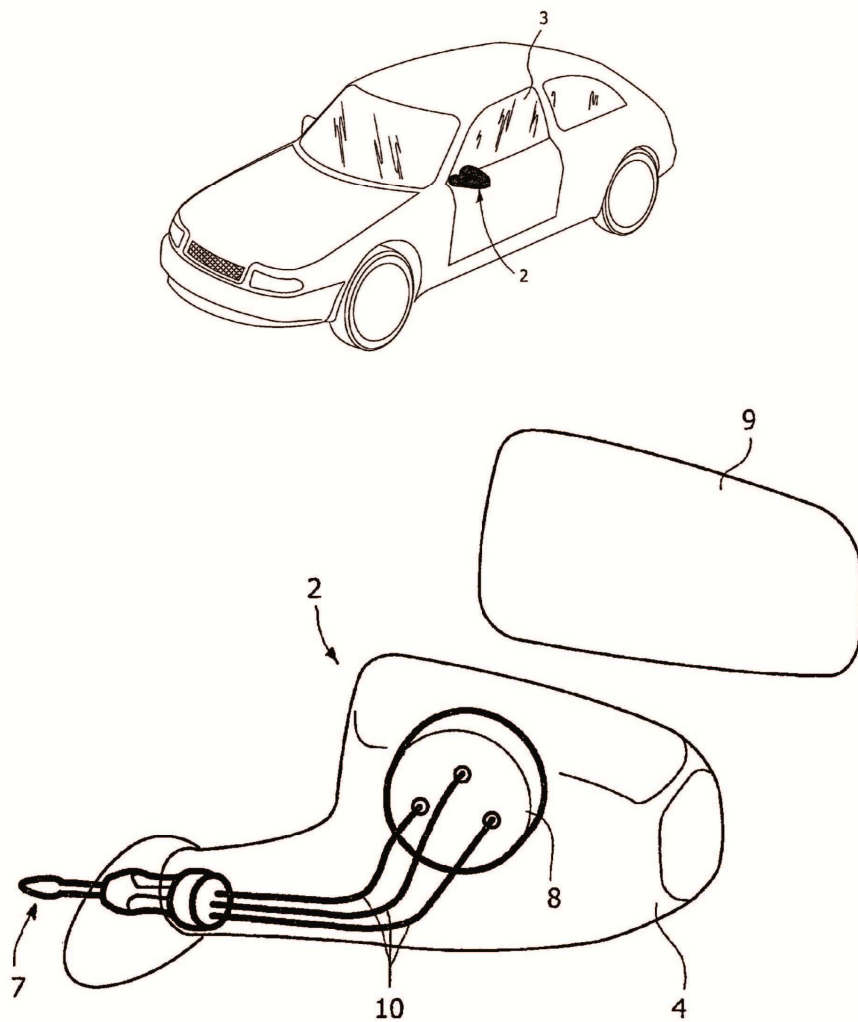
L'interruttore possiede quattro posizioni: una di riposo e le altre tre regolano invece i movimenti dello specchio. Ogni volta che l'utente sposta la leva sul contatto elettrico del filo corrispondente, questo viene riscaldato per effetto Joule, in modo da innescare il cambiamento di fase e cioè una riduzione della sua lunghezza. Perciò l'attivazione di un filo provoca una precisa rotazione dello specchio, il quale essendo solidale con il sistema di attuazione lo asseconda nei movimenti.

È quindi possibile azionare un filo per volta fino a raggiungere la posizione d'inclinazione dello specchio desiderata.

Per migliorare la precisione dei movimenti ciascuno dei fili a memoria di forma è rivestito da una guaina isolante al fine di evitare che si riscaldi anche il componente vicino a quello effettivamente alimentato da corrente. Questo accorgimento risulta fondamentale vista la stretta vicinanza dei componenti SMA, inoltre garantisce una buona risposta di movimento rispetto alla corrispondente posizione della leva di azionamento.

Per ragioni di sicurezza in caso di assenza di corrente elettrica, i tre fili a memoria di forma vengono utilizzati come strumenti di trasmissione meccanica per la regolazione dello specchio; in altre parole fungono da tiranti azionati manualmente.(fig 50)

²⁴ Cfr., Butera, F., *Outer-rear View Mirror for a Motor-vehicle with Shape Memory Actuating Means*, 15/01/2008, United States Patent n° US 7,318,649 B2, CFR Società Consortile per Azioni.



(Fig. 50): Sistema di attuazione a memoria di forma di uno specchio retrovisore esterno.

La leva (7) viene spostata su una delle posizioni per alimentare attraverso corrente elettrica i fili SMA (10) che attivandosi consentono la rotazione del supporto (8) solidale con lo specchio (9).

European Patent Application: Specchio retrovisore esterno per veicolo a motore con dispositivo di attuazione e memoria di forma, CRF Società Consortile per Azioni²⁵

Nel documento è presente un altro sistema di attuazione a memoria di forma, come variante del sistema illustrato precedentemente.

La presente invenzione riguarda uno specchietto retrovisore esterno per auto, fornito di un dispositivo di attuazione per regolare l'inclinazione dello specchio, composto da tre elementi metallici a memoria di forma, posizionati in modo da operare tra lo specchio stesso e un suo elemento di supporto.

Lo scopo di questo sistema di movimentazione è quello di gestire la piastra portante dello specchio in modo da posizionarla nel modo desiderato attraverso azioni rapide e silenziose.

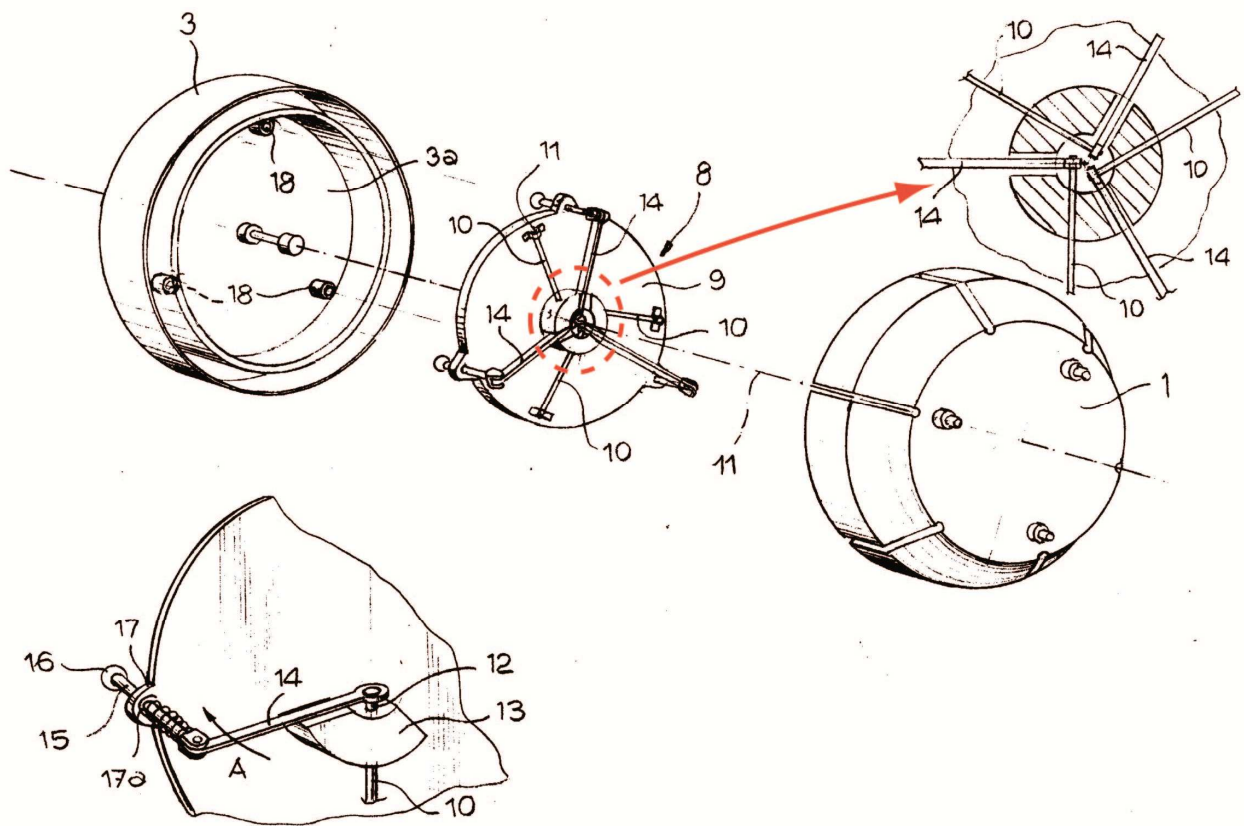
I tre elementi SMA sono barre di torsione Nichel-Titanio posizionate in direzioni radiali rispetto al piano che contiene lo specchio. Ognuna di queste barre ha un'estremità connessa ad un elemento di supporto e l'estremità opposta collegata alla piastra portante dello specchio mediante una leva di trasmissione. A questa leva vengono associate delle molle di ripristino, che riportano la rispettiva barra di torsione, nella sua posizione di riposo.

Al passaggio di corrente, che avviene su un elemento per volta, la barra si riscalda fino a raggiungere la temperatura di trasformazione di fase, che gli consente di torcersi. Questo provoca la conseguente rotazione della piastra portante dello specchio a cui sono collegati gli elementi SMA. Si può decidere di attivare elettricamente una barra per volta fino a raggiungere l'inclinazione dello specchio voluta.

Terminate queste regolazioni l'impulso elettrico cessa di riscaldare i componenti, i quali perdono progressivamente la loro rigidità austenitica e pertanto subiscono l'azione della forza di richiamo di alcune molle che riportano le barre in posizione di riposo.

Questo secondo sistema di regolazione dello specchio retrovisore appare più complesso ed artificioso del congegno visto in precedenza, in cui i tre tiranti SMA sembrano svolgere più efficacemente il lavoro di aggiustamento delle posizioni.(fig. 51)

²⁵ Crf., Butera, F., *Motor-vehicle Outer Rear View Mirror having a Shape Memory Actuating Device*, 24/02/1999, European Patent Application EP 0 897 831 A2, CRF Società Consortile per Azioni.



(Fig. 51): Vista esplosa di un dispositivo di attuazione con elementi SMA per uno specchio retrovisore automobilistico. In questa immagine lo specchio (non visibile) è montato sul corpo (3).

United States Patent: Specchio retrovisore antiriflesso per veicolo a motore con un dispositivo di attivazione a memoria di forma, Magneti Marelli S.p.A.²⁶

L'invenzione mostra uno specchio retrovisore per veicoli a motore composto da un corpo di supporto e uno specchio montato in modo che sia libero di ruotare rispetto al corpo stesso, inoltre è orientabile tra una posizione di normale utilizzo e un'altra antiriflesso grazie ad un attuatore a memoria di forma.

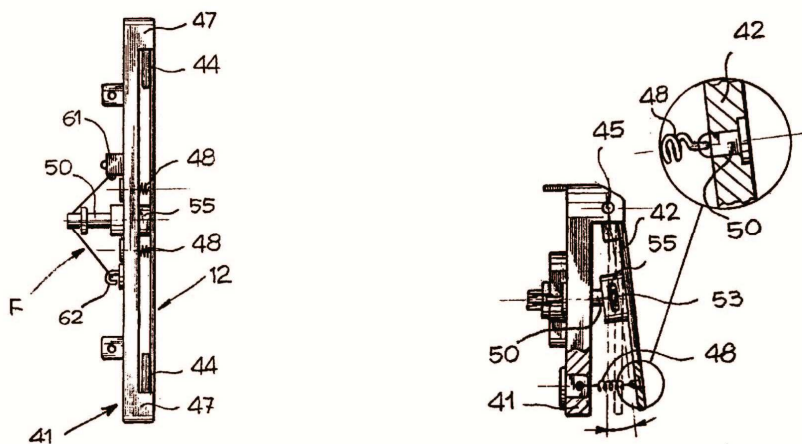
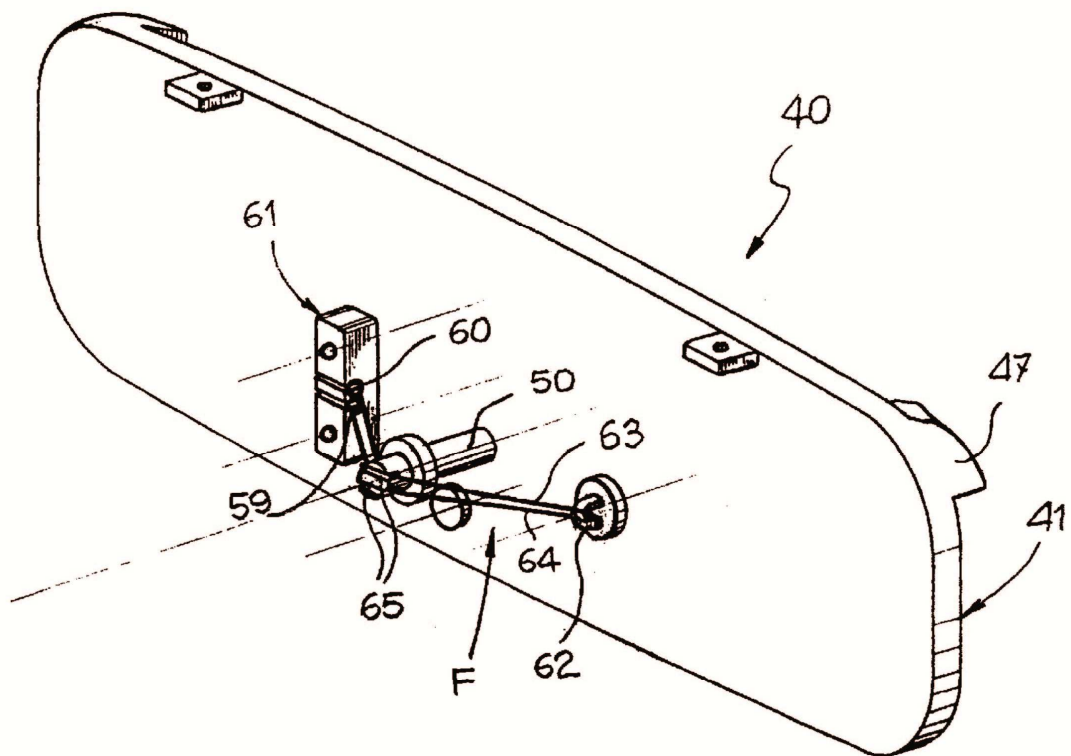
Questo specchio retrovisore è collocato all'interno dell'abitacolo del veicolo ed è fornito di molle interposte tra lo specchio e la sua scocca di supporto, che tendono a mantenere il dispositivo nella sua condizione di riposo e un mezzo di attivazione per il controllo dei movimenti dello specchio, realizzato in lega a memoria di forma alimentato elettricamente.

In questo caso l'attuatore è costituito da un filo SMA, fissato sul retro della scocca dello specchio, che al momento del passaggio di corrente si restringe e così facendo aziona uno spinotto costringendolo ad avanzare attraverso un'apposito foro ricavato nella scocca di sostegno.

Il movimento dello spinotto spinge lo specchio conferendogli una inclinazione opportuna, tale da assumere la cosiddetta posizione antiriflesso ed evitare perciò l'abbagliamento provocato dai fari puntati di un veicolo che ci precede.

Inoltre lo specchio è collegato con due molle di richiamo che nel momento dell'attivazione del filo a memoria di forma si allungano, poichè l'attuatore genera un lavoro sufficiente a farlo, ma nella fase di deattivazione, quando cioè non viene più trasmessa corrente, le molle tendono a contrarsi superando la rigidità martensitica del filo, riportando perciò lo specchio nella sua posizione di riposo.(fig. 52)

²⁶ Cfr., Butera, F. et al., *Motor-vehicle Rear View Mirror having an Anti-glare Shape Memory Actuating Device*, 26/12/2000, United States Patent n° 6,164, 784, Magneti Marelli S.p.A.



(Fig. 52): Vista del sistema di attuazione a memoria di forma dello specchio retrovisore tramite un filo (F).

Come si può osservare dalla figura sopra il sistema di attuazione sembra abbastanza semplice, tuttavia non è specificato in che modo il filo SMA riceva l'impulso elettrico per essere azionato.

United States Patent: Dispositivo di chiusura degli sportelli, CRF Società Consortile per Azioni²⁷

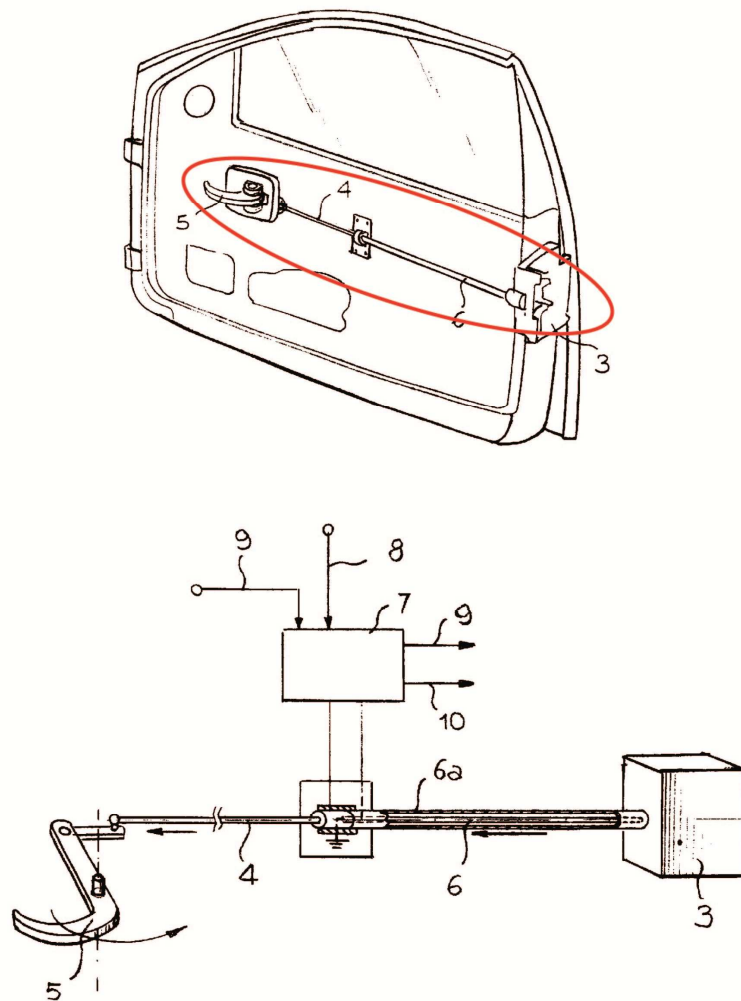
Lo scopo di questa invenzione è quello di realizzare una serratura per sportelli automobilistici, in grado di essere aperta e chiusa grazie ad un attuatore a memoria di forma alimentato elettricamente. Il congegno di attuazione è costituito da un filo a memoria di forma Nichel-Titanio alimentato elettricamente, inoltre questo filo è connesso ad un'asta rigida da una parte e al dente d'arresto della serratura dello sportello dall'altra.

Quando si vuole aprire la portiera dall'esterno del veicolo, si preme un pulsante sulla chiave di accensione, il quale invia un segnale ad una centralina che a sua volta alimenta elettricamente il filo SMA. Questo si surriscalda per effetto Joule recuperando la sua forma originaria nello stato austenitico, perciò si restringe generando un lavoro utile a far ruotare il dente d'arresto, solidale con il filo sesso, fino sbloccare la serratura. A questo punto si può aprire lo sportello attraverso la maniglia.

Fino a quando il pulsante sulla chiave non viene azionato nuovamente, la centralina continuerà ad alimentare il filo per impedirgli di raffreddarsi e di far chiudere la serratura. Quando si interrompe il passaggio di corrente il filo si raffredda, così l'azione di una molla di richiamo riporta il sistema nella condizione di partenza chiudendo perciò la serratura.

Nel caso in cui si debba aprire lo sportello dall'interno dell'abitacolo si fa ruotare manualmente una leva/maniglia posizionata sullo sportello che sblocca il dente d'arresto della serratura. In questo caso il filo SMA non deve manifestare l'effetto a memoria di forma, ma deve svolgere funzione di semplice trasmissione meccanica, poichè è la forza dell'utente la responsabile della movimentazione dei componenti coinvolti.(Fig. 53)

²⁷ Butera, F. et al., *Lock for Doors*, 29/03/2005, United States Patent n° US 6,871,519, B2, CRF Società Consortile per Azioni.



(Fig. 53): Sistema di attuazione SMA utilizzato per l'apertura della serratura di uno sportello d'automobile.

Il dispositivo illustrato è anche fornito di un sensore capace di "dialogare" con la centralina di controllo, il quale fornisce i dati circa la posizione del dente d'arresto della serratura. In questo modo il funzionamento dell'attuatore viene gestito con efficienza.

Per ragioni di sicurezza la presenza di una trasmissione meccanica che consenta l'apertura manuale delle portiere, deve essere fornita anche al portabagagli; questo per consentire sempre al passeggero di poter uscire dalla vettura, anche nel caso in cui si verifichi il bloccaggio accidentale di tutti gli sportelli.

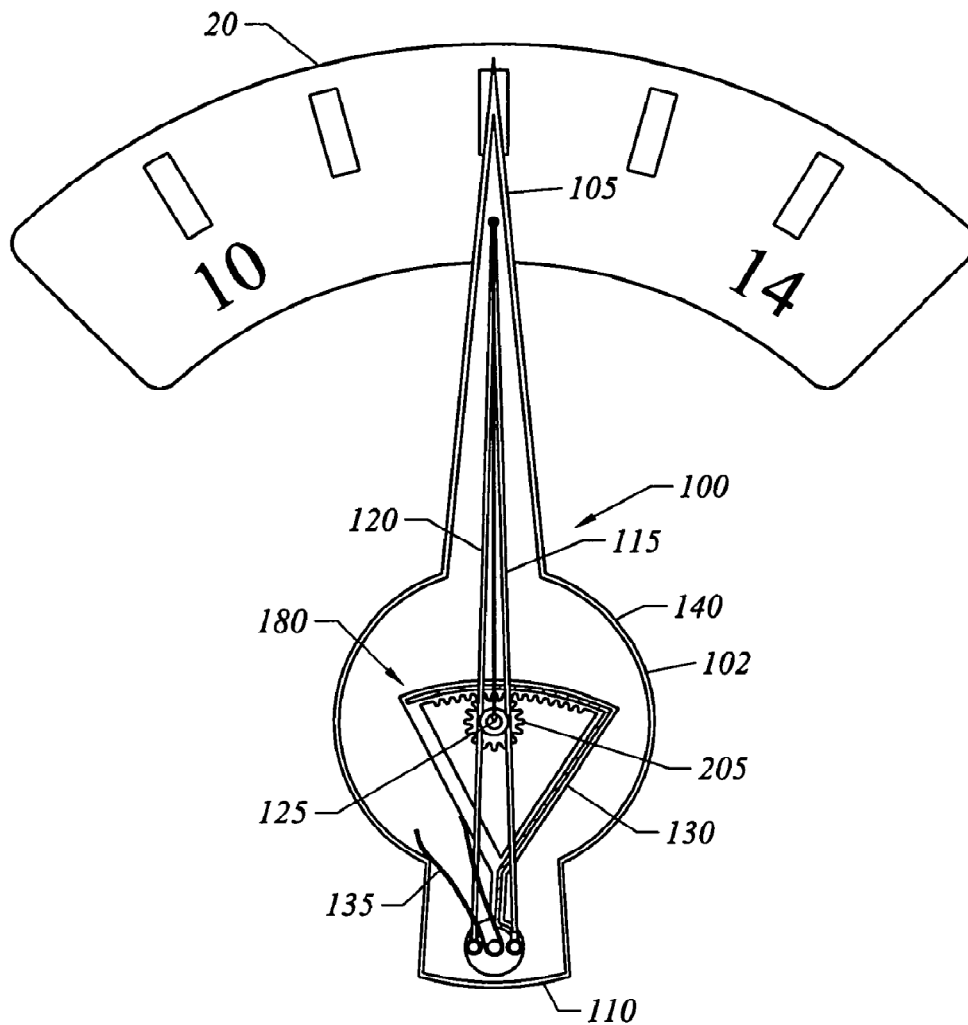
United States Patent: Lancetta del manometro con attuatore a memoria di forma integrato,
Alfmeier Prazision AG Baugruppen und Systemlosungen²⁸

La presente invenzione si riferisce alla movimentazione di una lancetta per l'indicatore del voltaggio della batteria di un autoveicolo, azionata grazie ad un attuatore a memoria di forma alimentato elettricamente.

In questo caso l'attuatore è costituito da due fili a memoria di forma, connessi tra loro nell'estremità appuntita della lancetta dell'indicatore. Tale attuatore è parte integrante della lancetta stessa e la sua attivazione è gestita da una centralina che fornisce corrente elettrica all'uno o all'altro filo SMA, in funzione del voltaggio di carica della batteria rilevato da un sistema di sensori. In altre parole quando la batteria del veicolo è prossima al massimo livello di carica, (indicato sulla destra della scala graduata) verrà attivato elettricamente il filo SMA di destra, che diminuendo la sua lunghezza, costringe la lancetta a spostarsi verso il valore massimo della carica. Quando viceversa il livello di carica della batteria sta diminuendo si azionerà in modo corrispondente il filo SMA di sinistra, che porta la lancetta sui valori minimi di carica. Questa lancetta è guidata tramite un sistema ad ingranaggi dentati che ne consentono la rotazione.

Inoltre la precisione nei movimenti e la conseguente assenza di giochi tra i componenti è assicurata da una molla a forma di forcina, la quale evita un accidentale ritorno elastico della lancetta. In questo modo per mettere in rotazione la lancetta in entrambe le direzioni, il filo a memoria di forma deve vincere la forza della molla; questo si verifica soltanto quando grazie al passaggio di corrente il filo si scalda e nel ritornare allo stato austenitico sviluppa lavoro meccanico sufficiente.(fig. 54)

²⁸ Cfr., MacGregor, M. et al., *Gauge Pointer with Integrated Shape Memory Alloy Actuator*, 01/08/2006, United States Patent n° US 7,082, 890 B2, Alfmeier Prazision AG Baugruppen und Systemlosungen.



(Fig. 54): Strumento indicatore carica batteria di un'automobile. La rotazione della lancetta avviene grazie a due fili a memoria di forma (115 - 120).

In altre circostanze tale congegno di attuazione può essere utilizzato per l'indicatore del livello di carburante; dove si leggono tipicamente la lettera "E" che indica empty (vuoto), la "F" full (pieno). In ogni caso tale sistema può venire impiegato in tutti quegli indicatori che prevedono un movimento lento della lancetta, se ne esclude infatti l'utilizzo nell'indicatore di velocità del veicolo, poichè i tempi di risposta del componente SMA sarebbero inefficaci rispetto alla funzione richiesta.

United States Patent: Sistema di chiusura ad elevata sicurezza, Nitinol Technologies Inc²⁹.

Questa invenzione consiste in un congegno di chiusura per la serratura di accensione di un'automobile. In modo generico esso rientra nella categoria di tutti quei dispositivi ausiliari che servono a proteggere i veicoli dai furti.

Nello specifico, questo sistema consiste in un lucchetto il cui chiavistello di apertura/chiusura a forma di "U" rovesciata, viene vincolato al corpo centrale del lucchetto stesso grazie a degli attuatori a memoria di forma alimentati elettricamente. In base a come questi attuatori, che consistono in due fili SMA, vengono attivati si mettono in movimento dei perni che in base alla posizione in cui si trovano permettono o meno l'apertura del lucchetto.

