

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PAVIA FACOLTÁ DI INGEGNERIA DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

STUDIO E SIMULAZIONE NUMERICA DI UNA CONNESSIONE TRAVE-COLONNA EQUIPAGGIATA CON BULLONI SMA

Candidato: Diego Toccalini

Relatore: Prof. Ferdinando Auricchio Correlatore: Prof. Manuel L. Romero Correlatore: Prof. Alessandro Reali

Anno Accademico 2014/2015

Ai miei nonni Carlo e Cesare, ripensando alle loro fatiche, ho avuto la forza di affrontare anche i momenti più difficoltosi.

Sommario

Le connessioni trave-colonna sono sempre state uno dei punti deboli delle strutture soggette a carichi sismici. Esistono svariate tipologie di connessioni trave-colonna, ma quella di cui ci andremo ad occupare in questo studio è la connessione bullonata. L'avvento di "materiali intelligenti", ovvero materiali in grado di cambiare significativamente le loro proprietà meccaniche (come forma, rigidezza, viscosità, ecc...), termiche o eletteromagnetiche in modo controllato e prevedibile, ha suscitato un notevole interesse anche in questo settore. Le leghe a memoria di forma (SMA) appartengono a questa categoria e nel corso degli ultimi anni hanno suscitato grande interesse tra i ricercatori di tutti il mondo, grazie a due proprietà innovative: l'effetto a memoria di forma e la superelasticità. I primi capitoli di questo studio sono incentrati proprio su tali materiali: vengono approfondite le proprietà, le caratteristiche e le funzioni per la quale tali leghe possono essere utilizzate. Tra le proprietà fondamentali delle leghe a memoria di forma troviamo il recupero spontaneo (in determinate condizioni) della deformazione, connessa ad un'ottima capacità dissipativa; proprietà che vuol essere sfuttata al meglio anche nelle connessioni per recuperare eventuali deformazioni post-sisma e per fornire al collegamento una capacità auto-centrante. Per questo motivo si è pensato di inserire all'interno di questa tipologia di connessioni, bulloni costituiti da materiali SMA. In questo studio si farà riferimento a prove sperimentali compiute su modelli di connessione trave-colonna di acciaio equipaggiate da bulloni SMA. Tali modelli, realizzati in scala reale da Yam e Fang dell'università di Newcastle (UK), sono mostrate nell'articolo "Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys" [1]. In riferimento a tale articolo si è cercato di riprodurre, tramite il software ad elementi finiti ABAQUS, il grafico sperimentale momento-rotazione di una particolare connessione proposta, tentando di migliorare, se possibile, i risultati numerici ottenuti dagli autori stessi e cercando infine valutare l'influenza della temperatura e della pre-trazione dei bulloni, aspetti non sviluppati nell'articolo.

Ringraziamenti

"Io penso che le persone non si dimenticano. Non puoi dimenticare chi un giorno ti faceva sorridere, chi ti faceva battere il cuore, chi ti faceva piangere per ore intere. Le persone non si dimenticano. Cambia il modo in cui noi le vediamo, cambia il posto che occupano nel cuore, il posto che occupano nella nostra vita. Ci sono persone che hanno tirato fuori il meglio di me, eppure adesso tra noi, rimane soltanto un semplice "ciao". Ci sono persone che nonostante mi abbiano fatto versare lacrime, mi abbiano stravolto la vita... Mi hanno insegnato a vivere. Mi hanno insegnato a diventare quello che sono. E, anche se oggi tra noi resta solamente un sorriso o un semplice "ciao", faranno sempre parte della mia vita. Io non dimentico nessuno. Non dimentico chi ha toccato con mano, almeno per una volta, la mia vita. Perchè se lo hanno fatto, significa che il destino ha voluto che mi scontrassi anche con loro prima di andare avanti". Ed in questa esperienza di vita durata più di 5 anni, di queste persone ne ho incontrate davvero tante. Grazie a tutte loro.

Un sentito ringraziamento va al Professor *Ferdinando Auricchio* il quale mi ha sostenuto, in qualità di relatore, in questo percorso di crescita didattica e personale. L'incommensurabile passione per il suo lavoro, la sua tenacia, il suo forte spirito lavorativo e la sua determinazione mi hanno contagiato, rafforzando le mie qualità come studente ma soprattutto come persona. Forte è la mia stima, così come la mia gratitudine nei Suoi confronti.

Uno speciale ringraziamento va al Professor *Alessandro Reali* che mi ha dedicato parte del suo tempo in diverse occasioni durante questo percorso, aiutandomi e riservandomi sempre una parola d'incoraggiamento.

Desidero ringraziare fortemente il Professor *Manuel R. Romero*, docente all'Università di Valencia. Le Sue indicazioni sono state preziose nella buona riuscita del mio elaborato di laurea magistrale. Grazie per il Suo aiuto e per la Sua cordialità.

Ringrazio i Professori *Cheng Fang e Michael C.H. Yam*, autori dell'articolo da cui ho preso spunto per il mio lavoro, e docenti all'Università di Newcastle (UK), per avermi fornito indicazioni fondamentali prima ancora di incamminarmi in questo percorso.

Un enorme ringraziamento va a *Valentina Mercuri* e *Mauro Ferraro*, che mi hanno supportato e sopportato quotidianamente. Grazie per ogni loro consiglio, per la pazienza che hanno avuto e per il sostegno che mi hanno sempre fornito in maniera impeccabile.

Ringrazio infine Simone Morganti, Alice Finotello, Andrea Montanino, Xi Zou e Alberto Cattenone che quando ho avuto bisogno di un aiuto o di un consiglio non si sono mai tirati indietro, ma anzi, si sono dimostrati più che disponibili e gentili.

Per quanto riguarda la sfera degli affetti personali, i primi ringraziamenti vanno ai miei genitori

Sergio e Pinuccia che mi hanno da sempre sostenuto e che hanno fatto l'impossibile per cercare di aiutarmi in ogni situazione. Grazie ai miei nonni per essere stati sempre presenti.

Il grazie più profondo va a mio nonno *Carlo*, splendido esempio di vita e fonte di insegnamenti e valori. L'amore che nutri per i tuoi nipoti è la ricchezza più grande che ogni persona possa desiderare. Infinitamente grazie.

Grazie a mio fratello Leonardo, per essere un punto fermo della mia vita.

Fabi: averti incontrata è stata la fortuna più grande di questa mia esperienza pavese. Grazie per esserci sempre.

Grazie al *Mombe*, amico di sempre. Il rapporto che abbiamo instaurato col passare degli anni è impossibile da descrivere in queste poche righe. Grazie di tutto.

Non mi sono mai sentito "inquilino", ma parte di una famiglia. Grazie di cuore a *Mich* e *Marciot*, persone stupende e fratelli acquisiti.

Grazie *STIV*, *Baro e Scandola*: racchiudendo tutte le emozioni e le esperienze che abbiamo vissuto assieme, fuoriesce un'unica parola: amicizia.

Non solo compagni universitari, ma amici veri: *Buzzo, Mela, Baldo e Jack*, grazie per tutto quello che abbiamo condiviso. Ogni momento trascorso con voi è un ricordo felice. Spero di trascorrerne tanti altri in vostra compagnia.

Ringrazio il Professor *Angelo Maggi*: racchiuso tra gli affetti personali perchè oramai è più di un professore. Grazie per ogni Suo aiuto e consiglio.

Ringrazio infine ogni persona che mi ha arricchito, con le sue gesta, con le sue parole o con il tempo passato insieme.

Vi voglio bene!!

0

Indice

1	Intr	oduzione
	1.1	Collegamenti trave-colonna
	1.2	Le leghe a memoria di forma ed il loro impiego nell'ingegneria strutturale $\ \ldots \ \ldots$.
	1.3	Obiettivo ed organizzazione
2	Sha	pe Memory Alloys (SMA)
	2.1	Definizione
	2.2	Cenni storici
	2.3	Struttura cristallina: la trasformazione martensitica
	2.4	Temperature caratteristiche e trasformazioni di fase
	2.5	La transizione di fase R $\ \ldots$
	2.6	L'effetto della memoria di forma (SME)
		2.6.1 $$ L'effetto della memoria di forma a una via (OWSME) e a due vie (TWSME) $$.
	2.7	La superelasticità (SE)
	2.8	Defromazioni plastiche e training del materiale
	2.9	Processo produttivo delle SMA
		2.9.1 Fusione
		2.9.2 Estrusione
		2.9.3 Laminazione e trafilatura
		2.9.4 Ricottura
		2.9.5 Trattamenti termomeccanici
		2.9.6 Post produzione
	2.10	Capacità intrinseche e SMA maggiormente utilizzate
		2.10.1 Proprietà e funzioni intrinseche
		2.10.2 Leghe di nichel e titanio
		2.10.3 Leghe a isteresi stretta
		2.10.4 Leghe a isteresi ampia
		2.10.5 SMA ad alta temperatura
		2.10.6 Leghe a base di rame
		2.10.7 Leghe a base di ferro
	2.11	Applicazioni SMA al di fuori dell'ingegneria strutturale
		2.11.1 Attuatori
		2.11.2 Dispositivi di accoppiamento e fissaggio
		2.11.3 Dispositivi biomedicali
		2.11.4 Smorzatori
		2.11.5 Smart materials
		2.11.6 Applicazioni varie

3 Applicazioni di leghe a memoria di forma nell'ingegneria strutturale						
	3.1	1 Sistemi di dissipazione di energia: telai controventati				
	3.2	Dispositivi di isolamento	49			
	3.3	Dispositivi di smorzamento per ponti	54			
	3.4	Connessioni strutturali a base di SMA	58			
		3.4.1 Connessioni in strutture di acciaio	58			
	0.5	3.4.2 Connessioni in strutture di cemento armato	60			
	3.5	Strutture riabilitate tramite sistemi SMA	61 C0			
	3.0	Implego di SMA come rinforzi in strutture di cemento aramto	62			
4	Il so	oftware ad elementi finiti ABAQUS	64			
	4.1	Analisi agli elementi finiti	64			
		4.1.1 Vantaggi e svantaggi	64			
		4.1.2 Procedure di analisi	65			
		4.1.3 Cenni al metodo agli elementi finiti (FEM)	65			
	4.2	ABAQUS	67			
		4.2.1 ABAQUS/standard e ABAQUS/explicit	67			
		4.2.2 ABAQUS CAE	67			
5	\cos	truzione del modello	77			
	5.1	Modulo "Part" e creazione delle parti	77			
		5.1.1 Beam	77			
		5.1.2 Beam stiffner	79			
		5.1.3 Block	79			
		5.1.4 Column	79			
		5.1.5 Column stiffner	81			
		5.1.6 End-plate \ldots	82			
		5.1.7 SMA bolt \ldots	82			
		5.1.8 Part-8	82			
	5.2	Modulo "Property": definizione dei materiali e creazione delle sezioni	86			
		5.2.1 Definizione dell'acciaio	86			
		5.2.2 Definizione delle leghe a memoria di forma	93			
		5.2.3 Sezioni	97			
	5.3	Modulo "Assembly" e assemblaggio del modello	99			
	5.4	Modulo "Step" e definizione degli Output	100			
	5.5	Modulo "Interactions": definizione del contatto e dei vincoli interni	101			
	5.6	Modulo "Load": definizione dell'amplitude, dei carichi e delle condizioni al contorno .	106			
		5.6.1 Definizione dei carichi	106			
		5.6.2 Amplitude	100			
		5.6.3 Condizioni al contorno	108			
	5.7 E 0	Modulo "Mesn": mesnatura delle varie parti	109			
	0.8 5.0	Ivioquio "Jod" e fancio dell'analisi	110			
	5.9	Modulo "Visualization" e rappresentazione dei risultati	110			
6	Out	put e risultati dell'analisi	112			
	6.1	Calcolo dei momenti	112			
	6.2	Calcolo delle rotazioni	112			
		6.2.1 Metodo analitico	115			
		6.2.2 Metodo numerico	115			
	6.3	Gratico Reaction Moment - Plastic Rotation	116			

7	Infl	uenza	della temperatura e della pre-trazione dei bulloni	119
	7.1	Influer	nza della temperatura	119
		7.1.1	Test uniassiale a T=40°C \ldots	119
		7.1.2	Effetto sulla connessione	119
	7.2	Influer	nza della pre-trazione dei bulloni	120
		7.2.1	Metodo Free-body e grafico forza-spostamento nei bulloni	122
		7.2.2	Pre-trazione decrementata	122
		7.2.3	Pre-trazione incrementata	125
0	C	· ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	105
8	Con	iciusio	ni e sviluppi futuri	127

Elenco delle figure

$1.1 \\ 1.2 \\ 1.3$	Alcune tipologie di giunti a <i>cerniera</i>	$15 \\ 15 \\ 16$
2.1	Trasformazione da austenite a martensite schematizzata in due dimensioni, dove in (a) si ha completamente austenite ed in (d) completamente martensite. Come mostrato in (c), lo spostamento atomico, attraverso l'interfaccia martensitica, avviene con distanze	01
2.2	Due meccanismi di accomodamento del cambio di forma dovuto alla trasformazione martensitica. Nello Slip (in alto), la microstruttura è irreversibilmente "danneggiata"; nel Twinning (in basso) l'accomodamento è reversibile	21 21
2.3	Schematizzazione del Twin Boundary: un atomo situato su questo piano, possiede una	ഫ
2.4	I Twin boundaries nella fase martensitica possono essere mossi dall'applicazione di uno sforzo di taglio. I movimenti dei Twin boundaries sono riespondabili di cambiamenti di	22
2.5	forma macroscopici	23
	uno stato ancor più ordinato chiamato DO_3 , presente, per esempio, nella lega $Cu - Al - Ni$.	24
2.6	Micrografia ottica della lega a memoria di forma Cu-Zn che mostra le tipiche caratteri- stiche martensitiche.	25
2.7	Variazione delle proprietà di una lega a memoria di forma in funzione della tempera- tura. La fase genitrice (austenite) è rappresentata dal reticolo quadrato, che dopo la	0.0
2.8	Tipica curva sforzo-deformazione di un materiale con martensite twinned che mostra due	26
	distinte regioni elastiche e due distinti plateaus plastici: il primo dovuto al movimento dei <i>Twin boundaires</i> , il secondo dovuto a processi dislocativi <i>Slip</i>	27
2.9	Grafico sforzo-deformazione che mette in evidenza i comportamenti di una stessa lega a memoria di forma in funzione della temperatura: (a) $T > M_d$ si ha un normale comportamento elasto-plastico; (b) $T < M_f$, la fase stabile è la martensite; (c) $A_f <$	
2.10 2.11 2.12	$T < M_d$, si manifesta il fenomeno superelastico	27 28 29 29

2.13 La fase R, disegnata in (b), presenta una struttura romboedrica: tale cella è ottenuta per deformazione della cella austenitica (a), lungo una delle sue diagonali maggiori. . . 30 2.14 Effetto a memoria di forma: la placchetta SMA originariamente in condizioni di equilibrio (a), la placchetta deformata plasticamente tramite sforzo(b), la placchetta riscaldata 30 a temperatura > As recupera la forma originaria (c). $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$ 2.15 Effetto a memoria di forma: la montatura SMA di un paio di occhiali deformata plasticamente viene riportata alla forma originaria. 312.16 Effetto della memoria di forma ad una via in cui viene rappresentato il reupero della forma austenitica all'aumentare della temperatura. 322.17 Effetto della memoria di forma a due vie rappresentato dal recupero di una deformazione quando il materiale viene riscaldato a T>Af, ed da una nuova deformazione durante il raffreddamento. 32 2.18 Curve sforzo-deformazione di un singolo cristallo di Cu-Zn caricato ad una temperatura 332.19 Diagramma tensione-deformazione di un materiale a memoria di forma a valori di temperatura superiori ad Af. 34 2.20 Curve sforzo-deformazione per un provino inizialmente in fase austenitica che si trova ad una temperatura compresa tra Af ed Md. Entro tale intervallo di temperatura, in virtù della trasformazione martensitica indotta per sforzo, il materiale mostra un comportamento pseudoelastico (a sinistra) o superelastico (a destra). 342.21 Effetto superelastico: la montatura SMA di un paio di occhiali viene deformata alla temperatura compresa tra Af ed Md; rilasciando lo sforzo, la montatura riacquista la forma originaria. 352.22 Deformazione plastica raggiunta a seguito di un ciclo di carico. 3637 2.23 Rappresentazione schematica e realistica di un forno per fusione a induzione sottovuoto. 2.24 Schematizzazione delle tecnologie di estrusione diretta ed indiretta. 382.25 Schema di funzionamento della laminazione 39 2.26 Schema funzionale di un machinario per la ricottura 402.27 Da sinistra : uno stent in NiTi con la tipica struttura a maglia intreccita (immagine di Joe Muskin, Illinois University of Urbana Champaign). Lo stent viene inserito ancora chiuso all'interno dei vasi che rischiano l'occlusione (al centro). Qui si espandono attivati 442.28 Reggiseno con elementi SMA (a); elementi SMA per reggiseni di diverse dimensioni (b). 46Rappresentazione schematica di barre SMA in strutture a telaio. 483.13.2Schema dello smorzatore SMA proposto da Ma e Cho. 49(a) Dispositivi ibridi proposti da Yang et al. (b) Differenti configurazioni proposte ... 3.3503.4(a) Sistema di isolamento a scorrimento proposto da Krumme et al. (b) Schema di un dispositivo di isolamento in ponti autostradali. 513.5Schema funzionale di un dispositivo SMA che include un gruppo di ricentraggio e un 523.6Schema di un dispositivo ibrido di isolamento alla base SMA-gomma. 523.7Dispostivo di isolamento scorrevole..... 533.8Variazione dell'isteresi in un dispositivo di isolamento SMA al variare della temperatura. 533.9(a) Sezione di un cavo. (b) Danno provocato da corrosione e fatica (Saint Nazaire Bridge, 543.10 (a) Diagramma schematico di uno strallo inclinato. (b) Strallo inclinato nel piano connesso ad uno smorzatore SMA. 56

0

3.11 3.12	 (a) Quattro stralli lunghi 45 m. (b) Smorzatori a base di NiTi impiegati nel lavoro di Torra et al. Dove: A= strallo; B=smorzatore SMA; C= accelerometri				
	Confronto tra uno smorzatore SMA ed un Tuned Mass Damper (TMD) per il controllo	_			
	delle vibrazioni in uno strallo	7			
3.13	(a) Connessione trave-colonna in acciaio con l'utilizzo di tendini SMA. (b) Specifiche				
~	della connessione trave-colonna utilizzata nel lavoro di Speicher et al	9			
3.14	Grafici momento-rotazione della connessione con l'utilizzo di (a) acciaio, (b) SMA mar-				
3.15	tensitiche, e (c) SMA superelastiche				
3.16	Dettagli di connessioni trave-colonna in cemento armato rinforzate con materiale a	•1			
3.17	 (a) Campanile della chiesa di S. Giorgio, riabilitato da barre di acciaio e dispositivi SMA. (b) Dispositivi SMA impiegati nella riabilitazione della basilica di S. Francesco 	1			
	d'Assisi. (c) Esterno della sinagoga Sherith Israel a San Francisco 6	12			
3.18	Risultati dei test su travi a T compiuti da Zafar e Andrawes	3			
4.1	Simulazione tramite analisi agli elementi finiti dell'impatto di un veicolo contro una				
	barriera asimmetrica	6			
4.2	ABAQUS	8			
4.3	Superfici master e slave	'1			
4.4	Superfici master e slave - node-to-surface contact	2			
4.5	Superfici master e slave - surface-to-surface contact	2			
4.6	Deformata elementino con integrazione lineare	4			
4.7	Deformata elementino con integrazione quadratica	4			
4.8	Modelli bidimensionali di mesh strutturata	5			
4.9	Meshatura swept in un solido	6			
4.10	Solidi con geometrie complesse dove è consigliata una meshatura bottom-up 7	6			
51	Misura soziona trava	2			
5.2	Visualizzazione tridimensionale dell'elemente "Beam"	0 /Q			
5.2 5.3	Misure sezione irrigidimente trave	0 /0			
5.4	Visualizzazione tridimensionale dell'elemente "Beam stiffner"	9 70			
5.5	Visualizzazione triumensionale den elemento Deam stimier	9			
5.6	Visualizzazione tridimensionale dell'alemento "Block"	20			
5.0	Misure sezione colonna	21 21			
5.8	Creazione dei fori	21			
5.9	Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Column"	1 1			
5.10	Misure sezione irrigidimento-colonna	22			
5 11	Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Column stiffner"	2			
5.12	Misure sezione piastra terminale	33			
5 13	Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "End-plate"	3			
5.14	Misure sezione vite SMA	34			
5.15	Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "SMA bolt"	34			
5.16	Misure Part-8	55			
5.17	Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Part-8"	55			
5.18	Legame elasto-plastico acciaio	6			
5.19	Legame elasto-plastico acciaio e modulo tangente	57			

0

5.20 5.21 5.22 5.23 5.24 5.25 5.26 5.27 5.28 5.28	Incrudimento88Plasticità perfetta89Incrudimento negativo o softening89Softening critico (d) e sub-critico (e).89Dominio elastico istantaneo90Incrudimento isotropo91Incrudimento cinematico91Effetto Bauschinger92Parametri di riferimento per il modello superelastico Auricchio-Taylor96
5.29 5.30	Confronto tra il grafico tensione-deformazione riportato dall'articolo e quello ricavato
0.00	dal test uniassiale
5.31	Esempio di "Section Assignments"
5.32	Una fase dell'assemblaggio mediante il comando <i>Coincident point</i>
5.33	Modello assemblato
5.34	Interazione di contatto End-plate - Block
5.35	Interazione di contatto Column - Block
5.36	Interazione di contatto End-plate - Column 102
5.37	Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (1)
5.38	Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (2)
5.39	Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (3)
5.40	Interazione Constraint tie tra Beam e Beam-stiffner (1)
5.41	Interazione Constraints tie tra Beam e Beam-stiffner (2)
5.42	Interazione Constraints tie tra Beam e End-plate 104
5.43	Interazione Constraint tie tra Blocks e SMA-bolts (1)
5.44	Interazione Constraints tie tra Blocks e SMA-bolts (2)
5.45	Interazione Constraints tie tra Beam e Part-8
5.46	Applicazione Bolt load
5.47	Legge temporale applicata allo spostamento, <i>Amplitude</i>
5.48	Definizione dello spostamento all'estremita della trave
5.49	Incastro della colonna: $Column_T op \in Column_Bottom$
5.50 F F 1	Vincolo di simmetria: Symmetry
0.01 5 50	Modello a mesnatura completata
0.02	Modulo Visualization: configurazione indeformata
0.00	Modulo $Visualization$: variable US a 19.00 second $\ldots \ldots \ldots$
6.1	Risultati sperimentali e numerici ottenuti da Yam e Fang
6.2	Sezione sulla quale sono state calcolate le variabili di interesse
6.3	Grafico Reaction force 3 - Time, nella sezione incastrata "bottom" della colonna 114
6.4	Grafico Reaction force 3 - Time, nella sezione incastrata "top" della colonna 114
6.5	Grafico Reaction Moment-Time
6.6	MPC-beam-constraint, per il calcolo delle rotazioni
6.7	Grafico Plastic Rotation-Time
6.8	Grafico Reaction Moment-Plastic Rotation
6.9	Confronto tra le curve Momento-Rotazione
7.1	Confronto dei grafici $\sigma - \varepsilon$ della lega durante un test di trazione uniassiale alle temperature di 22°C e 40°C
7.2	Confronto dei grafici $RM - UR$ della connessione alle temperature di 22°C e 40°C 121

7.3	Confronto dei grafici Plastic Energy Dissipation-Time della connessione alle temperature		
	di 22°C e 40°C	121	
7.4	Tecnica del "Free Body" utile per il calcolo della risultante della forza nei bulloni	123	
7.5	Grafico Forza-Spostamento assiale del bullone soggetto ad una pre-trazione di 19 KN	123	
7.6	Confronto tra le curve Forza-Spostamento assiale dei bulloni soggetti a una pre-trazione		
	rispettivamente di 19 (originale), 10 e 1 KN	124	
7.7	Confronto tra le curve Momento-Rotazione plastica delle connessioni con i bulloni sog-		
	getti a una pretrazione rispettivamente di 19 (originale), 10 e 1 KN	124	
7.8	Confronto tra le curve Forza-Spostamento assiale dei bulloni soggetti a una pre-trazione		
	rispettivamente di 19 (originale), 35 e 45 KN	125	
7.9	Confronto tra le curve Momento-Rotazione plastica delle connessioni con i bulloni sog-		
	getti a una pre-trazione rispettivamente di 19 (originale), 35 e 45 KN	126	

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto delle principali proprietà tra leghe NiTi e leghe a base di Cu	20
5.1	Parametri di alcune parti del modello derivanti da prove sperimentali	92
5.2	"True" parameters, inseriti nel codice	93
5.3	Significato e valore dei parametri per la definizione del materiale a memoria di forma .	96
5.4	Elenco delle sezioni assegnate alle varie parti del modello	98
5.5	Tipo di interazione e parti a cui è stata assegnata	101
5.6	Elenco del tipo e del numero di elementi assegnati alle varie parti durante l'operazione	
	di meshatura	109

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo introduttivo verranno inizialmente introdotte le differenti tipologie di connessione trave-colonna impiegate nelle costruzion in acciaio e successivamente verranno descritte le caratteristiche dei materiali a memoria di forma (*Shape Memory Alloys (SMA)*). Al fine di motivare il seguente lavoro, verranno presentati i vantaggi che alcune proprietà innovative di tali materiali possono portare a sistemi strutturali di questo tipo. Alla fine della sezione viene riportata la struttura del lavoro con una breve descrizione per ogni capitolo sviluppato nel seguito.

1.1 Collegamenti trave-colonna

I giunti trave-colonna sono tra gli elementi fondamentali della progettazione di strutture in acciaio, e possono essere realizzati in svariati modi collegando la trave all'anima della colonna, oppure alla flangia con soluzione bullonata, saldata o mista. Generalmente, tali collegamenti, possone essere raggruppati in due diverse categorie: giunto a cerniera o giunto ad incastro. Ovviamente essi devono essere in grado di sopportare situazioni differenti dal punto di vista delle caratteristiche di sollecitazione e pertanto è necessario che la progettazione e la realizzazione di tali collegamenti sia il più accurata possibile.

