

UTILIZZO DI MATERIALI A MEMORIA DI FORMA PER IL RESTAURO DI SUPERFICI MUSIVE ED IL CONSOLIDAMENTO DI PARAMENTI MURARI

N. SANTOPUOLI*, L. SECCIA⁺, E. TROIANI[°], V. VIRGILLI[°]

**Facoltà di Architettura e centro DIAPREM, Università di Ferrara*

+*II Facoltà di Ingegneria, Sede di Forlì e centro CIRAM, Università di Bologna*

[°]*II Facoltà di Ingegneria, Sede di Forlì, Università di Bologna*

SOMMARIO

Tra le numerose applicazioni della classe di materiali definiti *Shape Memory Alloys* (SMA), è particolarmente recente quella nel campo del restauro di opere d'arte [1]. Nella prima parte del presente lavoro è stato studiato il comportamento, sia attraverso simulazioni numeriche, sia mediante test sperimentali, di un dispositivo a memoria di forma in nickel-titanio (NiTiNOL), progettato per essere utilizzato come ancoraggio nel caso di superfici musive che presentino distacchi dalla parete o fra gli strati dell'intonaco di supporto. Gli apparati in esame sono stati discretizzati all'interno di un codice di calcolo agli elementi finiti, utilizzando, per la definizione del materiale, delle curve tensione-deformazione ricavate sperimentalmente. Tali curve, oltreché modificarsi notevolmente al variare della temperatura, presentano un particolare comportamento non lineare. I risultati delle analisi numeriche hanno confermato e precisato la validità delle analisi precedenti effettuate in sede di definizione delle caratteristiche del dispositivo [1, 2]. Gli esperimenti di laboratorio, svolti parallelamente alle simulazioni, hanno permesso di ottimizzare il modello utilizzato, di verificare l'affidabilità di questo dispositivo di ancoraggio, di ipotizzare ulteriori miglioramenti della sua geometria ed, infine, di progettare altri dispositivi da impiegare in contesti differenti da quello delle pareti musive. In particolare, nella seconda parte del lavoro vengono sinteticamente descritte varie applicazioni in SMA per il cantiere di restauro delle celebri botteghe di via dell'Abbondanza a Pompei, come i) dispositivi per l'ancoraggio di strati di intonaco ed ii) in blocchi lapidei e iii) giunti per la movimentazione di lastre in policarbonato.

1. INTRODUZIONE

L'espressione *Shape Memory Alloys* [3, 4] viene riferita ad una famiglia di leghe metalliche, quali le leghe nickel-titanio (NiTi) e quelle a base di rame (CuZnAl e CuAlNi), sensibili ai cambiamenti di temperatura e capaci di modificare la loro forma in una struttura programmata tramite un effetto "memoria".

Si distinguono leghe che presentano memoria ad una via e a due vie: nel primo caso l'effetto della memoria si manifesta quando il materiale, deformato plasticamente a basse temperature mentre si trova nello stato martensitico, inizia a ritornare durante il riscaldamento alla sua forma originale, che riacquista, sopra una determinata temperatura, nel momento in cui raggiunge la fase austenitica. Inoltre, se il materiale, una volta raffreddato, ritorna ad assumere senza l'applicazione di carichi esterni un'altra forma predefinita nel conseguente passaggio dalla fase austenitica alla fase martensitica, si ha il cosiddetto effetto della memoria a doppia via [5, 6, 7]. Pertanto, per questo tipo di leghe è possibile la memorizzazione di una forma sia ad alte che a basse temperature, anche se le possibilità di recupero sono minori di quelle che si ottengono per l'altra trasformazione. L'origine del fenomeno che dà il nome a queste leghe risiede nella trasformazione martensitica, durante la quale gli atomi si riarrangiano in una nuova struttura cristallina, senza cambiare la composizione chimica della fase di partenza; inoltre, la quantità di nuova fase presente dipende solo dalla temperatura raggiunta e non da quanto dura la permanenza isoterma: le trasformazioni di questo tipo sono denominate displasive.

Come mostrato in figura 1, nell'origine del diagramma è presente la fase martensitica (martensite *twinned*) derivante dalla trasformazione sopra descritta. In condizioni isoterme, sottoponendo il

materiale ad un carico P crescente, si assiste ad un tipo di trasformazione detta *detwinning*, in cui la struttura cristallina si ordina secondo le direzioni preferenziali dei reticoli atomici. Scaricando il provino a temperatura costante, rimane una deformazione permanente. Un successivo riscaldamento del materiale, senza applicazioni di carico, consente alla struttura cristallina di ritornare nella configurazione regolare propria della fase austenitica e, dal punto di vista macroscopico, si assiste al recupero della forma originale del campione di SMA.

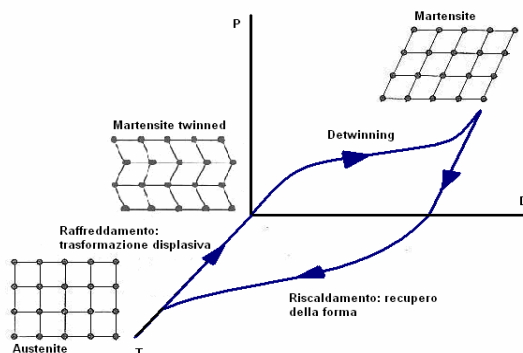


Figura 1. Diagramma Carico (P) – Deformazione (D) – Temperatura (T).