Infine questo lucchetto è responsabile di chiudere una cover protettiva metallica posizionata intorno alla serratura di accensione dell'automobile, per impedire che questa venga manomessa, costituendo perciò un sistema di protezione contro i furti.

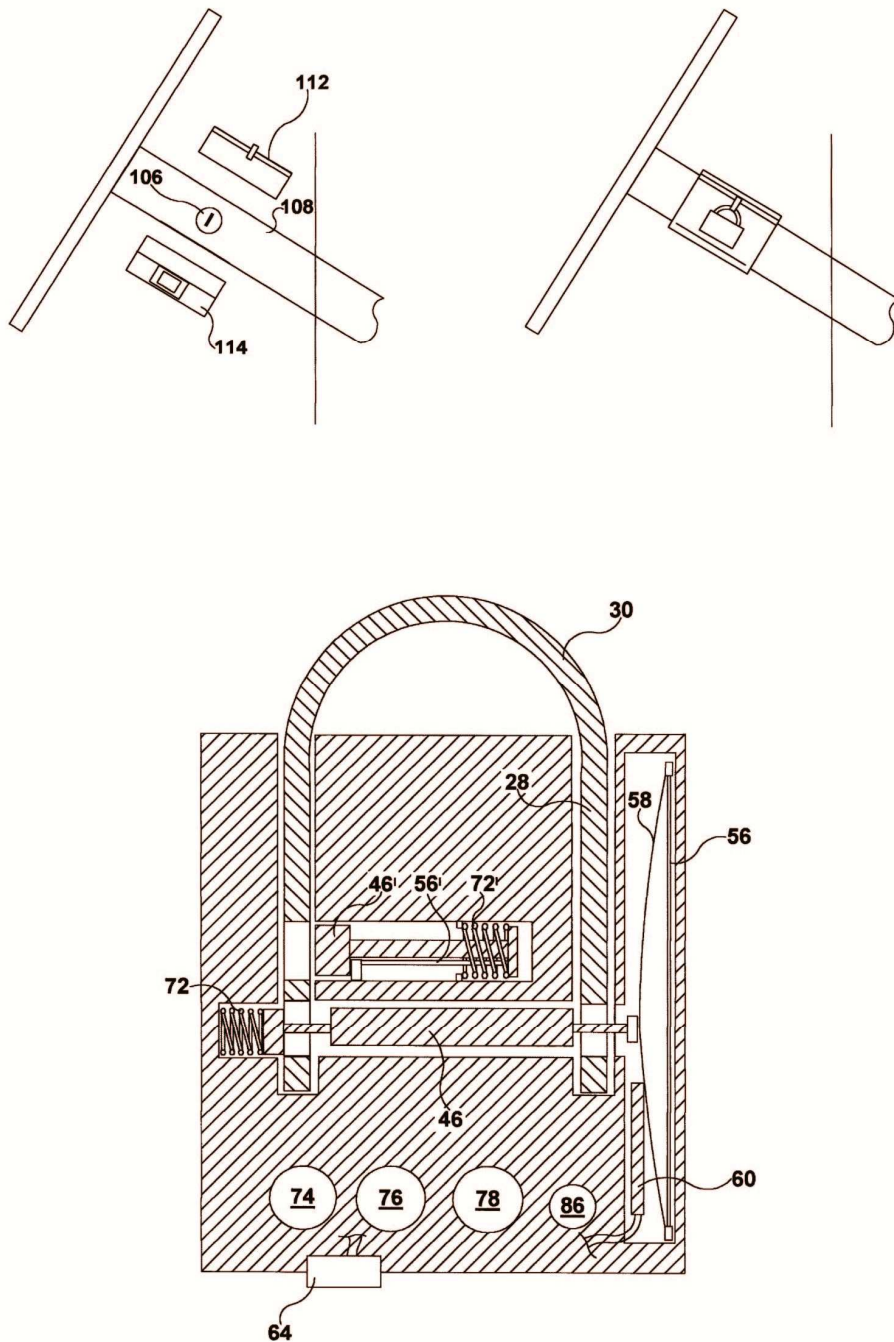
I due fili SMA che svolgono funzione di attuatori sono rappresentati (figura 55) dai numeri 56 e 56'. Il filo principale è il 56 a cui è collegata una lamella metallica flessibile, al passaggio di corrente essa segue il restringimento del componente stesso, deformandosi in modo elastico al fine di far traslare un perno di bloccaggio nella posizione di apertura del lucchetto. Questo perno è poi ulteriormente connesso sull'estemità opposta ad una molla di ripristino, che riporta il sistema nella posizione di chiusura, una volta interrotto il passaggio di corrente sul filo.

Per rendere il congegno ancora più efficace è stato previsto un secondo perno di bloccaggio movimentato dal filo SMA 56'. Al contrario del primo questo attuatore mantiene chiuso il chiavistello del lucchetto quando è alimentato da corrente; essendo quindi nello stato austenitico vince l'azione della forza di richiamo di una molla di ripristino. In altre parole il meccanismo di funzionamento degli attuatori a memoria di forma è stato progettato in modo che per aprire o chiudere il lucchetto si debba alimentare un solo filo SMA per volta.

Inoltre l'utente può aprire o chiudere il lucchetto grazie ad una manopola a combinazione numerica, la quale funziona come un interruttore, che collegato ad una batteria fornisce la giusta alimentazione elettrica al congegno per essere attivato come descritto.

²⁹ Cfr., Gerald, J., J. et al., *High Security Lock*, 09/02/1999, United States Patent n° 5,868,013, Nitinol Technologies Inc.

A mio parere tralasciando l'efficacia del lucchetto in sè, risulta discutibile il fatto che esso chiuda una cover posta intorno al perno dello sterzo. Infatti non potendo realizzare una cover universale bisognerebbe progettare una specifica per ogni modello di automobile moderna, che si adatti alla conformazione della scocca che racchiude la serratura stessa.



(Fig. 55): In alto si vede la cover che isola la serratura di accensione 106 del veicolo. In basso una sezione del lucchetto, i cui attuatori SMA sono rappresentati con i numeri 56 e 56'.

United States Patent: Cambio con attuatore integrato in lega a memoria di forma, Grand Haven Stamped Products, a division of JSJ Corporation³⁰

La presente invenzione riguarda il movimento del meccanismo della leva del cambio di un autoveicolo che indica la posizione di parcheggio (park "P"). Tale operazione avviene grazie ad un attuatore Nichel-Titanio a memoria di forma

Un filo SMA, collegato ad un circuito elettrico, si connette su un meccanismo d'arresto. Quest'ultimo è responsabile di mantenere la leva del cambio ben ferma su una precisa posizione, sia sulle merce di trazione che sulla posizione di parcheggio. Quando tramite impulsi elettrici il filo a memoria di forma viene attivato, riduce la sua lunghezza costringendo questo meccanismo a ruotare su un suo asse e, a portarsi sulla posizione di rilascio della leva del cambio, consentendo perciò al guidatore di spostarla.

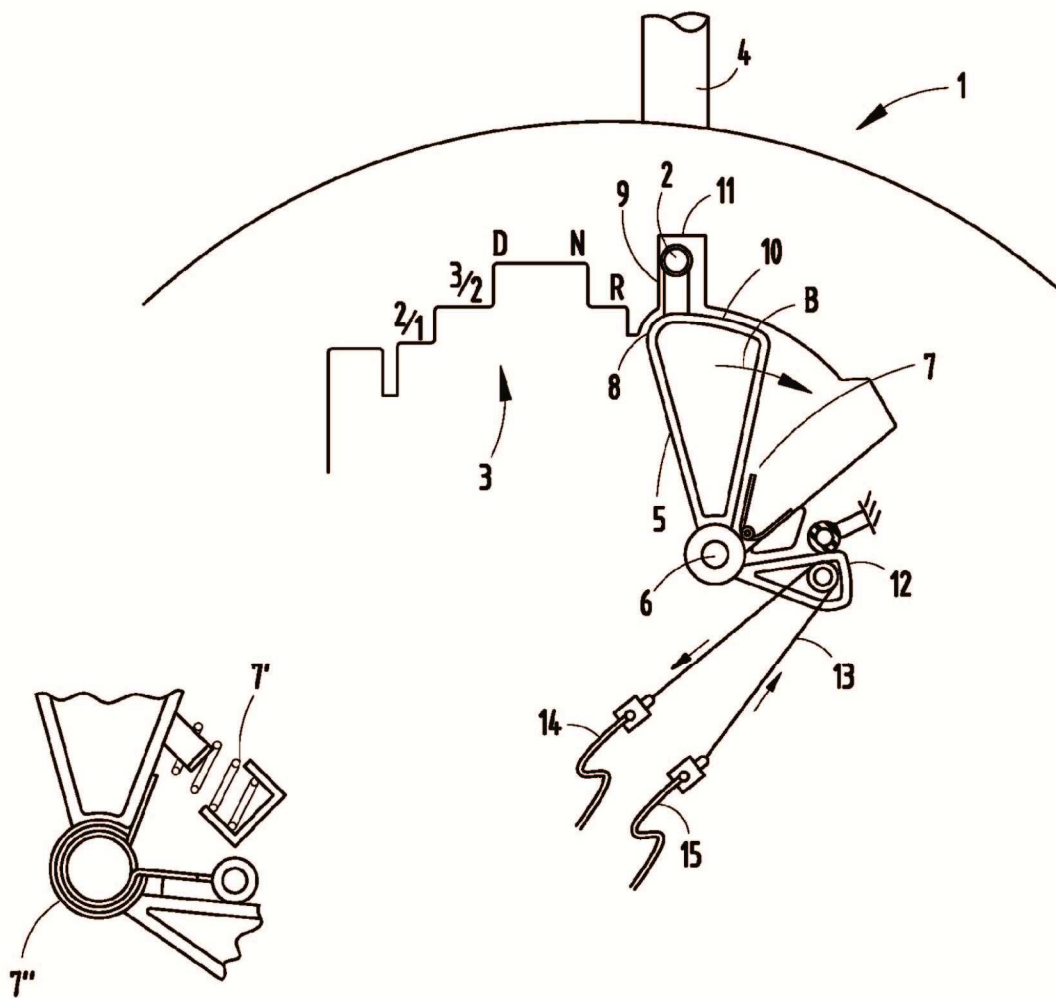
In questa particolare applicazione gli impulsi elettrici devono essere opportunamente calibrati, infatti vengono gestiti da un dispositivo di controllo elettronico (non visibile in figura) in grado di "dialogare" con il pedale della frizione, tramite un sensore capace di rilevare ogni minima pressione su di esso.

Inoltre vari elementi di ripristino e di tenuta (molle di differenti conformazioni) sono responsabili di mantenere il suddetto meccanismo d'arresto sulla posizione prestabilita, per evitare giochi di tolleranze indesiderati tra i vari ingranaggi del cambio. Per cui il sistema di attuazione deve essere in grado di vincere la somma delle forze applicate dai singoli elementi di ripristino, per poter rilasciare il meccanismo d'arresto e movimentare infine la leva del cambio.

Dopo l'effettivo spostamento di questa leva e il rilascio della frizione, il sistema di controllo elettronico smette di inviare impulsi elettrici al filo SMA, il quale raffreddandosi ritorna nel suo stato iniziale martensitico.

A questo punto l'attuatore non è più in grado di vincere la risultante delle forze dell'intero sistema di ripristino, che per questo riporta gradualmente il meccanismo in posizione di bloccaggio della leva del cambio.(fig 56)

³⁰ Cfr., Mitteer, M., D., *Shifter with Actuator Incorporating Shape memory Alloy*, 19/10/2010, United States Patent n° US 7, 814, 810 B2, Grand Haven Stamped Products, a division of JSJ Corporation.



(Fig. 56): Illustrazione di una delle possibili configurazioni per un sistema di attuazione SMA impiegato per bloccare e rilasciare la leva del cambio di un veicolo a motore.

6.3 Area posteriore del veicolo

European Patent Specification: Attuatore a memoria di forma per sbloccare lo sportello di accesso al tappo carburante, con elemento di collegamento flessibile associato all'attuatore, Fiat Group Automobiles S.p.A.³¹

Questo documento illustra il funzionamento di un attuatore elettrico a memoria di forma, impiegato per consentire l'apertura e la chiusura dello sportellino d'accesso al tappo per il rifornimento carburante di un'automobile.

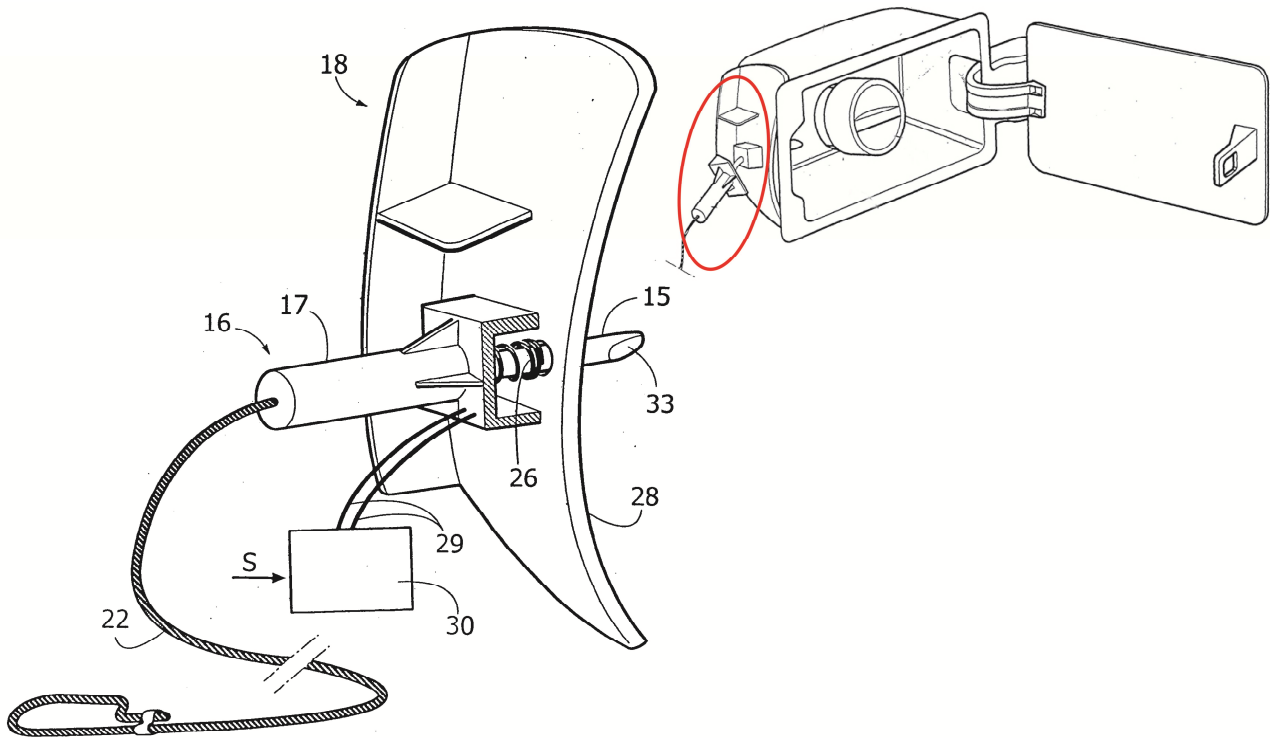
L'attuatore è costituito da un singolo filo NiTiNol alloggiato in un'apposita cover protettiva. Quando l'utente aziona il comando di apertura dello sportellino, un'apposita centralina invia un impulso elettrico al circuito connesso con il filo SMA, il quale scaldandosi per effetto Joule si restringe facendo arretrare con sé lo spinotto, a cui è solidale, dalla posizione di bloccaggio verso quella di rilascio dello sportellino, permettendone così l'apertura per l'accesso al tappo del serbatoio carburante.

Successivamente l'utente disinserisce il comando che gestisce l'apertura e la chiusura dello sportellino che a questo punto non invia più corrente al filo a memoria di forma. Perciò esso inizia a raffreddarsi diventando più malleabile a causa del progressivo passaggio verso la struttura cristallina martensitica. A questo punto lo spinotto viene riportato nella sua posizione iniziale di bloccaggio grazie all'azione di una molla di richiamo/ripristino, che distendendosi riesce a vincere la forza del filo nello stato martensitico. Lo sportellino viene così richiuso.

La peculiarità di questo congegno è che risulta particolarmente compatto, poichè perfino la molla di richiamo è posizionata intorno al filo SMA in asse con lo spinotto.

³¹ Tosco, F. et al., *Fuel Filling Lid for a Motor-vehicle, with a Shape Memory Actuator Device for Unlocking the Lid and a Flexible Connecting Member Associated with the Actuator Device*, 07/04/2010, European Patent Specification EP 2 082 914 B1, Fiat Group Automobiles S.p.A.

Osservando la figura 57 la zona ingrandita, pone l'attenzione sul meccanismo di attuazione.



(Fig. 57): Particolare dell'intero meccanismo di apertura/chiusura dello sportellino.

È presente un filo di sicurezza grazie al quale si riesce manualmente a far scorrere lo spinotto, qualora per qualche motivo lo sportellino non dovesse aprirsi con l'apposito comando elettrico.

United States Patent: Maniglia azionata da un "materiale attivo", GM Global Technology Operations³²

La presente invenzione consiste in un sistema realizzato con un "*materiale attivo*", capace di variare su richiesta la forma di una maniglia presente all'interno del portellone portabagagli di un'autoveicolo.

Il sistema di attuazione è costituito da due molle in "materiale attivo" azionate elettricamente per consentire il passaggio del componente da una posizione all'altra. Per materiale attivo s'intendono le SMA, i polimeri a memoria di forma, materiali piezoelettrici, polimeri elettroattivi e simili.

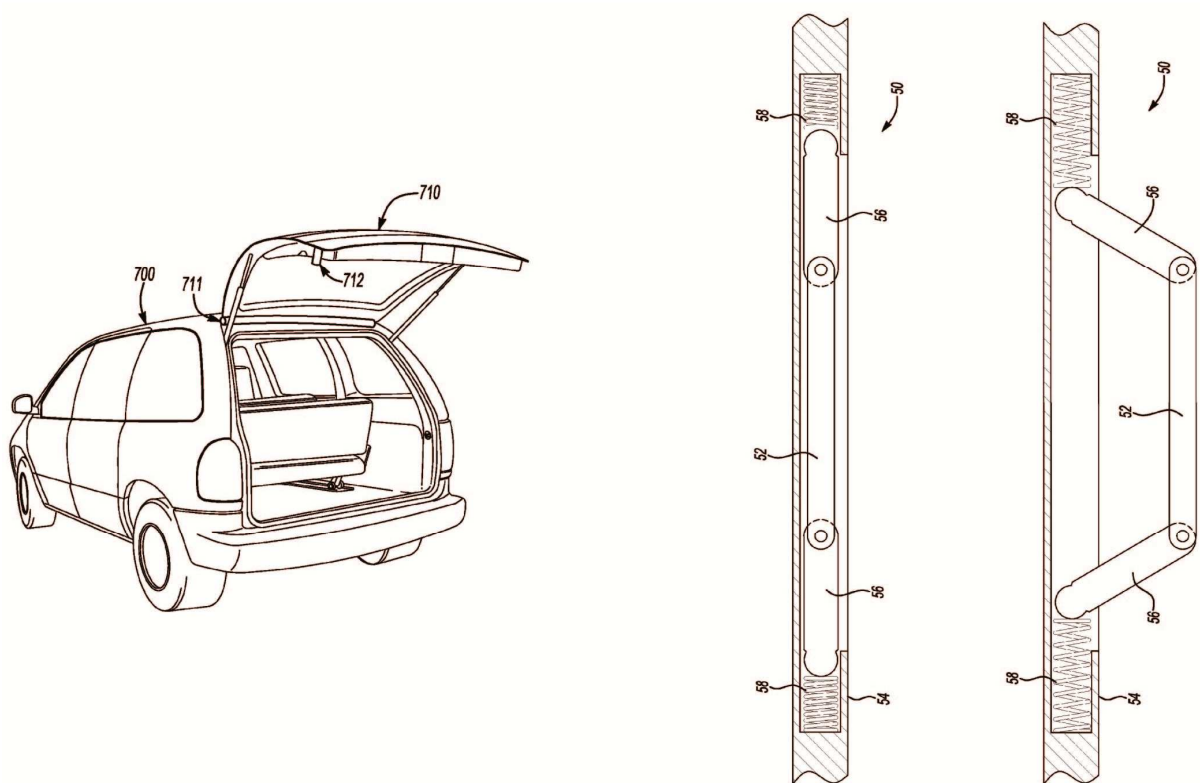
Viste le funzioni richieste per il corretto funzionamento del sistema, due molle in lega a memoria di forma sarebbero efficaci per lo scopo.

Questa maniglia possiede la capacità di assumere due posizioni: la prima di riposo in cui è un tutt'uno con i pannelli degli interni del veicolo, la seconda posizione in cui fuoriesce per essere afferrata. Più precisamente come si osserva in figura 58 il componente è costituito da tre parti principali incernierate tra loro, per consentire alla parte centrale di sporgere verso l'esterno quando le altre due la comprimono.

Quando il portabagagli viene aperto un pulsante viene rilasciato consentendo all'impianto elettrico del veicolo di alimentare elettricamente le due molle SMA, poste alle estremità della maniglia alloggiata in apposite cavità cilindriche. Una volta raggiunta la temperatura di trasformazione di fase austenitica le due molle cominciano ad estendersi, costirngendo perciò la maniglia a fuoriuscire dalla sua sede per assumere la posizione operativa.

L'utente la afferrerà al momento in cui dovrà richiudere il portellone. Dopo aver compiuto questa operazione il pulsante viene schiacciato nuovamente, perciò il passaggio di corrente viene interrotto e la maniglia ritorna nella sua posizione di partenza nel pannello interno del portabagagli.

³² Cfr., Browne, A., L. et al., *Active Material Enabled Self-actuated Decives*, 15/12/2009, United States Patent n° US 7,631, 915 B2, GM Global Technology Operations.



(Fig. 58): Illustrazione del sistema di azionamento della maniglia portabagagli di un'automobile.

In questo documento il componente maniglia in sè viene proposto in varie configurazioni, tuttavia in questa sede per brevità ne è stata descritta solo una.

Inoltre questo sistema, a prescindere dal numero di elementi che lo compongono, è stato pensato in generale per tutta una serie di applicazioni interne al veicolo, in cui la maniglia compare effettivamente come tale solo su richiesta, non rimanendo cioè in una posizione stabile.

Motore con componenti SMA per convertire calore in energia elettrica, General Motors S.p.A.³³

Oltre il 60% dell'energia termica generata da un'automobile viene persa come calore di scarto, di questa energia circa il 90% viene classificata come calore a "basso grado termico" poichè le temperature sono inferiori ai 200°C. Molte tecnologie come il termoelettrico sono state proposte come mezzi per raccogliere questa energia termica perduta. Tra questi anche i motori SMA sono degli ottimi candidati per la conversione di questo calore in lavoro meccanico. Inizialmente proposti negli anni '60 e soggetti a sviluppi negli anni '70 notevoli ostacoli tecnici hanno impedito che questa tecnologia potesse spostarsi da curiosità scientifica a realtà tangibile.

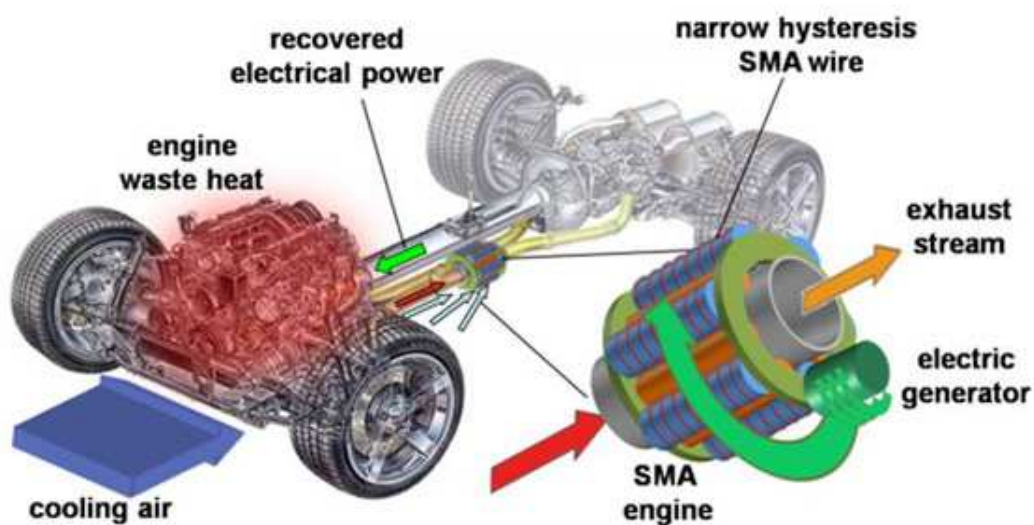
Questo documento fornisce una panoramica dei lavori in corso sui motori di calore SMA sotto il DOE (Department of Energy) statunitense per iniziativa dell' ARPA-E (Advanced Research Projects Agency - Energy).

Nei motori a combustione circa il 50% dell'energia del combustibile viene dissipata come calore di scarico, inoltre circa i $\frac{2}{3}$ dell'energia elettrica ricavata da un motore è persa nella conversione. L'obiettivo in questo progetto è quello di fornire un meccanismo per catturare calore a bassa qualità per generare energia riutilizzabile. La tecnologia sviluppata è un motore leggero, ad alta densità di potenza in lega a memoria di forma, che recupera l'energia di scarto a basso grado termico ($T < 200$ °C). Questo motore sfrutta le SMA che intrinsecamente trasformano il calore in lavoro meccanico, inoltre esso funziona non solo in aria ma anche a contatto con i liquidi. I benefici di questa raccolta dell'energia di scarto vengono utilizzati per migliorare l'efficienza di propulsori ibridi. Questo progetto patrocinato da General Motors, Dynalloy, Inc., e l'università del Michigan si pone come obiettivo quello di realizzare un motore termico in lega a memoria di forma in grado di sviluppare una potenza specifica in uscita di 1 W per grammo di SMA, che rappresenta un progresso significativo rispetto allo stato dell'arte, per i sistemi a stato solido per il recupero dell'energia termica (da 6 a 10 volte migliore di un motore termoelettrico). Le leghe a memoria di forma sono particolarmente adatte per questo tipo di applicazione, a causa della natura della loro temperatura di trasformazione di fase ed energia elevata.

³³ Cfr., Browne, A., L. et al., *SMA Heat Engines: Advancing From a Scientific Curiosity to a Practical Reality*, International Workshop SMART MATERIALS, STRUCTURES & NDT in AEROSPACE Conference NDT in Canada 2011, 2 - 4 November 2011, Montreal, Quebec, Canada.

Un primo dispositivo tradizionale è costituito da un motore termico rotativo che funziona per mezzo di un riscaldamento di un anello di SMA posto intorno a due pulegge. La contrazione termica delle SMA crea un momento torcente la cui potenza può essere estratta da un generatore.

È Stato poi sviluppato successivamente un nuovo motore termico progettato per operare sia a contatto con l'aria che nei liquidi. Attraverso un sistema di convogliatori d'aria, gli avvolgimenti SMA vengono riscaldati fino a contrarsi e raffreddati per farli ritornare alla loro lunghezza originaria; ciò avviene grazie al calore dei gas di scarico e dal flusso refrigerante, senza compromettere l'efficienza del propulsore del veicolo. Queste fasi cicliche di attivazione/deattivazione dei componenti in lega consentiranno di generare lavoro con una piccola massa grazie all'elevata frequenza di risposta degli elementi SMA. Il lavoro in uscita da questo motore può essere utilizzato come lavoro meccanico oppure per azionare dei generatori elettrici, i quali trasferiscono l'energia accumulata per ricaricare le batterie di un veicolo elettrico oppure ibrido.(fig. 59)



(Fig. 59)

Sistema di compensazione della viscosità dell'olio

Sistema sviluppato per compensare l'effetto della variazione di temperatura dell'olio nelle trasmissioni automobilistiche (Daimler-Benz, Germany)¹⁰.