- giunto a cerniera: esso non presenta la facoltà di trasmettere le azioni flettenti, mentre invece, deve possedere un'adeguata capacità rotazionale in modo tale da esprimere al meglio il vincolo di cerniera. Esso può essere costruttivamente realizzato mediante differenti dettagli costruttivi riportati in Figura 1.1.
- *giunto ad incastro*: tale giunto, contrariamente al precedente, è in grado di trasmettere le azioni flettenti tra i due elementi strutturali, ma non consente rotazioni di alcun tipo. Il collegamento viene generalmente effettuato sulla flangia della colonna, che è dotata di maggior inerzia rispetto all'anima; alcune tipologie di tali connessioni vengono mostrate in Figura 1.2.

La tecnica costruttiva migliore per realizzare un giunto ad incastro sarebbe quella di saldare parte della trave alla flangia della colonna, per poi realizzare un giunto trave-trave (Figura 1.3).

1.2 Le leghe a memoria di forma ed il loro impiego nell'ingegneria strutturale

Partendo dal concetto di intelligenza in senso lato viene introdotta una particolare classe di materiali che oltre alle intrinseche caratteristiche meccaniche, fisiche, chimiche che contraddistinguono in genere ciascuna tipologia di materiale, presentano delle proprietà di carattere funzionale. Con il termine funzionale si intende indicare la capacità di reagire a opportuni stimoli, compiendo determinate azioni:



Figura 1.1: Alcune tipologie di giunti a cerniera.



Figura 1.2: Alcune tipologie di giunti ad *incastro*.



Figura 1.3: Giunto ad incastro trave-trave.

ad esempio un materiale megneto-strittivo sottoposto ad un campo elettromagnetico si deforma, un piezoelettrico sottoposto a deformazione produce una differenza di potenziale, il germanio esposto alla luce ne assorbe i fotoni generando corrente elettrica, altri sono in grado di compiere più funzioni contemporaneamente [30]. Tra tutte questa varietà di materiali sono comprese anche le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloys (SMA)*).

Negli ultimi anni sono state effettuate svariate ricerche nel campo dell'ingegneria strutturale, ponendo particolare attenzione al controllo della risposta sismica delle strutture. Diversi sistemi e dispositivi innovativi, utilizzando principalmente leghe Ni-Ti o leghe a base di rame, sono stati realizzati per ridurre le forze sismiche agenti sulla struttura, o per assorbire parte dell'energia sismica, nonchè per regolare lo smorzamento della stessa. Le leghe a memoria di forma sono state inserite all'interno di questi dispositivi in farie forme ed in più configurazioni possibili, come ad esempio: fili, barre, nastri o tubi. Recentemente sono stati sviluppati dispositivi strutturali a base di SMA addirittura più competitivi delle classiche applicazioni in acciaio, elastiche o viscoelastiche, perchè in grado di combinare proprietà fondamentali come un'ottima capacità di recupero della deformazione ed una buona dissipazione energetica.

1.3 Obiettivo ed organizzazione

Nell'articolo "Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys" [1], pubblicato da Fang, Yam, Lam e Zhang nel 2015 vengono riprodotti sia fisicamente, in scala reale, sia numericamente attraverso un software ad elementi finiti, diversi modelli di connessione travecolonna equipaggiati con bulloni a memoria di forma. Il test è stato effettuato su un totale di sette modelli ognuno avente geometrie differenti; la dimensione della trave e della pistra terminale sono state determinate in modo da garantire la loro permanenza in campo elastico durante il processo di carico; con lo scopo di rafforzare la struttura sono stati applicati irrigidimenti addizionali. Un martinetto idraulico a doppia azione è stato utilizzato per l'applicazione dello spostamento ciclico all'estremintà della trave, inoltre ad ogni bullone è stata applicata una pre-trazione pari al 65% del carico di snervamento per assicurare una rigidezza iniziale sufficiente della connessione e per garantire un efficiente meccanismo di ricentraggio. Dopo la pre-trazione dei bulloni è stato applicato il carico ciclico all'estremità della trave. Dopo aver ottenuto le curve momento-rotazione plastica di ogni modello, sia sperimentale che numerica, sono state tratte conclusioni sulla geometria maggiormente efficace, sulla dissipazione energetica, nonchè sulla capacità di ricentraggio; infine sono state proposte alternative a questo tipo di dispostivi per migliorare ulteriormente determinate proprietà.

Lo scopo di questa tesi è quello di riprodurre al meglio, tramite il software ad elementi finiti ABAQUS/Standard, uno dei modelli di tale studio (più precisamente il modello D10-L190-H210) al

1

fine di ottenere una curva momento-rotazione che si avvicini il più precisamente possibile a quella sperimentale, tentando persino, se possibile, di migliorare la curva numerica ottenuta dagli autori dell'articolo stessi. Successivamente, sono state effettuate ulteriori analisi sullo stesso modello, in modo da valutare l'influenza di due fattori fondamentali non considerati nell'articolo: la variazione della temperatura ambiente e l'entità della pre-trazione dei bulloni.

La tesi è stata strutturata come segue:

- Capitolo 2: "Shape Memory Alloys (SMA)": il primo capitolo effettivo riguarda esclusivamente le leghe a memoria di forma: oltre alla trasformazione di fase, resposabile delle proprietà maggiormente rilevanti di tali leghe, sono stati anche approfonditi diversi aspetti meno conosciuti ma comunque di fondamentale importanza. Viene mostrato per completezza anche il processo produttivo delle stesse, determinante per far si che le proprietà sopracitate vengano manifestate al meglio; infine viene riportara una panoramica sulle leghe a memoria di forma maggiormente utilizzate e sulle applicazioni che sfruttano le loro proprietà.
- Capitolo 3: "Applicazioni di leghe a memoria di forma nell'ingegneria strutturale": questa sezione riguarda totalmente l'impiego di leghe a memoria di forma nel settore dell'ingegneria strutturale: vengono descritte le diverse applicazioni e tecnologie utilizzate all'interno di vari sistemi strutturali.
- Capitolo 4: "Il software ad elementi finiti ABAQUS": viene qui riportata una breve introduzione al metodo agli elementi finiti ed una accurata descrizione ed analisi del software utilizzato per le simulazioni numeriche.
- Capitolo 5: "Costruzione del modello": in questo capitolo viene descritta passo dopo passo l'intera costruzione del modello D10-L190-H210 mediante l'utilizzo del software ABAQUS.
- Capitolo 6: "Output e risultati dell'analisi": vengono riportati, descritti ed analizzati i risultati ottenuti dal'analisi numerica.
- Capitolo 7: "Influenza della temperatura e della pre-trazione dei bulloni": dopo aver effettuato ulteriori analisi vengono analizzate e valutate l'influenza della temperatura e della pre-trazione dei bulloni sul comportamento dell'intera struttura.
- Capitolo 8: "Conclusioni e sviluppi futuri"

1

Capitolo 2

Shape Memory Alloys (SMA)

2.1 Definizione

Vengono definite leghe a memoria di forma particolari materiali metallici che presentano proprietà esclusive [3], tra le quali se ne distinguono due:

- la capacità di ricordare una determinata forma geometrica macroscopica, impressa attraverso speciali trattamenti termomeccanici, fenomeno questo che prende il nome di Shape Memory Effect (SME)
- la possibilità di subire deformazioni dell'ordine del 10% recuperandole completamente durante la fase di scarico, senza evidenziare fenomeni di plasticizzazione, proprietà nota come Superelasticity (SE), o Pseudoelasticity, (in realtà fra le due proprietà vi è una sottile differenza che verrà evidenziata più avanti).

Entrambe queste proprietà sono da attribuirsi ad una transizione di fase martensitica termoelastica, che può essere indotta o da una variazione di temperatura oppure da uno stato di sforzo agente sul materiale. Infatti, a seconda della temperatura e della tensione loro impressa, tali materiali possono presentare due diverse fasi cristallografiche, dette:

- FASE AUSTENITICA
- FASE MARTENSITICA

Le trasformazioni dell'una nell'altra, e viceversa, al variare della sollecitazione termomeccanica, sono responsabili delle proprietà sopra citate.

2.2 Cenni storici

I primi a scoprire la trasformazione connessa con la memoria di forma in una lega metallica, furono due ricercatori, *Chang* e *Read*, nel 1932 [4]. Essi notarono la reversibilità della trasformazione martensitica in una lega AuCd (oro-cadmio) sulla base di osservazioni metallografiche e di variazioni della resistività del materiale.

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 *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 [5]. Da allora iniziarono i primi studi su questa classe di materiali, ed in particolare, sui NiTiNOL (acronimo di nichel, titanio e NOL). [6] [7] [8].

Nei decenni successivi, le leghe a memoria di forma divennero oggetto di notevole interesse, sia scientifico che 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 automobilistica. Il merito di un tale successo va alle loro esclusive proprietà legate all'effetto di memoria di forma, alla superelasticità e alla capacità di smorzare le vibrazioni, ma soprattutto alla loro proprietà di essere progettabili, e di conseguenza adattabili alle più svariate richieste.

A partire dagli anni '80 del XX secolo, questi materiali sono stati indagati sempre più approfonditamente anche dal punto di vista delle proprietà macroscopiche, per comprendere i meccanismi che presiedono alla trasformazione complessa che li caratterizza, denominata *trasformazione martensitica*. Di conseguenza, si può affermare che questa classe di materiali gode di duplice fascino, per le sue sempre più numerose applicazioni e per i fenomeni che caratterizzano le sue trasformazioni di base.

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

- 1. Le leghe NiTi presentano una maggiore deformazione per effetto della memoria di forma (fino al 10% contro il 5% di quelle a base di rame), sono più stabili termicamente, hanno un'eccellente resistenza alla corrosione e allo stress corrosion (corrosione sotto sforzo). Inoltre, la maggiore resistenza meccanica ne permette l'utilizzo per la realizzazione di giunti meccanici e di tenuta, e la resistenza alla corrosione cui si è accennato, nonchè la biocompatibilità, fanno si che queste possano essere impiegate in ambito biomedico, sotto forma, per esempio, di filtri anti-coaugulo per la circolazione sanguigna (stent) o di perni per fratture ossee.
- 2. Le leghe a base di rame, oltre a 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 si che queste rimanessero, comunque, le più studiate ed applicate.

Nella tabella sottostante vengono confrontate proprietà meccaniche, fisiche e termiche delle leghe Nichel-Titanio e delle leghe Cu [1] [9].

2.3 Struttura cristallina: la trasformazione martensitica

Le trasformazioni di fase solido-solido sono di due tipologie: diffusive e dislocative. Nelle trasformazioni diffusive, una nuova fase può essere generata solo da un movimento casuale degli atomi su distanze relativamente lunghe; questo movimento determina un cambiamento della composizione chimica nel passaggio tra le due fasi. Poichè è necessaria una migrazione atomica, questo tipo di trasformazione dipende sia dal tempo che dalla temperatura. Contrariamente, le trasformazioni dislocative non richiedono movimenti degli atomi di così lungo raggio; in questi casi gli atomi vengono riorganizzati in una nuova struttura cristallina, ma senza modificare la natura chimica della matrice. Poichè non è necessaria alcuna migrazione atomica, generalmente queste trasformazioni progrediscono indipendentemente dal tempo, con il movimento dell'interfaccia tra le due fasi limitata solo dalla velocità del suono. Le trasformazioni martensitiche sono generalmente di questa seconda tipologia e si formano mediante il raffreddamento di una fase a temperatura superiore, chiamata fase genitrice, o austenite. Le trasformazioni martensitiche sono trasformazioni del primo ordine, poichè si ha una cessione di calore nella trasformazione da austenite a martensite, vi è inoltre un'isteresi termica associata alla

Proprietà	Niti	CuAlNi	CuZnAl
-	$(48-52\%\mathrm{Ni})$	(10-14%Al;2-5%Ni)	(15-30%Zn;3-7%Al)
Temp. Fusione [°C]	1300	$650 \div 1020$	$1020 \div 1100$
Densità $[g/cm^3]$	6,45	7,64	$11 \div 13$
Resistività $[\mu \Omega * cm^3]$	Austenite=-100	$8,5 \div 9,7$	$11 \div 13$
	Martensite = -70		
Conduttività [W/cm*°C]	Austenite=18	120	$30 \div 43$
	Martensite = 8,5		
Capacità termica [J/Kg*°C]	837	400	$373 \div 574$
Modulo Young [GPa]	Austenite= $70 \div 100$	Fase Beta=72	Fase Beta=85
	$Martensite{=}28 \div 41$	Martensite=70	Martensite = 80
Limite snervamento [MPa]	Austenite= $200 \div 700$	Fase Beta=350	Fase Beta=400
	Martensite= $70 \div 150$	Martensite = 80	Martensite = 80
Tensione ultima [MPa]	$900 \div 1900$	600	$500 \div 800$
Temp. Trasformazione [°C]	$-200 \div 110$	≤ 120	≤ 200
Shape Memory Strain	MAX 8,5%	4%	4%
Isteresi Termica [°C]	01/12/50	15/25	15/20

Tabella 2.1: Confronto delle principali proprietà tra leghe NiTi e leghe a base di Cu

trasformazione, ed esiste un range di temperature entro il quale si ha la coesistenza delle due fasi, austenitica e martensitica.

Dal punto di vista cristallografico, la trasformazione della fase austenitica nella fase martensitica viene composta da due contributi: la cosiddetta deformazione di Bain (*Bain strain*), ed il successivo accomodamento (*Lattice-invariant shear*).

Come si può notare in 2.1, dove viene riportata una schematizzazione bidimensionale della trasformazione di fase, l'evoluzionei del fenomeno all'interno del materiale, avviene attraverso un'interfaccia che comprende un solo piano di atomi alla volta, conseguentemente, ad ogni atomo è richiesto uno spostamento minimo, tale da non produrre la rottura dei legami chimici.

La seconda parte della trasformazione martensitica (*Lattice-invariant shear*), è una fase di accomodamento: la struttura martensitica prodotta dalla deformazione di Bain presenta una forma, e spesso anche un volume, differenti dalla fase genitrice austenitica (comparazione tra Figura 2.1 (a) e 2.1 (d)). L'avvento della martensite in un normale acciaio comporta un cambiamento sia del volume, sia della forma; mentre leghe a memoria di forma come NiTi subiscono solamente un cambiamento di forma. Per questo motivo è necessario che la nuova fase martensitica appena formata e l'austenite circostante, trovino un'accomodamento della nuova struttura.

Esistono due meccanismi differenti attraverso i quali è possibile realizzare tale accomodamento: lo slittamento atomico (Slip), o la geminazione (Twinning), rispettivamente Figura 2.2 (a) e 2.2 (b).

In entrambi i casi il materiale, che presenta la nuova struttura martensitica in ogni cella, assume la stessa forma macroscopica della fase genitrice; ma, mentre lo slittamento atomico (Slip) è un processo irreversibile, tipico degli acciai, siccome cambia in modo permanente la microstruttura del materiale, la geminazione (Twinning), è un processo reversibile, ma in grado di accomodare soltanto cambiamenti di forma e non di volume contrariamente a quanto avviene nello slittamento. Come è facilmente deducibile quindi, nelle leghe a memoria di forma, il meccanismo principale di accomodamento è quello della geminazione, che conserva la reversibilità della trasformazione.

Come si può notare in Figura 2.3, il processo di accomodamento avviene attraverso un piano caratteristico speculare, denominato *Twin boundary*: posizionandosi sul boundary, la vista in una direzione è perfettamente speculare a quella opposta. Gli atomi situati su tale piano vedono lo stesso numero e lo stesso tipo di legami in entrambe le direzioni.



Figura 2.1: Trasformazione da austenite a martensite schematizzata in due dimensioni, dove in (a) si ha completamente austenite ed in (d) completamente martensite. Come mostrato in (c), lo spostamento atomico, attraverso l'interfaccia martensitica, avviene con distanze brevi.



(b) Accommodation by twinning

Figura 2.2: Due meccanismi di accomodamento del cambio di forma dovuto alla trasformazione martensitica. Nello Slip (in alto), la microstruttura è irreversibilmente "danneggiata"; nel Twinning (in basso) l'accomodamento è reversibile.



Figura 2.3: Schematizzazione del Twin Boundary: un atomo situato su questo piano, possiede una vista speculare a destra e a sinistra del piano stesso.

Il Twin boundary è un'interfaccia ad energia molto bassa e possiede un'elevata mobilità; queste risultano essere caratteristiche chiave di tale piano: la stabilità relativa della fase martensitica non è fortemente influenzata dal numero o dalla posizione di tali piani. Con l'applicazione di uno stress alla struttura, i Twin boundaries verranno facilmente mossi, consentendo che la microstruttura del materiale si disponga secondo una variante preferenziale. Il risultato del movimento dei Twin boundaries è la conversione di una variante in un'altra: la variante scelta sarà la più favorevole, in stretta dipendenza dalla direzione di applicazione del carico.

Come mostrato in Figura 2.4, l'applicazione di uno sforzo di taglio, produce una coalescenza di diverse varianti in una variante singola, tale fenomeno prende il nome di degeninazione o *Detwinning*.

Dalla Figura 2.1 alla 2.4, non vengono distinti i vari tipi di atomi che sarebbero presenti in maniera chiaramente differente, in qualsiasi tipo di lega. In ogni lega, tali atomi sono distribuiti su siti reticolari: nell'acciaio, gli atomi dei diversi elementi sono distribuiti casualmente sui siti reticolari, mentre in leghe NiTi, gli atomi si trovano su siti specifici in maniera molto ordinata.

Durante la trasformazione martensitica, la martensite assume lo stesso ordine della fase genitrice, tale processo è denominato: *Inherited ordering*.

Le strutture mostrate in Figura 2.5 (a) e 2.5 (b) sono celle a simmetria centrata (in Figura 2.5 (a) si ha una struttura a cella centrata cubica (BCC), mentre la struttura in Figura 2.5 (b) viene chiamata B2 o CsCl). Le leghe a memoria di forma sono generalmente basate su una simmetria BCC: alcune con una struttura BCC, altri con la struttura B2, ed infine una parte con un ordinamento ancora più complesso denominato DO_3 (Figura 2.5 (c)). E' interessante notare la progressione da BCC a B2 o DO_3 per soddisfare la necessità dei diversi atomi di rimanere separati l'uno dall'altro.

La martensite appare generalmente in lastre: in molte leghe a memoria di forma le lastre di martensite sono larghe ed è facile riconoscerle attraverso un microscopio ottico; eccetto la lega binaria Ni-Ti che presenta lastre molto sottili che non possono essere notate neanche con l'ausilio del microscopio ottico. In tutte le leghe, ma specialmente in quella Ni-Ti, bisogna porre molta attenzione nella preparazione dei campioni da visualizzare, infatti, anche semplici operazioni quali strofinatura o lucidatura possono danneggiare la martensite.

La Figura 2.6 mostra la micrografia tipica di un materiale martensitico. Nella figura si può notare un graffio che va da sinistra a destra dell'immagine, tale graffio viene effettuato sulla superficie durante il raffreddamento, nel passaggio da austenite a martensite; in ogni lastra di martensite la direzione del graffio è leggermente diversa. Un'altra caratteristica tipica della martensite è la superficie non uniforme: scorrendo semplicemente un dito su tale materiale è possibile accorgersi di questa peculiarità [10].



Figura 2.4: I Twin boundaries nella fase martensitica possono essere mossi dall'applicazione di uno sforzo di taglio. I movimenti dei Twin boundaries sono riespondabili di cambiamenti di forma macroscopici.



Figura 2.5: Strutture ordinate e disordinate che è facile riscontrare nelle leghe a memoria di forma: (a) mostra una struttura BCC disordinata dove atomi di diverso tipo sono distribuiti casualmente; (b) mostra la struttura B2, tipica della lega NiTi, dove le varie tipologie di atomi sono ordinate su specifici siti per separarsi il più possibile. Sebbene (a) e (b) sembrano avere una simmetria BCC, la struttura ordinata (b) non è di quel tipo siccome gli atomi posti negli angoli sono di natura diversa rispetto a quello al centro. (c) mostra uno stato ancor più ordinato chiamato DO_3 , presente, per esempio, nella lega Cu - Al - Ni.



Figura 2.6: Micrografia ottica della lega a memoria di forma Cu-Zn che mostra le tipiche caratteristiche martensitiche.

2.4 Temperature caratteristiche e trasformazioni di fase

Quasi tutte le proprietà fisiche di austenite e martensite sono tra loro differenti e quindi, oltrepassato il punto di trasformazione, si verifica un'importante varietà di modifiche di tali proprietà.

Le temperature $M_s, M_f, A_s e dA_f$ indicate nel grafico sottostante si riferiscono alle temperature cui ha inizio la trasformazione di asutenite in martensite e, viceversa, di martensite in austenite rispettivamente.

Più in dettaglio:

- A_s , o Austenite Start: in riscaldamento, è la temperatura cui ha inizio la trasformazione della martensite in austenite.
- A_f , o Austenite Finish: in riscaldamento, è la temperatura cui ha termine la trasformazione della martensite in austenite.
- M_s , o Martensite Start: in raffred damento, è la temperatura cui ha inizio la trasformazione dell'austenite in martensite.
- M_f , o Martensite Finish: in raffred damento, è la temperatura cui ha temine la trasformazione dell'austenite in martensite.

Queste temperature possono cambiare entro intervalli più o meno ampi e, come si è già accennato, alla trasformazione martensitica è associata una determinata isteresi termica, ossia una variazione delle temperature, di inizio e di fine trasformazione tra la fase di riscaldamento e quella di raffreddamento. La grandezza dell'isteresi dipende dal tipo di lega, ma generalmente, valori compresi tra 20C - 40C sono tipici delle leghe a memoria di forma. E' importante sottolineare che minime variazioni nelle percentuali dei divrsi componenti possono avere effetti violenti sulle temperature delle trasformazioni di fase. Comunemente la prima lastra di martensite che si forma in corrispondenza della temperatura M_s è l'ultima a trasformarsi in austenite in corrispondenza della temperatura M_f è la prima a ritornare austenite in corrispondenza della temperatura M_f è la prima a ritornare austenite in corrispondenza della temperatura M_s .



Figura 2.7: Variazione delle proprietà di una lega a memoria di forma in funzione della temperatura. La fase genitrice (austenite) è rappresentata dal reticolo quadrato, che dopo la trasformazione martensitica, viene distorto nell'elemento romboidale (martensite).

Una proprietà che cambia in modo significativo è la resistenza allo snervamento: la struttura martensitica si può deformare spostando i *Twin boundaries*, che come detto prima, risultano essere particolarmente mobili; per questo motivo la resistenza allo snervamento della martensite è estremamente inferiore rispetto a quella dell'austenite che invece può deformarsi solamente attraverso fenomeni dislocativi.

Solo una certa quantità di deformazione martensitica può essere accomodata dal movimento dei *Twin boundaries*; una volta che questo limite viene oltrepassato, il materiale si deforma prima elasticamente e poi, dovo essersi snervato, presenterà processi irreversibili (dislocamento); tale processo viene evidenziato dalla prova di trazione mostrata in Figura 2.8.

Inoltre, in base alla temperatura in cui si trova, la lega a memoria di forma presenta differenti proprietà meccaniche individuate nel diagramma di Figura 2.9, che mette in relazione la deformazione con il carico: al variare della temperatura le curve sono differenti.

Per temperature T inferiori alla temperatura di riferimento M_f , il provino è facilmente deformabile con piccoli sforzi. Dal diagramma in Figura 2.10 si evince che, scaricando il provino a queste temperature, rimane una percentuale di deformazione, recuperabile soltanto portando la temperatura a valori maggiori di A_f : in questo stadio, infatti, il materiale si trasforma in austenite recuperando così la forma memorizzata, come mostra la linea tratteggiata. Se la temperatura T si trova in un intervallo compreso tra la temperatura A_f e la temperatura M_d (M_d è la temperatura di transizione tra la fase superelastica e quella austenitica), cioè totalmente in fase austenitica, si manifesta fenomeno della superelasticità. Nella fase austenitica con temperature $T > M_d$, non è possibile nessun recupero di forma. In queste condizioni la fase austenitica mostra una normale deformazione plastica dopo avere raggiunto le condizioni di snervamento: la curva che rappresenta il comportamento del materiale è quella di un classico metallo [10].



Figura 2.8: Tipica curva sforzo-deformazione di un materiale con martensite twinned che mostra due distinte regioni elastiche e due distinti plateaus plastici: il primo dovuto al movimento dei *Twin boundaires*, il secondo dovuto a processi dislocativi *Slip*.



Figura 2.9: Grafico sforzo-deformazione che mette in evidenza i comportamenti di una stessa lega a memoria di forma in funzione della temperatura: (a) $T > M_d$ si ha un normale comportamento elasto-plastico; (b) $T < M_f$, la fase stabile è la martensite; (c) $A_f < T < M_d$, si manifesta il fenomeno superelastico.

2.5 La transizione di fase R

E' stata osservata per leghe NiTi quasi equiatomiche un'inusuale trasformazione di fase dopo un trattamento di invecchiamento a bassa temperatura. Questa trasformazione è particolare in quanto si ottiene un materiale che quando viene riscaldato presenta martensite ed austenite, mentre quando viene raffreddato appare anche una terza fase, chiamata R. Osservazioni sperimentali hanno dimostrato che questa trasformazione segue due strade distinte, a seconda della percentuale di Nichel presente: con la prima via seguita, verificata 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 separate trasformazioni martensitiche dalla fase R ($R \rightarrow M_1 e R \rightarrow M_2$). La seconda via, verificata 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 $A \rightarrow M_2$. La presenza della fase R la si trova anche in una lega Ti50Ni47Fe3 analizzando l'andamento della resistenza elettrica al variare della temperatura.



Figura 2.10: Curva della resistenza elettrica sulla temperatura di una lega Ti50Ni47Fe3

La temperatura T'_R determina l'inizio della transizione 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 °C. La variazione cristallografica che questa trasformazione comporta è una lieve distorsione dell'angolo del reticolo cristallino; questo indica quindi che la transizione di fase R può presentare l'effetto a memoria di forma. Analizzando la Figura 2.11, dove vengono riportate una serie di curve sforzo-deformazione in funzione della temperatura, si nota che la deformazione permanente dopo un ciclo di carico-scarico viene recuperata con un riscaldamento a temperature maggiori di T_R .

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

Quello che rende estremamente interessante questa transizione è il comportamento della lega sotto condizioni di carico ciclico. In particolare osservando la Figura 2.12 riferita sempre ad una lega Ti50Ni47Fe3, si osserva che la variazione dell'isteresi dopo 500000 cicli termici è notevolmente piccola.

Questo risultato indica che la stabilità dell'effetto a memoria di forma della fase R è molto maggiore rispetto a quello della fase martensitica, rendendo estremamente interessanti leghe che presentano questo tipo di transizione [11].



Figura 2.11: Effetto a memoria di forma della fase R



Figura 2.12: Variazione dell'isteresi termica in una lega Ti50Ni47Fe3 dopo 500000 cicli termici

2.6 L'effetto della memoria di forma (SME)

Da quanto detto in precedenza risulta ben chiaro che la martensite è generalmente una fase a simmetria minore rispetto a quella austenitica. La conseguenza di questo è che la martensite si può formare in diversi modi dall'austenite; mentre nella trasformazione opposta c'è solo una possibilità di ritorno alla struttura austenitica. Nell'esempio bidimensionale mostrato in precedenza si può notare come sforzi di taglio applicati alle celle rettangolari in due direzioni possono produrre due differenti tipologie di celle romboidali, mentre entrambe le celle romboidali hanno solamente una tipologia di struttura austenitica disponibile. Questo semplice concetto geometrico è il fondamento dell'effetto a memoria di forma. In altre parole, l'effetto a memoria di forma è la capacità di un materiale di ritornare spontaneamente ad una forma pre-impressa: quando il provino, dopo esser stato deformato plasticamente ad una temperatura inferiore a M_f , viene riscaldato fino ad una temperatura superiore ad A_f , recupera la forma originaria che possedeva prima di essere deformato [10].



Figura 2.13: La fase R, disegnata in (b), presenta una struttura romboedrica: tale cella è ottenuta per deformazione della cella austenitica (a), lungo una delle sue diagonali maggiori.



Figura 2.14: Effetto a memoria di forma: la placchetta SMA originariamente in condizioni di equilibrio (a), la placchetta deformata plasticamente tramite sforzo(b), la placchetta riscaldata a temperatura > As recupera la forma originaria (c).

2.6.1 L'effetto della memoria di forma a una via (OWSME) e a due vie (TWSME)

Nelle leghe a memoria di forma, lo SME (*Shape Memory Effect*), può manifestarsi in due differenti modi: a una via (*One Way Shape Memory Effect, OWSME*) oppure a due vie (*Two Ways Shape Memory Effect, TWSME*).

Se un provino, che si trova ad una temperatura inferiore a Mf, viene deformato tramite allungamento, la deformazione residua, una volta rimosso l'effetto deformante, viene recuperata se lo si riscalda fino ad una temperatura superiore ad Af. Se anche, a questo punto, il campione viene nuovamente raffreddato fino ad una temperatura inferiore ad Mf, esso mantiene in ogni modo inalterata la forma recuperata, e l'effetto a memoria di forma può essere riattivato solo rideformando il campione: per questo tale effetto viene chiamato *a una via*. A differenza del caso precedente, nel caso di effetto a



Figura 2.15: Effetto a memoria di forma: la montatura SMA di un paio di occhiali deformata plasticamente viene riportata alla forma originaria.

memoria di forma *a due vie*, il campione, una volta deformato tramite allungamento, viene riscaldato con una temperatura superiore ad Af fino a recuperare la forma originaria. A questo punto, raffreddando il provino si manifesta una seconda deformazione che potrà essere recuperata con un secondo riscaldamento. Il passaggio tra queste due forme può essere ripetuto indefinitamente. Per indurre l'effetto a due vie, è necessario un trattamento termomeccanico particolare, che crea determinate dislocazioni nella struttura cristallina. Ci sono diversi trattamenti di questo tipo, detti trattamenti di addestramento: tutti introducono dei microsforzi nel materile, alterando la nucleazione e la crescita della martensite, in modo tale che si formino alcune varianti in maniera preferenziale [10] [12] [13].

2.7 La superelasticità (SE)

Consideriamo adesso un'altra caratteristica dei materiali a memoria di forma, indipendente dalla temperatura: la superelasticità.

La formazione di martensite è un processo termoelastico ossia, una diminuzione incrementale di temperatura tra M_s e M_f sviluppa la crescita delle lastre di martensite e favorisce la nucleazione di nuove; ma, al contrario, quando la temperatura viene lievemente alzata, le lastre di martensite appena create scompaiono e quelle già esistenti si restringono. In altre parole vi è un'equivalenza tra temperatura e stress: una diminuzione della temperatura equivale ad un aumento di stress. Solitamente, in assenza di sforzi, la martensite si forma a partire dall'austenite, raffreddando il materiale fino alla temperatura M_s . Tuttavia, nello stesso materiale, la martensite si può formare ad una temperatura superiore ad M_s purchè sia applicato uno sforzo. In questo caso, la trasformazione è dovuta ad un'azione meccanica e non più termica, e la martensite così formata viene denominata Stress-induced-martensite (SIM). Al di sopra di M_s , lo sforzo necessario per produrre SIM aumenta linearmente con la tempe-



Figura 2.16: Effetto della memoria di forma ad una via in cui viene rappresentato il reupero della forma austenitica all'aumentare della temperatura.



Figura 2.17: Effetto della memoria di forma a due vie rappresentato dal recupero di una deformazione quando il materiale viene riscaldato a T>Af, ed da una nuova deformazione durante il raffreddamento.



Figura 2.18: Curve sforzo-deformazione di un singolo cristallo di Cu - Zn caricato ad una temperatura superiore ad M_s .

ratura (Figura 2.18), tale variazione obbedisce alla legge di *Clausius-Clapeyron*, generalmente scritta come:

$$\frac{d\sigma}{dM_s} = \frac{-\Delta H}{T\epsilon_0} \tag{2.1}$$

dove:

- $\sigma = \text{sforzo applicato}$
- M_s = temperatura da cui si forma martensite
- $\Delta H =$ calore latente di trasformazione
- T = temperatura
- ϵ_0 = massima deformazione uni
assiale associata alla trasformazione

Lo sforzo necessario per produrre martensite aumenta finchè non si raggiunge M_d , (massima temperatura a cui si può avere martensite); infatti al di sopra di tale temperatura, lo sforzo critico per indurre la martensite è maggiore a quello necessario a creare dislocazioni (*Slip*). Per questo motivo la martensite indotta da sforzo si presenta esclusivamente nel range di temperature che va da M_s a M_d .

Il comportamento superelastico si manifesta quando un materiale è deformato a temperatura compresa tra $A_f \in M_d$. In questo campo di temperature, la martensite generata applicando uno sforzo è instabile e quindi si trasforma di nuovo in austenite appena tale sforzo viene rimosso.

In riferimento al diagramma in Figura 2.19, il valore critico di tensione applicata A, al di sotto del quale il comportamento del materiale rimane puramente elastico, induce la prima trasformazione che caratterizza la proprietà in questione. A valori di tensione coincidenti a B, la struttura cristallina è quella classica della martensite deformata e la trasformazione termina. Per tensioni superiori a B il comportamento elasto-plastico del materiale è di tipo lineare. Quando la tensione precedentemente



Figura 2.19: Diagramma tensione-deformazione di un materiale a memoria di forma a valori di temperatura superiori ad Af.

applicata viene progressivamente rilasciata in un primo momento, da B a C, il comportamento è di tipo puramente elastico e lineare, in un secondo momento, da C a D, ha luogo la seconda trasformazione di fase, da martensite deformata ad austenite ed il ciclo di isteresi si conclude.

Va evidenziato che, se la deformazione non eccede un valore limite (che si aggira generalmente, per il NiTiNOL, attorno al 10%), essa viene completamente recuperata in fase di scarico; qualora invece la deformazione superi tale limite, al momento dello scarico, si hanno delle deformazioni residue, dovute alla nascita di movimenti atomici di dislocazione, che sono irreversibili. Va inoltre sottolineato che: quando nel diagramma sforzo-deformazione il recupero della deformazione segue un andamento *lineare*, la lega viene definita *pseudoelastica*, mentre, nel caso in cui il recupero della deformazione segua un andamento *non-lineare*, la lega viene definita *superelastica* [10] [12] [13].



Figura 2.20: Curve sforzo-deformazione per un provino inizialmente in fase austenitica che si trova ad una temperatura compresa tra Af ed Md. Entro tale intervallo di temperatura, in virtù della trasformazione martensitica indotta per sforzo, il materiale mostra un comportamento pseudoelastico (a sinistra) o superelastico (a destra).



Figura 2.21: Effetto superelastico: la montatura SMA di un paio di occhiali viene deformata alla temperatura compresa tra Af ed Md; rilasciando lo sforzo, la montatura riacquista la forma originaria.

2.8 Defromazioni plastiche e training del materiale

Mentre nei materiali classici come, per esempio, gli acciai, le deformazioni plastiche vengono raggiunte mediante l'applicazione di carichi, dopo lo snervamento, oltre il limite elastico, nelle leghe a memoria di forma tali deformazioni vengono indotte da trasformazioni da fase ed in particolare dal passaggio dalla fase austenitica a quella martensitica e viceversa. L'accumulo di tali deformazioni plastiche, se non tenuto in considerazione, può avere effetti gravosi su tutte le applicazioni che sfruttano le proprietà di queste leghe. Per analizzare questo fenomeno, in Figura 2.22 vengono messi a confronto i primi due cicli di lavorazione di un pezzo costituito dalla lega binaria NiTi. Nel grafico il materiale si trova, inizialmente, in fase austenitica nel punto a e viene, successivamente, portato al punto e mediante due cicli di raffreddamento e riscaldamento. La differenza tra a e c mostra la deformazione plastica riscontrata dopo il primo ciclo, mentre la differenza tra c ed e quella ottenuta dopo il secondo.

L'accumulo di tali deformazioni plastiche prosegue per oltre 2000 cicli e deve, obbligatoriamente, essere tenuto in considerazione nell'utilizzo di tali leghe. Una metodologia efficace per risolvere il problema è quella di effettuare un *training* del materiale, cioè la ripetizione dei cicli fintanto che l'accumularsi di deformazioni plastiche non si sia stabilizzato. Le proprietà del materiale, nonchè le temperature caratteristiche di trasformazione risentono in modo particolare di questo fenomeno e continuano a modificarsi dopo ogni ciclo [13].

2.9 Processo produttivo delle SMA

Come descritto nello studio di Carlone "Le leghe a memoria di forma e le loro applicazioni nel settore automotive" [14], il processo di *fusione a induzione sottovuoto, VIM (Vacuum Induction Melting)* è la tecnica tipica per la produzione delle SMA, specialmente delle leghe a base NiTi. Lo scopo produttivo è quello di fondere assieme diversi metalli per realizzare delle leghe.

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


Figura 2.22: Deformazione plastica raggiunta a seguito di un ciclo di carico.

2.9.1 Fusione

Il processo VIM comporta la fusione di metalli ottenuta attraverso un campo elettromagnetico a induzione applicato in condizioni di vuoto. La fusione ha luogo in un forno composto da un rivestimento refrattario o un crogiolo, generalmente realizzato in grafite, posto all'interno di una bobina di rame a induzione, attraversata da corrente alternata a media frequenza e raffreddata ad acqua. Il gruppo forno è totalmente racchiuso in un'apposita camera in acciaio, raffreddata ad acqua, dove una serie di pompe provvedono a creare le opportune condizioni di vuoto affinchè il materiale in carica possa essere fuso, ripulito da impurezze e colato sottovuoto o in atmosfera di gas inerte, (Figura 2.23).

Questo processo consente la purificazione di metalli e di leghe che contengono elementi con notevole affinità a certi gas, come ad esempio 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. Questo garantisce un eccellente grado di omogeneità della lega metallica che risulta particolarmente apprezzato a causa dell'elevata 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 ricavare così un prodotto finale pulito ed estrememente puro. Le condizioni di fusione e di colata vengono ottimizzate per prevenire la propagazione di crepe da solidificazione e dall'eccessivo ristringimento del pezzo colato durante il raffreddamento. Il risultato ottenuto dalla prima colata dei metalli fusi è un lingotto il cui peso può variare tra i 4 ed i 20 Kg.

2.9.2 Estrusione

Nel caso in cui si verifichi mediante dei test, la presenza di una percentuale inaccettabile di impurezze nel lingotto, questo può essere nuovamente fuso e colato. Al contrario se la qualità della lega viene giudicata buona il lingotto viene sottoposto al processo di *estrusione*, per ottenere barre di dimensioni ridotte rispetto al lingotto iniziale. L'estrusione avviene tramite presse sia dirette che indirette. Quella diretta avviene a temperature che variano 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 precedentemente



- Furnace body Furnace cover
- Electrodes
- Sealed revolving bearing
- Support
- Loader
- Inductor

- Sight port Cooling water system Temperature measuring facilities
- Vacuum system



Figura 2.23: Rappresentazione schematica e realistica di un forno per fusione a induzione sottovuoto.



Figura 2.24: Schematizzazione delle tecnologie di estrusione diretta ed indiretta.

riscaldato viene costretto da un pistone ad avanzare all'interno della pressa, successivamente viene forzato a passare all'interno di una matrice ad estrusione. Essa presenta un foro sagomato con la forma che si desidera imprimere al materiale. Viene così ottenuto un semilavorato di diversi metri di lunghezza sottoforma di barra. Per l'estrusione indiretta le billette di NiTi vengono rivestite da una guaina di protezione in lega di rame e trattate a temperatura di circa 900 °C. In questo secondo caso il lingotto rimane immobile 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.

2.9.3 Laminazione e trafilatura

Successivamente all'estrusione, le barre ottenute vengono tagliate in misure standard e trattate in un processo di decapaggio con particolari macchinari che rimuovono ossidi e residui di rame. In tale 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 stesso. Da questo momento in poi la barra subisce una serie di trattamenti progressivi necessari ad assottigliarla ed a conferirle le giuste proprietà meccaniche. Si procede quindi con un primo processo di laminazione a caldo a circa 900 °C, fino a quando non viene raggiunta una sezione di 50 mm. Grazie a due o più rulli controrotanti si contringe il materiale ad attraversare uno spazio più ristretto del suo spessore con lo scopo perciò di assottigliarlo. 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 loro ogni porosità. A questo punto l'asta di dimensioni un pò ridotte viene sottoposta alla laminazione a freddo, ossia 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 varie fasi di lavorazione, ottenendo un materiale con grani orientati ed 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



Figura 2.25: Schema di funzionamento della laminazione

compie un incrudimento del materiale che acquisisce una migliore resistenza ma una duttilità minore. Tale lavorazione a freddo risulta necessaria siccome quella a caldo determina la formazione di grani grossolani di grandi dimensioni.

Nella lavorazione di *trafilatura*, il filo viene sottoposto a passaggi forzati attraverso matrici (filiere) con 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 del filo viene automaticamente ottenuto un aumento della lunghezza del semilavorato.

2.9.4 Ricottura

Queste aste vengono sottoposte a laminazioni successive a caldo e a freddo, con trattamenti termici intermedi di ricottura. Quest'ultima lavorazione 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. In particolare questa lavorazione è composta da tre fasi: un preriscaldamento iniziale, dove il semilavorato passa all'interno del forno che si trova ad una temperatura compresa tra i 160°C ed i 280°C e, secondariamente, viene scaldato per effetto Joule fino a 700-800°C. Dopodichè, il filo viene imesso nell'emulsione di ricottura per essere raffreddato e pulito; infine il processo può essere terminato lasciando che il materiale si raffreddi autonomamente e completamente a temperatura ambiente oppure con l'ausilio di un getto di aria compressa. Questo prodotto 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.

2.9.5 Trattamenti termomeccanici

Il filo di NiTi non presenta ancora le desiderate proprietà di memoria di forma, le quali possono essere ottenute mediante una serie di trattamenti a caldo e deformazioni a freddo. Lo scopo 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 50000



Figura 2.26: Schema funzionale di un machinario per la ricottura

cicli di lavoro. I trattamenti termici vengono effettuati in un range di temperature tra i 350°C ed i 600°C e sottoposti ad un carico con una valore compreso 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.

In letteratura si osserva che i vari training del materiale, gli sforzi applicati in modo costante ed i 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 martensite.

2.9.6 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 porzioni di filo da qualche centimentro di lunghezza. Come ultima analisi vengono compiuti 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. Vengono anche effettuati dei test di resistenza e 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

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

2.10 Capacità intrinseche e SMA maggiormente utilizzate

In questa sezione verranno elencate alcune delle proprietà intrinseche dei materiali a memoria di forma maggiormente sfruttate per la costruzione di applicazioni utilizzabili nei settori più svariati, e descritte le tipologie di leghe più comuni, in riferimento allo studio condotto da Rota: "Compositi attivi con materiali a memoria di forma".

2.10.1 Proprietà e funzioni intrinseche

Generalmente, le capacità delle SMA citate qui di seguito possono essere sfruttate nella realizzazione di sistemi intelligenti:

- osservazione: le SMA sono sensibili ad alcuni cambiamenti ambientali come stimoli termici, meccanici, elettrici o magnetici;
- *capacità di scelta o controllo*: le SMA reagiscono agli stimoli ambientali solo quando vengono varcate delle soglie, che possono essere stabilite ad hoc;
- *attuazione*: se paragonate ad altri materiali usati comunemente come attuatori, le SMA sono in grado di fornire forze maggiori e di recuperare deformazioni più elevate, a discapito di un'efficienza minore;
- *adattività*: le proprietà meccaniche variano in maniera sensibile tra una fase e l'altra;
- *memoria e recupero*: forma o altri cambiamenti sono reversibili e possono essere ripetuti diverse volte;
- *immagazzinamento e conversione di energia*: una quantità considerevole di energia può essere immagazzinata; alcune conversioni di energia (termica-meccanica, chimica-meccanica, megnetica-meccanica, elettrica-meccanica...) possono essere realizzate;
- *smorzamento*: la maggior parte delle SMA ha una capacità di smorzamento intrinseca dovuta alla caratteristica microstruttura e alla transizione di fase.

2.10.2 Leghe di nichel e titanio

Negli ultimi trent'anni, le leghe binarie di Ni-Ti sono state studiate ampliamente e oggi sono le leghe a memoria di forma più importanti dal punto di vista commerciale, grazie alle ottime prestazioni in termini di recupero della forma e alle buone proprietà meccaniche. Inoltre, tali leghe presentano un'ottima resistenza alla corrosione e un' eccezionale biocompatibilità, che le rendono ampiamente utilizzabili in varie applicazioni biomediche. Infine, essendo facilmente fabbricabili in elementi di varie forme e dimensioni, sono tecnicamente utilizzabili per la realizzazione di elementi attivi in materiali compositi.

Come è facile dedurre però, il costo di produzione del NiTiNOL è piuttosto elevato per vari fattori: la risposta della lega a trattamenti termici è fortemente dipendente dalla composizione relativa in nichel e titanio e questo richiede una precisione nella composizione molto elevata. Inoltre, a causa della reattività del titanio ad alte temperature, la produzione e la lavorazione a caldo del lingotto richiedono estrema attenzione. Proprio per l'alto costo e per le difficoltà di produzione del NiTiNOL, oltre che per soddisfare alcune esigenze specifiche, nei primi anni '70 sono state condotte ricerche su materiali a memoria di forma alternativi, partendo da leghe ternarie basate su quella di Ni-Ti.

2.10.3 Leghe a isteresi stretta

La parziale sostituzione di rame al posto di nichel ha effetti interessanti sulle proprietà della lega, manifestando evidenti vantaggi. Le leghe ternarie Ti-Ni-Cu mostrano una minore sensibilità della temperatura a cui comincia la fase martensitica alla composizione chimica della lega; una riduzione marcata dell'isteresi legata alla trasformazione, che può essere ridotta dai normali 30 K a meno di 10 K; un incremento della capacità di smorzamento e, infine una differenza significativa di rigidezza tra la fase martensitica e quella austenitica. Tali caratteristiche le rendono particolarmente consigliabili per la realizzazione di attuatori per sistemi intelligenti.

2.10.4 Leghe a isteresi ampia

L'aggiunta di niobio alle leghe binarie Ni-Ti consente di abbassare la temperatura di inizio dalla fase martensitica e di creare una differenza di anche 150 K tra A_s e M_s . Le leghe di questo tipo sono particolarmente adatte per la realizzazione di dispositivi di accoppiamento e fissaggio. La lega più utilizzata in commercio è $Ti_{43}Ni_{47}Nb_9$, dove i numeri si riferiscono ai valori percentuali.

2.10.5 SMA ad alta temperatura

Quando il nichel della lega Ni-Ti viene parzialmente sostituito da palladio, platino od oro fino a una percentuale del 50% ed il titanio è sostituito da afnio e zirconio fino al 20%, le temperature di trasformazione martensitica possono essere aumentate fino a 873 K, persistendo l'effetto a memoria di forma. Tali leghe, nonostante il loro costo molto elevato, sono promettenti per applicazioni ad alte temperature. La lega più studiata, anche perchè la più interessante dal punto di vista economico, è la Ni-Ti-Hf.

2.10.6 Leghe a base di rame

Le leghe a base di rame presentano alcuni vantaggi, come il basso costo e la relativa facilità di fabbricazione, se comparate con le leghe a Ni-Ti. Tra le varie leghe proposte, Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni sono quelle di maggior interesse pratico, tanto da essere disponibili in commercio. Tuttavia, le applicazioni di tali leghe sono state fortemente limitate principalmente da due fattori: (1) le scarse duttilità e lavorabilità di queste leghe policristalline a causa della struttura a grana grossa e della notevole anisotropia elastica e (2) i problemi di instabilità legati alla presenza, in condizioni di equilibrio, di entrambe le fasi martensitca ed austenitica.

2.10.7 Leghe a base di ferro

Siccome il costo è uno dei fattori chiave nelle applicazioni, il basso costo delle leghe a base di ferro ha da sempre attratto molta attenzione e alcune di queste leghe sono oggi vicine all'introduzione sul mercato. Di particolare interesse sono le leghe Fe-Mn-Si, Fe-Ni-Mn e Fe-Ni-C. Dopo complessi trattamenti termomeccanici, queste leghe presentano l'effetto a memoria di forma, con recupero totale della deformazione, ma soltanto ad una via e dell'ordine di pochi punti percentuali. Più recentemente sono state studiate leghe Fe-Pt e Fe-Pd: in esse la trasformazione martensitica può essere innescata da un campo magnetico, rendendole così adatte alla realizzazione di materiali a memoria di forma ferromagnetici.

2.11 Applicazioni SMA al di fuori dell'ingegneria strutturale

Spaziando oltre il campo dell'ingegneria strutturale, esistono molteplici settori nei quali vengono sfruttate le proprietà dei materiali a memoria di forma: in particolare, nel campo meccanico possono essere

realizzati attuatori, connettori o giunti; nel campo areospaziale sfruttando le capacità di smorzamento per ridurre le vibrazioni; oppure in campo biomedicale per la realizzazione di stent, fili ortodontici o impianti endossei; ecc..

2.11.1 Attuatori

Durante il recupero della forma, generalmente ad alte temperature, il materiale a memoria di forma è in grado di generare lavoro meccanico: se ad esso viene applicata un'azione esterna che si oppone al recupero della forma, la tensione di recupero (chiamata comunemente *Recovery stress*) e la variazione della forma presentano la stessa direzione, e quindi danno luogo alla generazione di lavoro meccanico (positivo). I principali vantaggi che presentano gli attuatori a base di leghe a memoria di forma sono:

- silenziosità e pulizia: gli attuatori SMA non richiedono l'ausilio di componenti aggiuntivi basati su fenomeni di attrito (come ingranaggi), per questo motivo non presentano la formazione di residui polverosi, inoltre garantiscono un funzionamento silenzioso e senza vibrazioni; ed infine l'impossibilità di generare scintille li rende adatti all'impiego in presenza di sostanze infiammabili;
- semplicità: l'attuatore può esser progettato in modo da eseguire direttamente la funzione richiesta, evitando in tal modo l'impiego di elementi di trasmissione o collegamento.

Tra gli svantaggi, invece, ricordiamo:

- deterioramento: sollecitazioni o deformazioni particolarmente elevate possono generare alterazioni all'interno della struttura cristallina;
- bassa efficienza energetica: l'efficienza energetica degli attuatori SMA è fortemente dipendente dalla configurazione adottata: mentre nel caso di applicazioni di sollecitazioni uniformi non si genererebbero problemi di alcun tipo, con l'applicazione di sollecitazioni non uniformi si potrebbero ottenere prestazioni poco soddisfacenti.

Il surriscaldamento dell'elemento SMA può essere realizzato mediante corrente elettrica oppure con l'ausilio di un fluido. Generalmente viene preferito un riscaldamento del primo tipo in quanto la temperatura viene resa uniforme in tutto l'elemento in breve tempo senza la generazione di tensioni interne.

2.11.2 Dispositivi di accoppiamento e fissaggio

In questa categoria di applicazioni viene sfruttata la capacità dei materiali a memoria di forma di sviluppare una forza di notevole intensità quando, ad alte temperature, il recupero della forma viene impedito meccanicamente. Il giunto viene realizzato con dimensioni tali da presentare un'adeguata interferenza con le parti da fissare quando esso si trova ad alta temperatura. Per consentire il montaggio, la temperatura viene decrementata ed il giunto viene portato in fase martensitica per poi essere dilatato opportunamente. Una volta montato, il giunto posto alla temperatura ambiente presenta nuovamente la trasformazione di fase che tende a riportarlo nella forma originaria. Dato che il recupero della deformazione è parzialmente impedito dalle parti da fissare, il giunto sprigiona una notevole forza che realizza il fissaggio.

2.11.3 Dispositivi biomedicali

Il settore della applicazioni biomedicali è sicuramente quello di maggior rilevanza e maggior sviluppo. Una caratteristica fondamentale per il successo di tali leghe in questo campo è la straordinaria biocompatibilità, oltre all'ottima resistenza alla corrosione. Un'importante famiglia di dispositivi biomedicali sfrutta l'effetto a memoria di forma, tra cui:



Figura 2.27: Da sinistra : uno stent in NiTi con la tipica struttura a maglia intreccita (immagine di Joe Muskin , Illinois University of Urbana Champaign). Lo stent viene inserito ancora chiuso all'interno dei vasi che rischiano l'occlusione (al centro). Qui si espandono attivati dalla temperatura corporea (destra).