¹⁰ Cfr., PSTL, Ott. 2000, *Leghe ... applicazioni*, Cit., URL (<www.vincenzoarrichiello.com/pdfs/lmf-pstl.pdf>), 10/07/2012, p.15.

NOTA:

Di questi progetti, brevetti e concept riportati in questo capitolo, solo il motore con componenti SMA è stato realizzato con l'ottica di essere prodotto non solo come prototipo in laboratorio ma per essere concretamente utilizzato come sistema di ricarica delle batterie di un veicolo. Di tutti gli altri congegni non v'è traccia di effettiva applicazione.

Vista l'analisi preliminare sulle caratteristiche ed il comportamento delle leghe a memoria di forma, il brief è quello di sfruttare i loro punti di forza per realizzare un dispositivo SMA per l'automotive, in grado di portare delle migliorie oppure dei vantaggi nuovi rispetto ai congegni tutt'ora in uso.

7.1 Individuazione aree d'intervento

Considerando lo "stato dell'arte" e quindi le macro aree in cui è stato studiato lo sviluppo di componenti funzionanti grazie alle SMA, si evince che rispetto al sedile si possono individuare delle zone di interesse per il progetto di un nuovo congegno a memoria di forma.

A mio parere ciò dipende sia dall'interesse che una seduta suscita nel settore del disegno industriale, sia per la complessità e le aperte possibilità di sviluppo che un sedile automobilistico offre nel suo contesto d'uso.

Ad esempio tenendo presente che questo è il componente con cui un passeggero rimane a contatto più a lungo, quando utilizza un'auto, la sfida attuale e futura sembra rivolgersi ad un continuo miglioramento del comfort e della sicurezza del "sistema sedile" stesso. Infatti vengono prodotti optional sempre nuovi studiati per ridurre al minimo lo stress e l'affaticamento dovuto alla guida prolungata; infine sistemi per rendere l'ergonomia del sedile estremamente personalizzabile per "accomodare" le necessità degli utenti più disparati, determinando perciò l'abbattimento del calo d'attenzione alla guida, che pregiudica in ultimo la sicurezza sulle strade.

Per questi motivi si è reputato stimolante lavorare su un progetto che riguardasse i sedili.

7.1.1 Il sedile: benchmarking

Di seguito si riportano delle immagini di sedili per autovetture classificati secondo i diversi segmenti auto. la Commissione europea, ritiene ufficiale una classificazione per lettere in sostituzione di quella statunitense, la quale viene semplificata in sei voci che dividono le auto principalmente per dimensione:

Segmento A - "mini cars": identifica auto molto piccole, principalmente citycar

Segmento B - "small cars": identifica piccole utilitarie

Segmento C - "medium cars": identifica berline utilitarie medie

Segmento D - "large cars": identifica berline di medio grandi dimensioni

Segmento E - "executive cars": identifica berline di grandi dimensioni

Segmento F - "luxury cars": identifica lussuose berline di grandi dimensioni

Nonostante questa classificazione, che viene ripresa e confermata ormai sia da enti di analisi vendita esterni alla commissione e dalla stampa, non è ufficializzato alcun criterio specifico preso in considerazione per la classificazione del veicolo. Quindi non pervengono, quanti sono per esempio, i metri minimi di lunghezza per definire un'automobile media o grande o i criteri per definirla lussuosa. Ogni classificazione giustificata da un dato preciso è quindi da considerarsi soggettiva. A questa classificazione spesso si sono aggiunti altri segmenti che trovano molte meno conferme, sia all'interno della stessa commissione europea, sia fra enti terzi:

Infatti si utilizza la lettera S per identificare le vetture sportive, soprattutto quelle di grande potenza come le "super cars", talvolta invece si utilizza la lettera J per indicare i SUV (Sport Utility Vehicle) ed i fuoristrada³⁴.

³⁴ Cfr., Wikipedia l'enciclopedia libera, *Segmenti di automobili in Europa*, URL(<http://it.wikipedia.org/wiki/Segmenti_di_automobili_in_Europa>), 26/11/2012.

ESEMPI DI SEDILI PER SEGMENTI AUTO



Smart Fortwo

Segmento A

“mini cars”



Toyota IQ



Volkswagen Polo

Segmento B

“small cars”



Ford Fiesta



BMW Serie 1

Segmento C

“medium cars”



Opel Astra



Audi A4

Segmento D

“large cars”



Mercedes Classe C



BMW Serie 5

Segmento E
“executive cars”



Mercedes Classe E



Maybach Landoutlet

Segmento F
“luxury cars”



Rolls Royce Phantom Dragon



Land Rover Defender

Segmento J
“SUV + offroad”



Range Rover Evoque



Ferrari 458 Italia

Segmento S
“super cars”



Porsche 911 GT3

7.1.2 Componenti e materiali presenti all'interno del sedile di un autoveicolo

Con l'obiettivo di individuare al meglio le aree di interesse progettuale per l'applicazione delle leghe a memoria di forma in un sedile per automobile, sono stati esaminati i diversi componenti che lo costituiscono e con quali materiali sono realizzati.

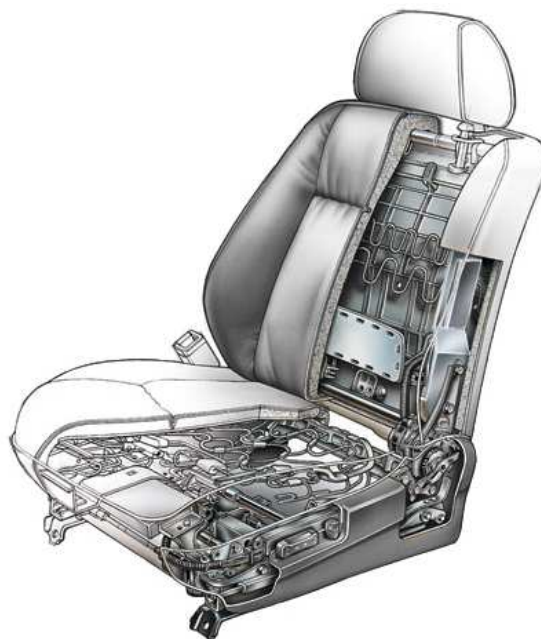
Tralasciando al momento gli optional tipici dell'alta gamma automobilistica, individuiamo quelli che sono gli elementi che non possono mancare per realizzare un sedile.

Tutto comincia dal telaio il quale costituisce la struttura portante dell'intero sistema. Esso viene generalmente composto da due parti principali: il telaio inferiore, con i binari guida e le relative slitte di scorrimento, più la struttura della seduta; e il telaio superiore dello schienale.

Questa struttura è terminata quando vengono assemblati il supporto per le gambe, costituito da una piastra opportunamente sagomata e quello per la schiena, realizzato di solito con dei fili metallici ondulati più una piastra a maggiore rigidità specifica per la zona lombare. Infine nella parte superiore viene applicato il poggiatesta, generalmente regolabile in altezza.

Successivamente si montano i cuscini morbidi e deformabili, che sono i componenti responsabili del comfort del passeggero. Su di essi viene applicata prima del loro fissaggio al telaio, il rivestimento, il quale rappresenta la parte che entra fisicamente a contatto con l'utente.

Per ultimo vengono montati tutti i pannelli e le scocche che rivestono la base del sedile le quali impediscono di raggiungere con le mani delle zone in cui ci si potrebbe ferire, a causa della movimentazione di ingranaggi; inoltre possono costituire l'alloggiamento dei comandi per le regolazioni del sedile e per l'innesto della cintura di sicurezza. (fig. 60)



(Fig. 60):
Spaccato di un generico
sedile per autoveicolo.

In un sedile così composto risultano tuttavia diversi i materiali impiegati, scelti appositamente per assolvere alle funzioni specifiche di ogni singolo componente.

Il telaio

Questa struttura può essere realizzata con l'assemblaggio di diversi scatolati metallici sagomati e realizzati fino a circa un decennio fa completamente in acciaio. Questo era infatti l'unico materiale in grado di assicurare le giuste proprietà di rigidità e resistenza, tipiche di un elemento portante, studiato per sopportare per quanto possibile, certe soglie di sforzo in caso di incidente per proteggere l'incolumità del passeggero. In anni più recenti le case automobilistiche hanno sempre mantenuto l'acciaio nei punti maggiormente sollecitati a rottura, in caso d'impatto, ma sono state aggiunte delle traverse in alluminio o magnesio, delle scocche polimeriche realizzate in materiali termoplastici caricati con fibre di vetro, nei punti meno sollecitati. Il tutto è stato fatto soprattutto per l'alleggerimento del sedile e nell'ottica più ampia di ridurre i consumi di carburante, poichè si deve muovere una massa minore.

Ad esempio le case automobilistiche Hyundai e Kia Motor Corporation dal 2007 hanno investito sull'impiego di una sempre crescente quantità di magnesio per realizzare la struttura del sedile e non solo all'interno di un'automobile³⁵.

Sono stati impiegati diversi processi di realizzazione:

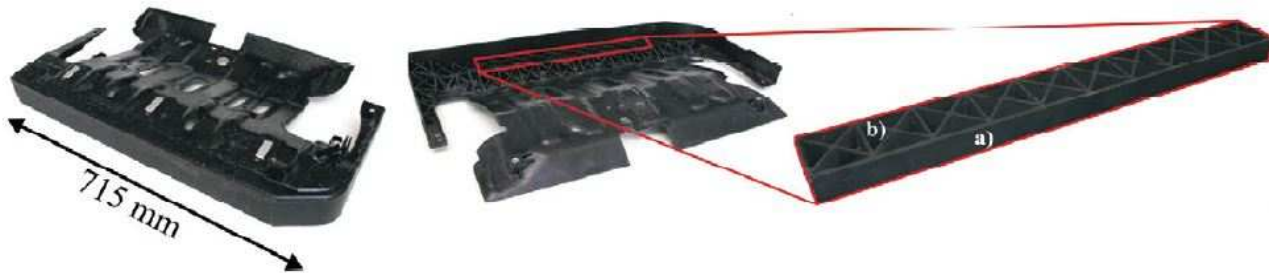
Estrusione dei montanti principali del telaio superiore e di quello inferiore in lega di magnesio, successiva piegatura a freddo per conferirgli la forma desiderata e saldatura finale dei vari pezzi. Questo ha comportato una riduzione di peso del 40% (circa 6 Kg) rispetto ad un telaio equivalente completamente in acciaio.

Come processo alternativo è stato prodotto il telaio del sedile in pressofusione di una lega di magnesio come pezzo unico, rinforzato tramite traverse in acciaio. In questo caso oltre ad un ulteriore alleggerimento si è ridotto il numero dei componenti da 18 a 2.

Per la progettazione di strutture resistenti agli incidenti, vengono di solito presi in considerazione i metalli. Tuttavia, studi recenti, hanno dimostrato la possibilità di realizzare determinati componenti strutturali utilizzando materiali compositi termoplastici rinforzati con fibre di vetro, grazie alla loro capacità di assorbimento di energia in caso d'impatto e alle caratteristiche di leggerezza e resistenza.

³⁵ Cfr., Jae, J., K., et al., *Recent Development and Applications of Magnesium Alloys in the Hyundai and Kia Motors Corporation*, in ["Materials Transactions"], Vol. 49, N° 5, pp. 894-897, 2008.

In questo esempio è stato scelto un piano di seduta per un sedile automobilistico per dimostrare lo sviluppo di un progetto integrato e del suo processo produttivo, mirando alla riduzione del peso e ad un costo di produzione uguale o minore rispetto ad un identico componente realizzato con materiale metallico.(fig 61)



(Fig. 61): Piano di seduta realizzato in Polipropilene caricato fibra di vetro al 35%. Il componente è caratterizzato inferiormente da: a) pareti trasversali per il sostegno del passeggero, b) nervature di rinforzo per sopportare l'energia che si sviluppa in caso d'incidente.

Tale componente viene prodotto in tre parti:

Si parte da una lastra di PP termoformata e successivamente rifinita con il taglio ad acqua.

Dopo si termoforma un profilo che funge da guida d'appoggio per l'ultimo componente.

Grazie alla fusione ad ultrasuoni a circa 180°C, si fonde la parte di irrigidimento delle varie nervature opportunamente dimensionate, sul fondo del piano termoformato, in corrispondenza del profilo di battuta.

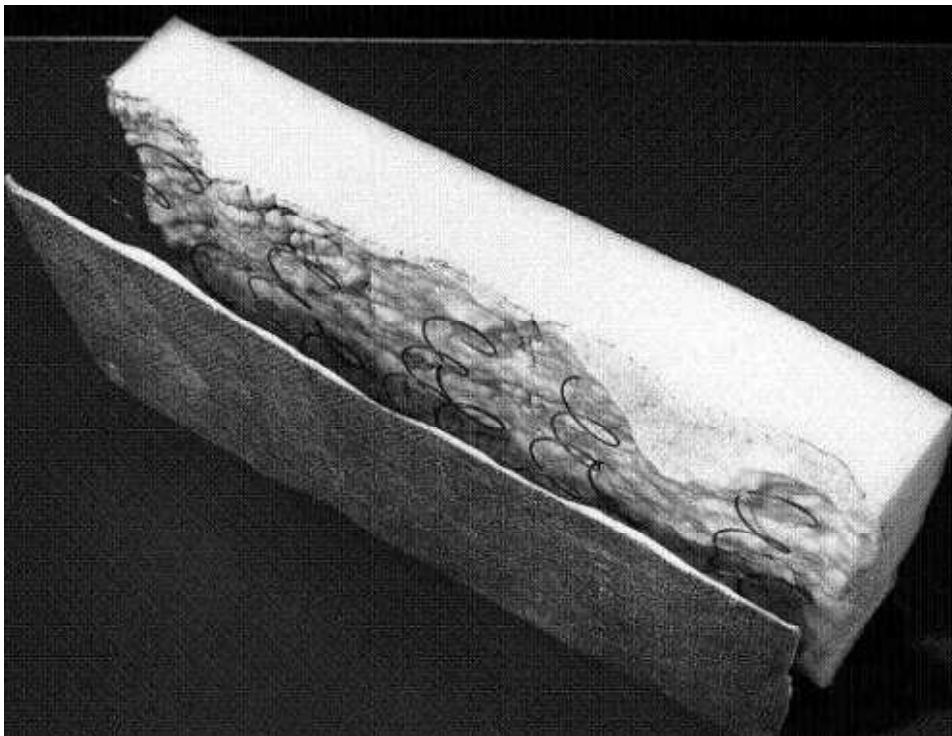
In ultimo il pezzo viene sottoposto a verifica attraverso dei test di resistenza a rottura, in cui viene simulato un incidente frontale³⁶.

³⁶ Cfr., Hufenbach, W., et al., *An Integral Design and Manufacturing Concept for Crash Resistant Textile and Long Fibre Reinforced Polypropylene Structural Components*, in ["Procedia Engineering"], n°10, Elsevier, 2011.

I cuscini

Fino agli anni '60 il settore manifatturiero dei sedili automobilistici utilizzava una schiuma di lattice per realizzarne i cuscini. Fino ad allora era considerato il materiale più adatto per garantire le richieste proprietà di comfort proprie di questi elementi.

Uno degli esempi tipici e meglio riusciti di un cuscino per un sedile di quegli anni, vede l'impiego di questa schiuma di lattice, con una densità variabile tra gli 80 ed i 130 Kg/m³, in cui sono state annegate delle molle per smorzare le vibrazioni dovute alle asperità del fondo stradale.(fig 62)



(Fig. 62): Porzione del cuscino di un sedile di fine anni '50.

Intorno al 1957 la produzione standard dei cuscini per auto avveniva con una schiuma di lattice. Si considerava infatti che questo materiale avesse il miglior rapporto sforzo/deformazione che garantisse il giusto comfort per un componente di questo tipo.

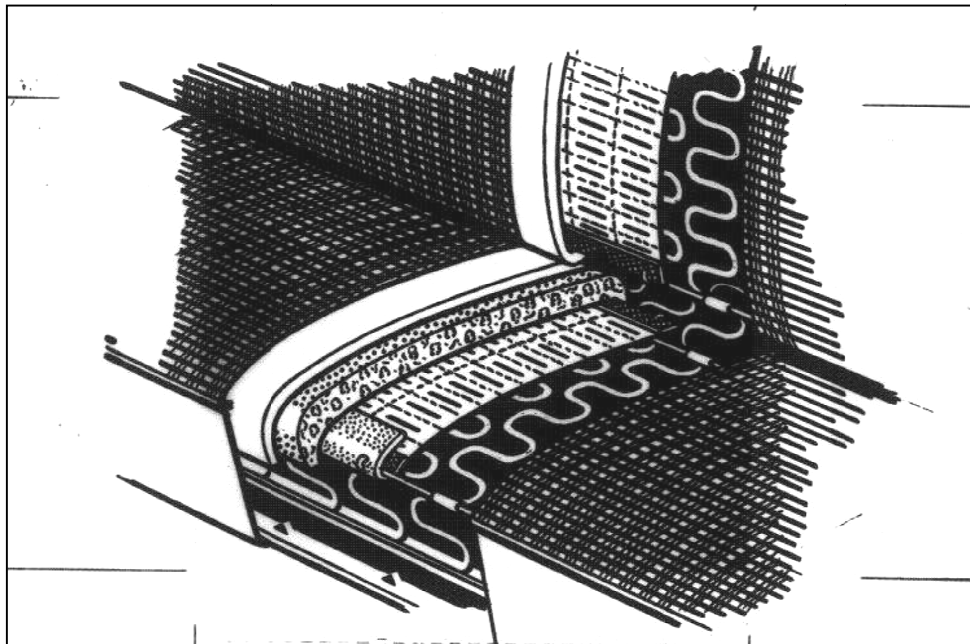
Tuttavia le certezze relative a questa schiuma sarebbero state presto messe in discussione grazie ad un nuovo materiale messo a punto dall'azienda DuPont appositamente per uso automobilistico. Si trattava di uno schiumato a bassa densità (circa la metà rispetto a quello in lattice), il quale oltre alle apprezzate caratteristiche di leggerezza, manteneva circa gli stessi valori di sforzo/deformazione dei

cuscini prodotti fino a quel momento. Il grande inconveniente era che costava molto produrlo. In ogni caso questo nuovo materiale aveva rimesso in gioco l'autorevolezza degli schiumati in lattice, aprendo così nuove strade verso la sperimentazione ed il perfezionamento di materiali innovativi da utilizzare per i sedili automotive.

Si giunge finalmente al Poliuretano espanso il quale segnerà una svolta decisiva all'interno del settore. Viene compreso subito che uno dei grandi vantaggi delle schiume poliuretatiche rispetto a quelle in lattice, è rappresentato dalla loro elevata resistenza alla compressione; inoltre il PU oltre a mostrare tempi rapidi di deformazione sotto un carico applicato, rivela tempi di rilassamento ancor più brevi, una volta rimosso tale carico.

Per questo a cominciare dagli anni '50 fino ai giorni nostri questo materiale ha subito un'evoluzione continua e costante nel tempo, grazie all'interesse riscontrato per questo tipo di applicazioni e non solo.

Nel 1961 negli USA è entrato in produzione un sedile costituito da un pad flessibile stampato in PU sostenuto da una caratteristica struttura a fili di alluminio con andamento sinusoidale.(fig 63)



(Fig. 63)

Intorno alla metà degli anni '70 circa il 90% delle imbottiture dei sedili viene realizzata con una schiuma poliuretana ad alta resilienza (HR High Resiliency) la quale offriva un miglioramento delle condizioni di produzione perchè si distaccava più velocemente dallo stampo.

Nel 1973 venne introdotto un nuovo standard di sicurezza FMVSS-302 riguardante l'infiammabilità del materiale, così per rientrare nella normativa venne studiato un nuovo isocianato con l'obiettivo di migliorare il comfort delle imbottiture, la resistenza a fatica, alla fiamma e alle basse emissioni di fumo³⁷.

Il processo grazie al quale si produce il poliuretano è chiamato Reaction Injection Molding (RIM) ovvero Iniezione Reattiva. È chiamata così perchè i componenti del materiale, isocianato e poliolo, sono contenuti in forma liquida in due cisterne separate. Al momento dell'iniezione che avviene a circa 35-40°C i componenti vengono introdotti in una camera di miscelazione e unità dosatrice, successivamente questa miscela liquida viene iniettata nello stampo dove si innescata una reazione chimica che fa espandere il materiale fino a farlo aderire all'impronta.

Prima di avviare tale processo è fondamentale calibrare opportunamente le % dei componenti da miscelare, poichè in base a questo si possono ottenere componenti dalla densità estremamente variabile: dal gommoso e flessibile, fino al rigido e strutturale se rinforzato con fibre di vetro.

Esiste inoltre la possibilità di inserire all'interno dello stampo degli inserti o dei generici componenti, i quali risulteranno completamente o parzialmente annegati nello stampato a processo ultimato. Questi offrono comfort, sicurezza e facilità di montaggio degli schiumati sul telaio del sedile.(fig 64)



(Fig. 64): Componenti di vario tipo solidali con il pad di poliuretano.

³⁷ Cfr., Ron Blair, G., et al., *Automotive Cushioning Through The Age*, in ["The Molded Polyurethane Foam Industry Panel"], September 2008.

Oggi le schiume di poliuretano flessibile sono ampiamente utilizzate nelle applicazioni ingegneristiche, soprattutto nei cuscini dei sedili automobilistici perchè forniscono gradi di comfort e protezione non ottenibili con nessun altro materiale singolo.

Nel gestire a livello progettuale le proprietà del materiale schiumato è possibile controllare il comfort sia in fase statica che dinamica dell'occupante del sedile.

Tuttavia, molti dei sedili progettati nell'industria automobilistica derivano da un'esperienza accumulata nel tempo, non da una chiara comprensione di tutte le proprietà delle schiume.

Ad ogni modo la proprietà fondamentale delle schiume per i cuscini dei sedili è la viscoelasticità, ovvero un recupero non immediato della forma di partenza anche dopo aver rimosso il carico applicato per deformarla. I tempi di rilassamento del componente schiumato dipendono dalla composizione chimica della schiuma stessa e quindi principalmente dalle percentuali di isocianato e poliolo mescolate per innescare la reazione. A proposito delle schiume poliuretatiche dei sedili, una volta che il passeggero si è alzato, esse impiegano qualche secondo per ritornare alla loro forma di partenza.

Risulta pertanto evidente che la complessità nella scelta opportuna di uno schiumato, sta nell'identificare un materiale che collasi in modo elastico sotto il peso del passeggero, senza che le sue proprietà intrinseche "degradino" al rilascio del carico. Per questo motivo è utile anche conoscere le costanti del tempo di rilassamento, che descrivono la velocità con cui lo sforzo decade in un esperimento Stress-rilassamento³⁸.

Negli ultimi anni lo sviluppo di "biopolioli" (cioè ricavati da fonti rinnovabili) ha suscitato l'attenzione delle industrie produttrici di poliuretani. Tuttavia i tempi di reazione dei sistemi che consentono di trasformare un concept in prodotto effettivo sono lunghi, quindi nonostante questi nuovi polioli a base vegetale (soia, palma ed altri...) siano stati sviluppati e proposti alle industrie, la maggiorparte dei cuscini per i sedili vengono comunque prodotti a partire di polioli a base di petrolio. Per adesso i test effettuati hanno dimostrato che nei sedili automobilistici solo il 5% della massa necessaria può essere prodotta tramite questi biopolioli, ma livelli di gran lunga superiori possono essere raggiunti. Queste valutazioni sono importanti per via dell'enorme impatto ambientale che questi materiali normalmente possiedono. Infatti per i poliuretani tradizionali non esiste un vero e proprio sistema di riciclaggio, infatti vengono utilizzati per ricavarne energia dalla combustione.

³⁸ Cfr., Deng, R., et al., *Flexible Polyurethane Foam Modelling and Identification of Viscoelastic Parameters for Automotive Seating Applications*, in ["Journal of Sound and Vibration"], 262, Academic Press, pp. 1-6, 2003.

Le imbottiture fibrose sintetiche

Sempre con l'intento della ricerca costante di un miglioramento, parallelamente al PU sono state sviluppate delle altre tipologie di imbottiti da utilizzare per i cuscini, cioè fibre vegetali e animali (cotone, cocco e peli di maiale).(fig 65)



(Fig. 65):Poliestere; sulla destra due esempi di cuscino realizzati con queste fibre.

Le prime ad essere prodotte furono negli anni '70 le fibre di poliestere commercializzate dalla DuPont sotto il nome di "Pneumacel". Questi venivano realizzati in fogli e successivamente formati per ottenere sia i cuscini della seduta che quelli dello schienale, grazie agli stampi con cui si producono le lamiere. Tuttavia per assicurare la necessaria quantità di deformazione al cuscino schiacciato dal passeggero, fu necessario aggiungere un pad di poliuretano insieme con il poliestere. Nel corso degli anni sono state perfezionate nuove fibre di varia natura che hanno portato numerosi vantaggi rispetto ai cuscini realizzati interamente in PU:

Assenza di collanti ed emissioni pericolose.

I cuscini risultano dal 10 al 20% più leggeri rispetto ai sedili in schiuma PU, senza che sia stata ridotta la resistenza al carico applicato.

Sono fino a 10 volte più traspiranti.

Possono essere modellati con differenti densità.

Possiedono livelli di risonanza alle vibrazioni minori e quindi risultano più comodi.

Hanno consentito di realizzare il cosiddetto "sedile sottile".

Tuttavia nonostante questi enormi passi avanti sull'evoluzione di materiali sintetici, le schiume di poliuretano non sono ancora scomparse dall'interno dei sedili per auto.

I rivestimenti

Sono stati sviluppati un gran numero di materiali, soprattutto sintetici, che vengono normalmente utilizzati per rivestire sia i sedili che gli interni delle automobili. Due tra gli esempi maggiormente significativi sono sicuramente i rivestimenti in Alcantara ed in pelle.

Il primo è un nome commerciale di un materiale di rivestimento realizzato senza il tipico intreccio di trama e ordito dei tessuti, prodotto dall'azienda Alcantara S.p.A. dagli anni '70.

Questo composito è ottenuto dalla particolare combinazione di un processo di filatura e di numerose tecnologie di produzione tessile e chimiche, che lo rendono un materiale estremamente resistente ma anche morbido, adatto a molteplici impieghi. Esso presenta elevate proprietà funzionali e caratteristiche tecniche differenziate a seconda del settore e della specifica applicazione. Il suo aspetto superficiale può essere modificato attraverso svariate lavorazioni.

I rivestimenti in pelle, generalmente considerati di maggior pregio, possono essere di vera pelle, oppure riproducono un'imitazione di quelle vere in "similpelle", di eco-pelle, neoprene, o velluto. La maggior parte dei rivestimenti, essendo realizzati artificialmente, possono subire svariati trattamenti superficiali e di colorazione.