- *filtri per emboli*: il filtro, mantenuto a bassa temperatura viene inserito attraverso un catetere, dopodichè una volta sistemato nella vena cava, soggetto alla temperatura corporea, si espande assumendo la forma a filtro;
- *stent*: lo stent, inizialmente compresso tramite raffreddamento, viene posizionato con l'ausilio di un catetere, dopodichè dopo essere stato rilasciato, per effetto della temperatura corporea, si espande generando in modo progressivo una forza radiale sulla parete del vaso;
- ancoraggi per sutura: sono fortemente utilizzati per il collegamento di tendini e legamenti al tessuto osseo

La superelasticità invece, viene ampiamente sfruttata in ortopedia per la realizzazione di sistemi di ancoraggio e fissaggio di impianti e per la immobilizzazione di fratture. Un ulteriore campo di applicazione e di sfruttamento del fenomeno superelastico nel settore biomedicale è rappresentato dalla costruzione di strumenti per procedure endoscopiche.

Tra le applicazioni più recenti e di forte espansione si possono citare:

- *apparecchiature fisiatriche*: utili per effettuare operazioni di movimentazione assistita di arti soggetti a paralisi per mantenere in efficienza l'apparato muscolare;
- *fili ortodontici*: realizzati con materiale superelastico, consentono l'applicazione di una forza che varia conseguentemente al movimento dei denti, pertanto possono rimanere operativi per un lungo periodo senza la necessità di essere ritensionati.

2.11.4 Smorzatori

L'ottima capacità di smorzamento abbinata alla buona resistenza meccanica delle SMA, ha incentivato la ricerca di applicazioni con varie finalità, tra cui:

- riduzione delle vibrazioni;
- riduzione del rumore;
- incremento della resistenza a carichi impulsivi.

Oltre che nel settore strutturale, ed in quello areospaziale, i sistemi di smorzamento SMA vengono anche utilizzati per la costruzione di attrezzi sportivi (come sci, mazze da golf o racchette da tennis) o per la costruzione di protezioni balistiche.

2.11.5 Smart materials

Vengono definiti *Smart materials* particolari materiali che reagiscono con cambiamenti dell'ambiente circostante, modificando una o più delle loro proprietà (meccaniche, ottiche, elettriche, chimiche, magnetiche o termiche).

Attualmente, l'impiego di leghe a memoria di forma viene sfruttato per la realizzazione di Smart material, come:

- *controllo attivo di forma*: l'azione di elementi SMA integrati nella struttura di un materiale composito è sfruttata per generare una modifica alla forma del manufatto;
- *modifica modale attiva*: elementi SMA vengono integrati nella struttura del materiale composito senza essere vincolati agli estremi; quando in tali elementi viene indotta la trasformazione di fase (mediante variazioone di temperatura), la variazione del modulo elastico modifica i modi di vibrare del manufatto;
- *riduzione attiva delle tensioni*: elementi SMA in fase martensitica, integrati in varie forme, possono portare una riduzione dello stato tensionale nella struttura che potrebbe derivare da diverse cause;
- *capacità di autoriparazione*: l'integrazione di fili superelastici precaricati, nella struttura del materiale composito, ha la potenzialità di contrastare la propagazione di fratture.

2.11.6 Applicazioni varie

Le particolari proprietà delle leghe a memoria di forma si adattano ad una svariata gamma di applicazioni in prodotti di uso quotidiano, come:

- *montature per occhiali*: in questo caso specifico viene utilizzata la proprietà superelastica delle SMA, in questo modo è possibile realizzare montature per occhiali particolarmente resistenti e confortevoli da indossare;
- *rinforzi per reggiseni*: reggiseni rinforzati da elementi SMA consentono notevole deformabilità, supporto e confort.
- *filo da pesca*: fili da pesca SMA mostrano una migliore resistenza alla corrosione rispetto ai comuni fili d'acciaio, inoltre eventuali attorcigliamenti possono essere facilemnte rimossi tramite riscaldamento.



Figura 2.28: Reggiseno con elementi SMA (a); elementi SMA per reggiseni di diverse dimensioni (b).

Capitolo 3

Applicazioni di leghe a memoria di forma nell'ingegneria strutturale

In riferimento all'articolo "Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering" [16] vengono descritte in seguito diverse applicazioni di leghe a memoria di forma adottate nel settore dell'ingegneria structurale.

Come già citato in precedenza, le leghe a memoria di forma possiedono caratteristiche fisiche e meccaniche che le rendono idonee per l'uso in applicazioni di ingegneria strutturale. In primo luogo, le SMA, svolgono un ruolo chiave nello sviluppo e nella realizzazione di dispositivi intelligenti che possono essere integrati nelle strutture per adempiere alle seguenti funzioni: rilevamento, dissipazione di energia, attuazione, monitoraggio, ricentraggio. Negli ultimi decenni sono state effettuate numerose ricerche nel campo dell'ingegneria strutturale, con una particolare attenzione al controllo della risposta sismica delle strutture. Diversi sistemi e dispositivi innovativi, utilizzando principalmente leghe Ni-Ti o leghe a base di rame, sono stati realizzati per assorbire parte dell'energia sismica o per ridurre le forze sismiche agenti sulla struttura, nonchè per regolare lo smorzamento della stessa. Le SMA sono state introdotte all'interno di questi dispositivi in farie forme ed in più configurazioni possibili, come ad esempio: fili, barre, nastri o tubi.

La rigidezza variabile nel comportamento superelastico $(T > A_f)$ può essere utilizzata per fornire e per controllare lo spostamento all'interno di tre regimi di deformazione caratteristici: a basse deformazioni ($\varepsilon < 1\%$) il modulo elastico della fase austenitica può essere utilizzato per limitare deformazioni in condizioni di servizio. A deformazioni intermedie $(1\% < \varepsilon < 6\%)$ il modulo può essere utilizzato per limitare la forza trasmessa dalla struttura quando essa è sottoposta a spostamenti piuttosto elevati. A grandi deformazioni ($\varepsilon > 6\%$) l'aumento del modulo in fase martensitica indotta da stress può essere utilizzato per controllare spostamenti prodotti da terremoti di grande entità. Dopo lo scarico, la trasformazione inversa, provoca una dissipazione isteretica di energia, che è una funzione ottimale soprattutto quando si parla di controllo sismico delle strutture.

Un'altra caratteristica di particolare importanza dovuta alla capacità di queste leghe di riacquistare la loro forma originale dopo aver subito deformazioni maggiori del 6-8% è quella del ricentraggio. In aggiunta a queste caratteristiche fondamentali, possono essere sfruttate in ingegneria civile altre proprietà eccellenti come ad esempio: resistenza alla corrosione, resistenza a fatica, capacità di smorzamento e buona versatilità in varie forme e configurazioni.

Nelle sezioni seguenti vengono elencate una serie di applicazioni utilizzate nell'ingegneria strutturale.



Figura 3.1: Rappresentazione schematica di barre SMA in strutture a telaio.

3.1 Sistemi di dissipazione di energia: telai controventati

A causa delle caratteristiche dinamiche di eventi naturali pericolosi, sono stati proposti recentemente concetti innovativi per la dissipazione di energia da impiegare come parte di dispositivi di protezione. In particolare, alcuni dispositivi passivi hanno acquisito notevole attenzione nel campo dell'ingegneira sismica, offrendo il vantaggio di evitare danni ad elementi strutturali e non strutturali nell'ambito di esigenze sismiche moderate. Tali dispositivi vengono utilizzati soprattutto in telai controventati, anche perchè questa tecnica è ampiamente utilizzata, specialmente per strutture in acciaio. Il meccanismo principale di dissipazione di energia che caratterizza questi sistemi è correlato al lavoro svolto dagli elementi del telaio sotto carichi di trazione e compressione. Tuttavia, i terremoti più recenti hanno evidenziato alcuni punti deboli nelle prestazioni dei telai controventati ordinari, tra cui una limitata duttilità ed una conseguente bassa capacità di dissipazione energetica; un comportamento asimmetrico negli elementi soggetti a trazione e compressione, e la rottura di elementi di connessione. Per superare questi problemi, sono stati sviluppati telai rinforzati ad instabilità controllata (BRBFs), ma non tutti i problemi sono stati risolti, come, ad esempio, la grande deformazine plastica subita dopo l'evento sismico, limitando spesso e volentieri l'adozione di tale sistema. Sono state quindi perseguite strategie alternative con l'utilizzo di leghe a memoria di forma. I due fattori chiave che determinano il successo di tali materiali in questa tipologia di strutture sono:

- Superelasticità: che consente un recupero di deformazione maggiore dell'8% dopo eventi sismici;
- *Dissipazione di energia attraverso un comportamento isteretico*: le barre SMA sono in grado di dissipare energia per mezzo della trasformazione o della riorientazione martensitica.

Grazie allo sfruttamento di queste due caratteristiche, il danno provocato da un evento sismico, (in termini di spostamento di interpiano e di spostamento permanente della struttura), può essere minimizzato rispetto alle soluzioni ordinarie, così come il costo associato alle riparazioni post-terremoto.

Negli ultimi anni, sono stati progettati e valutati sperimentalmente e numericamente numerosi prototipi di rinforzi SMA: Dolce et al. ha sviluppato dispositivi autocentranti (composti da fili NiTi) per la protezione sismica degli edifici. Clark et al. Ha condotto studi analitici sull'utilizzo di dispositivi SMA in edifici multipiano di acciaio, inserendo tali dispositivi ad ogni piano della struttura hanno constatato che lo spostamento d'interpiano è diminuito di quasi il 50%; inoltre l'energia assorbita dal telaio con dispositivi SMA si è ridotta del 15% rispetto a quella assorbita dal telaio senza dispositivi. Han et al. Ha valutato le prestazioni di otto dispositivi ammortizzatori (costituiti da fili SMA e fili d'acciaio) che sono stati installati in diagonale in una struttura di acciaio di due piani; confronti sperimentali hanno dimostrato un decadimento delle vibrazioni molto più veloce nel telaio con i dispositivi SMA, rispetto a quello senza. Anche Auricchio et al. Ha valutato le prestazioni sismiche di telai a più piani in acciaio



Figura 3.2: Schema dello smorzatore SMA proposto da Ma e Cho.

con diverse configurazioni di irrigidimento, ed ha dimostrato che la configurazione basata sulle SMA è stata più efficace nel ridurre le vibrazioni derivanti da un terremoto. Diversi sistemi di smorzamento SMA innovativi sono stati proposti da Motahari et al. con l'obiettivo di ottenere un uguale resistenza allo snervamento dei sistemi BRBs ma con una rigidezza iniziale diversa; un indicatore di danno è stato utilizzato per constatare i danni su un telaio multipiano. I risultati hanno dimostrato che gli ammortizzatori SMA sono stati in grado di ridurre sensibilmente i danni strutturali, pur evidenziando alcune limitazioni nel ridurre i danni non strutturali. Studi hanno dimostrato che i telai con rinforzi SMA sono caratterizzati da una grande versatilità, buona capacità di dissipare energia, funzionamento efficace, capacità di ricentraggio ed elevata rigidità per piccoli spostamenti. Tuttavia, i sistemi BRBFs sono dotati di una capacità di dissipazione energetica maggiore, per questo motivo sono stati proposti dispositivi ibridi, in modo da combinare efficacemente capacità di dissipazione energetica e capacità di ricentraggio. Ma e Cho hanno presentato un ammortizzatore innovativo a base di SMA, costituito da fili superelastici pretesi e da due molle precompresse che funzionano come un gruppo di dissipazione e ricentraggio (Figura 3.2).

Yang et al. Ha sviluppato e valutato le prestazioni di un dispositivo ibrido composto da tre parti principali: (1) un insieme di fili SMA per il ricentraggio, (2) due montanti ad assorbimento di energia e (3) due tubi in acciaio ad alta resistenza per giudare il movimento del dispositivo ibrido. Il dispositivo ibrido è stato impiegato in due diverse configurazioni: posizionato tra la trave e gli elementi diagonali dell'edificio o semplicemente lungo gli elementi diagonali (Figura 3.3). I risultati ottenuti dalle analisi indicano che questo sistema ibrido presenta una capacità di dissipazione di energia simile ad un sistema BRBF ma, in più, possiede anche un'eccellente capacità di ricentraggio.

3.2 Dispositivi di isolamento

Recentemente, i sistemi di isolamento alla base di strutture, hanno dimostrato di essere efficaci nella mitigazione della risposta simica di strutture edilizie e ponti. Negli ultimi decenni, lo sviluppo di applicazioni di ingegneria nel campo dell'isolamento sismico è stato notevolmente aumentato, così come l'introduzione di materiali innovativi performanti, tecnologie e sistemi ingegnerizzati. Il meccanismo fondamentale di un dispositivo di isolamento consiste nel disaccoppiamento del moto della struttura mediante un elemento di interfaccia flessibile, che isola la base della struttura dal terreno circostante, consentendo alla struttura di scorrere su una superficie specifica. Per ottenere questo risultato il sistema di isolamento deve essere progettato in modo tale che la struttura isolata abbia un periodo proprio fondamentale superiore ai 2,0 - 2,5 secondi e almeno triplo rispetto al periodo proprio della stessa struttura non isolata. In questo modo la struttura isolata si comporta durante il sisma quasi come un corpo rigido che tende a rimanere fermo rispetto alle vibrazioni del terreno. In aggiunta a questo, i sistemi di isolamento alla base sono concepiti per dissipare energia attraverso l'isteresi del materiale isolante e da meccanismi di smorzamento viscoso. La maggior parte dei sistemi di isolamento rientra in queste due categorie: di tipo *elastomerico* e *scorrevole*.

In generale, i requisiti necessari per far si che gli isolatori svolgano efficacemente il loro compito sono:



Figura 3.3: (a) Dispositivi ibridi proposti da Yang et al. (b) Differenti configurazioni proposte

- capacità di dissipazione di energia adeguata;
- buon ricentramento;
- nessuna deformazione residua sul cuscinetto neanche dopo un forte terremoto;
- alta resistenza a carichi ciclici.

Negli ultimi due decenni sono stati condotti diversi studi a riguardo di dispositivi di isolamento a base di SMA per la protezione sismica di edifici o ponti, in modo da riuscire a sfruttare nel migliore dei modi le caratteristiche che questi materiali possono offrire anche in questo ambito; ed in particolare:

- 1. *capacità autocentrante*, con la possibilità di fornire una forza di ricentraggio supplementare per riportare il sistema strutturale nella sua configurazione iniziale quando il terremoto è terminato;
- 2. *elevata rigidità per piccoli spostamenti*, per evitare che la struttura possa muoversi a causa del vento o da entità minori;
- 3. buona dissipazione di energia;
- 4. ulteriori importanti proprietà comuni a tutti i tipi di dispositivi basati su SMA, come resistenza a fatica, affidabilità a lungo termine, nessuna degradazione da invecchiamento, e scarsa sensibilità alla temperatura.

Krumme et al. Ha studiato le prestazioni di un dispositivo scorrevole SMA, dove la resistenza allo scorrimento viene ottenuta da due coppie di tiranti NiTiNOL; le prestazioni di questo dispositivo sono state studiate analiticamente nel 1970, la sruttura isolata esibisce un notevole miglioramento in termini di spostamenti di interpiano e la richiesta di rotazione delle colonne è stata ridotta a livelli accettabili.

Un sistema di isolamento a base di barre superelastiche è stato studiato da Wilde et al. In ponti autostradali. Il risultato comparando un sistema di isolamento SMA ed un sistema convenzionale è



Figura 3.4: (a) Sistema di isolamento a scorrimento proposto da Krumme et al. (b) Schema di un dispositivo di isolamento in ponti autostradali.

stato che il sistema di isolamento SMA fornisce risposte variabili all'eccitazione e possiede un notevole smorzamento; in particolare, per piccoli livelli di eccitazione, a differenza del sistema convenzionale, quello SMA mostra un movimento relativo tra pila ed impalcato trascurabile. Il confronto energetico ha evidenziato una dissipazione di energia minore del sistema SMA rispetto a quello convenzionale.

Dolce et al. Ha riportato uno studio completo su test e applicazione di due prototipi di dispositivi di isolamento alla base SMA, caratterizzati da pieno ricentramento ed elevata resistenza a fatica. L'efficacia di questi dispositivi è stata testata su un piccolo edificio in Italia. I risultati hanno evidenziato un ottimo ricentraggio, poichè, dopo solo due oscillazioni, l'edificio ha riacquistato la sua posizione originaria senza mostrare spostamenti residui.

Dolce et al. Ha condotto una vasta serie di prove su tavola vibrante di telai in cemento armato dotati di sistemi di isolamento tradizionali e di sistemi di isolamento SMA innovativi

Recentemente sono stati studiati e sviluppati sistemi di isolamento alla base ibridi. Shook et al. Ha proposto un sistema di isolamento alla base ibrido per la mitigazione dei moti sismici: i risultati hanno rivelato che il dispositivo proposto è stato in grado di ridurre gli spostamenti alla base del 18%. Choi et al. Ha proposto un nuovo concetto di sistema di isolamento incorporando fili SMA in un dispositivo elastomerico; tale dispositivo è stato testato su un ponte continuo in acciaio a tre campate: l'isolatore è stato in grado di limitare efficacemente lo spostamento relativo del ponte per forti movimenti del terreno, facendogli riacquistare inoltre la posizione originaria.

Nell'ambito delle strategie di progettazione di dispositivi di isolamento a base di SMA, la temperatura di servizio svolge un ruolo chiave per le prestazioni di tali dispositivi. In particolare, una



Figura 3.5: Schema funzionale di un dispositivo SMA che include un gruppo di ricentraggio e un gruppo di dissipazione.



Figura 3.6: Schema di un dispositivo ibrido di isolamento alla base SMA-gomma.



Figura 3.7: Dispostivo di isolamento scorrevole.



Figura 3.8: Variazione dell'isteresi in un dispositivo di isolamento SMA al variare della temperatura.

diminuzione della temperatura viene tradotta in un aumento di stress nel materiale a memoria di forma; inoltre l'effetto superelastico può essere raggiunto a temperature relativamente elevate, dove la fase austenitica è stabile. Dolce et al. Ha confrontato le prestazioni di tre dispositivi di isolamento a scorrimento composti da diversi materiali: gomma, acciaio e SMA; essi hanno riportato un'elevata sensibilità del sistema SMA, partendo da una temperatura di riferimento di 20° C ed applicando un escursione termica di $\pm 30C$.

Ozbulut e Hurlebaus hanno studiato le prestazioni di un dispositivo di isolamento scorrevole, considerando una variazione della temperatura ambiente, per catturare la risposta del materiale a diverse temperature e a diverse frequenze di carico. Il sistema di isolamento consiste in un cuscinetto di acciaio e teflon che regge carichi verticali e che dissipa energia combinato ad un dispositivo NiTi che garantisce capacità di ricentraggio e un ulteriore smorzamento. I risultati hanno dimostrato una maggiore forza di attrito per basse temperature, ed una rigidezza iniziale ed una forza di snervamento nel dispositivo SMA che aumenta con l'aumentare della temperatura.

3.3 Dispositivi di smorzamento per ponti

Sono stati condotti diversi studi per verificare se fosse possibile migliorare lo smorzamento di ponti attraverso l'utilizzo di materiali a memoria di forma e per cercare di superare alcuni limiti dei dispositivi convenzionali a base di acciaio. In particolare, molte infrastrutture civili comportano l'uso di cavi strutturali, come ad esempio, ponti sospesi o ponti in cemento armato precompresso.

A causa dell'esposizione ambientale durante il periodo di servizio del ponte, questi cavi sono inclini a due principali meccanismi di danno:

- ♦ corrosione: legata ad un ambiente marino, pioggia o neve, condizioni aggressive, ecc.. Anche se i cavi portanti sono di norma avvolti da protezioni, la corrosione può essere nascosta e, la sua progressione, può portare a danni considerevoli, obbligando il proprietario a sostituire tali cavi e quindi ad incombere ad ingenti spese;
- ♦ fatica: derivante da carichi di intensità variabile (come ad esempio il traffico) ed azioni metereologiche (come il vento). In particolare, a causa della loro flessibilità, della piccola massa e delle proprietà di basso smorzamento, le vibrazioni dei cavi, indotte da queste azioni, sono potenzialmente responsabili di sollecitazioni cicliche (derivanti, per esempio, dalla frizione tra i cavi e gli ancoraggi), che possono causare danni di fatica ai cavi o agli ancoraggi stessi. Dopo un certo numero di cicli, cavi ed ancoraggi, possono essere prograssivamente danneggiati, fino ad una completa disgregazione, con la conseguente necessità di sostituzione.



Figura 3.9: (a) Sezione di un cavo. (b) Danno provocato da corrosione e fatica (Saint Nazaire Bridge, France).

Possibili soluzioni per ritardare la comparsa di danni provocati da corrosione o fatica comprendono l'utilizzo di materiali resistenti alla corrosione e che riducano l'ampiezza di oscillazione del cavo, aumentando la capacità di smorzamento intrinseca. I materiali a memoria di forma sono candidati ideali per affrontare i problemi di stazionamento del cavo grazie alle loro proprietà specifiche, in particolare:

• superelasticità, con un conseguente recupero di deformazione che conferisce una notevole resistenza a fatica; in particolare, oltrepassata una certa temperatura chiamata A_f (solitamente posta a temperatura ambiente), tale materiale recupera la forma originaria senza mostrare alcuna deformazione plastica;

• *smorzamento*, correlata alle caratteristiche isteretiche della SMA; grazie a tale caratteristica la SMA funziona come un sistema passivo che dissipa energia ad ogni oscillazione del cavo.

Molti dispostivi di smorzamento a base di NiTi sono stati studiati e proposti da ricercatori di tutto il mondo. L'utilizzo di leghe a memoria di forma per smorzare stralli richiede una profonda conoscenza sia delle proprietà statiche e dinamiche delle SMA, ma anche degli effetti causati dalle variazioni di temperatura (estate/inverno). Alcune equazioni generali sul movimento di cavi sottoposti a carichi dinamici esterni e controllati da una serie di smorzatori in direzione trasversale, sono state proposte da Ben Mekki e Auricchio. Un cavo sospeso tra due supporti dotato di uno smorzatore a base di NiTi installato ad una distanza x_c dal supporto considerato, esercita una forza di smorzamento f_c in direzione Y (Figura 3.10).

Torra et al. Ha dimostrato che l'ampiezza di oscillazione di uno strallo può essere ridotta da un adeguato smorzatore SMA di un fattore superiore a 2, il che aumenterebbe di parecchio la vita utile dello strallo. Gli stessi autori hanno inoltre condotto test realistici su stralli di lunghezza pari a 50 metri dotati di sistemi di smorzamento SMA (Figura 3.11)

Deng et al. Ha valutato l'efficacia di dispositivi di smorzamento composti da fili NiTi, per ridurre l'ampiezza delle vibrazioni su campioni di stralli realisitici: l'ampiezza di oscillazione del cavo dotato di sistema di smorzamento SMA è stata ridotta del 25 % rispetto al campione sfornito di questo dispositivo; inoltre una drastica diminuzione dell'ampiezza di oscillazione del cavo equipaggiato si è verificata in meno di 10 secondi, contrariamente a quanto accaduto al cavo senza smorzamento SMA che ha continuato a oscillare fin oltre 120 secondi (Figura 3.12 (a)). Infine l'efficienza di questo sistema SMA è stata dimostrata mettendo a confronto le prestazioni di smorzamento di tale dispositivo con quelle del *Tuned Mass Damper (TMD)*, letteralmente "smorzatore a massa risonante" (Figura 3.12 (b)).

Per la progettazione ottimale di dispositivi di smorzamento SMA devono essere presi attentamente in considerazione una serie di fattori caratteristici come: la posizione del dispositivo, la sezione trasversale e la lunghezza dei fili. L'influenza della posizione del dispositivo SMA è stata valutata da Deng et al. Egli ha dimostrato che lo smorzamento è più efficace quando il dispositivo è posto vicino alla massima ampiezza, tipicamente vicino al punto di applicazione della forza.

L'equazione di bilancio energetico che regola un dispositivo di smorzamento SMA applicato ad un cavo è definita come segue:

$$E_k(t) + E_e(t) = E_i(t) + E_c(t)$$
(3.1)

Dove:

- $E_k(t)$ = energia cinetica dello strallo;
- $E_e(t)$ = energia elastica dello strallo;
- $E_i(t)$ = energia iniziale;
- $E_c(t)$ = energia associata al dispositivo SMA

 $E_c(t)$ può essere definita come la somma di due contributi: $E_{ec}(t)$ = termine elastico, ed $E_{dc}(t)$ = termine dissipativo, corrispondente all'area associata all'isteresi della lega a memoria di forma. Al fine di massimizzare la forza di smorzamento, l'area della sezione trasversale del dispositivo SMA dovrebbe essere la più grande possibile, e la lunghezza del dispositivo, la più corta possibile.



Figura 3.10: (a) Diagramma schematico di uno strallo inclinato. (b) Strallo inclinato nel piano connesso ad uno smorzatore SMA.



Figura 3.11: (a) Quattro stralli lunghi 45 m. (b) Smorzatori a base di NiTi impiegati nel lavoro di Torra et al. Dove: A= strallo; B=smorzatore SMA; C= accelerometri



Figura 3.12: (a) Spostamento verticale di uno strallo a L/2 con una forza iniziale pari a 4 KN. (b) Confronto tra uno smorzatore SMA ed un Tuned Mass Damper (TMD) per il controllo delle vibrazioni in uno strallo.

3.4 Connessioni strutturali a base di SMA

I connettori strutturali o le connessioni trave-colonna sono parti di strutture soggette a gravosi danni durante un evento sismico. Prima degli anni '90, le connessioni trave-colonna saldate erano considerate un sistema strutturale adatto per contrastare i carichi derivanti da un evento sismico. Tuttavia, dopo numerose rotture fragili di tali connessioni durante il terremoto di Northbridge del 1994 e durante i terremoti successivi sono state fatte ulteriori ricerche per creare connessioni in grado di esibire prestazioni migliori. Nonostante ciò, molto frequentemente, le connessioni mostrano un elevata deformazione plastica dopo un evento sismico; per ovviare questo problema e per ridurre le difficili e costose opere di riparazione, è stata pensata come possibile soluzione l'introduzione di barre ad alta resistenza post-tese all'interno delle connessioni così da garantire un effetto autocentrante.

Diversi ricercatori hanno proposto l'utilizzo di sistemi a base di SMA per migliorare la risposta strutturale delle connessioni in presenza di elevati carichi sismici, specialmente per le strutture in acciaio. In particolare sono stati proposti connettori SMA per fornire un migliore smorzamento e per tollerare deformazioni relativamente grandi; nonchè per sfruttare il meccanismo di ricentraggio e la loro unica proprietà di recuperare spontaneamente fino all'8% di deformazione, limitando i danni nei principali elementi strutturali.

3.4.1 Connessioni in strutture di acciaio

Per quanto concerne gli studi sulle applicazioni a strutture in acciaio, le prime ricerche sono state condotte da Leon et al. Che hanno eseguito prove sperimentali in scala reale di connessioni travecolonna con e senza l'applicazione di barre NiTiNOL (Figura 3.13 (a)).

Ocel el al. Ha testato una connessione trave-colonna con l'utilizzo di barre NiTi sottoposta ad un carico quasi statico e ciclico. Il collegamento era costituito da quattro barre SMA che collegavano le flange della trave alla flangia della colonna (meccanismo primario di trasfermimento di momento). Dopo il riscaldamento delle barre SMA, lo spostamento verticale dell'estremità della trave è stato recuperato fino al 76%.

Sepulveda et al. Ha eseguito un'indagine sperimentale su un prototipo di collegamento utilizzando quattro barre di CuAlBe (di 3 mm di diametro). La connessione era composta da una trave rettangolare cava, da una colonna con ampie flange, e da una piastra terminale tra i due elementi primari. I risultati sperimentali hanno evidenziato un comportamento superelastico della connessione, un moderato livello di dissipazione energetica e nessuna perdita di resistenza dopo aver sottoposto la connessione a diversi cicli con scorrimento fino al 3%.

Speicher et al. Ha riportato uno studio comparativo sulle conessioni trave-colonna (Figura 3.13 (b)) incorporando barre di (1) acciaio, (2) NiTi martensitico e (3) NiTi superelastico, per valutare la resistenza al momento di tale connessione. Dopo alcuni carichi ciclici, i collegamenti con barre di acciaio e SMA martensitico hanno perso rapidamente la loro rigidezza, mentre il collegamento con barre SMA superelastiche ha mostrato un'ottima duttilità, un'ottima dissipazione di energia, e una buona capacità di ricentraggio. Il collegamento con SMA superelastiche è stato in grado di recuperare l'85% della sua deformazione, inoltre, grazie alle barre superelastiche, tutti gli altri elementi della connessione sono rimasti in campo elastico (Figura 3.14).

Ma et al. Ha sperimentato un collegamento innovativo costituito da una piastra terminale, viti SMA, piastre di continuità ed irrigidimenti. Questo design innovativo sembra essere molto promettente in termini di prestazioni sismiche siccome la duttilità e la dissipazione di energia richieste potrebbero accomodarsi nella deformazione delle viti SMA; in questo modo la cerniera plastica potrebbe formarsi all'interno della connessione mentre gli elementi strutturali (trave, colonna e piastra terminale) rimarrebbero principalmente in campo elastico. Il vantaggio principale consiste nel minimizzare i costi di riparazione post-sisma negli elementi strutturali.



Figura 3.13: (a) Connessione trave-colonna in acciaio con l'utilizzo di tendini SMA. (b) Specifiche della connessione trave-colonna utilizzata nel lavoro di Speicher et al.



Figura 3.14: Grafici momento-rotazione della connessione con l'utilizzo di (a) acciaio, (b) SMA martensitiche, e (c) SMA superelastiche.



Figura 3.15: Risultati della sperimentazione di Fang et al. (a) Deformazione delle rispettive connessioni durante i test sperimentali. (b) Curve momento-rotazione.

Questo concetto è stato profondamente studiato da Fang et al. Che hanno presentato uno studio sperimentale in scala reale sulle prestazioni di connessioni trave-colonna con piastra terminale, sia tramite l'utilizzo di viti SMA che di viti ad alta resistenza (HS). Le connessioni con viti SMA mostrano un'eccellente capacità di ricentraggio (Figura 3.15 (a)), e capacità di dissipazione energetica moderata con smorzamento viscoso equivalente fino a 17,5%; la connessione con viti ad alta resistenza HS, invece, ha dimostrato di avere una buona capacità di dissipazione energetica ed una buona duttilità (Figura 3.15 (b)), ma di essere particolarmente soggetta ad una notevole deformazione permanente.

3.4.2 Connessioni in strutture di cemento armato

Come per le strutture di acciaio, le connessioni trave-colonna in cemento armato sono considerate l'anello debole di tale sistema strutturale; per questo motivo i materiali SMA sono stati proposti per rinforzare le zone della connessione soggette alla formazione di cerniere plastiche, grazie alla loro capacità di dissipare quantità significative di energia e di presentare una deformazione residua trascurabile dopo un evento sismico.

Youssef et al. Ha proposto l'impiego di SMA superelastiche come rinforzo nei giunti trave-colonna, ed hanno confrontato i risultati con i giunti di acciaio rinforzato. Il test, condotto su campioni di grandi dimensioni, ha dimostrato una capacità di dissipazione energetica inferiore ed una scarsa forza di adesione del calcestruzzo nel giunto rinforzato da materiale SMA, ma un significativo recupero di deformazione.

Alam et al. Ha studiato le prestazioni di connessioni trave-colonna in cemento armato rinforzate con acciaio o con materiale SMA superelastico sotto l'azione di un carico ciclico. L'elemento travecolonna in cemento armato è stato rafforzato con armature SMA in corrispondenza della zona della trave soggetta alla formazione della cerniera plastica, mentre l'acciaio è stato utilizzato per fortificare le restanti parti della connessione (Figura 3.16). I risultati hanno evidenziato che: anche se il giunto trave-colonna in acciaio ha dissipato una quantità maggiore di energia, il giunto rinforzato con SMA ha esibito risultati migliori grazie alla sua capacità di recuperare la deformazione. Gli autori hanno



Figura 3.16: Dettagli di connessioni trave-colonna in cemento armato rinforzate con materiale a memoria di forma.

inoltre provato a determinare una procedura analitica per calcolare la lunghezza della cerniera plastica, la larghezza delle fessure e la spaziatura delle crepe, per la connessione in cemento armato con giunti rinforzati da materiale a memoria di forma.

La prospettiva di utilizzare materiali SMA per migliorare le prestazioni di connessioni trave-colonna di elementi in cemento armato, è stata recentemente estesa anche a soluzioni ibride che coinvolgono polimeri rinforzati con fibre (FRP). Una ricerca è stata condotta da Billah e Alam, essi hanno proposto una configurazione ibrida di una colonna in calcestruzzo armato, per ridurre i danni permanenti e per migliorare la resistenza alla corrosione. La colonna è posta al piano terra di un edificio di sei piani e la regione soggetta alla formazione di creniere plastiche è stata rinforzata da materiale a memoria di forma, mentre le restanti regioni da FRP o tondini di acciaio inox. I risultati delle prove sperimentali condotte sotto l'azione di un carico ciclico hanno mostrato che la colonna rinforzata è stata in grado di recuperare lo spostamento residuo nella zona della cerniera plastica dell'87% in più rispetto alle colonne convenzionali.

3.5 Strutture riabilitate tramite sistemi SMA

Alcune strutture esistenti sono state ammodernizzate tramite l'utilizzo di tecnlogie basate su leghe a memoria di forma, specialmente nella riabilitazione di strutture storiche.

Castellano ed Indirli hanno adottato tale tecnologia per la ristrutturazione del campanile della chiesa di S. Giorgio, ubicata a Trignano, in Italia. Il campanile alto 18,5 metri e costruito originariamente nel 1302 fu colpito da un terremoto di magnitudo 4,8 Richter nell'ottobre del 1996, e rimase fortemente debilitato. Tale sistema a base di SMA è stato pensato per incrementare la stabilità flessionale della torre. Una barra di acciaio pretesa è stata installata in ciascuno dei quattro angoli interni della torre ed è stata ancorata alla fondazione ed al tetto (Figura 3.17 (a)). I dispositivi SMA, composti da 60 fili SMA da 1 mm di diametro e 300 mm di lunghezza, sono stati installati in ciascuna delle barre, all'altezza del terzo piano della struttura. E' stato successivamente possibile notare il perfetto comportamento di tale struttura storica in funzione all'evento sismico manifestatosi nel 2000 di magnitudo simile a quello del 1996.

Croci ha condotto un lavoro simile per riabilitare la basilica di S. Francesco D'Assisi (Italia), danneggiata dopo il terremoto del settembre del 1997. La basilica doveva essere opportunamente



Figura 3.17: (a) Campanile della chiesa di S. Giorgio, riabilitato da barre di acciaio e dispositivi SMA. (b) Dispositivi SMA impiegati nella riabilitazione della basilica di S. Francesco d'Assisi. (c) Esterno della sinagoga Sherith Israel a San Francisco.

restaurata per raggiungere un adeguato livello di sicurezza, preservando il concetto di struttura storica. Per affrontare questo problema, è stato utilizzato un dispositivo di connessione che sfrutta il principio della superelasticità delle leghe SMA, che ha consentito una riduzione delle forze sismiche trasmesse alla struttura ed ha controllato lo spostamento delle pareti in muratura (Figura 3.17 (b)).

Un altro esempio dell'adozione di tecnologie SMA per la riabilitazione di edifici danneggiati è quello riguardante la Sherith Israel Synagougue a San Francisco (Figura 3.17 (c)). In quel caso, la sfida consisteva nell'applicare una soluzione strutturale che non andasse ad intaccare il valore storico della sinagoga. Un sistema di tensionamento a base di NiTiNOL è stato utilizzato per ridurre lo spostamento e per fornire una capacità di ricentraggio alle pareti della struttura.

3.6 Impiego di SMA come rinforzi in strutture di cemento aramto

L'utilizzo di leghe SMA superelastiche come rinforzo per strutture in calcestruzzo sta guadagnando sempre più interesse tra i ricercatori di tutto il mondo grazie alle peculiari proprietà meccaniche delle leghe SMA rispetto ai comuni acciai. L'impiego di SMA come rinforzo può infatti cambiare le risposte di tali strutture sottoposte all'azione di carichi sismici riducendo le deformazioni permanenti negli elementi strutturali.



Figura 3.18: Risultati dei test su travi a T compiuti da Zafar e Andrawes.

Abdulridha et al. Ha valutato le prestazioni flessionali di travi in CA semplicemente appoggiate rinforzate con barre di NiTiNOL sotto l'azione di un carico ciclico. Queste travi hanno mostrato prestazioni migliori rispetto alle travi convenzionali nel limitare gli spostamenti residui e nel presentare fessure di larghezza inferiore.

Zafar e Andrawes hanno proposto un nuovo tipo di armatura composita a base di SMA. Tale armatura è composta da fili SMA di piccolo diametro annegati in una matrice di resina termoindurente con o senza aggiunte di fibre di vetro. Le armature SMA-FRP proposte sono state incorportare in travi di calcestruzzo a T e sono state testate in tre diversi punti mentre erano sottoposte ad uno spostamento controllato ciclico fino a rottura. Si è dimostrato che l'armatura SMA-FRP è stata in grado di migliorare le performance delle travi, fornendo capacità di ricentamento e capacità di chiusura delle fessure (Figura 3.18).

Capitolo 4

Il software ad elementi finiti ABAQUS

4.1 Analisi agli elementi finiti

L' analisi agli elementi finiti (FEA) è una tecnica di simulazione a computer usata nelle analisi ingegneristiche. Questa tecnica di simulazione utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM), il cui obiettivo è essenzialmente la risoluzione in forma discreta e approssimata di generali sistemi di equazioni alle derivate parziali [17].

4.1.1 Vantaggi e svantaggi

I vantaggi di un'analisi agli elementi finiti consistono nella possibilità di trattare problemi di campo:

- definiti su geometrie complesse;
- relativi ad una larga varietà di problemi ingegneristici (meccanica dei solidi, dei fluidi, del calore, di elettrostatica, ecc..);
- con complesse condizioni di vincolo;
- con complesse condizioni di carico.

Gli svantaggi dell'analisi consistono:

- nella impossibilità di generare una soluzione in forma chiusa e parametrizzabile del problema;
- nelle approssimazioni della soluzione inerenti all'approccio ad elementi finiti utilizzato:
 - errori di discretizzazione del dominio di forma non regolare mediante l'assemblaggio di elementi finiti di forma molto regolare (triangolare o rettangolare nel caso di problemi piani);
 - errori di interpolazione della soluzione all'interno dei singoli elementi finiti mediante semplici funzioni polinomiali;
 - l'uso di procedure numeriche approssimate per il calcolo di quantità integrali sul dominio degli elementi;
- negli errori connessi alle procedure di calcolo utilizzate:
 - errori di calcolo inerenti al numero limitato di cifre significative con cui lavora un computer ed ai conseguenti troncamenti decimali delle quantità numeriche utilizzate;
 - per lo stesso motivo, difficoltà numerica, per il computer, di operare con numeri estremamente grandi ed estremamente piccoli;
- nei facili errori di modellazione cui è soggetto l'utente.

4.1.2 Procedure di analisi

Oggigiorno sono disponibili una grande varietà di software di analisi agli elementi finiti, sia di tipo libero che commerciale.

Comune a tutti i pacchetti software è la suddivisione del processo di analisi in tre tempi:

- il *pre-processing* dove è costruito il modello ad elementi finiti;
- il processing di analisi vero e proprio con la risoluzione del problema agli elementi finiti;
- il *post-processing* dove viene elaborata e rappresentata la soluzione.

In particolare il *pre-processing* si articola:

- 1. nella scelta del tipo di analisi da effettuare (analisi statica/dinamica/termica, lineare o nonlineare, dipendente o meno dal tempo, ecc ...);
- nella scelta del tipo di elementi finiti (per problemi piani o tridimensionali, ad andamento polinomiale/lineare/quadratico/ecc, di tipo asta/trave/lastra/piastra/guscio/tridimensionale/ecc ...);
- 3. nella definizione dei parametri che caratterizzano il comportamento costitutivo dei materiali;
- 4. nella definizione del reticolo di nodi del problema discreto;
- 5. nella costruzione della discretizzazione ad elementi finiti assegnando per ognuno i nodi a cui essi fanno riferimento;
- 6. applicando le condizioni di vincolo e di carico.

Il post-processing elabora e rappresenta la soluzione sia nelle quantità fondamentali, rappresentate direttamente in forma discreta nel metodo FEM (per esempio, gli spostamenti in ambito strutturale), sia delle quantità da esse derivate importanti nella fisica del problema analizzato (per esempio le tensioni, in un approccio compatibile in problemi strutturali). Nei software commerciali entrambi, il pre-processing ed il post-processing, fanno sempre uso di un'interfaccia grafica che ne rende agevole l'iterazione con l'utente [17].

4.1.3 Cenni al metodo agli elementi finiti (FEM)

Il metodo agli elementi finiti (FEM) è un procedimento di discretizzazione che, attraverso l'uso di un modello matematico e di tecniche di calcolo numerico, rende possibile lo studio di problemi particolarmente complessi. Sulla base delle equazioni fondamentali che regolano il fenomeno allo studio, mediante un'opportuna approssimazione delle variabili in gioco, viene ricercata una soluzione che, pur non essendo esatta, fornisce indicazioni utili per l'analisi in problemi la cui soluzione per via analitica, coi metodi classici, risulterebbe onerosa quandanche fosse possibile. Il FEM può essere applicato sia per lo studio di strutture, sia per lo studio di trasmissione di calore, fluidodinamica, di acustica ed altri ancora, eventualmente applicati tra loro. Per quanto riguarda la meccanica delle strutture possono essere affrontati problemi elastici, ma anche problemi di elasticità non lineare e di plasticità, problemi statici, stazionari, dinamici ed anche di meccanica impulsiva.

L'obiettivo è quello di arrivare a scrivere per un certo numero di elementi significativi la relazione di rigidezza:

$$\{F\} = [K] * \{f\} \tag{4.1}$$



Figura 4.1: Simulazione tramite analisi agli elementi finiti dell'impatto di un veicolo contro una barriera asimmetrica

e di poter scrivere delle relazioni che permettano di esprimere il campo degli spostamenti, delle deformazioni e delle tensioni in tutto l'elemento, a partire dai valori degli spostamenti nodali. I vari elementi sono quindi connessi tra loro, con le regole di rotazione dei sistemi di riferimento e di assemblaggio della matrice di rigidezza della struttura, per calcolare il campo degli spostamenti, le reazioni vincolari ed il campo delle tensioni di tutta la struttura, sulla base dei vincoli e delle forze nodali applicate dall'esterno (o del moto imposto ad alcuni punti della struttura) considerati come dati iniziali noti del problema strutturale.

Per ottenere i risultati suddetti verrà seguito un procedimento logico basato su sette passi:

- 1. identificare e descrivere l'elemento;
- 2. scegliere un'opportuna funzione per approssimare il campo degli spostamenti di ogni punto dell'elemento;
- legare il campo degli spostamenti dell'elemento agli spostamenti nodali dell'elemento (funzioni di forma);
- 4. scrivere le relazioni tra il campo degli spostamenti ed il campo delle deformazioni per ogni punto dell'elemento;
- 5. scrivere il campo delle tensioni in funzione del campo delle deformazioni nell'elemento;
- 6. ricavare le relazioni tra i carichi nodali e gli spostamenti nodali, si ottiene qui la formulazione della matrice di rigidezza dell'elemento;
- 7. scrivere le relazioni tra il campo delle tensioni dell'elemento e gli spostamenti nodali [17].

4.2 ABAQUS

In riferimento allo studio condotto da Sannino "Modelli di Calcolo Avanzati per l'Analisi di Strutture Metalliche in caso di Incendio" [18], possiamo definire ABAQUS come un insieme di programmi per le applicazioni di ingegneria, basati sul metodo agli elementi finiti, che può risolevere problemi che spaziano da analisi lineari relativamente semplici a simulazioni non lineari di gran lunga più impegnative, in cui intervengono gli effetti non trascurabili legati alla non linearità geometrica, ai materiali ed alle condizioni al contorno. Vasta è la libreria di elementi, con cui è possibile modellare praticamente qualsiasi geometria, ed ugualmente varia è quella di modelli, con cui si può simulare il comportamento di una molteplicità di materiali, dal calcestruzzo ai metalli, dai compositi ai polimerici, dalla gomma alla roccia. Per le analisi su modelli costituiti da più parti elementari, si ha la facoltà di associare a ciscuna di esse il rispettivo modello di materiale e definire le iterazioni tra loro.

I problemi che si possono essere studiati sono molteplici; è possibile, infatti, implementare analisi:

- strutturali statiche (*static stress / displacement*);
- dinamiche (dynamic stress-displacements);
- di trasferimento di calore *(heat transfer)*;
- di fluidodinamica (mass diffusion);
- termo-meccaniche accoppiate (thermal-stress analysis);
- elettriche (electrical analysis);
- acustiche e d'iterazione tra la struttura e le onde *(acoustic and shock analysis)*.

In simulazioni non lineari, il programma determina automaticamente le tolleranze per la convergenza, modificandole continuamente, in modo da assicurare un risultato accurato nella maniera più efficiente.

4.2.1 ABAQUS/standard e ABAQUS/explicit

ABAQUS consiste di due prodotti principali per le analisi, vale a dire ABAQUS/explicit ed ABAQU-S/standard. In particolare, la scelta tra i due è vincolata al tipo di problema che si deve affrontare: il primo, infatti, a differenza del secondo, consente di tener conto degli effetti inerziali ed è, pertanto, utile per le analisi dinamiche. Essi, inoltre, si differenziano per l'algoritmo di soluzione: a ciascun incremento di tempo, ABAQUS/standard si risolve il sistema di equazioni accoppiate attraverso la creazione di una matrice globale di rigidezza, mentre l'explicit un metodo esplicito di risoluzione del sistema di equazioni differenziali [18] [19] [20] [21] [22].

4.2.2 ABAQUS CAE

Per la costruzione del modello, la definizione del tipo di analisi, la sua implementazione, nonchè l'attività di monitoraggio della stessa, ed infine per la visualizzazione dei risultati, è possibile avvalersi di un ambiente grafico interattivo, detto ABAQUS CAE, che contiene i prodotti precedentemente menzionati per l'esecuzione delle simulazioni, insieme al post-processore ABAQUS Viewer, cui si accede attraverso il modulo *Visualization*, che gestisce i risultati scritti nel file di output database (ODB).

ABAQUS CAE permette di costruire modelli rapidamente e facilmente, producendo o importando la geometria della struttura da analizzare, e di facilitare la realizzazione delle mesh attraverso l'individuazione di elementi di forma elementare. Proprietà fisiche e materiali, inoltre, possono essere



Figura 4.2: ABAQUS

assegnate alla geometria, unitamente a carichi ed a condizioni al contorno. Quando il modello è completo, ABAQUS CAE può sottoporlo all'analisi, monitorarlo e visualizzarne i risultati. ABAQUS CAE è suddiviso in moduli, ciascuno dei quali definisce un aspetto della modellazione e presenta molteplici funzioni:

- \star Part: per il disegno dei singoli elementi che costitui
scono il modello;
- * *Property*: per la definizione del materiale e delle caratteristiche della sezione, nonchè delle varie proprietà delle singole parti;
- \star Assembly: per assemblare le varie parti del modello, su cui applicare successivamente carichi e vincoli;
- \star Step: per configurare il tipo di analisi e le variabili che si vogliono avere in uscita;
- * Load: per applicare i carichi e le condizioni al contorno;
- * *Interaction*: per definire l'iterazione tra le parti in corrispondenza delle superfici di contatto, nonchè l'iterazione della struttura con l'ambiente in termini di flussi di calore;
- \star Mesh: per realizzare la mesh;
- \star Job: per analizzare il modello costitutivo;
- \star Visualization: per visualizzare i risultati dell'analisi.

Passando da un modulo all'altro si costruisce il modello da quale ABAQUS CAE genera il file di input, che poi sottopone ad ABAQUS/Standard ovvero ABAQUS/Explicit per l'analisi [18] [19] [20] [21] [22].

Part

Quando si definisce ciascuna parte del modello, è necessario specificare se si intende costruire una geometria tridimensionale, piana o che presenti un asse di simmetria, nonchè indicare se si tratta di

elementi deformabili o rigidi: una parte deformabile è un elemento che può deformarsi sotto l'azione di un carico che può essere di tipo meccanico, termico, elettrico, ecc... Mentre una parte rigida rappresenta una parte indeformabile che viene molto spesso utilizzata nelle analisi di contatto per modellare corpi che non si possono deformare. A seconda delle scelte effettuate in tal senso, è possibile, poi, disegnare la geometria con forme solid, shell, wire o point. La definizione della geometria ed, in particolare, la scelta dell'elemento è funzionale al tipo di analisi che si vuole implementare. Se si opta per una geometria tridimensionale, viene anche richiesto di definire il metodo di estrusione della geometria piana che verrà disegnata in seguito, tramite i comandi Extrusion, Revolution e Sweep. Definite tali scelte si apre un'interfaccia CAD che permette all'utente, grazie a comandi standard, di creare punti, linee, archi, rettangoli, cerchi, ecc... Così da rendere possibile la creaziaone di una qualsivoglia geometria bidimensionale. Viene inoltre consentito, non solo di creare un elemento direttamente in ABAQUS, ma anche di importarlo da un software esterno come può essere ad esempio AUTOCAD. Altra comodità presente in questo modulo è quella di poter copiare parti già create, dando così la possibilità all'utente di poter creare elementi simili modificando copie di elementi già creati. Infine è possibile creare punti di riferimento *Reference Point* per creare punti utili in seguito per collegare altri elementi, per applicare condizioni al contorno, ecc... Creare Set o superfici (Section), partizionare l'elemento in più parti (Partition) e creare fori o altre modifiche attraverso il comando Cut. I comandi presenti in questo modulo sono molteplici, sono stati descritti sopra solo alcuni tra questi, utilizzati con maggior frequenza [18] [19] [20] [21] [22].

Property

Le proprietà da associare agli elementi utilizzati ed eventualmente a specifiche regioni di essi sono:

- il tipo di sezione, previa la definizione del materiale e, nel caso di elementi beam e truss, del profilo *(Section)*;
- l'orientamento della sezione per gli elementi trave (*Beam section orientation*);
- un sistema di riferimento locale per definire le caratteristiche del materiale nel caso in cui non si utilizzino dei materiali isotropi (Material orientation);
- l'orientamento delle barre di armatura per gli elementi shell (Rebar reference orientation);
- la direzione normale per gli elementi shell o membrana (Normal);
- la direzione tangente per gli elementi beam / truss (Tangent).

In particolare, la modellazione di un materiale passa attraverso la definizione delle sue caratteristiche, ciascuna delle quali associata ad una determinata opzione o comportamento elementare *(Material behaviours)* [18] [19] [20] [21] [22].

Assembly

Ciascun elemento del modello, creato individualmente nel modulo *Part*, esiste con il proprio sistema di riferimento, indipendentemente dagli altri. Nel modulo *Assembly* non si fa altro che realizzare, a seconda del modello, una o più copie di ciascuno di essi *Instance* e stabilire la loro posizione reciproca all'interno di un sistema di riferimento globale. Ogni copia o *instance* mantiene, comunque, l'associazione con la sua parte originale cosicchè, se la geometria di una di esse è modificata, tutte le sue *instance* sono automaticamente aggiornate in modo da riflettere tali cambiamenti. Nel momento in cui si crea, si può, tuttavia, scegliere tra una *Dependent* o *Independent instance*; la prima è a tutti gli effetti una riproduzione della parte, per cui non può essere realizzata una mesh indipendente da

essa, la seconda, invece, è una copia dell'originale, per cui si può costruire una mesh indipendente dalle altre eventuali *instance*, nonchè dalla parte. Da rimarcare che, se di ogni parte si può effettuare più di una *instance*, il modello può, invece, contenere un solo *Assembly*, a cui applicare negli altri moduli i carichi, le condizioni al contorno, le iterazioni meccaniche e termiche tra le parti e con l'ambiente, i valori iniziali della temperatura [18] [19] [20] [21] [22].