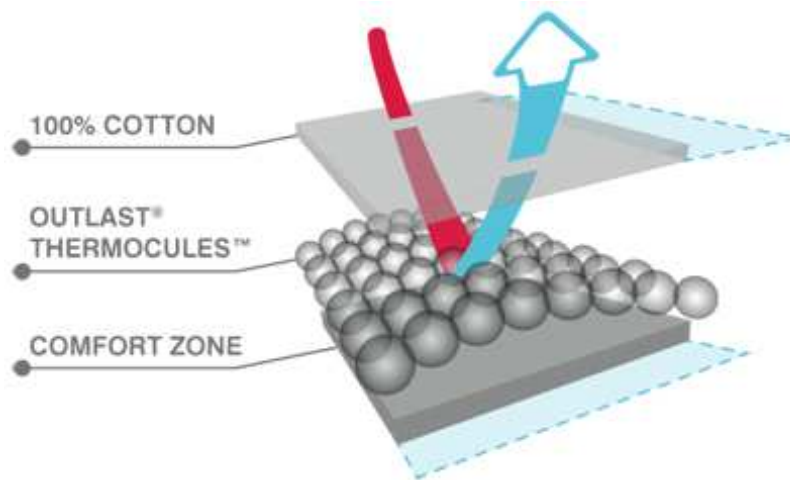
In generale le caratteristiche necessarie che un materiale di rivestimento per sedili deve avere sono:

- Resistenza all'affaticamento fisico.
- Resistenza agli agenti ambientali.
- Adattabilità alla geometria del sedile.
- Flessibilità di stile.
- Personalizzazione degli interni.

Esistono inoltre due classi di tecnologie sviluppate per tessuti "passivi" e "attivi".

I primi possono essere tessuti antimacchia o easyclean, oppure avere il controllo dell'umidità o della temperatura. Un esempio di quest'ultimo è un tessuto commercializzato con il nome di "Outlast" il quale viene realizzato con una microincapsulazione di sfere a cambiamento di fase (PCM): cioè nel momento in cui viene riscaldato per contatto, passa allo stato liquido assorbendo calore e conferendo al passeggero una sensazione di freschezza. Il sistema funziona anche al contrario, perciò se la temperatura registrata è al di sotto di una soglia prestabilita, le capsule rilasciano il calore immagazzinato. Inoltre il fatto che questi materiali PCM siano incapsulati all'interno di guaine polimeriche, gli conferisce una protezione permanente³⁹.(fig 66)

³⁹ Cfr., Outlast®, *Tecnologia*, URL(<<http://www.outlast.com/it/tecnologia>>), 21/11/2012.



(Fig. 66): Illustrazione del principio di funzionamento dell'Outlast.

I tessuti "attivi" possono essere invece metallizzati o elettronici: cioè delle fibre metalliche sono inserite all'interno del tessuto con compiti di riscaldamento, conduzione di elettricità e schermatura. Oppure vengono inserite fibre ottiche, led, oled, all'interno del tessuto con effetti decorativi e per l'illuminazione interna del veicolo.

In ultimo possiamo aggiungere che con lo scopo della personalizzazione, tramite l'elettrosaldatura si possono applicare delle decorazioni sul sedile.

Comfort e durata nel tempo dei sedili

Fino agli anni '80 il comfort dei sedili ha avuto poca importanza come caratteristica di vendita in un'automobile. Andiamo a considerare cosa richiede un utente da un sedile comodo:

Ottima distribuzione della pressione di seduta.

Supporto sicuro in tutte le condizioni di guida, soprattutto quello laterale durante una curva.

Ammortizzare e smorzare le vibrazioni, oscillazioni ed i sobbalzi provocati dal fondo stradale agli occupanti del veicolo. (Secondo la normativa ISO 2631-1:1997)

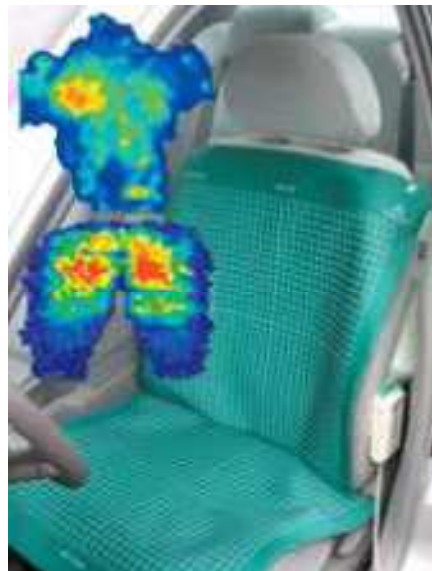
Trasmettere una sensazione di comfort in tutte le condizioni climatiche.

Nei sedili moderni sia in America che in molte nazioni europee i cuscini dei sedili vengono ancora realizzati in schiuma di PU, supportati da strutture metalliche sinusoidali, oppure da pannelli sagomati. Sedili confortevoli sono perciò prodotti con schiume ad alta resilienza con una densità minima richiesta per assicurare sia un ottimo assorbimento delle vibrazioni, che una lunga durabilità nel tempo e allo stesso tempo la leggerezza del componente.

Lo smorzamento delle vibrazioni avviene grazie all'attrito dell'aria che scorre all'interno delle celle aperte del materiale. Inoltre si riduce ulteriormente il picco di dette vibrazioni percepite dal passeggero, se un pad in schiuma ad alta resilienza viene montato sopra una struttura preforata oppure un supporto flessibile (molle/fili). Tuttavia anche se il ruolo del leone viene svolto dal cuscino, anche le coperture di rivestimento sono fondamentali per attutire tali vibrazioni.

Queste schiume garantiscono inoltre una riduzione delle pressioni sui punti di contatto del sedile anche durante i viaggi lunghi. Ciò è oggi possibile grazie al rilevamento di una mappa di pressione sul sedile, che avviene attraverso un tappeto sensibile al peso del passeggero "tester".(fig 67)

In questo modo si conferisce la giusta geometria ai cuscini, aumentando lo spessore dello schiumato nelle zone della mappa con livelli di pressione maggiore (di colore rosso/giallo), e diminuendolo in quelle circostanti.



(Fig. 67): Sistema di analisi della mappa di pressione sulla seduta e sullo schienale del sedile.

I cuscini schiumati meglio realizzati in assoluto, sono quelli che possiedono densità diverse e specifiche per ogni porzione. Infatti conoscendo le distribuzioni delle pressioni che il passeggero esercita a contatto col sedile, si riesce in fase di stampaggio a dosare il bicomponente per ottenere questo risultato. Si ha inoltre un'ottima adesione tra le parti, più morbide sui cuscini laterali di contenimento, più rigide nelle zone centrali che devono sopportare la maggior parte del peso.

Un altro aspetto discriminante circa il comfort riguarda l'eliminazione del calore di contatto che si genera tra l'utente ed il sedile stesso. Un sistema importante per la rimozione di questo calore in eccesso è costituito dalla trasmissione dell'aria calda e umida orizzontalmente attraverso la superficie del sedile. Questo metodo può essere migliorato tramite una superficie di contornatura della seduta conformata opportunamente per il ricircolo d'aria. Come vedremo meglio più avanti nei sedili maggiormente accessoriati, il problema del surriscaldamento da contatto viene risolto con un sistema di raffrescamento simile a quello di aerazione dell'abitacolo.

È importante mantenere invariate nel tempo le caratteristiche iniziali del sedile, viste le sollecitazioni che questo componente subisce durante il ciclo di vita di un autoveicolo. Per questo si comincia a tener conto di questo aspetto già nelle fasi di concept, per verificarle attraverso test di laboratorio che avvengono sul prototipo. Infatti queste prove mirano a valutare le capacità di resistenza del sedile, sottoposto ad azioni "estreme". Per esempio il cosiddetto martellamento o prova di fatica dinamica, in cui si accelerano i tempi di deterioramento dei materiali, che vengono sollecitati sia a temperatura ambiente, sia in condizioni tropicali a 40°C con l'80% di umidità.

I campioni vengono poi sottoposti a diversi cicli di pressione a 750 N e successivo recupero della forma, per 22 ore, in condizioni di temperatura e umidità prestabilite.

Al termine di questo test una scala di valori classifica la schiuma come buona, mediocre oppure insoddisfacente per un sedile.

Questi esperimenti mirano a verificare anche se le dimensioni del cuscino sono ottimali e quindi se alla fine della prova non si riscontrano riduzioni di spessore al di sotto dei 10 mm.

Infine si valutano le eventuali variazioni di durezza della schiuma, sia ad alte temperature che sotto lo zero termico, con i loro tempi di recupero della forma. Similmente si osserva il comportamento del cuscino bagnato con un liquido (acqua, caffè, tè, ecc...) e se questo compromette il recupero della forma una volta che viene asciugato.

7.1.3 Regolazioni standard e dotazioni aggiuntive

Come nel precedente caso dei componenti, anche per le regolazioni ne esistono alcune strettamente necessarie affinché l'utente possa servirsi del sedile in modo efficace.

Per questo possiamo facilmente individuare tre sistemi di regolazione che di solito sono sempre presenti anche nei modelli auto meno accessoriati, cioè: inclinazione dello schienale, la distanza dallo sterzo e l'altezza del poggiatesta. In base al modello di vettura questi sistemi possono essere azionati manualmente da ingranaggi meccanici, rimuovendone i fermi, oppure possono essere movimentati automaticamente.

Nel secondo caso vengono utilizzati degli attuatori nascosti all'interno del telaio del sedile, azionati da un impulso elettrico. Spesso in virtù delle consistenti forze in gioco, dell'ordine di grandezza delle decine di kg, la scelta sulla tipologia di attuatore ricade su quelli elettromeccanici. Questi possono essere di tipo rotativo, per reclinare lo schienale; oppure di tipo lineare per muovere il sedile lungo le sue guide di scorrimento (gestirne la distanza dallo sterzo), oppure per alzare/abbassare il poggiatesta. Altri sistemi di attuazione lineare possono essere impiegati per movimentare degli opportuni leveraggi che regolano l'altezza del sedile e l'inclinazione del piano di seduta rispetto al pianale auto.(fig 68)

Ad ogni modo le variabili da considerare per la giusta scelta di uno di questi attuatori sono numerose: la potenza necessaria, il tipo di alimentazione, le dimensioni in virtù dello spazio disponibile, il peso ecc...Si possono tuttavia riscontrare alcune caratteristiche comuni, come l'alimentazione elettrica ed un pignone dentato o vite senza fine per trasmettere il moto; ad essi possono essere o meno interposti degli ingranaggi che gestiscono il rapporto di trasmissione.



(Fig. 68)
Principali regolazioni
del sedile.

Nel corso dei decenni parallelamente all'evoluzione dell'auto in generale, anche i sedili hanno subito enormi variazioni, sia formali, che funzionali e materiche. Per questo osserviamo come sono fatti alcuni dei sedili più confortevoli dei nostri giorni. (fig. 69 -70)



(Fig. 69): Illustrazione delle dotazioni e dei sistemi di regolazione del sedile di un'Audi Q5.

In questi due esempi di sedili automobilistici di alta gamma, si osserva come rispetto al confronto con un sedile di una normale berlina media, la complessità del "sistema sedile" sia aumentata notevolmente, sia a livello del numero di componenti, sia come comandi e regolazioni possibili.



(Fig. 70): Illustrazione delle dotazioni e dei sistemi di regolazione del sedile di una Mercedes CL.

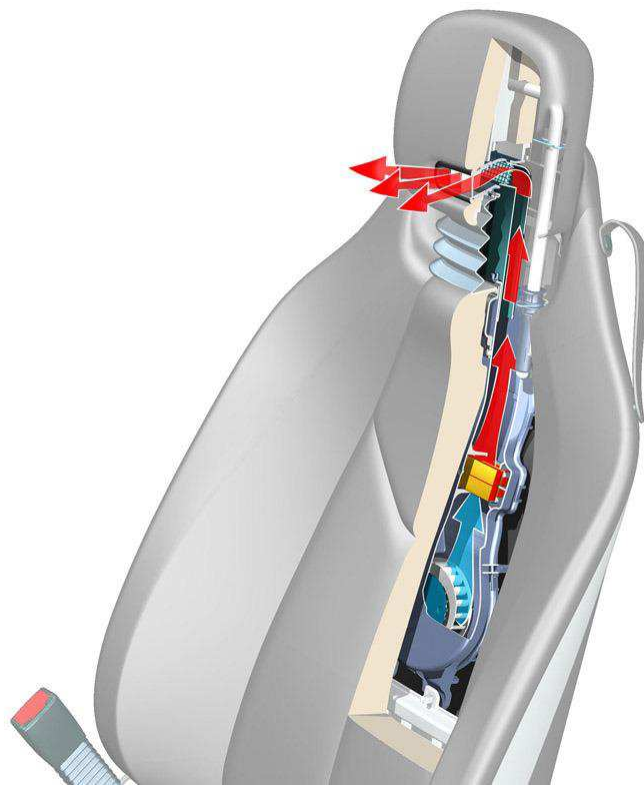
Come si può osservare dall'immagine il sistema interessante in questo tipo di sedili è quello per il controllo del clima: cioè del riscaldamento e della ventilazione. Quest'ultima è stata introdotta da Saab nel 1997 mentre invece il riscaldamento fu pensato da Cadillac già nel 1966.

Entrambi questi impianti per il controllo climatico funzionano grazie a delle tubature inserite tra telaio e cuscini, oppure a delle condutture ricavate nelle imbottiture stesse. Infine il flusso di aria

calda/fresca può essere convogliato all'esterno del sedile tramite delle apposite bocchette oppure direttamente attraverso speciali rivestimenti traspiranti.

Relativamente al riscaldamento, la temperatura può essere impostata su diversi livelli, attivati da un interruttore che ne controlla l'intensità. C'è anche la possibilità di variare la temperatura a seconda delle zone del cuscino, ma questo dipende dalla configurazione specifica dell'auto.

Il flusso d'aria calda può provenire da un innesto di condotti che dall'impianto di riscaldamento del veicolo stesso arrivano fino al sedile (incanalando il calore proveniente dal motore); oppure tramite una rete di resistenze elettriche che per effetto Joule rilasciano calore nell'ambiente, il quale può o meno essere direzionato da piccole ventole al di sotto dei cuscini di seduta e schienale⁴⁰.(fig. 71)



(Fig. 71): Illustrazione dell'impianto di riscaldamento della nuca attraverso una bocchetta ricavata nel poggiatesta, adottato per primo da Mercedes, tra il 2008 ed il 2009 all'interno del modello SL.

⁴⁰ Cfr., Lennart, H., et al., *Arrangement and Method for Manufacturing of a Heatable Seat*, 14/11/2000, United States Patent n° 6 147 332, Kongsberg Automotive AB.

Il sistema di raffrescamento può servirsi degli stessi condotti utilizzati per il flusso di calore, oppure avere dei canali ad uscite preferenziali, questa risulta essere una scelta delle case costruttrici.

Ad ogni modo esistono sia impianti di raffrescamento che di vera e propria climatizzazione. Il primo funziona tramite dei ventilatori dalle dimensioni di pochi centimetri, i quali azionati da un impulso elettrico, effettuano un ricambio d'aria nella zona di contatto sedile-passeggero, abbassando così il tasso d'umidità e la sensazione di calore. Per avere invece una vera e propria sensazione di abbassamento della temperatura, si collegano queste ventole all'impianto di climatizzazione del veicolo (disponibile solo sul piano di seduta)⁴¹.

È possibile personalizzare "l'avvolgenza" che il sedile esercita sull'utente attraverso dei sistemi di regolazione delle diverse zone dei cuscini. Il loro comfort dipende dalla posizione di molteplici camere d'aria collocate in modo strategico all'interno degli schiumati. L'inflazione d'aria all'interno di questi air-bag è controllata da elettrovalvole che alimentano delle altre valvole pneumatiche, le quali pompano aria dall'ambiente insufflandola sotto pressione in queste camere.

Inoltre dei sensori di pressione misurano costantemente la quantità d'aria immessa all'interno di queste sacche, per fornire un controllo proporzionale del sistema ed aumentare così le funzionalità disponibili. Per questo quando le camere d'aria si gonfiano, espandono esercitando una pressione sui cuscini del sedile (specie su quelli laterali di contenimento) i quali assumono una conformazione tale da migliorare la stabilità del passeggero sul sedile soprattutto in curva. Infine un sistema di "scarico" costituito da collettori, consente ad alcune valvole a tenuta in silicone, di espellere una certa quantità d'aria da queste sacche per sgonfiarle e gestire quest'effetto di "avvolgenza" a seconda delle preferenze del passeggero⁴².

Il numero e le posizioni di questi air-bag dipendono dalle scelte progettuali delle case costruttrici, ma in generale quelle che non possono mancare sono nella zona lombare (in assenza di un'altra struttura di supporto) e nei cuscini laterali di schienale e seduta.(fig 72)

⁴¹ Cfr., Christian, T., G., et al., *Variable Temperature Seat*, 28/01/1997, United States Patent n° 5 597 200, Amerigon Inc.

⁴² Cfr., Daniels, F., G., et al., *Microvalve Controller for Pneumatically Contoured Support*, 27/01/2004, United States Patent n° US 6 682 059 B1, Ctex Seat Comfort Limited.

Camere d'aria
pneumatiche capaci di
espandersi e restrin-
gersi per regolare
"l'avvolgenza" sul
passeggero

Bocchette uscita aria
calda e fresca



(Fig. 72): Spaccaro del sedile anteriore di una Mercedes classe S. Si può osservare la disposizione delle camere d'aria e delle uscite per il riscaldamento/aerazione all'interno dei cuscini.

Ma non è tutto, infatti il massimo del comfort per i sedili di una moderna berlina di lusso è la funzione di massaggio. Questo sistema sfrutta, in questo caso, gli air-bag posizionati all'interno dei cuscini sgonfiandoli e rigonfiandoli ad intermittenza, trasmettendo la sensazione di un massaggio. Alcune case automobilistiche come Mercedes e Volkswagen hanno previsto questa funzione nella zona lombare dello schienale, per rilassare la colonna vertebrale; invece BMW lo applica anche sul cuscino di seduta, allo scopo di mantenere sempre attiva la circolazione delle gambe anche durante i lunghi tragitti. Inoltre sul sedile del guidatore il massaggio è regolato da un timer che blocca tale funzione dopo circa 10 minuti, per evitare un eccessivo rilassamento e perciò un conseguente calo di attenzione alla guida.

Si riporta di seguito un esempio specifico adottato da BMW:

La funzione di massaggio è in questo caso collocata nello schienale, dove è presente un sistema pneumatico del tipo descritto precedentemente, con due funzioni: di movimento e di massaggio.(fig 73)



(Fig. 73): In giallo sono evidenziati gli air-bag responsabili della funzione massaggio nello schienale.

Questo sistema prevede 12 camere d'aria circolari che lavorano sulla colonna vertebrale, più altre 6 sacche quadrate, per un peso totale di 740 g. Gli air-bag vertebrali agiscono simultaneamente in direzione longitudinale rispetto alla colonna stessa, mentre gli altri sei tendono a compiere un movimento rotatorio sul busto verso destra e sinistra. Un ciclo completo di massaggio + movimento dura 60 sec⁴³.

⁴³ Cfr., Franz, L., et al., *The Effect of a Lightweight Massage System in a Car Seat on Comfort and Alectromyogram*, in ["Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics"], Vol 34, n°2, p. 109, February 2011.

7.1.3.1 Sedili girevoli

Diamo uno sguardo adesso ad un optional raro da trovare anche in una vettura di lusso, ma che tuttavia migliorerebbe di molto l'accessibilità all'abitacolo: il sedile girevole.

Già nel 1957 una casa automobilistica americana proponeva una vettura in grado di far ruotare il sedile del guidatore dalla sua posizione di guida verso l'esterno dell'abitacolo, con lo scopo di facilitare l'ingresso e l'uscita dal sedile stesso.(fig. 74 - 75)



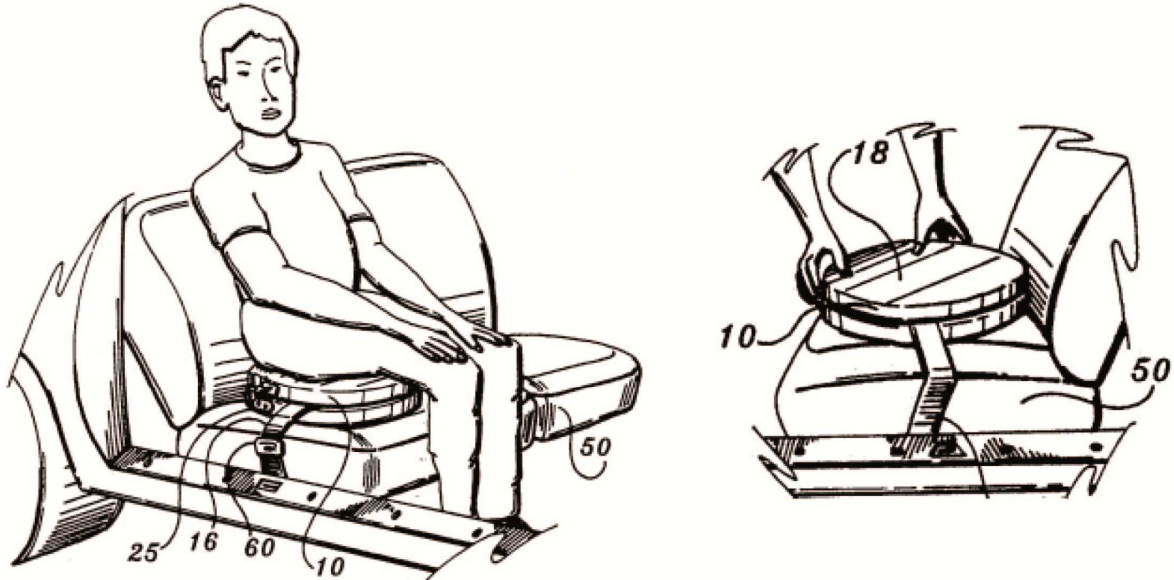
(Fig. 74)

La Chrysler 300F del 1960 proponeva un sistema di rotazione montato anche sul sedile del passeggero. Il movimento avveniva manualmente rilasciando un fermo sotto il sedile.



(Fig. 75)

Quest'altro sistema consiste nel fissare, con una cinghia, un cuscino girevole al piano di seduta del sedile del veicolo. Questo cuscino è costituito da due parti: una morbida connessa in modo che possa ruotare con un secondo piano rigido su cui viene montata la cintura⁴⁴.(fig 76 - 77)



(Fig. 76)

Sul mercato sono attualmente presenti queste tipologie di cuscini girevoli. Possono ruotare su loro stessi di 360° in ogni direzione e sono portatili, inoltre sono stati studiati per un target di persone con lievi difficoltà motorie, ma non con invalidità totale delle gambe.



(Fig. 77)

⁴⁴ Cfr., Cherniak, I., T., *Vehicular Portable Swivel Seat*, United States Patent n° 5 318 339, 07/06/1994.

Dispositivi per disabili

Quello che viene chiamato "*sedile girevole*" in realtà non è altro che una piastra meccanica installata sotto il sedile originale della vettura. Tale piastra viene movimentata manualmente, oppure su richiesta si può avere la rotazione automatica gestita da un attuttore elettrico lineare. Le guide di scorrimento esistenti permettono al sedile, una volta compiuta la rotazione, di sporgere dall'abitacolo quel tanto che basta per favorire l'accesso al veicolo. Per sfruttare al meglio gli spazi è possibile sostituire il sedile di serie con altri meno invasivi ma altrettanto comodi⁴⁵.(fig 78 -79)



(Fig. 78)



(Fig. 79)

Seggiolino girevole motorizzato con funzione "ascensore", progettato per l'utilizzo nelle automobili, mini bus o furgoni. Il sistema di rotazione può essere anche manuale, ma generalmente avviene tramite un telecomando ad impulso elettrico.

Capacità media di carico di questi sistemi per la fuoriuscita totale del sedile dall'auto è di circa 150Kg.

⁴⁵ Cfr., Independ Living Centres, *Auto Adapt Turny Swivel Car Seat Bases*, URL(<<http://ilcaustralia.org.au/products/6095>>), 06/11/2012.

Nei veicoli commerciali

Sedili modificati per consentire la rotazione del piano di seduta, oltre a quella canonica dello schienale. In questo caso il sistema consiste nel montare, attraverso imbullonatura, due piastre al di sotto delle guide di scorrimento del sedile. Queste piastre possono ruotare l'una sull'altra tramite un'apposita leva azionata manualmente, che rilascia un congegno di bloccaggio.(fig 80)

Questo tipo di componenti vengono anche montati all'interno di alcuni modelli di camper o caravan.



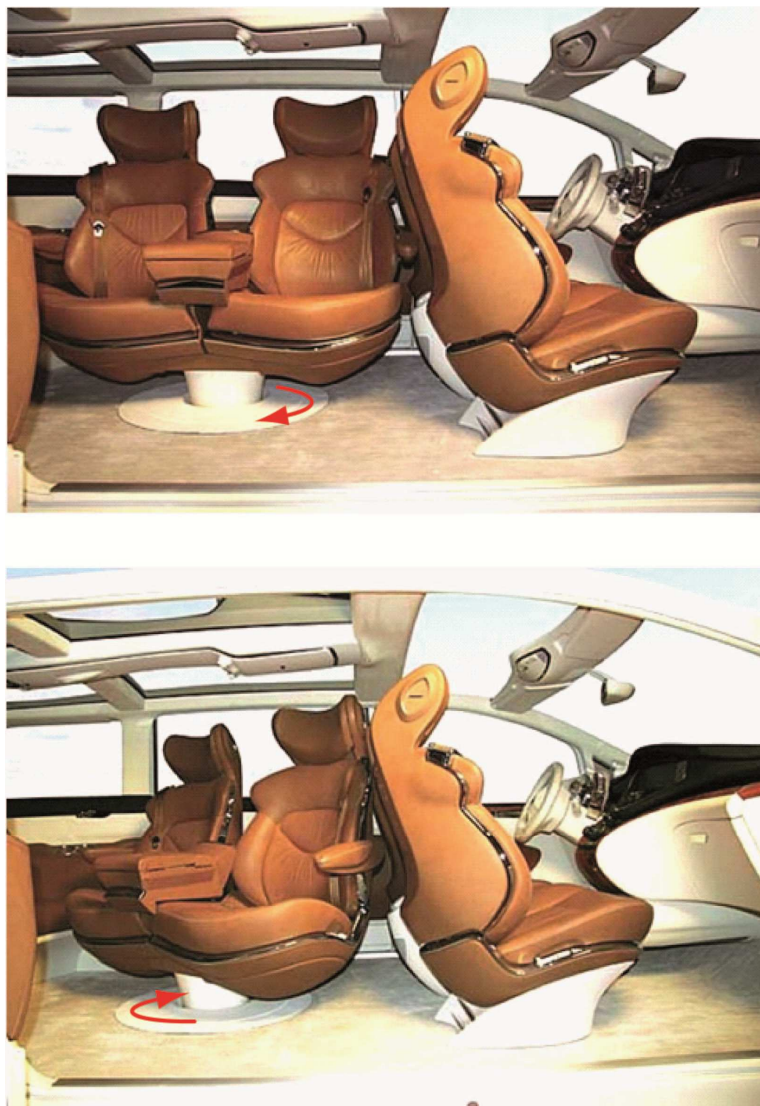
(Fig. 80): Esempio di una delle piastre per sedile girevole attualmente sul mercato.

Questo tipo di strutture vengono realizzate su misura rispetto ai modelli d'atuo ai quali sono destinati; in particolare quello in figura è compatibile per: Fiat Ducato, Peugeot Boxter e Citroen Relay. Le piastre sono generalmente realizzate in acciaio verniciato, dallo spessore variabile tra i 2 ed i 3mm, un peso di poco più di 1 kg e una capacità di carico di circa 450 kg.

Una delle principali criticità dei sedili girevoli, che si contrappone alla migliorata capacità di accesso da parte dell'utente, risulta essere la mancanza di spazio all'interno dell'abitacolo per consentire questa operazione. Infatti tale spazio è necessario per evitare di interferire con altri elementi presenti nel veicolo.