Step

Per ogni modello si hanno uno *step* iniziale, ed uno o più *step* successivi. Il primo step consente di definire le condizioni al contorno (*Boundary conditions*), campi predefiniti *Predefined fields*, e le iterazioni tra le parti che sono applicabili ad inizio analisi. Ad esempio, se viene applicata una condizione al contorno o un'iterazione durante tutta l'analisi, di solito è conveniente applicare tali condizioni nello step iniziale. Altra caratteristica fondamentale di questo primo step è che non può essere modificato, sostituito o eliminato. Ad ogni step successivo, invece, è associata una diversa procedura, che definisce il tipo di analisi che sarà effettuata durante lo stesso, e per i quali è possibile specificare eventuali cambiamenti nei carichi, nelle condizioni al contorno e nelle iterazioni tra le parti. E' inoltre possibile mediante il comando *Nlgeom* dire al programma se tener in conto delle non linearità geometriche oppure no, per esempio nel caso in cui certi carichi determinino grandi spostamenti rendendo importanti tali non linearità.

In ABAQUS vi è una distinzione netta tra *General non-linear step* e *Linear perturbation step*. Nel primo è, infatti, possibile tener conto degli effetti della non linearità, legata al materiale, ai grandi spostamenti ed al contatto o iterazione tra le parti e con l'ambiente, mentre il secondo consiste essenzialmente in una perturbazione lineare a partire da uno stato di base; si hanno, inoltre, differenze legate alle condizioni di carico, alla misura del tempo, all'interpretazione dei risultati. Generalmente si ricorre allo step di tipo *General*, per i quali lo stato di partenza è quello corrispondente alla fine dell'ultimo step *General*. Ogni step è caratterizzato, inoltre, da un suo tempo o *Step time*, che può corrispondere ad un tempo fisico, come nel caso di analisi dinamiche o d'incendio, o costituire un valore convenzionale e sufficientemente piccolo rispetto al primo caso, quando lo step non è legato ad alcun fenomeno in particolare. In ogni caso le durate dei vari step si sommano per costituire il tempo totale dell'analisi o *Total time*.

I prodotti di analisi di ABAQUS calcolano i valori di molte variabili ad ogni incremento di uno step. Solitamente si è interessati solamente ad un piccolo sottoinsieme di tutti questi dati; per questo motivo è possibile specificare i dati che vogliamo ottenere nel file di output attraverso i comandi *Field* output request e History output request; attraverso questi comandi si ha la possibilità di:

- definire le variabili o anche solo componenti di esse a cui siamo interessati;
- definire la regione del modello da dove desideriamo ottenere tali dati;
- definire ad ogni quanti incrementi desideriamo che i dati vengano trascritti nel file di output.

Quando viene creato il primo step, alcune variabili vengono selezionate di default dal programma stesso. Maggiore è il numero di variabili (o componenti di esse) che vogliamo ottenere in uscita, maggiore sarà la dimensione del file di output e maggiore sarà anche il tempo che il programma impiegherà per generarlo; per questo motivo è bene fare attenzione a selezionare esclusivamente le variabili di nostro interesse per evitare di appesantire inutilmente l'analisi.

Infine è utile osservare che a seconda degli elementi utilizzati per effettuare la meshatura del modello, alcune variabili in uscita potrebbero non essere disponibili, e quindi, potrebbero essere necessiare altre tecniche per aggirare questo spiacevole inconveniente [18] [19] [20] [21] [22].



Figura 4.3: Superfici master e slave

Interaction

In questo modulo è possibile definire:

- l'interazione tra la struttura e l'ambiente che la circonda (ad esempio flussi termici);
- l'interazione tra le varie parti del modello attraverso la definizione dei contatti;
- vincoli di vario tipo tra le parti del modello.

Per quanto concerne la delicata modellazione dei contatti tra le varie parti, è possibile in ABAQUS definire le proprietà ad essi inerenti, in termini di caratteristiche meccaniche e termiche; si può, quindi, evitare la compenetrazione tra le superfici a contatto, specificare i coefficienti di attrito relativamente allo slittamento, definire la trasmissione di calore tra esse. Nei contatti particolare attenzione richiede la definizione delle *superfici slave* e delle *superfici master*, ed il problema presenta una sensibilità differente a seconda del metodo che si utilizza per discretizzare le superfici a contatto; infatti, si possono seguire due diversi approcci al problema:

- ♦ node-to-surface contat;
- \blacklozenge surface-to-surface contat.

Nel *node-to-surface contact* il contatto viene stabilito tra ciascun nodo della superficie slave e l'insieme di nodi della superficie master che si ottengono dalla proiezione del primo su di essa, come mostrato in Figura 4.3.

I nodi della superficie slave sono costratti a non penetrare nella superficie master; altrettanto non vale, invece, per quelli della superficie master, come si evince dalla Figura 4.4.

Il contatto si basa sulla definizione della normale alla superficie master, mentre non intervengono la normale alla superficie slave nè la sua curvatura in ogni punto. Nel metodo *surface-to-surface*






Figura 4.5: Superfici master e slave - surface-to-surface contact

contact entra in gioco la forma di entrambe le superfici poichè il contatto è definito in senso medio e non limitatamente ai nodi della superficie slave; ne consegue che in alcuni nodi si può avere la compenetrazione individuale, ma in grande scala il fenomeno è scongiurato, come si nota in Figura 4.5.

Pertanto, per il primo approccio più che per il secondo, diventa importante la definizione per le superfici slave di una mesh meno grossolana di quella utilizzata per le master, nonchè la scelta per queste ultime delle superfici appartententi a corpi più rigidi, per materiale e geometria, anche se effetti benefici in termini di costi computazionali si hanno pure per il *surface-to-surface contact*. Infine all'interno del modulo *Interaction* possono essere definiti vincoli (*Constraints*) tra le varie regioni del modello; attraverso tali strumenti possono essere soppressi o riprestinati determinati gradi di libertà tra le parti. Esistono vari tipi di *Constraint*, di seguito riportiamo quelli più frequenti e di maggior interesse:

- *Tie*: questo vincolo permette di fondere insieme due regioni, anche se le mesh dei due elementi sono dissimili;
- *Rigid body*: questo vincolo permette di vincolare il movimento di determinate regioni del modello al moto di un punto di riferimento;
- *Coupling*: tale vincolo permette di vincolare il movimento di una superficie al movimento di un singolo punto;
- Adjust points: tale vincolo consente di spostare uno o più punti su una determinata superficie;
- *MPC constraint*: questo vincolo consente di vincolare il movimento dei nodi slave di una determinata regione al moto di un singolo punto [18] [19] [20] [21] [22].

Load

Al modello possono essere prescritte le seguenti tipologie di condizioni esterne:

- *condizioni iniziali*, con le quali sono specificati nello step iniziale valori non nulli per alcune variabili, quali la temperatura o la velocità;
- condizioni al contorno, che si riferiscono a variabili del problema, quali spostamenti o rotazioni in un'analisi statica oppure temperature in un'analisi di trasferimento di calore, con le quali, ad esempio, è possibile modellare i vincoli;
- carichi, di varia natura e dipendenti dall'analisi;
- *campi predefiniti*, introducibili in step successivi a quello iniziale, con i quali, per esempio, in un'analisi stress/displacement è possibile assegnare dei campi di temperatura;
- *pre-carichi nei connettori*, con cui si può modellare, ad esempio, la pretrazione nelle viti e meglio definire dei collegamenti complessi tra le parti.

In particolare, per quanto riguarda i carichi è possibile assegnare al modello:

- ♦ carichi concentrati e distribuiti, che possono seguire o meno la rotazione dei nodi o delle superfici cui essi sono applicati;
- ♦ *flussi termici*;
- variazioni di pressioni sulla sua superficie per effetto dell'incidenza di onde che si propagano in un mezzo;
- ♦ *flusso del fluido* interstiziale in materiali porosi.

In questo modulo infine, è possibile creare, attraverso il comando *Amplitude*, una legge temporale da assegnare ad una determinata condizione al contorno, come può essere ad esempio un carico o uno spostamento [18] [19] [20] [21] [22].

Mesh

Questo modulo permette di generare la *mesh* delle varie parti create in ABAQUS CAE. Sono molteplici gli strumenti disponibili per facilitare e rendere razionale tale operazione, quali la divisione di ciascun lato nel numero di elementi desiderati (attraverso il comando *Seed*), la definizione della dimensione massima degli elementi, nonchè una varietà di tecniche di controllo per la generazione della mesh e per la verifica della sua qualità. Essenziale ai fini dell'analisi è, poi, la corretta definizione del tipo di elemento da associare a ciascuna parte o sua regione ed il tipo di integrazione. In particolare, per i problemi interessati da grandi deformazioni in campo plastico, la definizione della funzione di forma, attraverso la specificazione del numero di punti di integrazione per ogni lato dell'elemento, è fondamentale per evitare problemi di *overconstraint*, quali quelli dovuti ai meccanismi di *shear locking* e *volumetric locking*. Se si sceglie, infatti, un'integrazione completa lineare, con cui si ha un punto di inegrazione ad ogni vertice dell'elemento, quest'ultimo si deforma come riportato in Figura 4.6.

E' evidente che la parte superiore si è allungata, mentre quella inferiore ha subito un accorciamento, per cui avremo in corrispondenza di esse delle tensioni di σ_{11} rispettivamente di trazione e compressione. La lunghezza delle linee verticali, invece, non è cambiata, assumendo che gli spostamenti siano sufficientemente piccoli, per cui le σ_{22} in ogni punto sono nulle. Il quadro tensionale descritto è coerente con quello sollecitativo. Tuttavia, in ogni punto di integrazione l'angolo tra le direzioni



Figura 4.6: Deformata elementino con integrazione lineare

verticale ed orizzontale è cambiato, per cui si hanno delle σ_{12} non nulle, la qual cosa non è corretta per un elemento soggetto a puro momento. Ciò comporta che una parte di energia è dissipata per effetto degli scorrimenti tra tali direzioni piuttosto che per effetto delle dilatazioni, per cui l'elemento presenta deformazioni minori in tal senso, risultando più rigido *(Shear Locking)*. Questo problema non si presenta se si sceglie un'integrazione completa quadratica (Figura 4.7).



Figura 4.7: Deformata elementino con integrazione quadratica

Tuttavia, gli elementi quadratici esibiscono alcuni problemi se gli elementi sono distorti ed il momento presenta un gradiente. Pertanto, si può scegliere di utilizzare un'integrazione lineare con una mesh più fitta nella direzione dell'asse baricentrico di travi e colonne, al fine di ridurre i problemi su accennati. Nell'interfaccia grafica di ABAQUS le parti si colorano di diversi colori a seconda del tipo di meshatura utilizzabile; più precisamente le teciniche di meshatura possibili sono:

- ★ Structured: questo tipo di meshatura genera mesh strutturate utilizzando forme prestabilite semplici come quadrati o cubi (Figura 4.8). L'elemento utilizzato con questa tecnica è un esaedro (HEX) in parti tridimensionali.
- ★ Swept: questa tecnica di meshatura viene utilizzata per soldi e superfici complesse; la tecnica di meshatura si compone di due fasi: inizialmente ABAQUS CAE crea una mesh su un solo lato della regione (chiamato lato sorgente), successivamente copia i nodi della meshatura creata uno strato di elemento alla volta, sino a raggiungere il lato finale; questo percorso viene chiamato sweep path; tale tecnica è frequente in elementi con sezioni circolari o in elementi cavi/forati (Figura 4.9). L'elemento utilizzato con questa tecnica è un esaedro (HEX) per parti tridimensionali, mentre TRI o QUAD per parti bidimensionali.
- ★ Free: a differenza della meshatura strutturata, questa tecnica non utilizza modelli prestabiliti. Il metodo Free consente una maggiore flessibilità, ma le mesh che ne risultano possono essere molto complesse. L'elemento utilizzato con questa tecnica è un tetraedro (TEX) per parti tridimensionali, mentre TRI o QUAD per parti bidimensionali.
- ★ Bottom-up: questo è un processo di meshatura manuale e permette di costruire una meshatura esaedrica in qualsiasi regione solida; mentre tutte le altre tecniche sono vincolate in qualche modo dalla geometria, questo tipo di meshatura può ignorare alcuni vincoli geometrici (Figura 4.10) [18] [19] [20] [21] [22].



Figura 4.8: Modelli bidimensionali di mesh strutturata

Job

Una volta che il modello è stato ultimato, il modulo *job* consente di effettuare l'analisi e monitorare il suo svolgimento. Il programma dà anche l'opzione di far ripartire analisi già effettuate o non ultimate, specificando negli attributi del modello il job dal quale vanno letti i dati e lo step di partenza. E' infine possibile monitorare l'avanzamento dell'analisi: aprendo la finestra *Monitor* dopo aver lanciato l'analisi vengono mostrati lo step di riferimento, il numero dell'incremento e quindi il tempo raggiunto, eventuali messaggi di warning o di errore. La voce *running* indica che l'analisi è ancora in corso; la voce *completed* indica che l'analisi è terminata con successo; la voce *aborted* indica che l'analisi è stata interrotta.

Per la visualizzazione dei risultati dopo che l'analisi è terminata con successo bisogna accedere al modulo di visualizzazione.

Visualization

Con questo modulo è possibile visualizzare i risultati intermedi e finali dell'analisi, utilizzando molteplici strumenti e funzioni, che permettono, ad esempio, di diagrammare lo stato tensionale in una sezione e la variazione nel tempo delle componenti dello spostamento in un particolare punto, di utilizzare la scala delle deformazioni appropriata per meglio leggere gli spostamenti, nonchè vedere con animazioni l'evoluzione del modello.



Figura 4.9: Meshatura swept in un solido



Figura 4.10: Solidi con geometrie complesse dove è consigliata una meshatura bottom-up

Capitolo 5

Costruzione del modello

Nell'articolo "Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys" [1] scritto da Michael C.H. Yam (Hong Kong Polytechnic University, China) e Cheng Fang (University of Newcastle, UK), vengono studiati diversi modelli di connessione trave-colonna equipaggiate con bulloni SMA, ognuno realizzato con geometrie differenti dagli altri. Tali modelli sono stati sia realizzati fisicamente in scala reale, che riprodotti sul software ad elementi finiti ABAQUS/Standard. Sono stati quindi comparati i grafici momento-rotazione plastica delle varie connessioni, nel caso sperimentale e nel caso numerico, ottenendo così, a seconda della connessione analizzata (e quindi dalla geometria), differenze più o meno marcate. Uno degli scopi dell'articolo è quindi quello di osservare la migliore risposta in termini di momento-rotazione tra le varie connessioni, e conseguentemente di valutare quale geometria sia la più consona per strutture di questo tipo.

Tra le varie connessioni proposte nell'articolo si è scelto di riprodurre attraverso ABA-QUS/Standard quella denominata D10-L190-H210, con l'obiettivo di rappresentare nella maniera più accurata possibile, sfruttando esclusivamente i dati reperibili dall'articolo, il grafico momento-rotazione sperimentale della connessione, per poter poi investigare sull'influenza del cambiamento di temperatura o sull'influenza della pretensione dei bulloni.

In questo capitolo verranno descritte ed analizzate dettagliatamente tutte le procedure atte alla realizzazione di tale modello. La connessione è composta dalle seguenti parti: una trave, una colonna, due irrigidimenti per la trave ed altrettanti per la colonna, una piastra terminale, otto viti, ed otto autobloccanti. Con lo scopo di ridurre l'onere computazionale è stata sfruttata la simmetria lungo un asse (asse X), ed è stato riprodotto sul codice soltanto metà modello.

5.1 Modulo "Part" e creazione delle parti

Come accennato in precedenza, il modulo *Part* consente di riprodurre o di importare parti di una qualunque geometria: piana o tridimensionale. Le parti create in totale sono otto e sono tutte state riprodotte direttamente sul software grazie all'ottima interfaccia CAD disponibile. Ognuna delle parti è tridimensionale ed è costituita da elementi solidi. Nelle figure sottostanti vengono riportate le misure veritiere ricavate dall'articolo (espresse in millimetri) e la visualizzazione tridimensionale delle varie parti.

5.1.1 Beam

Il primo elemento creato è stata la trave, di tipo *derormabile*. La lunghezza effettiva della trave è pari a 1472 mm. Attraverso l'operazione *Partition* sono state separate le due flange dall'anima, questo per facilitare il processo di meshatura della trave.



Figura 5.1: Misure sezione trave



Figura 5.2: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Beam"



Figura 5.3: Misure sezione irrigidimento-trave



Figura 5.4: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Beam stiffner"

5.1.2 Beam stiffner

Successivamente alla trave è stato generato l'irrigidimento per la trave stessa; anch'esso elemento *deformabile*, di spessore pari a 5 mm e anch'esso partizionato i due sottoparti.

5.1.3 Block

Come terzo elemento è stato creato l'autobloccante tipo: elemento *deformabile* e partizionato in quattro sottoparti uguali. Possiede uno spessore pari a 48,7 mm ed il foro centrale ha diametro pari a 15 mm.

5.1.4 Column

Successivamente è stata generata la colonna, anch'essa di tipo deformabile e partizionata esattamente come la trave. Su una flangia sono stati creati quattro fori di diametro pari a 17 mm grazie al comando Cut identicamente ai quattro fori che verranno generati in seguito sulla piastra terminale siccome i due elementi verranno successivamente sovrapposti. L'altezza della colonna è pari a 1700 mm.



Figura 5.5: Misure sezione autobloccante



Figura 5.6: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Block"



Figura 5.7: Misure sezione colonna



Figura 5.8: Creazione dei fori



Figura 5.9: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Column"

5.1.5 Column stiffner

Il quinto elemento deformabilecreato è l'irrigidimento della colonna che possiede una larghezza di 159 millimetri.



Figura 5.10: Misure sezione irrigidimento-colonna



Figura 5.11: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Column stiffner"

5.1.6 End-plate

L'elemento successivo generato è la piastra terminale, di tipo deformabile e di spessore pari a 24.7 millimetri. Questo elemento possiede quattro fori di diametro pari a 17 mm.

5.1.7 SMA bolt

E' stato creato poi l'elemento chiave del modello, ossia la vite SMA. Anch'egli deformabile, è stato generato attraverso una rivoluzione della geometria di 360°. La vite è stata partizionata tre volte, le prime due che dividono la testa dal gambo, sono state create (come nei casi precedenti) per facilitare l'operazione di meshatura; mentre la terza, a metà del gambo, per facilitare l'applicazione della *Bolt load* che tratteremo in seguito.

5.1.8 Part-8

L'ottavo ed ultimo elemento generato è la Part-8. Unico di tipo analytical rigid. Suddetta parte verrà posizionata all'estremità della trave come corpo rigido. Al centro della Part-8 è stato creato un reference point (RP) dove sarà assegnato lo spostamento. Tale elemento è largo 5 mm e spesso 150 mm.



Figura 5.12: Misure sezione piastra terminale



Figura 5.13: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "End-plate"



Figura 5.14: Misure sezione vite SMA



Figura 5.15: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "SMA bolt"







Figura 5.17: Visualizzazione tridimensionale dell'elemento "Part-8"

5.2 Modulo "Property": definizione dei materiali e creazione delle sezioni

Il modello che stiamo trattando sarà costituito da quattro diversi materiali che saranno definiti ed assgnati alle varie parti in questo modulo: tre diverse tipologie di acciaio ed il materiale a memoria di forma. I parametri, ottenuti dall'articolo ed inseriti nei modelli costitutivi dei materiali, sono stati ricavati da prove sperimentali effettuate su spezzoni di materiale in eccedenza.

5.2.1 Definizione dell'acciaio

Legame elasto-plastico

Si percorra la storia tensione-deformazione OABCDE.



Figura 5.18: Legame elasto-plastico acciaio

- 1. fino al punto A (ossia fino a quando non viene raggiunto lo sforzo $\sigma = \alpha_0$ di snervamento a trazione) il comportamento è elastico-lineare con $\sigma = E\varepsilon$;
- 2. quando la curva si inoltra sul tratto AB si generano deformazioni permanenti;
- 3. se si scarica dal punto B, solo parte della deformazione precedentemente prodotta viene recuperata;
- 4. al punto C (scarico completo), sarà presente una deformazione residua pari a $\varepsilon_B \sigma_{01}/E$, dove E indica la pendenza del tratto BC;
- 5. proseguendo lo scarico, il diagramma si mantiene rettilineo fino al punto D, raggiunto il quale iniziano a prodursi deformazioni permanenti di segno opposto alle precedenti. Il corrispondente livello di sforzo $\sigma = \sigma_{02}$ è in generale diverso dal valore $\sigma = -\sigma_0$ di snervamento a compressione per il materiale vergine. Un intervallo come BD può essere considerato elastico, nel senso che le variazioni di sforzo $\Delta\sigma$ al suo interno corrispondono a variazioni di deformazione $\Delta\varepsilon$ reversibili e legate a $\Delta\sigma$ attraverso la rigidezza E.

Una descrizione analitica del legame richiede che nella deformazione ε siano distinguibili i contributi elastico (e), e permanente o plastico (p):

$$\varepsilon = e + p \tag{5.1}$$

5

Nell'ipotesi che la pendenza allo scarico si mantenga invariata, si ha:

$$\sigma = Ee = E(\varepsilon - p) \tag{5.2}$$

Se σ viene rimosso, la deformazione elastica viene interamente recuperata, mentre p permane.

La natura irreversibile delle deformazioni plastiche esige che il legame costitutivo dipenda dalla storia di carico e sia quindi formulato in termini incrementali.

Gli incrementi di sforzo e di deformazione sono rispettivamente indicati con $\dot{\sigma}$ e $\dot{\varepsilon}$.

Il comportamento elasto-plastico è indipendente dal tempo, che gioca solo il ruolo di variabile ordinatrice; la velocità con cui si verifica il processo di carico non ha importanza reale, anche se non deve essere tale da indurre fenomeni dinamici.

Occorre distinguere tra due situazioni:



Figura 5.19: Legame elasto-plastico acciaio e modulo tangente

- 1. se il processo incrementale ha inizio da un punto interno all'intervallo elastico istantaneo (ad esempio, da un punto sul segmento BD, con esclusione degli estremi), la risposta incrementale è puramente elastica: $\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}$;
- 2. a partire da uno degli estremi dell'intervallo, invece, nel processo incrementale possono prodursi deformazioni plastiche *p*, a trazione o compressione, e la risposta è diversa a seconda che queste effettivamente si producano o che si abbia scarico.

A partire dal punto B valgono le seguenti alternative:

•
$$\dot{\sigma} = E_t \dot{\varepsilon}$$
 se $\dot{\varepsilon} > 0$

• $\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}$ se $\dot{\varepsilon} < 0$

La curva uniassiale permette di distinguere cinque distinti casi:

a) $E_t > 0$ (incrudimento). Valgono le alternative:

$$\begin{aligned} &-\dot{\varepsilon} \ge 0 \to \dot{\sigma} = E_t \dot{\varepsilon} \\ &-\dot{\varepsilon} \le 0 \to \dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon} \\ &-\dot{\sigma} \ge 0 \to \dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E_t \\ &-\dot{\sigma} \le 0 \to \dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / E \end{aligned}$$

I legami diretto ed inverso sono entrambi univocamente definiti.



Figura 5.20: Incrudimento

- b) $E_t = 0$ (plasticità perfetta).
 - $\begin{aligned} &-\dot{\varepsilon} > 0 \to \dot{\sigma} = 0 \\ &-\dot{\varepsilon} \le 0 \to \dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon} \end{aligned}$

Il legame diretto è quindi univocamente definito, mentre così non è per il legame inverso. Risulta infatti: $\dot{\sigma} > 0$ non ammissibile; $\dot{\sigma} = 0 \rightarrow \dot{\varepsilon} \ge 0$ qualunque; $\dot{\sigma} < 0 \rightarrow \dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}/E$

c) $0 > E_t > -\infty$ (incrudimento negativo o *softening*).

Il legame diretto è univocamente definito, mentre non è definto il legame inverso.

d) ed e) (softening critico o sub-critico).

Configurano situazioni in cui la curva tensione-deformazione cade verticalmente o più che verticalmente.

Nell'ambito dell'ipotesi di piccoli spostamenti le deformazioni elastiche e plastiche contribuiscono additivamente alla deformazione totale:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + p_{ij} \tag{5.3}$$



Figura 5.21: Plasticità perfetta



Figura 5.22: Incrudimento negativo o softening



Figura 5.23: Softening critico (d) e sub-critico (e).



Figura 5.24: Dominio elastico istantaneo

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} e_{kl} \tag{5.4}$$

dove D_{ijkl} è un tensore elastico definito. In termini incrementali si ha:

$$\dot{\tau}_{ij} = D_{ijkl} (\dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{p}_{kl}) \tag{5.5}$$

La formulazione analitica del legame richiede che vengano definiti:

- un *dominio elastico istantaneo*, che identifichi gli stati di sforzo che corrispondono a situazioni potenzialmente plasticizzabili;
- una legge di scorrimento, che goveni gli incrementi di deformazione plastica.

Il dominio elastico istantaneo viene definito imponendo che una o più *funzioni di plasticità* siano non-positive.

$$\varphi_{\alpha}(\sigma_{ij}, X) = 0 \tag{5.6}$$

con $\alpha=1,...,Y$ e X sono quantità che controllano le modifiche nel dominio elastico indotte dalla plasticizzazione.

Il legame detto associato ipotizza che a ogni istante le funzioni φ_{α} definiscano un dominio convesso nello spazio delle componenti di sforzo.

Legge di scorrimento:

$$\dot{p}_{ij} = \sum_{\alpha=1}^{Y} \frac{\delta \varphi_{\alpha}}{\delta \sigma_{ij}} \dot{\lambda}_{\alpha} \tag{5.7}$$

Se $\varphi_{\alpha} < 0$ il punto rappresentativo dello stato di sforzo si trova all'interno del dominio elastico istantaneo e $\dot{\lambda}_{\alpha} = 0$: la risposta incrementale è puramente elastica.

Deformazioni plastiche si possono produrre $\lambda_{\alpha} > 0$ solo se il punto si trova sulla frontiera del dominio $\varphi_{\alpha} = 0$ e si mantiene su di essa nel processo incrementale $\varphi_{\alpha} = 0$ [23].

Tipologie di incrudimento ed "Effetto Bauschinger"

Principalmente vengono definite due tipologie di incrudimento:

- *incrudimento isotropo*: ossia, un'espansione omotetica della superficie di snervamento in tutte le direzioni;
- *incrudimento cinematico*: ossia, una traslazione della superficie di snervamento parallelamente a se stessa [24].