Nelle concept car

Con l'intento di migliorare l'interazione tra i passeggeri di una monovolume è stato sviluppato il concept della Nissan "FORUM" presentato il 19/03/2008. I suoi interni nascono per assecondare le esigenze di una famiglia in viaggio; infatti quella centrale delle tre file di sedili previsti nella vettura, può ruotare in modo indipendente. Questo significa che la poltrona a due piazze può ruotare di 90° oppure di 180° rispetto al suo asse centrale. In questo modo i passeggeri dell'ultima fila potranno interagire con quelli della seconda, faccia a faccia, come se fossero intorno ad un tavolino⁴⁶.(fig 81)



(Fig. 81)

⁴⁶ Cfr., Motorbox, *Concept Car*, URL(<<http://www.motorbox.com/auto/magazine/concept-car/nissan-forum>>), 22/11/2012.

7.2 *Il colpo di frusta*

Il cosiddetto "colpo di frusta"⁴⁷ è la lesione più diffusa fra quelle dovute agli incidenti automobilistici.

Esso indica generalmente un effetto dannoso nella zona del collo, dovuta ad una sua eccessiva sollecitazione, provocata da un tamponamento posteriore del veicolo che si stà accupando.

In caso d'impatto, sul collo, già di per sé vulnerabile, può esercitarsi una forza enorme. Il corpo viene spinto in avanti, e se la testa non accelera con esso il collo può venire sottoposto a uno stiramento eccessivo. Fra i sintomi che ne conseguono figurano dolori dalla zona cervicale, cefalee e rigidità dei muscoli del collo. Tali sintomi scompaiono di solito dopo qualche settimana, ma in alcuni casi possono protrarsi a lungo. Una protezione adeguata contro i colpi di frusta deve ridurre il movimento del capo rispetto al busto. I movimenti relativi fra le varie parti del corpo devono essere il più possibile contenuti.

Il test del "colpo di frusta"

Il cosiddetto "colpo di frusta" è una lesione che riguarda per il 50% dei casi un incidente in auto.

Inoltre è stato osservato che tra 0 (zero) ed i 25 Km/h si verificano il maggior numero di lesioni al collo. L'incidente stradale più frequente è il tamponamento, sia da fermo che in movimento, cioè un urto sulla parte posteriore del veicolo, ricevuto da un altro veicolo.

Anche un urto laterale può causare il "colpo di frusta"; meno frequente un urto frontale.

Il tamponamento rimane la casistica di incidente stradale più diffuso. (fig. 82)

⁴⁷ Cfr., Volvo, URL(<https://www.media.volvocars.com/media/articles/html/18283_7_8.aspx>), pubblicato il 12/12/2008.



(Fig. 82): Simulazione di un "tamponamento" (Impatto posteriore sul veicolo). Crash-test con manichino per l'analisi dei dati, su un sedile Volvo.

il test del "colpo di frusta" si divide in due parti principali, la misurazione e la prova dinamica. Nella **misurazione** si valuta la distanza del poggiatesta dal capo, la sua forma e la regolazione in altezza/profondità. Nel **test dinamico** (Euro NCAP parla di velocità bassa ma non dice il valore) il sedile viene posto su una slitta con un manichino seduto sopra, studiato per verificare gli effetti di un tamponamento. Il test prevede tre velocità d'impatto e la media delle rilevazioni fa il risultato finale. Il massimo punteggio ottenibile è di 4 punti⁴⁸.

COSA SUCCEDDE DURANTE UN TAMPONAMENTO (in pochi decimi di secondo)

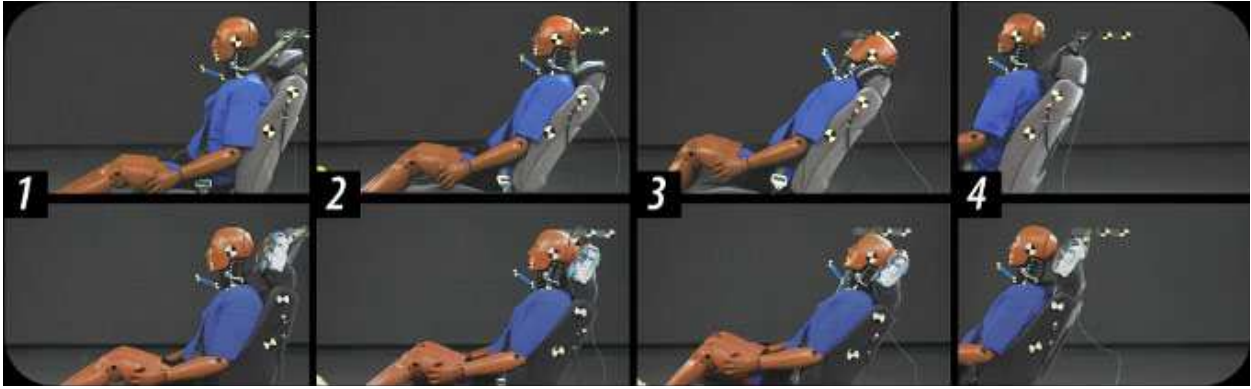
Durante la guida, la colonna cervicale, in posizione normale. (prima di un tamponamento).

La testa è ancora ferma, mentre il corpo, a causa del violento urto da dietro, è accelerato in avanti.

La testa si piega indietro, mentre la parte superiore della colonna cervicale non è più tesa.

Vi è un'ulteriore estensione del collo che rallenta il movimento rotatorio della testa. Il poggiatesta impedisce la flessione all'indietro della testa.(fig 83)

⁴⁸ Cfr., Test di sicurezza euroncap, URL(<<http://it.euroncap.com/it/whiplash.aspx>>), 20/01/2013.



(Fig. 83): Le fasi principali di un tamponamento. Si osservano le differenze tra un sedile con poggiatesta posizionato scorrettamente (sopra), rispetto ad un poggiatesta posizionato correttamente (in basso).

Per evitare che il conducente ed i passeggeri durante un tamponamento siano esposti ad un grave pericolo, occorre regolare bene il poggiatesta, utilizzando contemporaneamente le cinture di sicurezza⁴⁹.

7.2.1 Sistemi anti colpo di frusta

Il sistema VOLVO contro il colpo di frusta

"Il modello S80 è stato la prima vettura Volvo dotata del sistema WHIPS", racconta Lotta Jakobsson, esperta di sicurezza e membro del team di sviluppo di tale sistema presso Volvo Cars. Si era allora nel 1998 e nel 2000 il sistema WHIPS veniva ormai installato di serie sui sedili anteriori di tutti i modelli Volvo.

"Nel tempo, il sistema è stato oggetto di un affinamento e di uno sviluppo continui, e quest'anno festeggiamo il suo decimo compleanno", spiega Lotta Jakobsson.

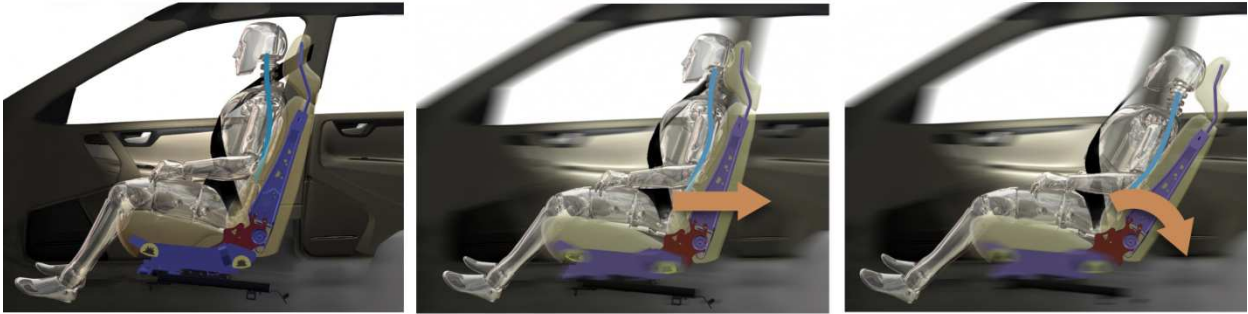
"Il sistema di protezione WHIPS, unico nel suo genere, è quindi stato progettato per distribuire le forze esercitate su tutta la schiena e sul capo, nonché per smorzare il percorso di tali forze spostandosi con il corpo", spiega Lotta Jakobsson.

"Lo schienale accompagna il movimento all'indietro del corpo e si inclina in una certa misura rispetto alla seduta. Tale soluzione riduce la forza esercitata sulla schiena e sul collo. Il poggiatesta

⁴⁹ Cfr., Bellelli, M., *Poggiatesta come va regolato?*, Settembre 2008, S.I.

delle vetture Volvo è inoltre progettato contro i colpi di frusta, essendo collocato in modo da rimanere vicino alla testa e risalire oltre la stessa, offrendo al capo un supporto eccellente".(fig. 84)

WHIPS – Whiplash Protection System



(Fig. 84): Schema di funzionamento del sistema WHIPS progettato dalla Volvo Cars.

"Il sistema WHIPS si è dimostrato molto efficace per la protezione contro i tamponamenti", prosegue Lotta Jakobsson.

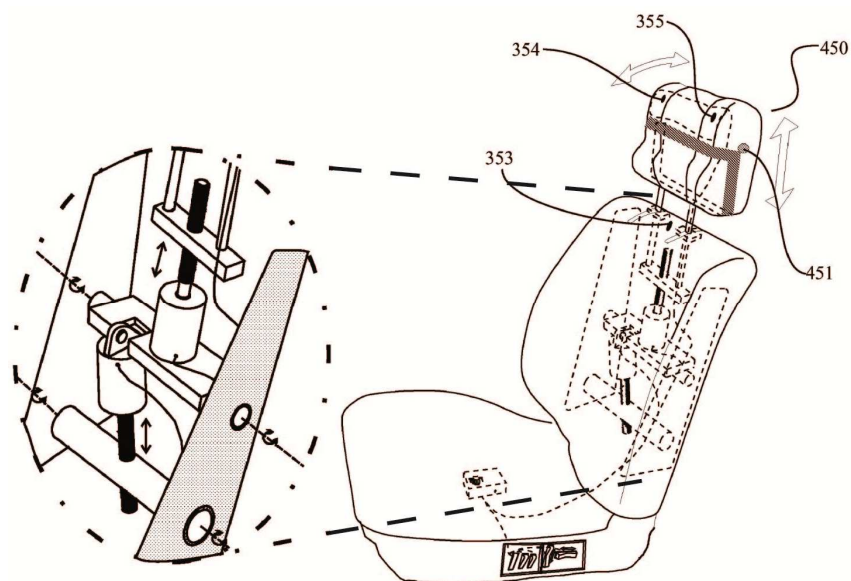
"Le nostre indagini indicano una riduzione della metà del rischio di dolori a lungo termine a seguito di un impatto posteriore, e vari studi esterni forniscono risultati simili"⁴⁷.

⁴⁷ Cfr., Volvo, URL(<<https://www.media.volvocars....aspx>>), Cit., pubblicato il 12/12/2008.

Sistema per prevenire il colpo di frusta muovendo il poggiatesta di un sedile⁵⁰

Questo brevetto descrive una serie di sistemi e metodi progettati per la prevenzione degli effetti negativi provocati sul passeggero dal cosiddetto "colpo di frusta", durante un impatto posteriore. Questi diversi dispositivi comportano la movimentazione del poggiatesta del sedile in vari modi, in prossimità della testa del passeggero in caso d'incidente. Questo congegno include anche una rete di sensori, disposti sul paraurti posteriore dell'automobile, che "anticipano" l'impatto tra i veicoli, generando un segnale di output quando un oggetto esterno si avvicina al retro del veicolo ad una velocità superiore rispetto ad una prestabilita. Perciò quando viene inviato questo segnale il poggiatesta si muove per diminuire i danni del colpo di frusta; inoltre c'è un altro sensore che blocca il poggiatesta quando rileva un contatto oppure la prossimità di questo con la testa dell'occupante del sedile.

In un primo caso all'interno dello schienale del sedile, sono stati montati due attuatori lineari a vite senza fine, accoppiati con dei fori filettati ricavati all'interno di staffe portanti, le quali a loro volta sono connesse al poggiatesta. Quindi a seconda della direzione di rotazione di questa vite senza fine il poggiatesta trasla in alto o in basso. Inoltre queste staffe portanti hanno la possibilità di ruotare su loro stesse, permettendo quindi al poggiatesta non solo di alzarsi/abbassarsi, ma anche di ruotare rispetto allo schienale per avvicinarsi alla testa del passeggero del sedile in caso di tamponamento posteriore del suo veicolo.(fig 85)

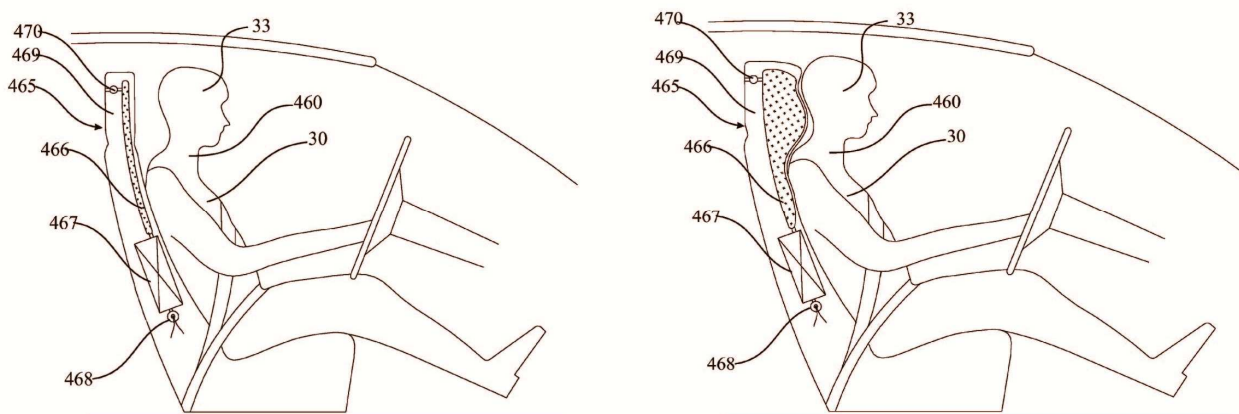


(Fig. 85)

⁵⁰ Cfr., Breed, S., D., *System and Method for Moving a Headrest for Whiplash Prevention*, 15/09/2009, United States Patent n° US 7 588 115 B2, Automotive Technologies International, Inc.

Oltre al suddetto sistema sono stati brevettati altre due varianti del dispositivo che attraverso differenti comandi provocano sempre una riduzione del rischio di un trauma provocato dal colpo di frusta. Qui sotto sono stati riportati alcuni esempi:

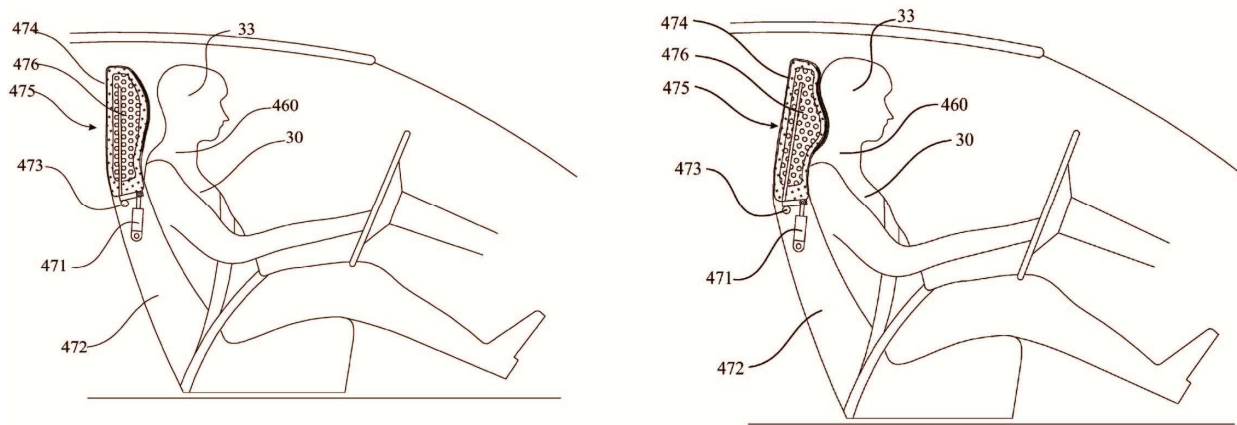
Una prima soluzione alternativa prevede una camera espandibile montata all'interno del poggiatesta e nello schienale. Ad essa è collegata una piccola bombola che può iniettare sotto pressione un gas riscaldato. Quando la rete di sensori di prossimità rileva l'imminenza di un incidente, inviano un segnale di attivazione a questa bombola che insuffla un gas propellente all'interno di questa camera, la quale gonfiandosi costringe il cuscino del poggiatesta ad espandersi e conformarsi al collo e alla testa del passeggero.(fig 86.1)



(Fig. 86.1): In questa sequenza illustrativa si osserva come grazie all'espansione della camera interna al sedile, il poggiatesta vada ad avvolgere collo e nuca proteggendolo dalle sollecitazioni dell'impatto posteriore.

Una soluzione successiva è stata quella di sviluppare un sistema di movimentazione del poggiatesta, grazie a due attuatori lineari, i quali attraverso una struttura di sostegno riescono elettricamente a ruotare il cuscino del poggiatesta avvicinandolo al passeggero. Dunque in caso di incidente dei sensori inviano un impulso elettrico a questi attuatori che portano il poggiatesta a contatto con il collo e la testa dell'utente. Inoltre un Air Bag alloggiato all'interno del cuscino viene fatto gonfiare istantaneamente in modo da adattare la forma del poggiatesta a quella del capo.(fig 86.2)

Si comprende infine che lo scopo ultimo per la prevenzione del colpo di frusta è eliminare lo spazio esistente tra poggiatesta e passeggero, evitando così il trauma dei muscoli del collo e delle vertebre cervicali che si trovano a sostenere accelerazioni forti e improvvise.



(Fig. 86.2): Sequenza di funzionamento di un sistema automatico contro gli effetti dannosi del colpo di frusta.

REGOLAZIONI DEL SEDILE

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dal "Research Council for Automobile Repairs" (RCAR) e l' "International Insurance Whiplash Prevention Group" (IIWPG) circa la corretta regolazione del del sedile, per ridurre al minimo il rischio di lesioni ai passeggeri del veicolo.

Gli esperimenti effettuati hanno preso in considerazione un manichino di maschio adulto ed hanno dimostrato che:

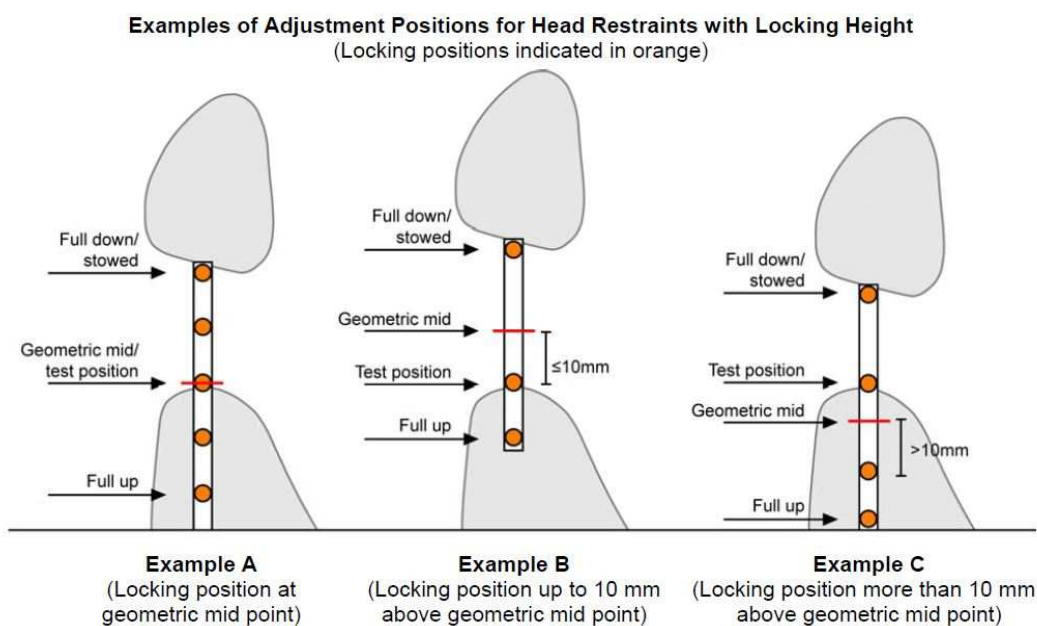
Il poggiatesta risulta tanto più efficace quanto più è vicino alla testa; ad ogni modo è stato osservato che se è posto fino ad una distanza massima di 7cm dalla parte cervicale, risulta essere ancora d'aiuto nella prevenzione del "colpo di frusta". Al di fuori di queste indicazioni il poggiatesta risulterebbe inefficace in caso di tamponamento.(fig. 87)



(Fig. 87)

Viene indicata una distinzione tra i poggiatesta completamente fissi e quelli regolabili. Cioè nel primo caso è semplice rilevare le distanze, nel secondo caso invece vengono fatte delle medie tra la posizione migliore assumibile e quella peggiore, per assegnare i punteggi sulla sicurezza.

L'altezza della testa non deve mai superare quella del poggiatesta, più precisamente il poggiatesta non dovrebbe mai essere al di sotto di 8 cm dal punto più alto della testa. Questo valore ammette una tolleranza di $\pm 10\text{mm}$ come è visibile in figura 88.



(Fig: 88)

Per quanto riguarda i test dinamici devono essere eseguiti con il sedile di serie montato sulla vettura sulla quale è destinato, quando ciò non è possibile si monta il sedile sopra una slitta, la quale come già visto prima è in grado di accelerare. Inoltre risulta fondamentale posizionare correttamente sul sedile il manichino cosparso di sensori, dai quali si osserveranno i risultati a test concluso⁵¹. Infatti secondo la procedura "RCAR" l'inclinazione corretta dello schienale è di 19° rispetto alla verticale al pavimento, inoltre la parte centrale del poggiatesta deve distare non meno di 635 cm dal cosiddetto punto H del manichino (corrispondente all'anca).

La prova dinamica consiste in una simulazione di urto posteriore in cui un manichino è posizionato sul sedile sottoposto a prova. Il sedile è montato su di una slitta che accelera da ferma in avanti fino ad una velocità di 16 Km/h, con un picco di accelerazione di 10 g ed una durata di 91 ms.

Le regolazioni del sedile e la posizione del manichino rispettano le specifiche delle normative ISO 6487 oppure della SAE J2011-1.

⁵¹ Cfr., Insurance Institute for Highway Safety, *RCAR-IIWPG Seat/Head Restraint Evaluation Protocol (Version 3)*, March 2008.

7.3 L'Airbag

Poichè il progetto di un poggiatesta "anti-colpo di frusta" rientra nei cosiddetti sistemi di sicurezza del veicolo, si ha la necessità di avere pressochè gli stessi tempi di reazione dell'airbag.

L'**airbag** è un sistema di sicurezza passiva oggi presente in tutte le automobili.

La sua introduzione sul mercato è stata intorno al 1980 e da allora ad oggi, grazie alle innovazioni nel campo dell'elettronica, il suo ingombro si è ridotto del 70% e la velocità di risposta è aumentata.

La sua funzione è impedire il contatto della testa dei passeggeri con il volante o il cruscotto e assorbire la forza d'urto. Il principio fisico su cui si basa afferma che l'impulso è uguale al prodotto della forza per l'intervallo di tempo durante cui tale forza esercita la sua azione, e l'airbag allungando il tempo di contatto riduce la forza agente sul passeggero, limitando i danni che questa forza può provocare.

I dati rilevati dopo la sua introduzione hanno evidenziato una notevole riduzione dei danni ai passeggeri. È bene ricordare che per avere la massima protezione l'airbag deve essere utilizzato unitamente alle cinture di sicurezza, in caso contrario il solo airbag può causare danni invece che benefici.

Questo sistema è costituito da:

- sacco in kevlar (fibra di grafite) per proteggere il passeggero;
- capsula esplosiva con innesco;
- sensori di rilevamento per riconoscere l'impatto;
- centralina elettronica per valutare l'urto, azionare l'airbag e controllarne il corretto funzionamento.

SACCO E SISTEMA DI GONFIAGGIO

Oggi nelle automobili si trovano solitamente due palloni a protezione del conducente, di cui uno per urti frontali e uno per quelli laterali, e lo stesso per il passeggero a lato; poi a seconda dei modelli e delle case automobilistiche si possono avere airbag per i sedili posteriori e, di ultima generazione, window bag a coprire tutti i vetri laterali dell'auto per proteggere da eventuali corpi esterni durante l'urto.

Il volume dei sacchi varia a seconda di dove sono collocati per garantire la giusta protezione, ad esempio l'airbag frontale per il conducente ha un volume di circa 50-70 litri e per il passeggero a lato 150-170 litri.

Il gas con cui i palloni sono gonfiati è per il 95% azoto quindi innocuo per le persone, il restante 5% invece è costituito da gas nocivi che possono causare reazioni o abrasioni.

Il sacco e la capsula esplosiva sono contenuti nel volante e nel cruscotto per gli airbag frontali anteriori, a lato dei sedili per impatti laterali e nel retro dei sedili per i passeggeri posteriori. Nella capsula si trova in forma solida azoturo di sodio, questo composto è nocivo per l'uomo, ma essendo chiuso ermeticamente nei vani contenenti gli airbag è molto difficile venirne in contatto.

Le reazioni sono innescate dal fatto che i sensori, rilevando una decelerazione immediata della vettura, generano una corrente elettrica che produce calore che a sua volta permette l'attivazione delle reazioni.

La seconda reazione con nitrato di potassio serve ad eliminare il sodio metallico generato dalla prima per evitare che l'airbag causi danni al passeggero.

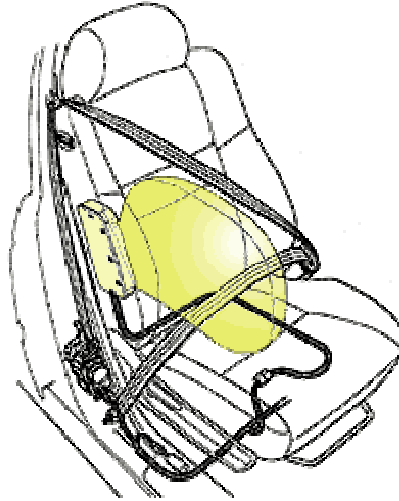
L'accensione del combustibile avviene circa 10 millisecondi (ms) dopo l'urto e il tempo necessario per gonfiare il pallone è di circa 30-50 (ms) così da proteggere istantaneamente i passeggeri in caso di incidente; inoltre anche il tempo necessario per sgonfiare il sacco è molto piccolo e questo permette di attutire l'impatto, di non ostacolare la respirazione del passeggero e di permettergli una rapida uscita dall'abitacolo. (fig. 89)



(Fig. 89): Fasi di apertura dell'airbag.

Gli airbag laterali sono posizionati lateralmente nello schienale dei sedili così permettono indipendentemente dalla statura, dalla posizione e dalla regolazione dello schienale di proteggere efficacemente il passeggero, inoltre questa collocazione consente di utilizzare sacchi del volume di

12 litri: molto inferiore al volume che sarebbe necessario se l'airbag fosse alloggiato nella portiera dell'auto. (fig. 90)



(Fig. 90): Airbag laterale

A seconda dell'urto e della velocità si ha una diversa attuazione degli airbag:

frontali: si aprono in caso di impatto frontale o obliquo fino a $\pm 30^\circ$ rispetto all'asse longitudinale dell'auto con una velocità di almeno 30 km/h; laterali: si aprono in caso di impatto obliquo superiore a $\pm 30^\circ$ rispetto all'asse longitudinale con una velocità di almeno 30 km/h e in caso di impatto frontale con velocità superiore a 40 km/h.

SENSORI

Il sensore fondamentale per il corretto funzionamento dell'airbag è l'*accelerometro*. Questo sensore ha il compito di rilevare brusche variazioni negative dell'accelerazione in modo che il sistema di controllo possa decidere se la situazione richieda o no l'attivazione del sistema.

Un fattore importante affinché l'accelerometro funzioni correttamente è che sia ben fissato alla scocca dell'auto, in caso contrario il dispositivo misurerebbe la propria accelerazione e non quella della vettura.

Questo tipo di sensore in passato era di tipo meccanico, ora invece sono anche di tipo elettronico.

Gli accelerometri meccanici sono sostanzialmente di due tipi:

a magneti: un magnete esercita una forza su una massa “sensibile” tenendola ferma in condizioni di normale funzionamento dell’auto, in caso di collisione la massa si sposta e il magnete tenta di riportarla all’equilibrio, se l’urto è di grande entità la massa si sposta a tal punto da andare a chiudere un contatto che invia alla centralina un segnale di pericolo.

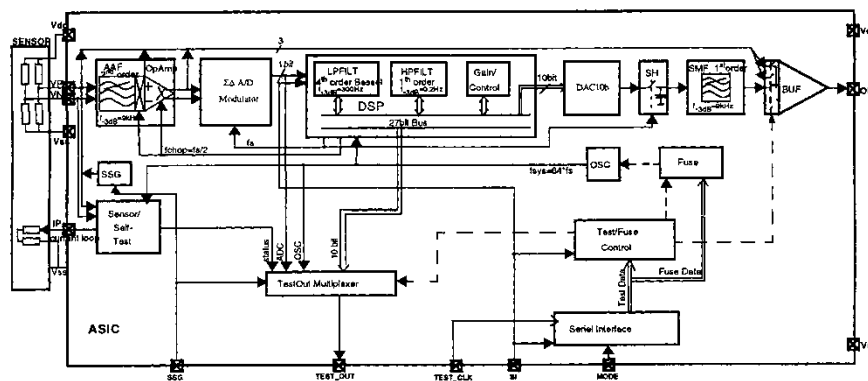
A massa sospesa: la massa è appesa ad un supporto solidale alla vettura tramite delle leve e in caso di incidente si ha un movimento del peso, il sensore si attiva in caso il movimento superi una certa soglia; in alcuni casi questi sensori per l’attivazione necessitano anche di un valore della velocità superiore ad una certo valore.

In generale questi sensori possono essere considerati come integratori dell’impulso d’urto, infatti, si attivano solo se si ha un impulso superiore ad un certo valore e di una certa durata.

I sensori di tipo elettronico contengono i seguenti componenti: trasduttore per generare il segnale d’urto, circuito di elaborazione e generazione del segnale di attivazione.

In caso d’impatto un accelerometro si attiva e genera un segnale continuo che viene poi convertito in digitale ed elaborato producendo delle variabili interne, queste sono confrontate con valori di riferimento contenuti in memoria e di conseguenza si ha o meno il triggering del sensore.

I sensori di tipo elettronico possono essere anche realizzati con un’intelligenza locale per attivare in modo indipendente i vari dispositivi di sicurezza appropriati.



(Fig. 91): si osserva un esempio di sensore di accelerazione con intelligenza locale: all’interno del modulo vi sono un amplificatore, un convertitore A/D, un DSP per l’elaborazione, un DAC, filtri e moduli di self-test per controllare il corretto funzionamento del sistema attraverso un’interfaccia seriale.

Un altro sensore che si può trovare nelle automobili è quello di roll-over: questo sensore ha il compito di rilevare situazioni di ribaltamento della vettura. In realtà non è un singolo componente, le informazioni sono date da tre sensori integrati nella centralina di controllo dell'airbag: un sensore di imbardata e due sensori di accelerazione. Il primo rileva la velocità di rotazione intorno all'asse longitudinale, i secondi misurano l'accelerazione in direzione trasversale alla direzione di moto e in altezza.

Altri sensori sono addetti a rilevare la presenza o meno del passeggero sul sedile per poter attivare l'airbag con diverse modalità a seconda della situazione. Questi sensori sono realizzati con tecniche molto diverse, alcune sono:

sensori-vite: sostituiscono le viti di ancoraggio dal sedile al telaio della vettura e misurano le forze agenti. In questo modo tramite quattro sensori-vite per ogni sedile si può determinare il peso del passeggero attraverso la misurazione della corsa della vite con sensori ad effetto Hall; noto il peso la centralina attuerà il sistema in modo diverso a seconda del caso rilevato (nessun passeggero, bambino, adulto).

sensori capacitivi: molto robusti, economici e facilmente integrabili; permettono di ricavare informazioni sia sulla posizione sia sulla morfologia del passeggero. Sono costituiti da due sottili strisce di materiale conduttivo disposte sotto il rivestimento dei sedili perpendicolarmente all'asse longitudinale della vettura. Quando il passeggero è seduto tutti gli accoppiamenti agenti sul sistema passeggero-sedile si possono riassumere con sei capacità, il loro valore è influenzato dalle caratteristiche dell'individuo, quindi misurando la carica sugli elettrodi si ottengono informazioni sulla superficie del passeggero affacciata al sedile. Da questi dati la centralina valuterà poi il tipo di passeggero e di conseguenza attuerà l'airbag in modo appropriato. Il problema di questo sistema è che il valore delle capacità oltre ad essere legato alle caratteristiche del passeggero dipende anche dalla distanza di quest'ultimo dagli elettrodi e non è possibile separare le informazioni relative alla distanza da quelle di superficie. Si può risolvere il problema utilizzando un terzo elettrodo più largo degli altri, a distanza diversa e polarizzabile in modo indipendente, in questo modo con misurazioni fra più elettrodi è possibile separare le informazioni.

3-D vision technology: sensori che utilizzano la luce per individuare il tipo di passeggero. Le tecniche sono diverse, ad esempio è possibile valutare il calore emesso dal corpo umano, oppure utilizzare micro-telecamere, o ancora basarsi sul time-of flight (TOF) principle. Quest'ultimo metodo ha il vantaggio di non avere problemi legati all'illuminazione dell'abitacolo, infatti, consiste nell'illuminare la scena in cui può essere presente il passeggero con un fascio di luce modulata prodotta da LED, la luce viene poi riflessa dall'oggetto e rinviata al ricevitore; a seconda del tragitto percorso dalla luce questa avrà un diverso ritardo di fase rispetto al fascio di partenza e la misura di

questo ritardo può essere convertita nella distanza dell'oggetto, poi sarà il sistema di controllo ad elaborare i dati e constatare o meno la presenza di passeggero.

SISTEMA DI CONTROLLO

Il sistema di controllo dell'airbag è costituito da un microcontrollore, una memoria, un accumulatore di riserva e un sistema di diagnostica per rilevare eventuali malfunzionamenti dei vari componenti.

L'accumulatore si attiva nel caso in cui dovesse mancare la corrente proveniente dalla batteria della vettura e fornisce l'energia necessaria per azionare entro circa 100ms tutti i sistemi di sicurezza.

La memoria si suddivide in due parti: una nella quale vengono registrati i valori rilevati dai sensori per poi essere confrontati e valutati (RAM), l'altra nella quale sono memorizzati i dati di riferimento per effettuare i confronti e vengono memorizzati i dati relativi ad incidenti avvenuti per poi effettuare una ricostruzione (EEPROM).

La ricostruzione è possibile grazie al Recording Crash Event Data: se la gravità dell'incidente provoca l'apertura dell'airbag tutti i dati ottenuti nei 5 secondi precedenti l'impatto vengono memorizzati nella EEPROM. Il sistema per fare questo esegue un controllo "a polling" attraverso vari sensori su variabili come la velocità, l'accelerazione, i giri del motore, lo stato dei freni, la posizione del cambio e memorizza continuamente questi dati in un buffer (RAM), dove rimangono soltanto i dati più recenti (in questo caso quelli relativi agli ultimi 5 secondi); nel caso in cui si attivi il sistema l'aggiornamento del buffer è sospeso e i dati lì intrappolati vengono trasferiti nella EEPROM. E' così possibile in ogni momento attraverso un PC estrarre i dati dalla EEPROM per analizzare le dinamiche di incidente.

Per quanto riguarda l'attivazione dell'airbag è necessario avere un'elaborazione di tipo real-time sia per ottenere i dati dai sensori, sia per elaborare questi dati e di conseguenza attivare il sistema. A questo scopo è utile avere un database contenente dati relativi alle varie situazioni che si possono verificare per effettuare un immediato confronto.

AFFIDABILITA' DEL SISTEMA

I fattori che determinano l'affidabilità del sistema sono legati al tipo di realizzazione e alla scelta di ogni componente.

Infatti è importante conoscere l'incertezza dell'accelerometro e degli altri sensori, la sensibilità ai disturbi dei sistemi di memorizzazione e la probabilità di errore degli algoritmi.

La stessa importanza si ha per la scelta della dislocazione dei sensori e del loro numero. Per la prima scelta le possibilità sono: porre i sensori nella crush-zone o nella non crush-zone, le differenze sono abbastanza importanti e influenzano anche il tipo di sensore da utilizzare. I sensori posti nella crush-zone devono rispondere ad impulsi di grande entità mentre quelli nella non crush-zone ad impulsi di entità minore, quindi, per avere concordanza di risposte, i secondi devono essere più sensibili dei primi, inoltre affinché le attivazioni siano simultanee i sensori della non crush-zone devono essere più veloci in quanto essendo più lontani dalla zona d'impatto ricevono l'onda dell'urto leggermente in ritardo.

Per quanto riguarda il numero di sensori nel passato si tendevano ad utilizzare più sensori dislocati in diversi punti della vettura, oggi invece si preferisce un'unico sensore per poi rimandare l'affidabilità ai diversi algoritmi decisionali utilizzati.

RISULTATI

Negli ultimi anni i sistemi di sicurezza nelle vetture hanno subito una grossa evoluzione grazie alle innovazioni nel campo elettronico, per questo è stato possibile aumentare il livello di integrazione e quindi aumentare le funzionalità dei sistemi senza limitare il comfort e l'estetica delle automobili.

Attualmente non solo l'evoluzione non si è fermata, ma si sta cercando di apportare ulteriori miglioramenti che sono orientati, nel caso dell'airbag, ad un perfetto adattamento del sistema al passeggero. Un esempio è lo Smart airbag: si utilizza un sacco a doppio strato per poter attivare separatamente le due parti a seconda della morfologia del passeggero.

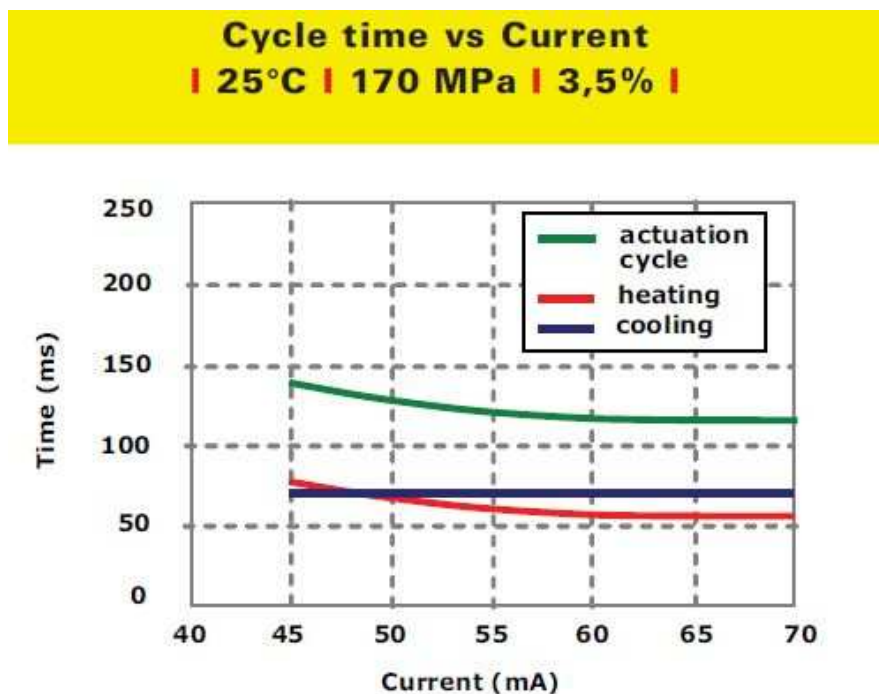
Fino ad ora i risultati ottenuti sono buoni e la sicurezza all'interno dell'abitacolo sta raggiungendo livelli sempre più alti⁵².

⁵²Cfr., Embedded system: l'airbag, URL(<[Http://www-micrel.deis.unibo.it/SMLS/doc/Slide0708/21_Airbag](http://www-micrel.deis.unibo.it/SMLS/doc/Slide0708/21_Airbag)>), 18/01/2013.

7.4 Attuatori a memoria di forma ad azionamento rapido

Stando ai dati riportati in alcuni documenti sia delle stesse aziende produttrici delle leghe a memoria di forma, che di esperti del settore automotive che hanno presentato dei progetti di sistemi di sicurezza per il passeggero/pedone, scegliendo opportunamente lo spessore del filo e l'intensità di corrente applicata, si possono progettare attuatori "SMA" che agiscono in pochi millesimi di secondo. Inoltre questi parametri vanno calibrati sullo sforzo a cui il componente è sottoposto.

Ad esempio l'azienda italiana "SaesGetters" S.p.A. produce fili SMA studiati appositamente per sostituire i tradizionali attuatori nelle automobili che si attivano in tempi inferiori ai 100 ms. (fig.92)



(Fig. 92): Nel grafico si osserva il tempo di attivazione di un filo SMA da 0,025mm di spessore, in funzione della corrente applicata. La durata complessiva del ciclo di riscaldamento/raffreddamento è al di sopra dei tempi di innesco di un sistema di sicurezza. Va tuttavia tenuto conto del fatto che l'effetto memoria di forma (indicato dalla linea rossa) dovuto al riscaldamento per effetto Joule, si mantiene comunque in linea con i tempi di reazione degli airbag. Come si evince dal grafico, per essere sicuri che un attuttore composto da un filo SMA con tali caratteristiche reagisca in 60 ms, devo fornire una corrente compresa tra i 55 ed i 60 mA⁵³.

⁵³ Cfr., SaesGetters Datasheets, URL(<<http://www.Saesgetters.com/technicaldata/downloads>>), 21/01/2013.

L'azienda americana "Miga Motor Company" produce dei fili SMA dello spessore di 0,3 mm che alimentati da 10 V di corrente si attivano in 50 ms, sviluppando una forza di 11 N (1,1 kg). Il tempo ciclo, cioè l'intervallo di tempo trascorso tra un riscaldamento ed il successivo raffreddamento è di 0,5 secondi circa.(fig. 93)

MigaOne™ Specifications at a Glance	
Stroke:	0.35 inches (9mm)
Output Force:	Constant 2.5 lb-f (11 N)
Actuation Time:	50 ms to Position-Hold (Controlled by input voltage or PWM)
Weight:	0.45 ounces (12.8 grams)
Thickness:	0.11" (2.8mm)
Resistance:	3.8 ohms *
10V actuation:	~2.7 amps, 0.5s *
Mounting:	Holes for 4x 2-56 screws
Electrical:	3-Pin header on 0.1" pitch
Operating Temperature:	-20°F to 140°F (-29°C to 60°C)
<i>*Note: All values are approximate</i>	

(Fig. 93) Nota: I valori di peso e spessore sono relativi alla struttura che sostiene l'attuatore.

Un'altra caratteristica importante riguarda l'intervallo delle temperature di esercizio: infatti poichè questo attuatore lineare è stato progettato per essere impiegato all'interno dell'abitacolo del veicolo, il Delta T varia da -29°C a + 60°C.

Inoltre questi attuatori sono sottoposti a prove di fatica che ne assicurano l'efficienza fino a 100.000 sollecitazioni cicliche. Invece di solito per i sistemi di sicurezza, come l'airbag, occorre sostituire almeno un componente dopo che è stato utilizzato una sola volta⁵⁴.

⁵⁴ Cfr., Miga Motor Company, *Migaone™ DataSheet, Linear Shape Memory Alloy Actuator*, 06/08/2007.

Un'altra azienda americana "Dynalloy Inc." produce un semilavorato che fa al caso nostro: è un attuatore commercializzato col nome di "Flexinol[®]" sviluppato appositamente per manifestare l'effetto memoria di forma grazie al passaggio di corrente, in tempi rapidissimi.

L'applicazione di correnti elevate per intervalli di tempo brevi, causa un riscaldamento virtualmente "istantaneo" dell'attuatore SMA. Il fattore limite di questa attivazione rapida non è il riscaldamento repentino, ma lo stress a cui esso è sottoposto. Infatti se la contrazione del filo avviene per un lungo periodo di tempo sotto un carico eccessivo, si può generare snervamento.

Per ottenere queste contrazioni rapide si deve avere un carico basso, o applicato per un breve intervallo di tempo, inoltre la corrente applicata deve essere alta e per un piccolo intervallo di tempo, così da non generare surriscaldamento.

La Dynalloy afferma che il Flexinol è in grado di passare dalla temperatura ambiente a 100°C in 1 millisecondo. Ciò è possibile per adesso fino ad uno spessore del filo di poche decine di micrometri; tuttavia se ne raccomanda un utilizzo per intervalli di tempo inferiori al secondo.⁵⁵

Il secondo vincolo espresso dall'azienda è il tempo ciclo, ovvero l'intervallo di tempo trascorso tra un riscaldamento ed il successivo raffreddamento. Infatti per ottenere questo genere di azionamento rapido non si devono avere limiti di tempo inferiori a qualche secondo sul raffreddamento.

Va comunque precisato che per un caso di applicazione specifica sono necessarie delle prove in laboratorio che sottopongano l'attuatore scelto a test elettrici e di carico.

Per quando riguarda invece le batterie di alimentazione di un'automobile diciamo che ne esistono diversi tipi, ma si può affermare che una batteria dalle prestazioni medie possiede una tensione di 12 V e può sviluppare 70 Ah con un picco di 760 A⁵⁶.

⁵⁵ Cfr., Dynalloy Inc., Makers of Dynamic Alloys, *Technical Characteristics of Flexinol[®] Actuators Wires*, s.l., s.d.

⁵⁶ Cfr., Bosch Automotive Aftermarket, URL(<<https://www.bosch-automotive-catalog.com> >), 2012/2013.

7.5 Caso studio

È stato preso in esame come caso studio, il sedile anteriore di una Fiat Grande Punto del 2011. L'analisi sullo stato dell'arte ha fatto emergere possibilità di intervento, con le leghe a memoria di forma, nel "sistema sedile". Risulta perciò fondamentale capire concretamente come vengono realizzati. (fig. 94).



(Fig. 94): Sedile e telaio corrispondente di una Fiat Grande Punto.

Un sedile automobilistico si presenta generalmente composto da tre parti principali: il telaio, i cuscini ed i rivestimenti. Il peso maggiore è evidentemente costituito dal telaio, che pesa circa 15,8 kg e nel caso in questione è realizzato interamente in acciaio. Questo elemento strutturale viene realizzato con lamiere imbutite, tranciate e saldate dallo spessore iniziale di 1 mm per le parti

esterne, mentre le lamiere soggette a sollecitazioni inferiori (quelle in alto e in basso sullo schienale) hanno uno spessore di 0,8 mm.

Già da una prima occhiata si percepisce subito la complessità di tale componente data dalle numerose imbutiture e piegature progressive, le quali da semilavorati piani formano una rigida e articolata struttura che assume una conformazione tridimensionale.

Per quanto concerne i cuscini questi vengono generalmente prodotti con la tecnologia "RIM" (Reaction Injection Molding) in grado di iniettare in uno stampo due sostanze che miscelate insieme reagiscono e vanno a costituire il Poliuretano espanso.

Anche in questo caso i cuscini vengono prodotti con tale materiale, come specificato dalla sigla "PUR" impressa sullo stampo. I cuscini di schienale e seduta vengono successivamente infilati come due guanti sulle rispettive porzioni del telaio e fissati in alcune estremità attraverso un collante. Nella parte superiore dello schienale, dove ci sono i fori per inserire il poggiatesta, il cuscino è molto più sottile e sembra come tagliato in una lavorazione successiva per ricavare un lembo separato dal resto del componente. Ciò lascia presupporre che questo lembo esista per ragioni produttive, ovvero al fine di ridurre la complessità dello stampo per realizzare la parte interna del cuscino che va a contatto col telaio ed i fori per il poggiatesta. In fase di montaggio si infila il cuscino dello schienale sul telaio e poi si ripiega questa estremità facendola aderire intorno alla parte superiore della lamiera e fissandola con del collante. Questa operazione risulta possibile poiché dato lo spessore ridotto di questa porzione di cuscino, che di fatto si protrae ben oltre il punto più vicino di contatto con l'utente, si riesce a deformare elasticamente la parte fino al contatto con la struttura in acciaio.

Il rivestimento dei cuscini è costituito da un tessuto simile all'alcantara ma più elasticizzato. Anch'esso viene infilato sopra il componente montato precedentemente e si richiude o con delle graffette oppure con una cerniera lampo.

Il peso del poggiatesta del sedile della Fiat Grande Punto è di circa 500 g ed è completamente estraibile dal suo alloggiamento, tramite degli appositi pulsanti. Su questo modello è possibile regolare in altezza il poggiatesta, facendolo scorrere all'interno di due guide incastrate per interferenza all'interno del telaio.

7.6 Concept

Ragionamento sul caso specifico della movimentazione del poggiatesta

Quando si deve progettare un sistema di attuazione basato sulle leghe a memoria di forma bisogna tener presente che:

Il tempo (t) di attivazione (Martensite \longrightarrow Austenite) è inversamente proporzionale all'intensità di corrente elettrica applicata [I, misurata in Ampere (A)]. Ovvero più i tempi di attivazione richiesti sono brevi maggiore sarà la corrente da applicare.

La resistenza elettrica che il filo oppone al passaggio di corrente dipende innanzitutto dagli elementi di lega, inoltre è direttamente proporzionale allo spessore del filo. Va tenuto conto che i valori di resistività elettrica [misurati in ohm (Ω)] variano nelle due diverse fasi cristalline delle "SMA".

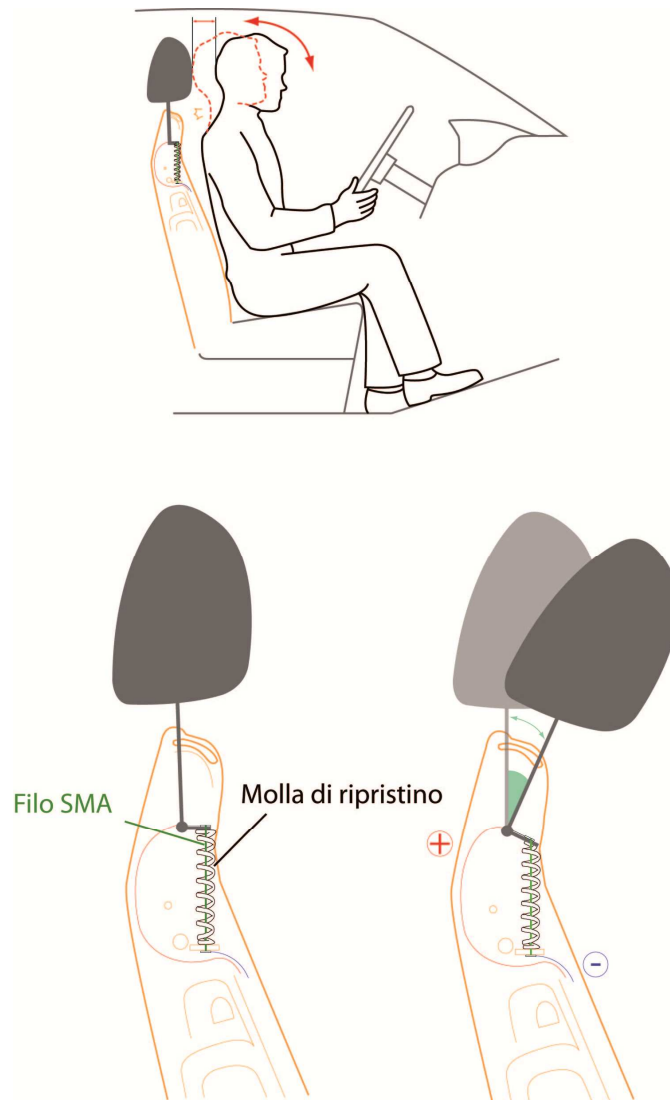
Le temperature di transizione di fase ($M_s - M_f - A_s - A_f$) dipendono dalla composizione chimica della lega metallica.

La forza di output generata in fase austenitica dipende dal trattamento termomeccanico a cui il componente è sottoposto.

Il recupero in % della forma (quindi la corsa dell'attuatore) dipende non dalla fornitura di calore ma dalla rimozione del carico applicato in fase martensitica.

La lunghezza del filo determina la corsa dell'attuatore: cioè si dovrà scegliere la lunghezza opportuna del filo a seconda dell'ampiezza della corsa desiderata; considerando che l'attuatore ha una corsa compresa in un intervallo del 3,5% e l'8% della sua lunghezza totale.

Sulla base di queste considerazioni è stato studiato il concept di un sistema di sicurezza, il quale in caso di tamponamento, conferisce un solido supporto al collo e alla nuca del passeggero, evitando così il trauma da "colpo di frusta". Questo supporto è costituito dal poggiatesta che viene fatto avanzare verso il passeggero al momento giusto, grazie ad un sistema costituito da un attuatore a memoria di forma.(fig. 95)



(Fig. 95):
Concept

7.7 *Design definitivo*

Al momento dell'impatto, una rete di sensori posizionata all'interno dei paraurti del veicolo, invia un segnale elettronico alla centralina dedicata a tale sistema di sicurezza. Questa è a sua volta in grado di alimentare elettricamente l'attuatore a memoria di forma, tramite la batteria a 12 V.