Figura 5.25: Incrudimento isotropo



Figura 5.26: Incrudimento cinematico

Nel modello considerato in questo lavoro di tesi è stato implementato un incrudimento di tipo cinematico, così da tenere in cosiderazione il fenomeno dell' *effetto Bauschinger*.

Il confine tra la fase elastica e quella plastica è segnato da un valore di tensione di snervamento a trazione $f_y(t)$, ed uno a compressione $f_y(c)$; supponendo di sottoporre un corpo ad uno stato di sforzo di trazione $f'_y(t)$ superiore a questo valore, dal momento in cui il materiale è soggetto a scarico, e successivamente ad una sollecitazione di compressione, la nuova tensione di snervamento a compressione avrà un valore inferiore a $f_y(c)$. Questo fenomeno è giust'appunto l'effetto Bauschinger, che si verifica a causa della traslazione della superficie di plasticizzazione (incrudimento cinematico), verso un punto rappresentativo dello stato di sollecitazione di trazione. Un procedimento analogo si verifica anche invertendo l'ordine di applicazione degli sforzi [25].



Figura 5.27: Effetto Bauschinger

"Nominal parameters" e "True parameters"

I valori dei parametri per le varie parti del modello, calcolati sperimentalmente e riportati nell'articolo, sono trascritti nella tabella sottostante:

Material	Modulus of	Yield strength	Ultimate	Fracture
	elasticity (GPa)	(MPa)	Strength (MPa)	strain
Steel 1	210.1	287.5	452.9	28.3%
Steel 2	205.6	377.5	531.2	24.9%
Steel 3	193.3	306.1	487.4	26.0%

Tabella 5.1: Parametri di alcune parti del modello derivanti da prove sperimentali

Esiste però una differenza tra i valori ricavati sperimentalmente (chiamati *nominal parameters*), ed i valori da inserire all'interno del software ABAQUS/Standard (chiamati *true parameters*). Per effetturare la conversione da *nominal* a *true* parameters sono state utilizzate le formule note in letteratura, riportate di seguito:

• per convertire il *nominal stress* nel *true stress*:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \tag{5.8}$$

• per convertire il *nominal strain* nel *nominal strain*:

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \tag{5.9}$$

• infine, per convertire il *true strain* nel *true plastic strain*:

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \tag{5.10}$$

Material	Yield stress	Plastic	Ultimate	Plastic
	(MPa)	strain	stress(MPa)	strain
Steel 1	287.89	0	581.07	0.2464
Steel 2	378.19	0	663.47	0.2191
Steel 3	306.59	0	614.12	0.2279

I parametri nominali sono stati così tradotti nei parametri reali che sono stati inseriti all'interno del codice per definire la plasticità degli acciai (Tabella 5.2) [26].

Tabella 5.2: "True" parameters, inseriti nel codice

Per quanto rigurarda la definizione del ramo elastico, il modulo di Young è riportato in Tabella 5.1, mentre il modulo di Poisson è stato adottato per ogni tipo di acciaio pari a 0.33.

5.2.2 Definizione delle leghe a memoria di forma

I modelli costitutivi

Come riportato da Virgilli [13], le leghe a memoria di forma, scoperte negli anni trenta, hanno visto la nascita di modelli costitutivi che le potessero rappresentare anche dal punto di vista matematico, soltanto a partire dagli anni '80. E', infatti, in questi anni che inizia una vera ricerca intorno ad esse, sia per quanto rigurda la caratterizzazione delle loro proprietà, sia, appunto, per quanto riguarda la ricerca di modelli costitutivi. Ciò che determina un buon modello matematico è la capacità di descrivere il comportamento di tali leghe; in particolare: la distinzione tra fase martensitica e fase austenitica, la quale permette di descrivere l'effetto superelastico; la distinzione tra martensite twinned o detwinned, che permette di tenere in conto dell'effetto a memoria di forma; infine, l'influenza della velocità di carico e della velocità di deformazione, in quanto indispensabili nel determinare i parametri fisici del materiale e la curva d'isteresi. Trattandosi, comunque, di materiali che presentano un comportamento ed una struttura piuttosto complessi, nessun modello è in grado di descrivere tutte queste proprietà contemporaneamente. All'interno del vasto campo in cui si possono raggruppare tutti i modelli costitutivi, sono state fatte diverse distinzioni, tra cui la più utilizzata e menzionata, considera modelli micro, meso e marcoscopici. I modelli microscopici utilizzano gli effetti delle trasformazioni di fase in scala microscopica mediante la costruzione di relazioni elastiche, termiche e chimiche per quantificare le deformazioni locali e le modalità di trasformazione. Tali relazioni locali sono poi omogeneizzate o generalizzate mediante operazioni di media con lo scopo di derivarne un modello macroscopico tale da essere utilizzato ai fini pratici.

Le relazioni più utilizzate nella derivazione dei modelli microscopici sono:

- funzioni dell'energia libera (mediante le quali viene riscritto il secondo principio della termodinamica);
- relazioni descrittive degli effetti che hanno luogo a livelli delle microscale (enucleazione, moto tra i grani);
- legge cinematica dell'interfaccia basata sulla teoria dell'attivazione termica.

Tali modelli risultano poco utilizzabili dal punto di vista ingegneristico a causa della loro estrema complessità, nonostante forniscano importanti informazioni sulla natura del materiale e sull'influenza che il comportamento nelle microscale dell'energia esercita sui parametri del modello e sulle caratteristiche fisiche del materiale. I modelli mesoscopici studiano il comportamento delle leghe a memoria di forma con riferimento ad una scala intermedia tra la microscopica e la macroscopica. Utilizzano, generalmente, elementi tipici dei modelli microscopici (come, ad esempio, i piani ed i bordi tra i grani,

nonchè le varianti martensitiche, ecc..), in combinazione con vari tipi di omogeneizzazioni e medie, al fine di ricavare relazioni costitutive macroscopiche. Ciò che differenzia i modelli presenti in letteratura sono il calcolo dell'energia di interazione e la transizione dal caso monocristallino al policristallino. Infine, i modelli macroscopici si basano sull'ipotesi che qualsiasi punto del materiale è costituito da una miscela di più fasi, e non da un'unica fase distinta ed identificabile. Tali modelli si possono fondare sui principi termodinamici di irreversibilità così come su presupposti puramente fenomenologici e sono generalmente uni-direzionali, con una struttura relativamente semplice. Proprio per questa loro semplicità ed affidabilità, unita alla facilità con cui è possibile reperirne i parametri, sono i più utilizzati nelle applicazioni ingegneristiche. Le differenze principali tra i vari modelli appartenenti a questo gruppo riguardano la scelta delle variabili interne utilizzate, delle relazioni energetiche e delle equazioni di stato considerate, nonchè il modo in cui vengono utilizzati il principio di conservazione dell'energia (primo principio della termodinamica), il bilancio dell'entropia ed il secondo principio della termodinamica).

A questo proposito tali modelli si possono suddividere in:

- modelli che legano le trasformazioni dal punto di vista termodinamico basandosi sull'energia libera;
- modelli basati su tecniche di *fitting* dei dati sperimentali, ossia che cercano di ricostruire la curva di carico a partire dai dati;
- combinazioni dei primi due.

Modello costitutivo Auricchio-Taylor per la superelasticità

Nel 1995 una nuova famiglia di modelli anelastici basati sul concetto di *plasticità generalizzata*, è stata sviluppata da Auricchio e Lubliner. Questa teoria basata su variabili interne e su alcuni assiomi fondamentali, include la plasticità convenzionale come un caso speciale. Questa generalità rende il modello uno strumento adeguato per rappresentare materiali costitutivi con un comportamento complesso. Il lavoro presentato da Lubliner ed Auricchio rappresenta un tentativo di applicare la teoria generalizzata alla risposta di una SMA.

Auricchio et al. Ha quindi proposto un modello tridimensionale del comportamento superelastico delle SMA nel regime di piccole deformazioni; successivamente è stata proposta un'estensione al caso appena citato: il modello tridimensionale è sempre in grado di ricavare la variabile PE ma in un regime di grandi deformazioni. Tale modello rappresenta la base della "ABAQUS user subroutine" per la definizione di materiali a memoria di forma nelle simulazioni di ABAQUS.

Questo lavoro sull'effetto superelastico isotermico è basato sulla decomposizione del gradiente della deformazione nella forma:

$$F = F^e F^{tr} \tag{5.11}$$

dove F^e rappresenta la parte elastica del gradiente della deformazione, ed F^{tr} una vabiabile interna relativa alle trasformazioni di fase. Un'altra assunzione riguarda il parametro scalare ξ , che rappresenta la martensite a singola variante, siccome nel modello non c'è la distinzione delle diverse varianti in cui la martensite si può manifestare. Nel modello vengono considerate tre trasformazioni di fase: la conversione di austenite in martensite a singola variante $(A \Rightarrow S)$, la trasformazione inversa $(S \Rightarrow A)$, ed il riorientamento della martensite a singola variante $(S \Rightarrow S)$. Il modello considera la risposta tridimensionale utilizzando una superficie di tipo *Drucker-Prager* per modellare la dipendenza dalla pressione nella fasi che si presentano in questi matriali [27] [28].

ABAQUS MODEL TIME-CONTINOUS FRAMEWORK

Variabili esterne: ε, T

dove ε è la deformazione totale e T la temperatura.

Variabili interne: ε^t, ξ

dove ε^t è il tensore di trasformazione della deformazione.

Equazioni costitutive:

 $\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon^{el} + \Delta \varepsilon^{tr}$

$$\Delta \varepsilon^{tr} = a \Delta \xi_S \frac{\delta F}{\delta \sigma}$$

$$F_s \le F \le F_s$$

dove ξ_S è la frazione di martensite e F la trasformazione potenziale.

L'intensità della trasformazione segue la legge di stress potenziale:

$$\Delta \xi_S = f(\sigma, \xi_S) \Delta F$$

La trasformazione potenziale segue la legge lineare di Drucker-Prager:

$$F = \bar{\sigma} - p \tan \beta + CT$$

dove p è la pressione, β e C parametri del materiale.

UMAT per materiali superelastici

Nella simulazione in ABAQUS è possibile tramite l'opzione User material, inserire le costanti per definire il materiale. La "User subroutine UMAT" è specifica per analisi effettuate tramite ABAQU-S/Standard, mentre la "User subroutine VMAT" per analisi con ABAQUS/Explicit; come già detto tutta la simulazione in questo lavoro è stata effettuata con ABAQUS/Standard. La formulazione uti-lizza 24 variabili di stato (SDVs), numero specificabile attraverso l'opzione Depvar. Con l'utilizzo di ABAQUS/Standard devono essere inserite 15 costanti (enunciate in Tabella 5.3) tramite l'opzione User material. Il nome del materiale non può essere casuale, ma è ben specifico, ed è connesso al tipo di elementi utilizzati nella simulazione. Nella simulazione trattata, l'utilizzo di elementi tridimensionali solidi implica il nome specifico: $ABQ_SUPER_ELASTIC$ [29].

Test uniassiale

In questo paragrafo viene riportato un semplice test di trazione-compressione uniassiale effettuato su un cubo di lato pari a 1 millimetro, per verificare che i parametri del modello, ricavati dall'articolo riproducano a tutti gli effetti la curva tensione-deformazione riportata nell'articolo stesso. Tale cubo è stato vincolato tramite le condizioni di simmetria correlate ad un test uniassiale nello step iniziale;



Figura 5.28: Parametri di riferimento per il modello superelastico Auricchio-Taylor

INPUT	Significato	Valore
E_A	Austenite elasticity	50000 [MPa]
ν_A	Austenite Poisson's Ratio	0.33
E_M	Martensite elasticity	45000 [MPa]
ν_M	Martensite Poisson's Ratio	0.33
ε^L	Transformation strain	0.05
$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})_L$	$(\delta\sigma/\delta T)$ loading	6.7
σ_L^S	Start of transformation loading	380 [MPa]
σ_L^E	End of transformation loading	490 [MPa]
T_0	Reference Temperature	22 [°C]
$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})_U$	$(\delta\sigma/\delta T)$ unloading	6.7
σ_U^S	Start of transformation unloading	220 [MPa]
σ^E_U	End of transformation unloading	120 [MPa]
σ_{CL}^S	Start of transformation stress	
	during loading in compression	0
ε_V^L	Volumetric transformation strain	0.05
NA	Number of annealings to be performed	
	during the analysis	0

Tabella 5.3: Significato e valore dei parametri per la definizione del materiale a memoria di forma

dopodichè nello step successivo della durata di 1 secondo, è stato applicato uno spostamento di 0.06 mm sulla faccia non vincolata del cubo in direzione Z. Allo spostamento è stata assegnata una legge di carico capace di portare il cubo in trazione nella prima metà dell'analisi (T=0.25 sec, fattore di amplificazione = 1), ed in compressione nella seconda metà (T=0.75 sec, fattore di amplificazione = -1). E' stato definito un campo di temperatura agente su tutto il cubo pari a 22°C. In conclusione il cubo è stato suddiviso nella meshatura in 100 elementi "brick" a 8 nodi con integrazione ridotta codificati C3D8R.

Il risultato del semplice test uniassiale viene mostrato nel grafico tensione-deformazione; oltre a distinguere chiaramente la classica forma a "bandiera" tipica dellle leghe a memoria di forma, possiamo notare che i due grafici, quello riportato nell'articolo e quello ottenuto dal test uniassiale, combaciano perfettamente (Figura 5.30).



Figura 5.29: Prova uniassiale su un cubo SMA



Figura 5.30: Confronto tra il grafico tensione-deformazione riportato dall'articolo e quello ricavato dal test uniassiale

5.2.3 Sezioni

Dopo aver definito i materiali di cui sarà composta la connessione in esame, attraverso il comando *Section* sono state definite le sezioni. Nel nostro caso sono state create quattro sezioni di tipo *solid*, *homogeneous*, una per ogni tipo di materiale, ed in particolare:

- Section-1 \mapsto Steel 1
- Section- $2 \mapsto Steel \ 2$
- Section- $3 \mapsto$ Steel 3
- Section-4 $\mapsto ABQ_SUPER_ELASTIC$

Compiuta questa semplice operazione non rimane altro da fare che assegnare ad ognuna delle parti che abbiamo generato in precedenza, la corrispettiva sezione a cui è assegnato il corrispettivo materiale. Quando una sezione viene assegnata, la parte si colora di verde acqua. Le varie parti deformabili con le diverse sezioni assegnate sono elencate in Tabella 5.4; mentre alla Part-8, definita come corpo *Analytical rigid*, non è stata chiaramente assegnata alcuna sezione.

Part	Section	Material
Beam	Section-1	Steel 1
Beam stiffners	Section-1	Steel 1
Block	Section-1	Steel 1
Column	Section-3	Steel 3
Column stiffners	Section-3	Steel 3
End-Plate	Section-2	Steel 2
SMA bolt	Section-4	ABQ_SUPER_ELASTIC

Tabella 5.4: Elenco delle sezioni assegnate alle varie parti del modello



Figura 5.31: Esempio di "Section Assignments"

5.3 Modulo "Assembly" e assemblaggio del modello

In questa sezione vedremo finalmente il nostro modello prendere forma; in questo modulo infatti vengono assemblate con precisione tutte le parti finora generate con un sistema di riferimento proprio, fino alla costituzione finale del modello, generato con un sistema di riferimento globale. Attraverso l'opzione *Instance* si ha inoltre la possibilità di duplicare una parte e di inserirla più volte all'interno del modello: tale comando è stato ampiamente sfruttato per ricreare ben otto volte la parte "Block", quattro volte la parte "SMA bolt", nonchè due volte gli irrigidimenti della trave e della colonna.

La sezione sul quale è utile porre più attenzione è quella riguardante il posizionamento delle parti; infatti, quando una parte viene inserita, viene automaticamente posizionata al centro del sistema di riferimento globale (di coordinate 0, 0, 0). Esistono in ABAQUS CAE diverse metodologie per posizionare una parte a proprio piacimento: una prima è costituita dai comandi *Translate Instance* e *Rotate Instance* che permettono di traslare o ruotare la parte lungo il sistema di riferimento globale, inserendo direttamente le coordinate delle tre direzioni o l'angolo di rotazione, una seconda metodologia consiste nell'utilizzare particolari *Constraint*, tra cui: *Parallel face, Face to face, Parallel edge, Edge to edge, Coaxial, Coincident point* e *Parallel csys.* Tali vincoli permettono un assemblaggio più rapido e sfruttano gli assi o le superfici a contatto tra le parti. L'opzione utilizzata maggiormente nel caso in esame è stata quella del *Coincident point* che ha permesso attraverso un punto di coincidenza, la costruzione rapida del modello. In seguito vengono riportate due immagini: la prima (Figura 5.32) mostra il posizionamento della trave all'interno del modello attraverso il comando *Coincident point*; la seconda (Figura 5.33) mostra il modello completo di ogni sua parte.



Figura 5.32: Una fase dell'assemblaggio mediante il comando Coincident point



Figura 5.33: Modello assemblato

5.4 Modulo "Step" e definizione degli Output

Per il caso studiato sono stati definiti tre diversi step:

- ▼ *Initial*: si tratta dello step iniziale, già predefinito dal programma;
- ▼ *Prestress*: questo step è stato appositamente creato per l'applicazione di una pretensione nelle viti, che approfondiremo nelle successive sezioni; ha la durata totale di 1 secondo, ed incrementi variabili definiti automaticamente dal programma.
- ▼ *ApplyDisp*: in quest'ultimo step viene sviluppata tutta la storia di spostamento imposto successivamente all'estremità della trave; ha una durata di venti secondi, nel quale lo spostamento assegnato alternerà valori positivi a valori negativi sempre più crescenti fino ad estinguersi completamente al termine dei 20 secondi. La funzione *Nlgeom* è attivata, gli incrementi sono di 0.01 secondi e possono essere al massimo 100000.

Dopo la definizione degli step, vengono automaticamente scelte dal software alcune variabili da ottenere in uscita nel file di output: per quanto riguarda gli *History Output Requests* vengono accettate le variabili di default del programma. Per quanto concerne invece i *Field Output Requests*, vengono selezionate le seguenti variabili, dopo aver specificato di voler ottenere i valori in ogni nodo del modello e per ogni incremento temporale:

- S (Stress components and invariants);
- PE (*Plastic strain components*);
- PEEQ (Equivalent Plastic Strain);
- LE (Logarithmic Strain Components);

- U (Traslation and Rotations);
- UR (Rotations);
- RF (Reaction Forces and Moments);
- CF (Concentrated Forces and Moments);
- CSTRESS (Conctat Stresses);
- CDISP (Conctat Displacements).

Come già detto in precedenza, occorre prestare particolare attenzione nel selezionare le variabili, per evitare un'inutile appesantimento dell'analisi.

5.5 Modulo "Interactions": definizione del contatto e dei vincoli interni

Questa modulo, risulta essere tra tutti, il più delicato: verranno infatti determinate le iterazioni di contatto tra le diverse parti e definiti i *constraints* per simulare l'effetto della saldatura tra di esse; operazioni delicate in quanto possono essere fonte di diversi errori che possono compromettere il completamento del processo di analisi. Le operazioni che sono state eseguite sono state brevemente indicate nell'articolo di riferimento.

Attraverso l'opzione Interactions properties è stata definita l'interazione Hard Conctat, Surface to surface senza penetrazione in direzione normale per tutte le superfici di contatto. E' stato utilizzato un modello d'attrito di Coulomb Penalty con coefficiente pari a 0.2 che corrisponde al fattore di slittamento di classe D per acciai non trattati a caldo. Infine, attraverso il comando Constraints, sono state impiegate le iterazioni Tie con Specify Distance pari a 0.1 per simulare tutte le saldature d'angolo. Tutte queste operazioni vengono mostrate nelle Figure $5.34 \div 5.46$. Le superfici colorate di rosso sono le cosiddette Superfici Master, mentre quelle colorate di viola sono le Superfici Slave.

Nella tabella sottostante vengono riportate le tipologie di interazione e le varie parti soggette ad esse.

Tipo Interaction	Parti tra cui avviene l'interazione
Contact	End-plate e Block
Contact	Column e Block
Contact	Column e End-plate
Constraint Tie	Column e Column-Stiffners
Constraint Tie	Beam e Beam-Stiffners
Constraint Tie	End-plate e Beam
Constraint Tie	Block e SMA-Bolts
Constraint Tie	Beam e Part-8

Tabella 5.5: Tipo di interazione e parti a cui è stata assegnata



Figura 5.34: Interazione di contatto End-plate - Block



Figura 5.35: Interazione di contatto Column - Block



Figura 5.36: Interazione di contatto End-plate - Column



Figura 5.37: Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (1)



Figura 5.38: Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (2)



Figura 5.39: Interazione Constraints tie tra Column e Column-stiffner (3)



Figura 5.40: Interazione Constraint tie tra Beam e Beam-stiffner $\left(1\right)$



Figura 5.41: Interazione Constraints tie tra Beam e Beam-stiffner (2)



Figura 5.42: Interazione Constraints tie tra Beam e End-plate



Figura 5.43: Interazione Constraint tie tra Blocks e SMA-bolts (1)



Figura 5.44: Interazione Constraints tie tra Blocks e SMA-bolts (2)



Figura 5.45: Interazione Constraints tie tra Beam e Part-8

5.6 Modulo "Load": definizione dell'amplitude, dei carichi e delle condizioni al contorno

5.6.1 Definizione dei carichi

I carichi definiti nell'analisi considerata sono di due differenti tipologie:

- Bolt load, per la pre-trazione dei bulloni SMA
- Displacement, per l'applicazione dello spostamento all'estremità della trave.

Nello step denominato *Prestress*, i quattro bulloni sono stati tutti pre-tesi attraverso l'applicazione di una *Bolt load* inserita nella sezione interna con un valore di *magnitude* pari al 65% della tensione di snervamento dei bulloni stessi (come descritto nell'articolo), questo per migliorare la capacità di ricentraggio e per garantire una rigidezza iniziale della connessione sufficiente. Il valore di trazione che ne è scaturito è pari a 19000 N, ossia 19 KN (Figura 5.46).



Figura 5.46: Applicazione Bolt load

Chiaramente, la lunghezza dei bulloni deformati al termine dello step *Prestress* è stata fissata tramite l'opzione *Fix at current length* nello step successivo *ApplyDisp*.

A questo punto possiamo definire nello step ApplyDisp, attraverso l'opzione BCs, lo spostamento verticale all'estremità della trave; per poterlo applicare facilmente è necessario definire al centro della Part-8 un punto di riferimento o $Reference \ point$. Il valore imposto a tale spostamento è di 15 millimetri che verrà modificato durante l'analisi in funzione di una legge temporale che verrà definita nel paragrafo seguente.

5.6.2 Amplitude

Viene ora definita, attraverso il comando Amplitude, una legge temporale che modificherà il valore dello spostamento applicato all'estremità della trave per tutta la durata dello step ApplyDisp. In funzione di tale legge il valore massimo di spostamento imposto alla trave sarà pari a $\pm 60mm$.



Figura 5.47: Legge temporale applicata allo spostamento, Amplitude



Figura 5.48: Definizione dello spostamento all'estremità della trave
5.6.3 Condizioni al contorno

Vengono infine definite le condizioni al contorno attraverso l'opzione BCs:

- $\star\ Column_Top$, definita nello step iniziale, di tipo ENCASTRE, che vincola tramite incastro la parte superiore della colonna, impendendo traslazioni e rotazioni in ogni direzione spaziale.
- \star $Column_Bottom,$ è identica alla condizione sovrastante, l'unica differenza è che ad essere vincolata è la parte inferiore della colonna.
- ★ Symmetry, anch'essa è definita nello step iniziale, di tipo XSYMM. Definendo tale condizione è stato possibile sfruttare la simmetria lungo l'asse X, ed analizzare soltanto metà modello, in modo da ridurre l'onere computazionale.



Figura 5.49: Incastro della colonna: $Column_Top$ e $Column_Bottom$



Figura 5.50: Vincolo di simmetria: Symmetry

5.7 Modulo "Mesh": meshatura delle varie parti

La meshatura di tutte le parti (esclusa la Part-8 che, data la sua natura, risulta non meshabile) è stata effettuata tramite il comando *Seed.*

Per alcune componenti del modello come la trave, gli autobloccanti, gli irrigidimenti e la parte della colonna senza fori è stata utilizzata una meshatura strutturata; gli elementi che sono stati implementati in queste parti sono elementi *brick* a 8 nodi, con integrazione ridotta e *hourglass control*, denominati all'interno del software ABAQUS, C3D8R. Per quanto concerne i bulloni SMA,la tecnica di meshatura utilizzata è stata la *sweep*; gli elementi C3D8R non sono compatibili con il modello costitutivo dei materiali superelastici, per questo motivo sono stati utilizzati gli elementi C3D8 senza integrazione ridotta. Per quanto riguarda infine la piastra terminale e la flangia della colonna soggetta ai fori è stata utilizzata una meshatura *free*; gli elementi utilizzati per queste due parti sono tetraedrici modificati a 10 nodi, denominati C3D10M.

Part	Element type	Elements number
Beam	Linear hexaedral of type C3D8R	259
Beam stiffners	Linear hexaedral of type C3D8R	30
Block	Linear hexaedral of type C3D8R	320
Column without hole	Linear hexaedral of type C3D8R	374
Column with hole	Quardatic tetrahedral of type C3D10M	4881
Column stiffners	Linear hexaedral of type C3D8R	50
End-Plate	Quadratic tetrahedral of type C3D10M	4362
SMA bolt	Linear hexaedral of type C3D8	1311

In seguito viene riportata una tabella indicante la parte meshata, il tipo di elementi utilizzati per essa, ed il numero di elementi in cui è stata suddivisa.

Tabella 5.6: Elenco del tipo e del numero di elementi assegnati alle varie parti durante l'operazione di meshatura

Risulta evidente che le parti fondamentali del modello quali bulloni, piastra terminale e flangia della colonna adiacente alla piastra terminale, hanno subito un processo di meshatura più raffinato: questo per migliorare il livello di accuratezza delle variabili che desideriamo ottenere una volta terminato il processo di analisi.