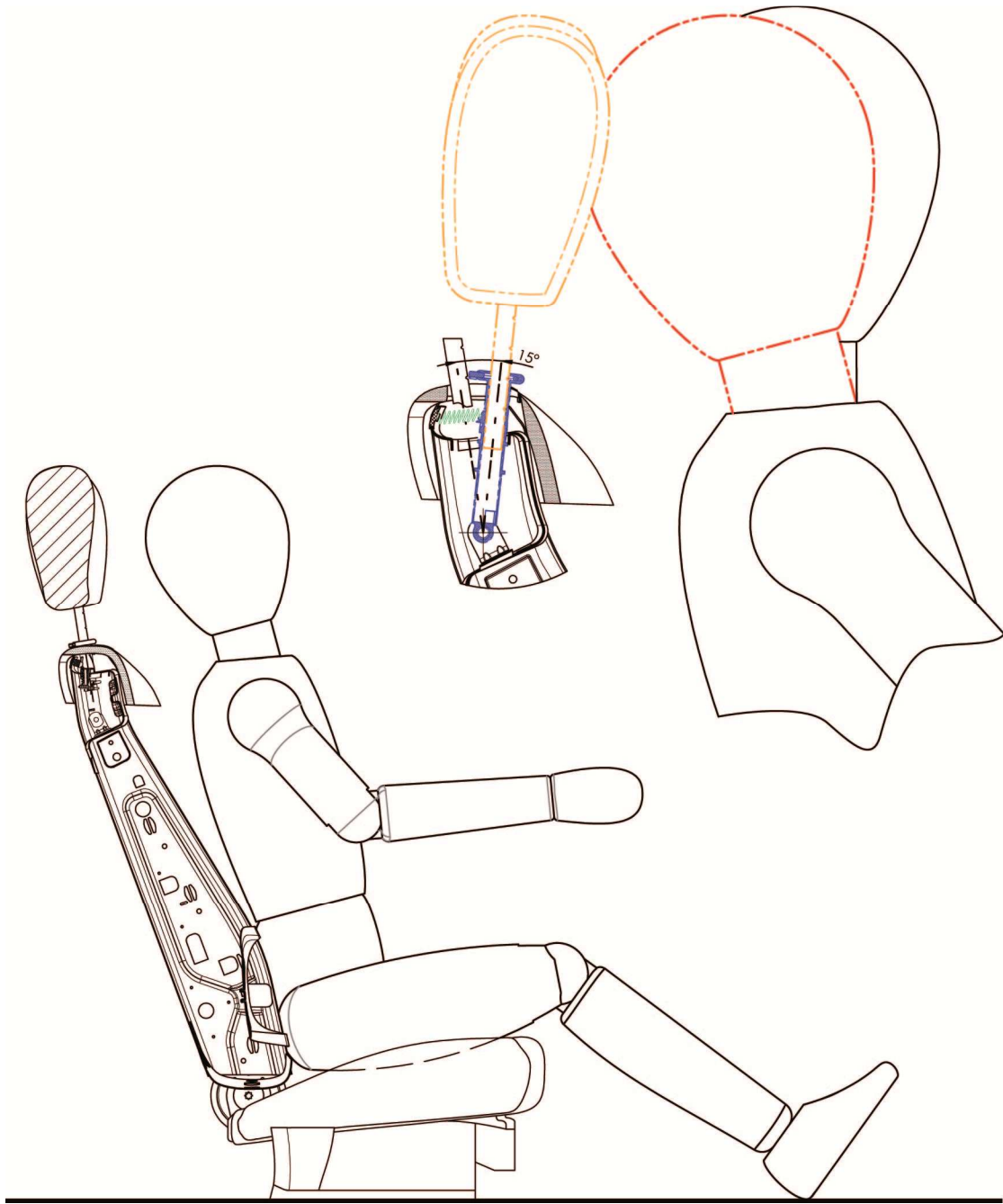
Dunque per essere sicuri che tale movimentazione avvenga, si è scelto di progettare il sistema di attuazione a memoria di forma come un componente che operi a prescindere dal peso del poggiatesta. Infatti l'attuatore "SMA" gestisce il sistema di bloccaggio/rilascio del congegno stesso. La rotazione del poggiatesta avviene grazie a due opportune molle che, agendo sulle guide di scorrimento, spingono con la forza di 10N ciascuna, il poggiatesta in avanti.

Considerando che potrebbero esistere dei poggiatesta ben più pesanti di quello preso ad esempio come caso studio, risulta fondamentale scegliere adeguatamente queste due molle in base al peso da mettere in movimento.

Dopo circa 50 ms dal tamponamento il filo "SMA" si scalda recuperando la sua forma genitrice, mettendo in rotazione il gancio di bloccaggio che normalmente assicura il poggiatesta in posizione di "riposo". A questo punto le due molle compresse posizionate in alto sul telaio e dietro le guide di scorrimento, sono libere di estendersi portando con loro il poggiatesta in avanti. Successivamente un opportuno snap fit va ad incastrarsi nella lamiera del telaio, impedendo così al poggiatesta di ritornare indietro quando riceve l'urto dalla testa, la quale viene accelerata verso il sedile.

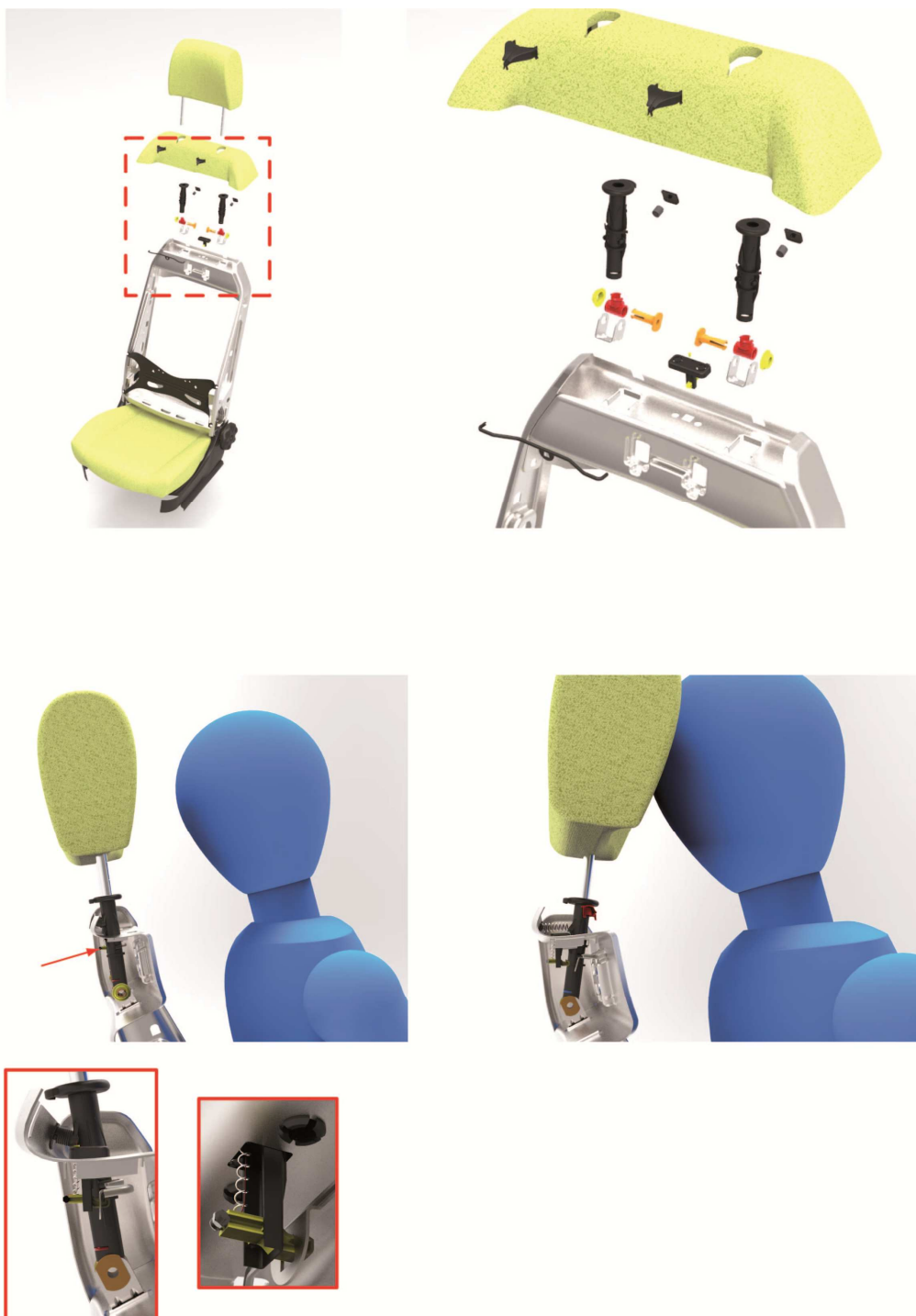
Dopo l'attivazione, il filo a memoria di forma non viene più alimentato da corrente, perciò passati circa 5 sec. dall'incidente il filo stesso si raffredda e viene riportato nella sua condizione di riposo martensitica, dalla sua molla di ripristino. Infine per riportare il poggiatesta in posizione "zero" è necessario portare il veicolo in assistenza, condizione vincolante di tutti i principali sistemi di sicurezza per automobile. (fig. 96)

NOTA: Vedi tavole tecniche allegate.



(Fig. 96): Vista schematica del sistema di sicurezza anti colpo di frusta.

Di seguito sono illustrate la vista esplosa delle varie parti e le fasi di movimentazione del poggiatesta. (fig. 97)



(Fig. 97): Sopra nella vista esplosa sono visibili tutti i componenti del sistema. In basso si possono osservare le due condizioni di "riposo" e di "attivazione" del poggiatesta; evidenziati più in basso ci sono i dettagli del gancio di bloccaggio (indicato dalla freccia rossa) che mantiene l'intero dispositivo in posizione d'arresto, rilasciandolo solo in caso di tamponamento.

In questa fase indagheremo quali siano i materiali più adatti per la realizzazione dei singoli pezzi, i quali verranno accomunati in base alle funzioni che devono assolvere per il corretto funzionamento del sistema.

Cominciamo con i componenti polimerici, i quali vista la geometria, saranno sicuramente prodotti tramite stampaggio per iniezione.

In questo progetto le categorie funzionali dei componenti polimerici sono tre:

1. Movimentazione del poggiatesta
2. Struttura attuatore con relativo meccanismo di bloccaggio/rilascio
3. Protezione esterna del cuscino del sedile.

SCREENING 1

Componenti per la movimentazione del poggiatesta

FUNZIONI

- Assicurare la corretta movimentazione del poggiatesta

VINCOLI

- Adeguata resistenza e rigidità meccanica
- Resistenza agli urti (soprattutto guida di scorrimento)
- Stampabile per iniezione

OBIETTIVI

- Minimizzare i costi di produzione

Il vincolo dello stampaggio per iniezione ci impone già una prima selezione dei materiali: PE, PP, PS, ABS, PC, PMMA, PA, POM, PBT; questi infatti sono i materiali più comunemente utilizzati da questa tecnologia con temperature di processo basse e medie.

RANKING 1

Sono state individuate cinque proprietà che sono in grado di rispondere alle esigenze analizzate in fase di screening: Limite elastico - Modulo di Young - Tenacità a frattura - Costo - Energia di stampaggio. Ad ogni proprietà corrispondono tre colonne indicanti il valore medio, quello normalizzato e quello pesato. Il valore medio di una proprietà è stato ricavato dal software C.E.S. EduPack 2012 "Cambridge Engineering Selector"; il dato normalizzato è ripartito su una scala di valori da 0 a 10; il valore pesato viene calibrato su una scala da 0,5 a 2 rispetto all'importanza della proprietà.

Tabella di Ranking 1

MAT.	LIMITE ELASTICO [Mpa]			MODULO DI YOUNG [Gpa]			TENACITÀ A FRATTURA [Mpa \sqrt{m}]			COSTO [€/kg]			ENERGIA DI STAMPAGGIO [MJ/kg]			PUN TOT
	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	
PP	28,9	4	6	1,2	4,6	4,6	3,7	4,6	9,2	1,4	3,1	-6,2	20,1	5	-10	3,6
ABS	34,7	4,9	7,3	2	5	5	3,3	4,6	9,2	1,8	4,7	-9,4	19,2	4,7	-9,4	2,7
PMMA	63,1	5	7,5	3	1,7	1,7	1,1	4,4	8,8	2,1	5	-10	18,5	5	-10	3,5
PA	72,4	5,3	7,9	2,9	4,6	4,6	3,9	4,9	9,8	3	4,6	-9,2	20,9	4,7	-9,4	3,7
PA 30% GF	99,8	6,2	9,3	5,3	4,7	4,7	4,5	6,8	13,6	3,2	5,2	-10,4	20,7	5,5	-11	6,2

Legenda: V= valore medio; N= val. normalizzato; P= val. pesato

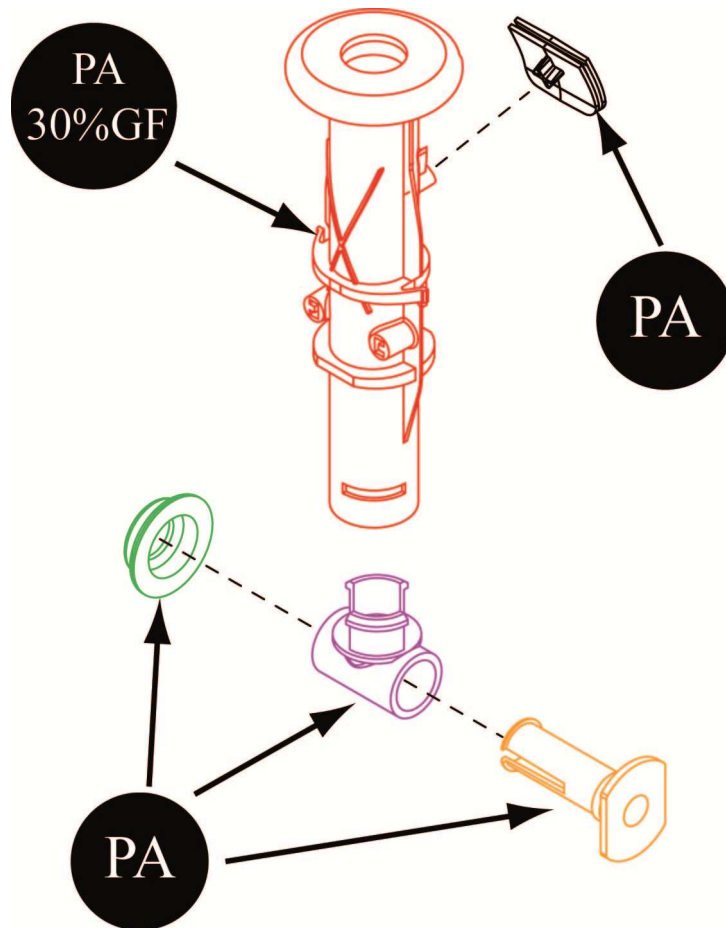
NOTA: ai valori di costo ed energia di stampaggio è stato assegnato un valore negativo che è stato poi sottratto dal totale per rispettare gli obiettivi di minimizzare i costi di produzione.

NORMALIZZAZIONE = $10 / (\text{Val. MAX} - \text{Val. MIN}) * (\text{Val. prop.} - \text{Val. MIN})$

CONCLUSIONI:

Poichè tra i componenti che assicurano la corretta movimentazione del poggiatesta, uno in particolare necessita di elevate proprietà di resistenza e tenacità (cioè la guida di scorrimento che va in battuta sul telaio), si è scelto di realizzarlo in PA 30% GF, visto che nell'analisi di Ranking ha ottenuto il punteggio migliore, nonostante il costo elevato. I restanti componenti verranno invece

prodotti in PA non caricato, poichè le sollecitazioni richieste sono nettamente inferiori; in questo modo si restringe al minimo necessario l'impiego di fibra di vetro esclusivamente dove è fondamentale. La scelta del PP, nonostante sia il terzo punteggiato classificato, sarebbe da evitare visto il valore esiguo del limite elastico.(fig. 98)



(Fig. 98): Componenti responsabili della movimentazione del poggiatesta.

SCREENING 2

Struttura attuatore con relativo meccanismo di bloccaggio/rilascio

FUNZIONI

- Assicurare sostegno adeguato all'attuatore SMA ed al gancio di bloccaggio/rilascio

VINCOLI

- Adeguata resistenza e rigidità meccanica
- Temperatura di esercizio sufficientemente elevata (il filo SMA arriva a circa 60 °C)
- Isolante elettrico (tutti i polimeri analizzati sono buoni isolanti elettrici)
- Stampabile per iniezione

OBIETTIVI

- Minimizzare i costi di produzione

RANKING 2

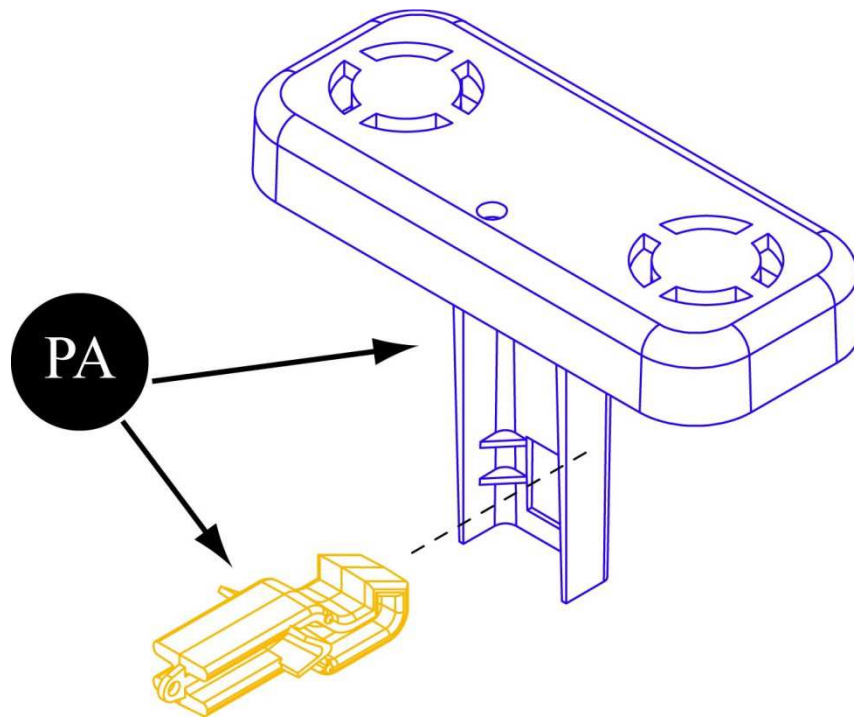
Le proprietà individuate che sono in grado di rispondere alle esigenze di screening sono: Limite elastico - Modulo di Young - Massima temperatura di esercizio - Costo - Energia di stampaggio.

Tabella di Ranking 2

MAT.	LIMITE ELASTICO [Mpa]			MODULO DI YOUNG [Gpa]			MAX TEMP. ESERCIZIO [°C]			COSTO [€/kg]			ENERGIA DI STAMPAGGIO [MJ/kg]			PUN TOT
	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	
PP	28,9	4	6	1,2	4,6	4,6	107,5	6,2	12,4	1,4	3,1	-6,2	20,1	5	-10	6,8
ABS	34,7	4,9	7,3	2	5	5	69,4	3,9	7,8	1,8	4,7	-9,4	19,2	4,7	-9,4	1,3
PMMA	63,1	5	7,5	3	1,7	1,7	49,4	2,8	5,6	2,1	5	-10	18,5	5	-10	-5,2
PA	72,4	5,3	7,9	2,9	4,6	4,6	125	7,2	14,4	3	4,6	-9,2	20,9	4,7	-9,4	8,3
PA 30% GF	99,8	6,2	9,3	5,3	4,7	4,7	110	6,3	12,6	3,2	5,2	-10,4	20,7	5,5	-11	5,2

CONCLUSIONI:

In questa circostanza il vero fattore discriminante per la scelta del materiale è la Max temperatura di esercizio. Perciò considerate anche le altre proprietà, il polimero migliore per il nostro caso è il PA, il quale ha ottenuto un vantaggio netto anche rispetto al PP secondo classificato.(fig. 99)



(Fig. 99): Struttura attuatore SMA e gancio di bloccaggio/rilascio del sistema.

SCREENING 3

Protezione esterna del cuscino del sedile

FUNZIONI

- Proteggere sia il cuscino che il suo rivestimento esterno quando il poggiatesta avanza.

VINCOLI

- Adeguata resistenza e rigidità meccanica
- Resistenza agli urti
- Stampabile per iniezione

OBIETTIVI

- Minimizzare i costi di produzione

In questo caso il componente da realizzare deve possedere la giusta rigidità, tale da resistere all'urto con la guida di scorrimento del poggiatesta, ma allo stesso tempo deve deformarsi senza rompersi. Quindi oltre alla scelta opportuna del materiale bisogna conferirgli una geometria tale che gli consenta di deformarsi esclusivamente nel punto desiderato. Bisogna progettare una cosiddetta "cerniera integrale o elastica", nella quale l'assottigliamento della sezione in un suo punto preciso, ci garantisce che si fletta proprio in quel punto.

RANKING 3

Sono state individuate cinque proprietà che sono in grado di rispondere alle esigenze analizzate in fase di screening: Limite elastico - Modulo di Young - [indice del materiale condizionato dall'allungamento: M_3] - Costo - Energia di stampaggio.

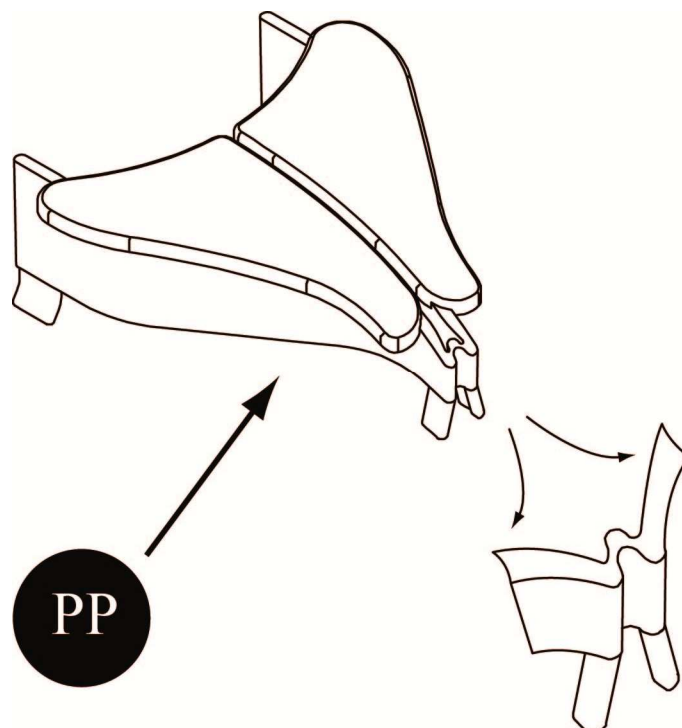
Dove all'indice M_3 corrisponde il rapporto tra Tenacità a frattura/Modulo di Young. I materiali con un valore elevato di M_3 sono quelli che meglio si adattano al caso in questione.

Tabella di Ranking 3

MAT.	LIMITE ELASTICO [Mpa]			MODULO DI YOUNG [Gpa]			M ₃ [10 ⁻³ √m]			COSTO [€/kg]			ENERGIA DI STAMPAGGIO [MJ/kg]			PUN TOT
	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	V	N	P	
PP	28,9	4	6	1,2	4,6	4,6	3,1	6,8	13,6	1,4	3,1	-6,2	20,1	5	-10	8
ABS	34,7	4,9	7,3	2	5	5	1,6	3,5	7	1,8	4,7	-9,4	19,2	4,7	-9,4	0,5
PMMA	63,1	5	7,5	3	1,7	1,7	0,4	0,9	1,8	2,1	5	-10	18,5	5	-10	-9
PA	72,4	5,3	7,9	2,9	4,6	4,6	1,3	2,8	5,6	3	4,6	-9,2	20,9	4,7	-9,4	-0,5
PA 30% GF	99,8	6,2	9,3	5,3	4,7	4,7	0,8	1,7	3,4	3,2	5,2	-10,4	20,7	5,5	-11	-4

CONCLUSIONI:

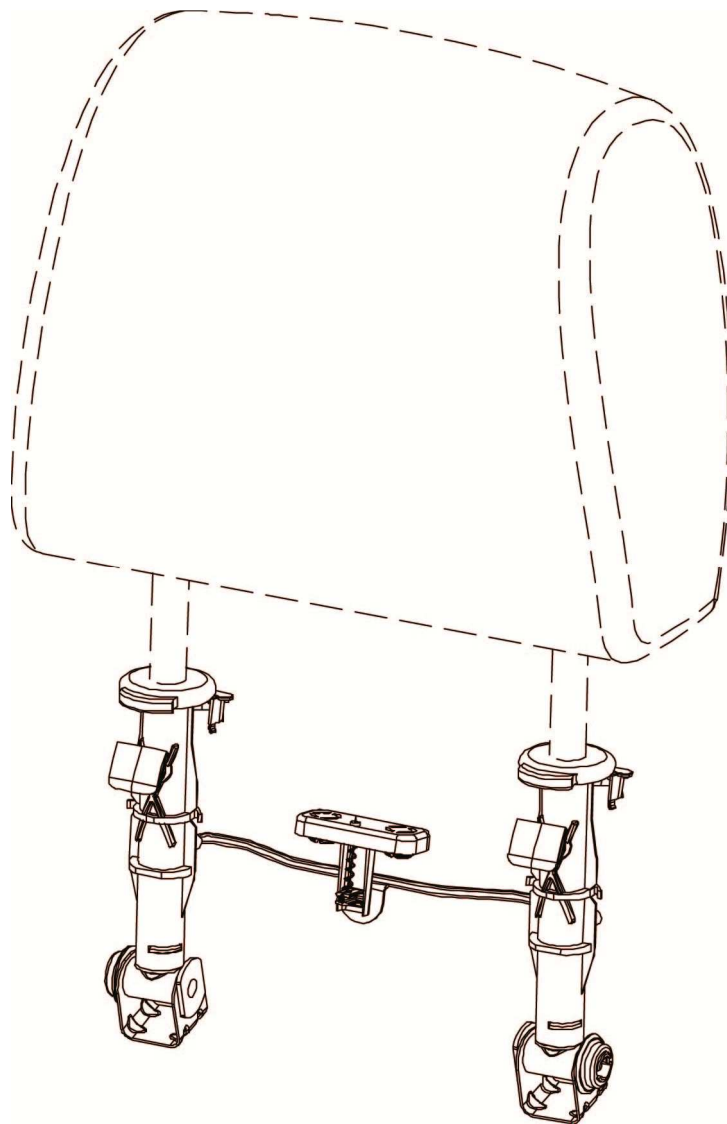
La tabella di Ranking 3 lascia poche alternative di interpretazione: per realizzare una cerniera elastica la migliore scelta tra i materiali selezionati è il PP, il quale ha ottenuto un punteggio di gran lunga superiore anche rispetto al secondo classificato, l'ABS. Inoltre il costo della materia prima è il più basso rispetto a tutti i materiali scelti.(fig. 100)



(Fig. 100):
Componente di protezione esterna del cuscino con cerniera elastica.

8.1 Stima del costo di produzione

Dopo aver scelto i giusti materiali per tutti i componenti necessari, sapendo inoltre che la tecnologia utilizzata sarà lo stampaggio per iniezione, si passa ad analizzare alcuni dati utili per stimare il costo di produzione del progetto. I dati riportati sono ottenuti grazie a due sistemi: il metodo A fornisce un'equazione per il calcolo del costo di produzione in base a dati precisi; il metodo B si serve di un modello di previsione del costo del software C.E.S. EduPack 2012 "Cambridge Engineering Selector". L'analisi che seguirà si riferisce a tutti i componenti del progetto (fig. 101)



(Fig. 101): Vista complessiva del sistema anti colpo di frusta.

Tabella CALCOLO DEL COSTO PER UNITÀ

RISORSE	SIMBOLO	UNITÀ
MATERIALI: consumabili/semilavorato	C_m	€/kg
CAPITALE: costo attrezzature	C_t	€
costo macchinario	C_c	€
TEMPO: costi indiretti sull'unità di tempo + manodopera	\dot{C}_{oh}	€/h
ENERGIA: costi dell'energia	C_e	€/h
INFO: ReS/ Diritti e licenze	C_i	€/anno

DOVE:

m = Peso di materiale (kg)

f = Sfrido (%)

int = Funzione numero intero

n = Volume di produzione (pz)

n_t = Numero di pezzi stampabili con uno stampo (vita dello stampo) (pz)

\dot{n} = Ritmo produttivo (pz/h)

L = Frazione di tempo in cui il macchinario è in uso (h)

$C_{c/two}$ = Costo orario rispetto all'uso del macchinario (h)

EQUAZIONE PER IL CALCOLO DEL COSTO C_s : (Metodo di stima del costo A)⁵⁷

$$C_s = \frac{m C_m}{(1-f)} + \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left[\frac{n + 0,51}{n_t} \right] \right\} + \frac{1}{\dot{n}} \frac{(C_c)}{L t_{two}} + \frac{C_{oh}}{\dot{n}}$$

⁵⁷ Cfr., *Modello di costo di produzione*, Politecnico di Milano, s.l., s.d., s.n.