5.8 Modulo "Job" e lancio dell'analisi

Dopo aver ultimato le operazioni di meshatura, siamo pronti a passare all'ultimo modulo prima del lancio dell'analisi. Nel modulo *Job* non è necessario compiere alcuna procedura particolare se non quella di scegliere un nome per il file .ODB che troveremo in uscita. In questo modulo sono state accettate tutte le impostazioni predefinite. A questo punto, prima di lanciare l'analisi vera e propria, è utile compiere un'ultimissima verifica per accertarsi che tutte le operazioni precedenti siano state completate ed eseguite correttamente. Mediante l'opzione *Data check* il file di inpunt (INP) contenente tutti i dati necessari al processo di analisi è stato sottoposto ad una veloce operazione di controllo. La voce *"Completed Succesfully"* ci conferma che tutti i moduli sono stati completati e che quindi il modello è pronto per essere analizzato. A questo punto, attraverso il comando *Submit*, è stato avviato il processo di analisi e la voce *Running* è stata mostrata. E' possibile ora, tramite l'opzione *Monitor*, seguire iterazione dopo iterazione il processo di analisi.



Figura 5.51: Modello a meshatura completata

5.9 Modulo "Visualization" e rappresentazione dei risultati

Una volta terminata l'analisi con successo è possibile accedere attraverso il comando *Results*, al modulo di visualizzazione: è stato caricato il file .ODB generato dall'analisi e sono stati mostrati quindi i risultati richiesti. Attraverso l'interfaccia grafica è stata inizialmente mostrata la configurazione indeformata della struttura, dopodichè attraverso il menù a tendina posto nella barra degli strumenti è stato possibile scegliere e quindi visualizzare la variabile di nostro interesse.

Attraverso le funzioni XY data è possibile infine creare e gestire grafici tra le variabili ottenute.



Figura 5.52: Modulo $\it Visualization:$ configurazione indeformata



Figura 5.53: Modulo $\it Visualization:$ variabile U3 a 19.00 secondi

Capitolo 6

Output e risultati dell'analisi

I risultati ottenuti dagli autori dell'articolo in termini di momento-rotazione plastica vengono riportati in Figura 6.1 [1]. La linea nera rappresenta la curva sperimentale ottenuta dalla connessione realizzata in scala reale, mentre la linea rossa tratteggiata mostra la curva ricavata dall'analisi numerica agli elementi finiti effettuata mediante l'impiego del software ABAQUS/Standard.

Come citato in precedenza, l'utilizzo di elementi solidi tridimensionali HEX e TEX per la creazione del modello in ABAQUS/Standard, non consente l'output di qualsivoglia variabile; tra queste sono comprese anche le due variabili di nostro interesse: le rotazioni plastiche e le reazioni di momento in ogni nodo della mesh. Per questo motivo sono state adottate metodologie teoriche di comprovata efficacia per riuscire a ricavarle che verranno esplicate in seguito. Chiaramente, siccome si è interessati alla sezione soggetta alla massima sollecitazione di momento, andremo a calcolare le variabili sulla faccia interna della piastra terminale, evidenziata in rosso, in Figura 6.2.

6.1 Calcolo dei momenti

Siccome la variabile RM (*Reaction moment*) ad ogni istante ed in ogni nodo non viene fornita dal software, è stata adottata una strategia alternativa per poterla ricavare. Attraverso la sommatoria in ogni nodo delle reazioni vincolari verticali (RF3) nelle sezioni incastrate della colonna, è stato individuato il carico P corrispondente allo spostamento specifico imposto all'estremità della trave nel generico istante; dopodichè tale carico è stato moltiplicato per la lunghezza effettiva della trave, ovvero 1.472 metri, ed infine raddoppiato siccome l'analisi numerica è stata effettuata su metà modello. Chiaramente il valore del momento è direttamente proporzionale all'entità dello spostamento: maggiore è lo spostamento impresso all'estremità della trave, maggiore sarà la reazione di momento nell'estremità opposta della trave. Allo spostamento ±60 millimetri è stato riscontrato il valore massimo di momento $\approx \pm 35$ KNm.

Nelle figure sottostanti vengono riportati i grafici RF3-Time relativi rispettivamente alle sezioni incastrate della colonna "bottom" e "top", ed in ultimo, il grafico definitivo Moment-Time.

6.2 Calcolo delle rotazioni

Per quanto concerne il calcolo delle rotazioni plastiche andremo a considerare due distinti metodi: il primo, analitico, utilizzato anche dagli autori dell'articolo; ed il secondo, attraverso il software, utilizzato per verificare l'attendibilità dei risultati. I risultati ottenuti attraverso i due distinti metodi risultano pressochè identici.



Figura 6.1: Risultati sperimentali e numerici ottenuti da Yam e Fang



Figura 6.2: Sezione sulla quale sono state calcolate le variabili di interesse





Figura 6.3: Grafico Reaction force 3 - Time, nella sezione incastrata "bottom" della colonna

Figura 6.4: Grafico Reaction force 3 - Time , nella sezione incastrata "top" della colonna



Reaction Moment-Time

Figura 6.5: Grafico Reaction Moment-Time

6.2.1 Metodo analitico

Suddetto metodo, ricavato dall'articolo "Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts" [2], consente di ricavare le rotazioni plastiche della connessione attraverso la seguente formula analitica:

$$\theta_p = \frac{\Delta - P/K_e}{L} \tag{6.1}$$

dove:

- θ_p = rotazione plastica;
- $\Delta =$ spostamento verticale all'estremità della trave;
- P = carico applicato;
- K_e = rigidezza elastica della trave;
- L = lunghezza della trave.

Il termine K_e è stato ricavato dalla seguente formula analitica:

$$K_e = \frac{3EJ}{L^3} \tag{6.2}$$

dove:

- E = modulo di Young ricavato sperimentalmente in precedenza;
- J = momento d'inerzia della trave;
- L = lunghezza della trave.

6.2.2 Metodo numerico

Attraverso questa tecnica, calcoleremo nuovamente le rotazioni plastiche della connessione, ricavandole direttamente dal software, utilizzando una strategia appositamente studiata per ovviare ai problemi descritti in precedenza; in modo da verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti nella sezione sovrastante.

Come prima operazione, tornando nel modulo *Part*, è stato creato un *Reference point* nel baricentro della sezione della piastra terminale (Figura 6.2), secondariamente è stato creato un *Set*, per la sezione stessa chiamato "*Face*". A questo punto è stato creato un nuovo tipo di constraint nel modulo *Interactions*, chiamato *MPC constraint*. Tale vincolo, di tipo *beam*, consente di creare una trave rigida ideale che permette di vincolare le rotazioni dei diversi nodi del set al solo *Reference point*. Spuntando ora, la variabile UR nella sezione *Field output request*, per il singolo set "*Face*", il software riesce a calcolare la rotazione del *Reference Point* e quindi, di tutta la sezione.

Viene riportato in Figura 6.7 il grafico Plastic rotation-Time . Com'è possibile osservare, le massime rotazioni plastiche, pari a circa 0.04 radianti, vengono raggiunte in corrispondenza dei massimi valori di spostamento all'estremità della trave ($\pm 60mm$), rispettivamente al tempo di 18 secondi per il valore positivo e di 20 secondi per quello negativo.



Figura 6.6: MPC-beam-constraint, per il calcolo delle rotazioni



Plastic rotation-Time

Figura 6.7: Grafico Plastic Rotation-Time

6.3 Grafico Reaction Moment - Plastic Rotation

A questo punto, sovrapponendo i grafici relativi alla reazione di momento ed alla rotazione plastica è stato ottenuto il grafico Momento - Rotazione mostrato in Figura 6.8. In seguito verranno confrontati



Figura 6.8: Grafico Reaction Moment-Plastic Rotation

i risultati ottenuti dalla suddetta analisi con i risultati sperimentali e numerici ottenuti dagli autori dell'articolo.

Dal grafico in Figura 6.8 si può notare, oltre alla tipica forma a "bandiera" del grafico stesso, la perfetta simmetria rispetto all'origine, che evidenzia l'ininfluenza del segno applicato allo spostamento, relativamente al comportamento della connessione. Sono inoltre distinguibili i cinque cicli isteretici, dovuti agli altrettanti cicli di carico e scarico. Infine, le parti appuntite agli estremi della curva, indicano che i bulloni SMA iniziano a manifestare una completa trasformazione di stato in martensite detwinned, oltre σ_L^E .

In Figura 6.9 vengono mostrate tre differenti curve:

- $\bullet\,$ la curva azzurra, denominataRM-UR è la curva momento-rotazione numerica ottenuta in questo lavoro di tesi;
- $\bullet\,$ la curva verde, denominata NUM-ART è la curva momento-rotazione numerica ottenuta dagli autori dell'articolo;
- la curva rossa, denominata SPE-ART è la curva momento rotazione sperimentale ottenuta dagli autori.

Risulta evidente che le curve carico-scarico predette dai modelli FE non corrispondono perfettamente ai risultati ottenuti nel test sperimentale. Questa differenza è principalmente dettata dalla limitazione del modello costitutivo superelastico e dalla deviazione delle proprietà del materiale a memoria di forma. Le differenze riscontrate tra le due curve numeriche possono essere dettate da diversi fattori dovuti alla modellazione, come ad esempio: il numero di elementi utilizzato durante la meshatura di ciascuna delle parti, in numero di iterazioni relativo ad ogni step, i metodi con cui sono



Figura 6.9: Confronto tra le curve Momento-Rotazione

state ricavate le variabili non direttamente ottenibili dal software (momento e rotazione plastica); oppure l'assunzione di alcune misure o parametri omessi o non specificati nell'articolo di riferimento. Considerando infine la complessità elevata del problema, dovuta essenzialmente a non-linearità di materiali, non-linearità geometriche ed al problema del contatto, si può affermare che le risposte isteretiche generali sono simulate con buona precisione.

Capitolo 7

Influenza della temperatura e della pre-trazione dei bulloni

In questo capitolo finale verranno sviluppati due distini aspetti, non approfonditi nell'articolo di riferimento "Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys" [1]: l'influenza sulla connessione della temperatura e della pre-trazione dei bulloni SMA.

7.1 Influenza della temperatura

Come già detto in precedenza le leghe a memoria di forma sono strettamente connesse alla temperatura, in paticolare, il comportamento superelastico si manifesta esclusivamente nel range di temperature comprese tra $A_f \in M_d$. Al di sotto di A_f la deformazione residua non è stata ancora recuperata, oppure è stata reuperata solo parzialmente, mentre al di sopra di M_d il comportamento della lega strettamente elasto-plastico, comunemente agli acciai. Siccome lo studio del comportamento della connessione è stato effettuato ad una temperatura ambiente media di riferimento pari a 22°C, si è voluto ripetere la procedura di analisi ad una temperatura più elevata, pari a 40°C, tipica di estati torride, per mettere a confronto i risultati ottenuti e per osservare quanto questo sbalzo potesse incidere sul comportamento finale della connessione.

7.1.1 Test uniassiale a T=40°C

Il primo passo è stato quello di effettuare un test di trazione uniassiale su un cubetto di materiale SMA, esattemente come fatto in precedenza, utilizzando le stesse condizioni al contorno, gli stessi parametri del materiale e le stesse dimensioni. L'unica variabile di stato modificata è stata quella riguardante la temperatura esterna. Attraverso l'opzione *Predefined field* è stata quindi aumentata la temperatura, da 22°C a 40°C. Dopo il completamento dell'analisi, sono stati estrapolati dal software i dati relativi alla deformazione (ε) ed allo stress (σ). A questo punto è stato confrontato il comportamento della lega, sovrapponendo i due grafici $\sigma - \varepsilon$ relativamente alle temperature di 22°C e di 40°C (Figura 7.1).

Come risulta evidente dal grafico l'unica differenza sostanziale evidenziata è la traslazione verso l'alto del ciclo di isteresi, dovuta ad un ramo elastico più sviluppato: il ciclo di isteresi si manifesta per valori maggiori di sforzo e deformazione.

7.1.2 Effetto sulla connessione

A questo punto, dopo aver osservato le differenze ottenute nel test uniassiale, è stata implementata allo stesso modo la temperatura di 40°C nell'analisi della connessione per valutare il comportamento della struttura a livello generale. Dopo aver estrapolato i momenti e le rotazioni con le rispettive



Figura 7.1: Confronto dei grafici $\sigma - \varepsilon$ della lega durante un test di trazione uniassiale alle temperature di 22°C e 40°C.

metodologie indicate in precedenza, è stato ricavato il grafico momento-rotazione plastica ed è stato sovrapposto a quello ottenuto dall'analisi della connessione a T=22°C in modo da poter osservare i cambiamenti ottenuti (Figura 7.2).

Come si evince dal grafico, la differenza più marcata tra le due curve è la traslazione verso l'alto dei cicli isteretici. Come nel caso del test uniassiale, questo fatto è dovuto ad un ramo elastico maggiormente sviluppato. Osservando attentamente le due curve, è possibile notare una discrepanza di ampiezza tra le isteresi dei vari cicli: come si può vedere, il primo ciclo di isteresi nella curva a 22°C non è evidente nella curva a 40°C; questa variazione di ampiezza si assottilia sempre più al crescere del numero di cicli, infatti, l'ampiezza del quinto ed ultimo ciclo isteretico risulta essere molto simile tra le due curve.

Tale difformità nei primi cicli isteretici si manifesta perchè nella curva riferita alla temperatura di 22°C la trasformazione di fase avviene prima e, conseguentemente, il contributo dissipativo è composto anche da una parte relativa alla trasformazione stessa. Nella curva relativa alla temperatura di 40°C, invece, il materiale rientra ancora in fase elastica, per questo motivo l'energia dissipata risulta inferiore.

In Figura 6.3 viene riportato il grafico plastic energy dissipation-time che mette in relazione l'energia dissipata mediante i cicli isteretici relativi alle trasformazioni di fase, e il tempo, per le due diverse temperature.

7.2 Influenza della pre-trazione dei bulloni

Come descritto nei capitoli precedenti, nell'analisi agli alementi finiti, così come nelle prove sperimentali in scala reale effettuate dagli autori dell'articolo, i bulloni sono stati tutti pretesi attraverso l'applicazione di un carico pari al 65% del carico di snervamento della lega a memoria di forma stessa. Come descritto nell'articolo, tale pre-trazione è stata impressa ai bulloni per garantire una rigidezza iniziale della connessione adeguata e per garantire un efficace meccanismo di ricentraggio. Non è stata però

 $\tilde{7}$



Figura 7.2: Confronto dei grafici RM - UR della connessione alle temperature di 22°C e 40°C.



Plastic energy dissipation

Figura 7.3: Confronto dei grafici Plastic Energy Dissipation-Time della connessione alle temperature di 22°C e 40°C.

evidenziata l'influenza che tale pre-tensione ha innanzitutto sui bulloni SMA e secondariamente sul comportamento dell'intera connessione; per questo motivo sono stati ricavati i grafici forza-spostamento dei bulloni ed i grafici momento-rotazione plastica della connessione attraverso altre quattro analisi, implementando quattro diversi valori di pre-trazione:

- pre-trazione di 1 KN;
- pre-trazione di 10 KN;
- pre-trazione di 35 KN;
- pre-trazione di 45 KN.

Ricordiamo che l'analisi principe è stata effettuata con una pre-tazione dei bulloni pari a 19 KN.

7.2.1 Metodo Free-body e grafico forza-spostamento nei bulloni

La prima operazione è stata quella di ricavare il grafico forza-spostamento dei bulloni della connessione originaria, ossia quella con un valore di pre-trazione impressa ai bulloni pari a 19 KN. Tale curva è stata ottenuta considerando il bullone all'estremo della connessione, soggetto quindi ad una maggiore deformazione. Siccome non risulta semplice estrapolare tali dati, nella sezione a metà del gambo del bullone è sato adoperato il metodo "Free-Body". Innanzitutto è utile attraverso il comando *Create Display Group*, visualizzare solamente i bulloni e rimuovere le restanti parti della connessione, dopodichè mediante l'opzione *View Cut* sezionare i vari bulloni per poter utilizzare efficamente la procedura descritta in seguito. Attraverso il *Free-Body Cut* è possibile visualizzare le forze ed i momenti risultanti trasmessi attraverso una determinata sezione del modello. Tale opzione però è disponibile solamente nel modulo *Visualization*, ed è possibile utilizzarla se nella lista delle variabili di uscita selezionate in *Field output requests* è presente anche la voce NFORC riguradante le forze nodali. Dopo aver definito la sezione del modello da dove ricavare le variabili, il software mostra due vettori che indicano la grandezza e la direzione delle risultanti di forza e momento dell'area selezionata. Per diversificare i due vettori, il software mostra la risultante delle forze con una sola punta, mentre la risultante dei momenti con due punte.

A questo punto attraverso il comando *Create XY Data: "Free Body"* è stato possibile estrapolare il grafico forza-tempo nella sezione del bullone considerata. L'operazione successiva è quella di ricavare, attraverso una procedura standard, la curva spostamento assiale-tempo di un punto a metà del gambo del bullone, per poter così sovrapporre i due grafici ed ottenere quello finale forza-spostamento assiale (Figura 7.5).

7.2.2 Pre-trazione decrementata

A questo punto sono state effettuate due analisi del tutto identiche a quella precedente, decrementando però il valore di pre-trazione dei bulloni: una prima volta a 10 KN ed una seconda volta a 1KN. Inizialmente sono stati ricavati mediante la tecnica descritta sopra, e riprodotti i grafici forza-spostamento assiale dei bulloni per essere confrontati con il precedente caso (Figura 7.6); infine sono stati nuovamente ottenuti i grafici momento-rotazione plastica per valutare il comportamento dell'intera struttura (Figura 7.7).

Risulta evidente che, paragonando le varie curve momento-rotazione plastica, la diminuzione della pre-trazione nei bulloni si traduce in un decremento della rigidezza iniziale della connessione.



Figura 7.4: Tecnica del "Free Body" utile per il calcolo della risultante della forza nei bulloni



Figura 7.5: Grafico Forza-Spostamento assiale del bullone soggetto ad una pre-trazione di 19 KN.



Figura 7.6: Confronto tra le curve Forza-Spostamento assiale dei bulloni soggetti a una pre-trazione rispettivamente di 19 (originale), 10 e 1 KN.



Figura 7.7: Confronto tra le curve Momento-Rotazione plastica delle connessioni con i bulloni soggetti a una pretrazione rispettivamente di 19 (originale), 10 e 1 KN.



Figura 7.8: Confronto tra le curve Forza-Spostamento assiale dei bulloni soggetti a una pre-trazione rispettivamente di 19 (originale), 35 e 45 KN.

7.2.3 Pre-trazione incrementata

Per concludere sono state effettuate due ulteriori analisi, andando ad incrementare il valore della pretrazione dei bulloni rispetto al caso originale (di 19 KN), rispettivamente a 35 KN e 45 KN. Come sopra, inizialmente sono stati ricavati e riprodotti i grafici forza-spostamento assiale dei bulloni per essere confrontati con il caso principe (Figura 7.8); infine sono stati nuovamente ottenuti i grafici momento-rotazione plastica per valutare il comportamento dell'intera struttura (Figura 7.9).

Dal confronto tra le curve forza-spostamento dei bulloni, appare chiaro che con 35 KN di pretrazione la martensite indotta da sforzo (SIM) presente nella struttura del materiale è di gran lunga maggiore rispetto all'austenite, per questo motivo appaiono isteresi molto ristrette; imponendo una pretrazione di 45KN, invece, il materiale è completamente in fase martensitica (SIM), e pertanto le isteresi scompaiono del tutto. Comparando le varie curve momento-rotazione plastica risulta chiaro che con l'incremento del valore della pre-trazione dei bulloni, la connessione mostra una diminuzione progressiva delle isteresi fino a giungere alla totale scomparsa e presentando sempre più un comportamento elastico non-lineare.



Figura 7.9: Confronto tra le curve Momento-Rotazione plastica delle connessioni con i bulloni soggetti a una pre-trazione rispettivamente di 19 (originale), 35 e 45 KN.

Capitolo 8

Conclusioni e sviluppi futuri

Nello studio effettuato è stata posta l'attenzione sulle innovative proprietà delle leghe a memoria di forma e dalla loro applicazione nel settore dell'ingegneria strutturale. Le ottime prestazioni di tali leghe in termini di recupero di deformazione, capacità di ricentraggio e dissipazione di energia fanno si che l'attenzione di molti ricercatori si sia focalizzata su questi materiali.

I dispositivi anti-sismici a base di SMA vengono impiegati sempre più frequentemente: la capacità di auto-ricentraggio assume particolare importanza nella riduzione delle deformazioni plastiche residue degli elementi strutturali e questo si traduce in un notevole risparmio economico in fase di manutenzione post-sisma.

In questo studio è stato riprodotto in maniera accurata il grafico sperimentale momento-rotazione della connessione D10 - L190 - H210 ottenuto da Yam, Fang, Lam e Zhang nello studio "Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys" [1], ottenendo in determinati punti del grafico, risultati addirittura migliori in confronto a quelli ricavati dagli autori stessi; dopodichè è stata posta l'attenzione su due aspetti di notevole rilievo:

- temperatura;
- pre-trazione dei bulloni.

Aumentando la temperatura ambiente da 22°C a 40°C le prestazioni del dispositivo risultano simili ma non identiche: una trasformazione di fase (*austenite* \mapsto *martensite*(*SIM*) e viceversa) più completa determina un comportamento leggermente migliore della connessione posta a 22°C con una capacità dissipativa di poco superiore.

Valutando la risposta dei bulloni sottoposti a pre-trazioni di diversa intensità è stato osservato che l'induzione nel materiale SMA di una fase intermedia austenite-martensite (SIM), attraverso l'applicazione di una pre-trazione sensata, favorisce il comportamento dell'intera struttura, garantendo una rigidezza iniziale della connessione migliore. Un eccesso di pre-trazione nei bulloni però può indurre nel materiale una fase completamente martensitica ancora prima che essi vengano sottoposti a deformazioni ulteriori; questo implica una scomparsa dei cicli isteretici con una conseguente perdita di capacità dissipativa.

Svariati sono i punti di partenza per poter sviluppare ulteriori studi o approfondimenti: dall'introduzione di sistemi ibridi, come ad esempio connessioni miste con bulloni SMA e bulloni ad alta resistenza (HS), in modo da combinare la capacità di recupero di deformazione dei bulloni SMA alla ottima resistenza al teglio del bulloni ad altra resistenza; alla calibrazione dei parametri del materiale a memoria di forma per questa tipologia specifica di problemi, in modo da ottenere connessioni più performanti in termini di costo e dissipazione.

Bibliografia

- Yam MCH, Fang C, Lam ACC, Zhang Y. Numerical study and practical design of beam-to-column connections with shape memory alloys. Journal of Constructional Steel Research 104 (2015) 177-192.
- [2] Fang C, Yam MCH, Lam ACC, Xie L. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts. Journal of Constructional Steel Research 94 (2014) 122-136.
- [3] Otsuka K, Wayman CM. Shape Memory Materials. Cambridge University Press (1998).
- [4] Chang LC, Read TA. Trans. AIME (1951).
- [5] Buehler WJ, Gilfrich JV, Wiley RC. J. Appl. Phys (1963).
- [6] Arbuzov IA, Khandros LG. Fiz. Met. Metallowed (1964).
- [7] Otsuka K, Shimizu K. Scripta Met (1970).
- [8] Wang FE, Buehler WJ. A Summary of Recent Research on the NiTiNOL Alloys and Their Potential Application in Ocean Engineering. Journal of Applied Phisics, 34 (1963).
- [9] Auricchio F. Shape Memory Alloys: applications, micromechanics, macromodelling and numerical simulations. University of California, Berkeley.
- [10] Wayman CM, Duerig TW. An introduction to martensite and shape memory. Engineering aspects of shape memory alloys, Butterworth-Heinemann (1990) 3-20.
- [11] Otsuka K. Introduction to the R-phase transition. Engineering aspects of shape memory alloys, Butterworth-Heinemann (1990) 36-45.
- [12] Auricchio F. Un'introduzione alle leghe a memoria di forma. Università degli Studi di Pavia (2013).
- [13] Virgilli V. Materiali a Memoria di Forma: caratterizzazione e applicazioni nel campo dei Beni Culturali. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- [14] Carlone L. Le leghe a memoria di forma e le loro applicazioni nel settore automotive. Politecnico di Milano (2013).
- [15] Rota M. Compositi attivi con materiali a memoria di forma. Università degli Studi di Pavia (2001).
- [16] Auricchio F, Menna C, Asprone D. Applications of shape memory alloys in structural engineering. Shape memory alloy engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. Lecce L, Concilio A. Butterworth-Heinemann (2015) 13 369-401.

- [17] Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zhu JZ. The finite element method: its basis and fundamentals. Butterworth-Heinemann (2005).
- [18] Sannino D. Modelli di calcolo avanzati per l'analisi di strutture metalliche in caso di incendio. Università degli Studi di Napoli "Federico II" (2010).
- [19] SIMULIA Dassault Sistémes. Abaqus Analysis User's Manual.
- [20] SIMULIA Dassault Sistémes. Abaqus/CAE User's Manual.
- [21] SIMULIA Dassault Sistémes. Getting Started with Abaqus: Keywords Edition.
- [22] SIMULIA Dassault Sistémes. Getting Started with Abaqus: Interactive Edition.
- [23] Sacco E. Legame Costitutivo. Meccanica delle strutture, Corradi dell'Acqua L. McGraw-Hill (1992).
- [24] Bertini L. Lezioni di progettazione meccanica. Università degli Studi di Pisa.
- [25] De Nicolo B. Materiali da costruzione. Sperimentazione e normativa. Calcestruzzo allo stato fresco e indurito. Acciaio da cemento armato normale, precompresso e da carpenteria. Progetto finalizzato edilizia del CNR, vol. 9, Angeli F. (2004) 170-171.
- [26] Zareh H. ABAQUS/CAE material Non-linearity tutorial. Portland State University, Mechanical Engineering (2011).
- [27] Lubliner J, Auricchio F, Taylor RL. Shape memory alloys: macromodelling and numerical simulation of the superelastic behavior. Computer methods in applied mechanics and engineering, 146:281-312 (1997).
- [28] Taylor RL, Auricchio F. Shape memory alloys: modelling and numerical simulation of the superelastic behavior. Computer methods in applied mechanics and engineering, 143:175-194 (1997).
- [29] Simulia Copyright Dassault Systémes. UMAT-Superelastic-plastic.pdf
- [30] Sala G, Landro L, Airoldi A, Bettini P. Materiali intelligenti. Tecnologie e materiali areospazialiver01 52:1