Componente 1: guida di scorrimento poggiatesta + relativo fermo

Nota: Considerata la tecnologia possiamo affermare che gli sfridi non verranno inclusi nel calcolo finale poichè trattandosi di polimeri termoplastici eventuali sfridi possono essere reintrodotti nel ciclo produttivo. Per quanto riguarda la barra di bloccaggio in acciaio, realizzata da una macchina pressa piegatrice, gli sfridi considerati sulla lamiera sono dell'ordine del 20%.

$$Cs = 0,01365 \text{ (kg)} * 3,2 \text{ (€/kg)} + 15000 \text{ (€)}/15000 \text{ (pz)} * [\text{int } 15000 \text{ (pz/y)}/4000 \text{ (pz)}] + \\ + 1/20 \text{ (pz/h)} * [60000 \text{ (€)}/0,5 * 8 \text{ (h/d)} * 300 \text{ (d/y)}] + [24 \text{ (€/h)} + 35 \text{ (€/h)}/20 \text{ (pz/h)}] = 9,5 \text{ €/pz}$$

Poichè in tale progetto sono comprese due guide di scorrimento per il poggiatesta, il costo totale di produzione di questi componenti per ogni sistema è di **19 €**

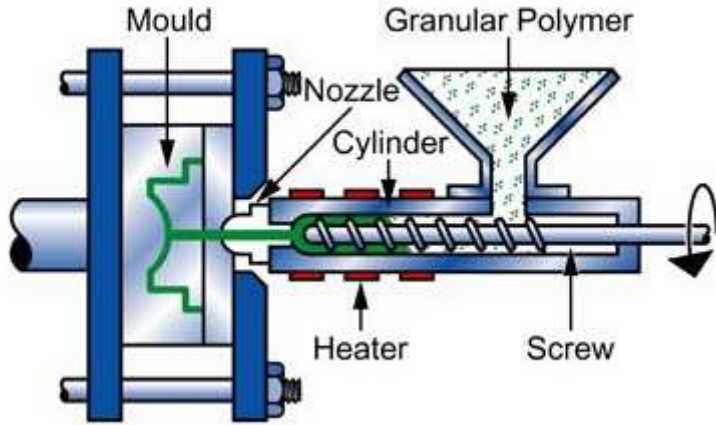
Giustificazione dei dati considerati per il calcolo:

Per quanto riguarda i componenti polimerici, i valori circa il costo dello stampo e della pressa, come quelli del ritmo produttivo e del volume di produzione, poi ancora i valori del costo della manodopera e della macchina, sono stati stimati ragionevolmente in base alla complessità del pezzo da realizzare e chiaramente ai dati dichiarati circa i costi dello stampaggio per iniezione, reperiti dal C.E.S. EduPack 2012.

Seguendo questo criterio di valutazione (A) per tutti i componenti del sistema si è arrivati ad un costo totale di produzione del congegno anti colpo di frusta di **86 €**circa.

Il costo finale tiene conto che l'attuatore SMA con annessa molla di ripristino costa 2 €/pz e le molle in acciaio che spingono in avanti le guide di scorrimento costano anch'esse 2 €/pz.

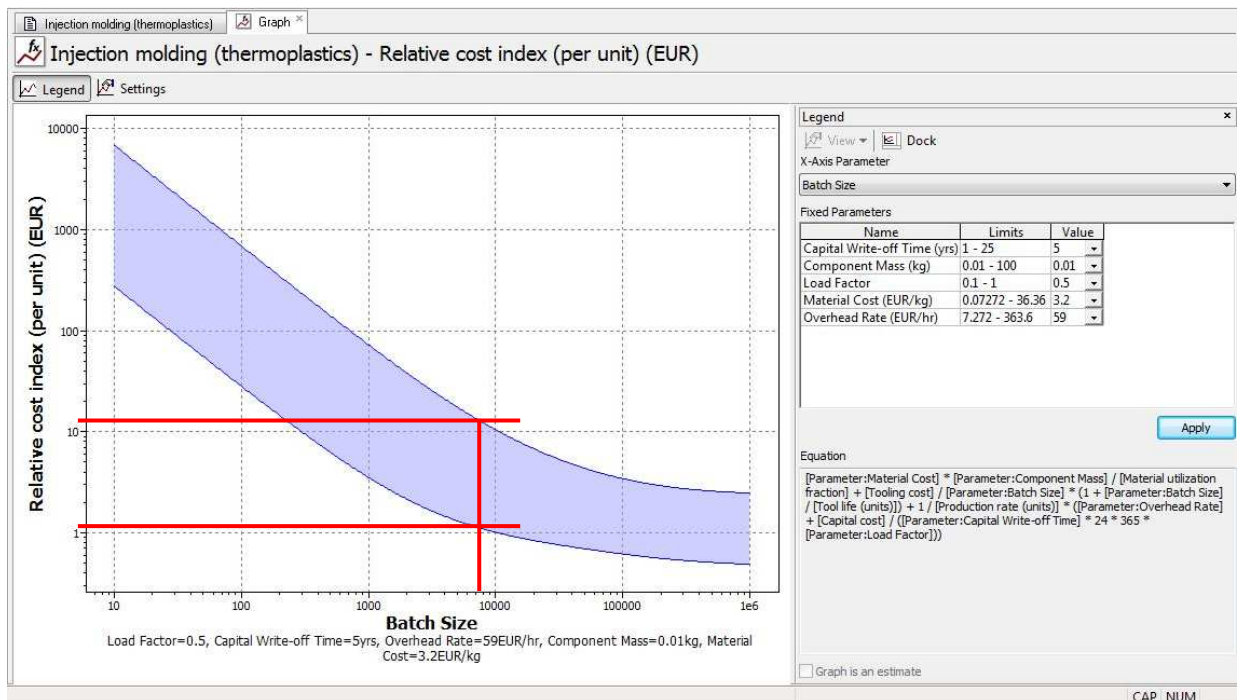
La tecnologia dello stampaggio per iniezione (fig. 102)



(Fig. 102)

Immagine schematica del processo di stampaggio per iniezione. I polimeri in granuli vengono immessi nella macchina attraverso una tramoggia, poi spinti verso lo stampo da una vite senza fine e riscaldati fino a fusione; infine immessi a pressione nello stampo, dove il componente prende forma. Dopo il tempo necessario per far raffreddare e indurire il pezzo, lo stampo si apre espellendolo dal suo interno.

GRAFICO MODELLO DEL COSTO C.E.S. EduPack 2012



Per un volume di produzione di 7500 pezzi, stimato in base ai vincoli produttivi minimi dello stampaggio per iniezione, il range di costo stimato dal grafico per realizzare la guida di scorrimento è compreso tra poco più di un euro ed 11 Euro.

Rispetto al costo stimato con il metodo A si rimane abbastanza in linea con esso, confermandone con buona approssimazione il valore sul costo finale dei 9,5 €.

Va tuttavia precisato che nel metodo B non si considerano adeguatamente i costi indiretti sull'utilizzo della macchina ed inoltre il costo orario rispetto all'uso della macchina è considerato su 365 giorni 24 ore al giorno. Al contrario nel metodo A si è tenuto conto della geometria e della complessità del pezzo da produrre per stimarne il costo dell'attrezzatura; infine il costo orario rispetto all'uso della macchina è considerato per 300 giorni lavorativi l'anno 8 ore al giorno.

Applicando il criterio di valutazione (B) per la stima del costo di produzione del sistema anti colpo di frusta, per tutti i componenti, il range di valori ottenuto con un volume di produzione di 7500 congegni l'anno, varia da un minimo di **41 €** ad un massimo di **102 €**

8.2 Conclusioni

Il tema della sicurezza a bordo di un veicolo risulta sempre di estremo interesse, sia dal punto di vista delle case automobilistiche, che da quello degli acquirenti. Infatti nonostante le migliorie pensate per aumentare il comfort oppure l'aspetto estetico, siano molto apprezzate, quei progetti che mirano ad aumentare la sicurezza conferiscono un grande valore aggiunto all'intero "sistema auto".

Dunque appurato questo ed il fatto che ci fosse spazio per un progetto che riguardasse le leghe a memoria di forma, vista anche l'attenzione crescente del mondo automotive verso le loro proprietà, si è pensato al progetto di questo congegno anti colpo di frusta.

Premettendo che l'efficacia di tale sistema andrebbe verificata con prove sperimentali e rilevamenti sui manichini dei crash test, i punti di forza di questo progetto sono:

- Aver contribuito a **migliorare il livello di sicurezza** alla guida di un veicolo.
- Aver **sostituito** completamente i **tradizionali attuatori meccanici**, ad oggi impiegati per compiere questo tipo di movimentazione di componenti all'interno e non solo, di un abitacolo. Infatti l'impiego delle leghe a memoria di forma ha comportato un alleggerimento complessivo di un prodotto che normalmente arriva a pesare qualche Kg, rispetto alle poche decine di grammi di tale congegno. Dunque si massimizza il rapporto potenza/peso con il fine ultimo di ridurre i consumi di carburante, poichè la massa del veicolo viene ridotta.
- La sua attivazione tramite riscaldamento da passaggio di corrente elettrica, **evita qualunque sistema di riduzione o di trasmissione**, di solito presente negli altri tipi di attuatori, perciò non si hanno movimenti di ingranaggi, da cui potrebbero derivare attriti e rumorosità fastidiose; soprattutto considerata la posizione appena dietro la testa.
- Vengono ridotte al minimo le dimensioni e il numero dei componenti dell'attuatore, il quale possiede **compattezza e semplicità meccanica**.
- Nonostante il costo medio delle SMA sia abbastanza alto (tra i 20 ed i 30 €/kg), tuttavia per questo tipo di **applicazioni filiformi** i costi di produzione e di manutenzione sono assolutamente **contenuti**.
- Tutti i componenti del sistema sono stati progettati **evitando inserti oppure viti e bulloni**, per ridurre il tempo ciclo in fase di produzione e facilitare l'assemblaggio.

- Nell'ottica di **standardizzare** l'impiego di un poggiatesta anti colpo di frusta in qualunque veicolo, **vengono fornite le lavorazioni necessarie** da effettuare sulla lamiera del telaio, (come ad esempio dimensioni e distanze dei fori), al fine di alloggiare tutte le parti coinvolte **senza dover modificare troppo il progetto originale del telaio** stesso.
- Infine tutti i componenti che costituiscono il sistema di movimentazione del poggiatesta, sono stati disegnati **senza complicare gli stampi dei pezzi già esistenti** (come le guide di scorrimento), limitando inoltre sia il numero che la complessità dei componenti aggiunti.

Gli svantaggi sono:

- Per questo tipo di applicazioni ad azionamento rapido, non esiste una formula matematica immediata che mettendo in relazione le dimensioni del filo, la sua resistività elettrica e la forza di output richiesta, mi faccia calcolare l'intensità di corrente necessaria da fornire affinché l'attuatore si attivi in un tempo desiderato. Infatti di solito vengono effettuate delle prove di misura in laboratorio, grazie alle quali si riescono a stabilire con buona approssimazione, sia l'intensità di corrente che la velocità di attivazione.
- Bisogna tener presente che questi attuatori SMA possiedono una durata utile che è funzione dei cicli di attivazione a cui il componente viene sottoposto. In questa circostanza il problema non sussiste, considerando che dopo ogni singola attivazione bisogna rimandare il veicolo in assistenza; questo è il vero svantaggio.

BIBLIOGRAFIA

1. Teh, Y., H., *Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators*, Australian National University, 2008.
2. Virgilli, V., *Materiali a Memoria di Forma: caratterizzazioni e applicazioni nel campo dei beni culturali*, Università di Bologna, 2008.
3. Brugnara, M., *Teoria ed applicazioni delle Leghe a Memoria di forma*, Università degli Studi di Trento, 1999.
4. Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., *Materiali dalla scienza alla progettazione ingegneristica*, Milano, Casa Editrice Ambrosiana, 2009.
5. Funakubo, H., *Shape Memory Alloys, Precision Machinery and Robotics*, Vol.1, S.I., Taylor & Francis, 1987, trad. in En. Kennedy J.B., S.I., S.d.
6. Inductotherm Group, *Il processo di induzione per fusione sottovuoto (Vim)*, 2012, URL(<<http://www.consarceng.com/italian/pages/products.html>>), 05/07/2012.
7. Saes Getters S.p.A., Tuissi, A., Bassani, P., Mangioni, A., Toia, L., Butera, F., *Fabrication Process and Characterization of NiTi Wires for Actuators* URL(<<http://www.saesgetters.com/default.aspxidPage=838>>), 19/07/2012.
8. *Attuatore*, URL(<<http://it.wikipedia.org/wiki/Attuatore>>), 26/08/2012.
9. Stoeckel, D., *Shape Memory Actuators for Automotive Applications*, in ["MATERIALS & DESIGN"], VOL. 11, 6 DECEMBER 1990.
10. PSTL, Ott. 2000, *Leghe a memoria di forma caratteristiche e applicazioni*, URL (<www.vincenzoarrichiello.com/pdfs/lmf-pstl.pdf>), 10/07/2012, p.15.
11. Butera, F., *Shape Memory Actuators, for Automotive Applications*, in ["ADVANCED MATERIALS & PROCESSES"], MARCH 2008.

12. Rota, M., *Compositi attivi con materiali a memoria di forma*, Cit., Università degli Studi di Pavia, pp. 7-8, 2000/01.
13. BSI.Italia, URL(<<http://www.bsigroup.it/it/Servizi-di-valutazione-e-certificazione/Sistemi-di-gestione/Standard-e-schemi/ISOTS-16949/>>), *ISOTS-16949*, 03/10/2012.
14. Bellini, A. et al., *Mechatronic Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps: A Case Study*, in [IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS], VOL. 56, NO. 7, JULY 2009.
15. Strittmatter, J. et al., *Long-time Stability of Shape Memory Actuators for Pedestrian Safety System*, in [Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering], Vol. 34, Issue 1, May 2009.
16. Barnes, M., B. et al., *Shape Memory Alloy Resettable Spring Lift for Pedestrian Protection*, in [Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies], Proceeding of SPIE Vol. 6930, 2008.
17. Biasiotto, M. et al., *Locking Device for Preventing a Rotation and/or an Axial Movement of a Pin, Including Shape Memory Releasing Means*, 06/07/2007, European Patent Specification EP 2 012 029 B1, CRF Società Consortile per Azioni.
18. Alacqua, S. et al., *Sunshade Device for Motor-vehicles, with Shape Memory Actuators*, 02/11/2010, United States Patent n° US 7, 823, 955 B2, CRF Società Consortile per Azioni.
19. Alacqua, S. et al., *Apparatus with Integrated Shape Memory Actuator for Regulating a Flow of Air in a Conduit, Particularly for Air-conditioning Systems in a Motor Vehicles*, 10/09/2002, United States Patent n° US 6,446,876 B1, CRF Società Consortile per Azioni.
20. Lawall, P., J. et al., *Manipulable Lumbar Support Utilizing Active Material Actuation*, 15/03/2011, United States Patent n° US 7, 905, 547 B2, GM Global Technology Operations.
21. Lawall, P., J. et al., *Adjustable Seat Ramp Utilizing Active Material Actuation*, 24/01/2012, United States Patent n° US 8, 100, 471 B2, GM Gloal Technology Operations.

22. Alacqua, S. et al., *A Release Device for a Component of a Motor Vehicle Seat, Including a Shape Memory Actuator*, 23/03/2005, European Patent Application EP 1 513 773 A1, CRF Società Consortile per Azioni.
23. Mayer, Ch., *Final Report for the Work on "Intelligent Safety Systems" (SP 6)*, European Funded Project n° FP6-PLT-506503, 07/07/2009.
24. Butera, F., *Outer-rear View Mirror for a Motor-vehicle with Shape Memory Actuating Means*, 15/01/2008, United States Patent n° US 7,318,649 B2, CFR Società Consortile per Azioni.
25. Butera, F., *Motor-vehicle Outer Rear View Mirror having a Shape Memory Actuating Device*, 24/02/1999, European Patent Application EP 0 897 831 A2, CRF Società Consortile per Azioni.
26. Butera, F. et al., *Motor-vehicle Rear View Mirror having an Anti-glare Shape Memory Actuating Device*, 26/12/2000, United States Patent n° 6,164, 784, Magneti Marelli S.p.A.
27. Butera, F. et al., *Lock for Dors*, 29/03/2005, United States Patent n° US 6,871,519, B2, CRF Società Consortile per Azioni.
28. MacGregor, M. et al., *Gauge Pointer with Integrated Shape Memory Alloy Actuator*, 01/08/2006, United States Patent n° US 7,082, 890 B2, Alfmeier Prazision AG Baugruppen und Systemlosungen.
29. Gerald, J., J. et al., *High Security Lock*, 09/02/1999, United States Patent n° 5,868,013, Nitinol Technologies Inc.
30. Mitteer, M., D., *Shifter with Actuator Incorporating Shape memory Alloy*, 19/10/2010, United States Patent n° US 7, 814, 810 B2, Grand Haven Stamped Products, a division of JSJ Corporation.

31. Tosco, F. et al., *Fuel Filling Lid for a Motor-vehicle, with a Shape Memory Actuator Device for Unlocking the Lid and a Flexible Connecting Member Associated with the Actuator Device*, 07/04/2010, European Patent Specification EP 2 082 914 B1, Fiat Group Automobili S.p.A.
32. Browne, A., L. et al., *Active Material Enabled Self-actuated Devices*, 15/12/2009, United States Patent n° US 7,631, 915 B2, GM Global Technology Operations.
33. Browne, A., L. et al., *SMA Heat Engines: Advancing From a Scientific Curiosity to a Practical Reality*, International Workshop SMART MATERIALS, STRUCTURES & NDT in AEROSPACE Conference NDT in Canada 2011, 2 - 4 November 2011, Montreal, Quebec, Canada.
34. Wikipedia l'enciclopedia libera, *Segmenti di automobili in Europa*, URL(<http://it.wikipedia.org/wiki/Segmenti_di_automobili_in_Europa>), 26/11/2012.
35. Jae, J., K., et al., *Recent Development and Applications of Magnesium Alloys in the Hyundai and Kia Motors Corporation*, in ["Materials Transactions"], Vol. 49, N° 5, pp. 894-897, 2008.
36. Hufenbach, W., et al., *An Integral Design and Manufacturing Concept for Crash Resistant Textile and Long Fibre Reinforced Polypropylene Structural Components*, in ["Procedia Engineering"], n°10, Elsevier, 2011.
37. Ron Blair, G., et al., *Automotive Cushioning Through The Age*, in ["The Molded Polyurethane Foam Industry Panel"], September 2008.
38. Deng, R., et al., *Flexible Polyurethane Foam Modelling and Identification of Viscoelastic Parameters for Automotive Seating Applications*, in ["Journal of Sound and Vibration"], 262, Academic Press, pp. 1-6, 2003.
39. Outlast[®], *Tecnologia*, URL(<<http://www.outlast.com/it/tecnologia>>), 21/11/2012.

40. Lennart, H., et al., *Arrangement and Method for Manufacturing of a Heatable Seat*, 14/11/2000, United States Patent n° 6 147 332, Kongsberg Automotive AB.
41. Christian, T., G., et al., *Variable Temperature Seat*, 28/01/1997, United States Patent n° 5 597 200, Amerigon Inc.
42. Daniels, F., G., et al., *Microvalve Controller for Pneumatically Contoured Support*, 27/01/2004, United States Patent n° US 6 682 059 B1, Ctex Seat Comfort Limited.
43. Franz, L., et al., *The Effect of a Lightweight Massage System in a Car Seat on Comfort and Alectromyogram*, in ["Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics"], Vol 34, n°2, p. 109, February 2011.
44. Cherniak, I., T., *Vehicular Portable Swivel Seat*, United States Patent n° 5 318 339, 07/06/1994.
45. Indipend Living Centres, *Auto Adapt Turny Swivel Car Seat Bases*, URL(<<http://ilcaustralia.org.au/products/6095>>), 06/11/2012.
46. Motorbox, *Concept Car*, URL(<<http://www.motorbox.com/auto/magazine/concept-car/nissan-forum>>), 22/11/2012.
47. Volvo, URL(<https://www.media.volvocars.com/media/articles/html/18283_7_8.aspx>), pubblicato il 12/12/2008.
48. Test di sicurezza euroncap, URL(<<http://it.euroncap.com/it/whiplash.aspx>>), 20/01/2013.
49. Bellelli, M., *Poggiatesta come va regolato?*, Settembre 2008, S.I.
50. Breed, S., D., *System and Method for Moving a Headrest for Whiplash Prevention*, 15/09/2009, United States Patent n° US 7 588 115 B2, Automotive Technologies International, Inc.

51. Insurance Institute for Highway Safety, *RCAR-IIWPG Seat/Head Restraint Evaluation Protocol (Version 3)*, March 2008.
52. Embedded system: l'airbag, URL(<[Http://www-micrel.deis.unibo.it/SMLS/doc/Slide0708/21_Airbag](http://www-micrel.deis.unibo.it/SMLS/doc/Slide0708/21_Airbag)>), 18/01/2013.
53. SaesGetters Datasheets, URL(<<http://www.Saesgetters.com/technicaldata/downloads>>), 21/01/2013.
54. Miga Motor Company, *Migaone™ DataSheet, Linear Shape Memory Alloy Actuator*, 06/08/2007.
55. Dynalloy Inc., Makers of Dynamic Alloys, *Technical Characteristics of Flexinol® Actuators Wires*, s.l., s.d.
56. Bosch Automotive Aftermarket, URL(<<https://www.bosch-automotive-catalog.com> >), 2012/2013.
57. *Modello di costo di produzione*, Politecnico di Milano, s.l., s.d., s.n.

ALTRE FONTI NON CITATE

- Williams, A., E., Shaw, G., Elahinia, M., *Control of an Automotive Shape Memory Alloy Mirror Actuator*, in ["Mechatronics"] n°20, Elsevier, 2010.
- Luchetti, T., Zanella, A., Biasiotto, M., Saccagno, A., *Electrically Actuated Antiglare Rear-view Mirror Based on a Shape Memory Alloy Actuator*, in ["Journal of Materials Engineering and Performance"], Vol. 18, Submitted 15/09/2008, in revised form 03/04/2009.
- Otsuka, K., Ren, X., *Physical Metallurgy of Ti–Ni-based Shape Memory Alloys*, in ["Progress in Material Science"], n°50, Elsevier, 2005.
- Stoeckel, D., Waram, T., *Use of Ni-Ti Shape Memory Alloy for Thermal Sensor Actuators*, Proceeding SPIE San Diego, p. 382, 1991.
- La Pira, R., *Nei ricodri delle Leghe*, in ["Nòva-Il Sole 24 ore"], estratto da p. 13, 25/10/2007.
- Bassani, P., *Leghe a memoria di forma Ni50-XTi50Cux : preparazione e caratterizzazione per l'uso in attuatori a stato solido*, Politecnico di Milano, 1998.
- Preti, L., C., *Microattuatori in leghe a memoria di forma : sperimentazione, implementazione di leggi costitutive e validazione numerico-sperimentale*, Politecnico di Milano, 2006.
- Tardugno, A., *Studio di microdispositivi in materiale a memoria di forma: progettazione, applicazioni numeriche e applicazioni biomedicali*, Università di Pavia, 2006.
- Neale, G., C., et al., *Vehicle Seat Assembly Having a Cradle Seat Back*, 13/04/2004, United States Patent n° US 6 719 368 B1, Magna Seating System Inc.
- Sgilagy, A., Borboni, A., *Folded Geometry, Multi-Functional NiTi Actuators*, NanoMuscle, Inc., Mechanical Engineering Department University of Brescia, p.4, S.d.

- Fonte, W., G., *An Automotive Lower Back Seat System Design*, Submitted to the Department of the Material Science and Engineering, at the Massachusetts Institute of Technology, pp. 10-21, 18/08/1994.
- Shimada, M., *Apparatus for Manufacturing a Seat*, 04/04/1989, United States Patent n° 4 818 331, Tachi-S Co., Ltd.
- Brennan, L., et al., *Automotive Vehicle Seating Comfort System*, 01/08/2006, United States Patent n° US 7 083 227 B2, W.E.T. Automotive Systems.
- Rees, A., W., R., *Extruded Automotive Seat Track*, 25/05/1993, United States Patent n° 5 213 300, ITT Corporation.
- Fujita, Y., *Slide Device for an Automotive Seat*, 12/07/1988, United States Patent n°4 756 503, Tachi-S Co., Ltd.
- Kawashima, H., *Swivel Seat for Vehicle*, 20/12/1988, United States Patent n° 4 792 188, Fuji Kiko Company.
- Bergs, J., Kanaska, D., *Motor Vehicle Seats and their Defect Classification*, in ["Engineering for Rural Development"], n°24, Latvia University of Agriculture, Jelgava, 25/05/2012.
- Lee, k. B., *Activating Headrest*, 10/10/2006, Unites States Patent n° US 7 118 174 B2, Hyunday Motor Company.
- Yamada , N., *Headrest Device for Active Headrest*, 06/12/2011, United States Patent n° US 8 070 222 B2, Nihon Technica Co.
- Maeda, K. et al., *Headrest*, 07/12/2010, United States Patent n° US 7 845 721 B2, Inoac Corporation.
- Dynalloy Inc., *Technical Characteristics of Flexinol[®] Actuator Wire*, S.l., S.d.

SITOGRAFIA

- URL <http://www.consarceng.com>
- URL <http://www.saesgetters.com>
- URL <http://www.wikipedia.org>
- URL <http://www.iso.org>
- URL <http://www.cmcq.com.cn/download/ts16949.en.pdf> (standard di qualità per i componenti automotive)
- URL <http://www.freepatentsonline.com>
- URL <http://www.epo.org> (European Patent Office)
- URL <http://www.strutpatent.com>
- URL <http://www.patentgenius.com>
- URL <http://www.docstoc.com>
- URL <http://www.nitinol.com>
- URL <http://www.tinialloy.com> (state of the art of shape memory actuators).
- URL <http://www.bsigroup.it/it/Servizi-di-valutazione-e-certificazione>
- URL <http://www.sciencedirect.com>
- URL <http://www.directindustry.com>
- URL <http://www.dynalloy.com>
- URL <http://www.ui.torino.it/allegati/21790>
- URL <http://www.vincenzoarrichiello.com/pdfs/lmf-pstl.pdf>
- URL <http://cecs.anu.edu.au> (Dept. Systems Engineering Australian National University, Improving the Speed of Shape Memory Alloy Actuators by Faster Electrical Heating).
- URL http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id_extrusion
- URL <http://www.moldedfoam-ip.com>
- URL <http://www.alcantara.com>
- URL <http://www.outlast.com/it/tecnologia>
- URL <http://www.bosch-automotivetechology.it/componentSeatingComfort>
- URL <http://www.migamotors.com>

ALLEGATI: Indice delle tavole tecniche

- Esploso (A0)
- Sezioni d'assieme (A0)
- Assieme blocco/scorrimento poggiatesta (A2)
- Sviluppo lamiera telaio (A2)
- Fermacuscino (A3)
- Struttura attuatore SMA (A3)
- Alloggiamento molla telaio (A4)
- Cardine (A4)
- Femo esterno (A4)
- Gancio di bloccaggio (A4)
- Guida di bloccaggio (A4)
- Perno interno (A4)