Una ulteriore qualità peculiare di queste leghe, è il fenomeno della superelasticità: se un provino viene sottoposto a grandi deformazioni (fino a circa il 15%), entro un intervallo di temperature caratteristiche della particolare lega, risulta in grado di recuperarle.

Le applicazioni di tali materiali sono ormai diffuse in molti campi [8], come il settore aerospaziale, meccanico, biomedico (per l'elevata biocompatibilità di questi materiali), elettromeccanico, architettonico e via dicendo. Citiamo ad esempio i dispositivi di fissaggio dei circuiti stampati, gli interruttori elettrici in dispositivi di sicurezza, i sensori e attuatori che hanno un grande potenziale nelle applicazioni in robotica (come nelle mani artificiali), le connessioni nei circuiti idraulici degli aerei, i meccanismi di rilascio di apparati meccanici e di apertura di antenne.

Lo studio sviluppato nel presente lavoro si inserisce all'interno di un progetto di ricerca¹ promosso dalla II Facoltà di Ingegneria (sede di Forlì) dell'Università di Bologna in collaborazione con la Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara e la Facoltà di Architettura *Valle Giulia* dell'Università di Roma *La Sapienza* (Arch. Prof. N. Santopoli), e con il Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e delle Tecnologie Industriali dell'Università di Trento (Prof. S. Gialanella). Partendo da una prima serie di prove sperimentali e analisi numeriche, sono state eseguite simulazioni su di una serie di dispositivi a memoria di forma in nickel-titanio, mostrati nella figura 2, ed utilizzati negli ultimi tre anni in attività di restauro e conservazione dei beni culturali. Particolare riguardo è stato posto al calcolo delle deformazioni e dello stato tensionale che si sviluppano quando il materiale riacquista, a temperatura ambiente, la sua forma preimpostata. Parallelamente è stata svolta una campagna di prove sperimentali nei laboratori di Forlì della Seconda Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna e nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e delle Tecnologie Industriali dell'Università di Trento, volti, i primi, all'ottimizzazione delle procedure di installazione e di utilizzo di tali apparati, del modello numerico e di conseguenza della geometria del dispositivo, e, i secondi, alla caratterizzazione della lega di NiTiNOL.

2. CARATTERISTICHE DEL DISPOSITIVO IN SMA

Il dispositivo, denominato convenzionalmente spina, è stato ricavato da una sottile lamina di Ni-Ti ed è stato prodotto in due tipologie delle dimensioni di $65 \times 10 \times 0,5 \text{ mm}^3$ e $80 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$. La lavorazione, che ha consentito di memorizzare la forma prefissata, prevede la permanenza ad

¹ Nella prima fase del progetto uno dei promotori della ricerca è stato il Politecnico di Berlino (Prof. I. Müller, Dr. A. Musolff).

una temperatura di 400 °C per circa 30 minuti, al termine dei quali, dopo un procedimento di tempra in acqua, è già verificabile l'effetto della memoria di forma.

La spina, sottoposta tramite l'utilizzo di ghiaccio secco ad un raffreddamento che consenta di deformarla fino a creare una piastra sottile, viene inserita in un apposito foro rettangolare praticato nella superficie oggetto di restauro. L'aumento di temperatura fino al raggiungimento di quella ambiente permette la transizione di fase: le alette della spina si deformano tornando alla geometria iniziale e garantendo un vincolo di incastro nel muro. Alla parte sporgente all'esterno viene applicata una lamina trasparente di plexiglas, per migliorare il sostegno del mosaico circostante (figura 3).

Il maggior vantaggio di questo tipo di dispositivo innovativo risiede nella ridotta intrusività rispetto, ad esempio, ad un tassello costruito in un altro materiale, che usualmente necessita di un diametro più elevato e, quindi, di un foro più largo. Inoltre, come le prove di laboratorio mostrate nel seguito hanno confermato, il "dispiegarsi" delle alette all'interno degli strati di intonaco forma una struttura interna che consente di ipotizzarne l'utilizzo, almeno nella maggior parte delle situazioni, senza l'aggiunta di consolidanti chimici, necessari invece per le situazioni di utilizzo tipiche degli ancoraggi tradizionali. Un altro aspetto, molto importante nel campo del restauro, è che il materiale ha un'elevata resistenza alla corrosione, la quale permette al dispositivo una durata maggiore rispetto a molte altre leghe metalliche.



Figura 2. Dispositivo di ancoraggio.

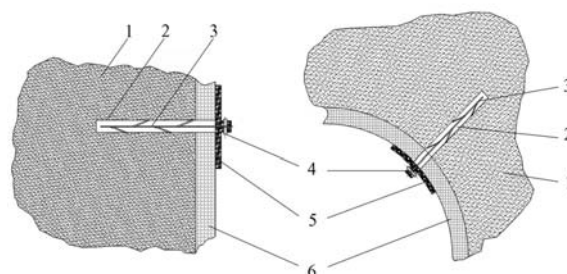


Figura 3. Montaggio della spina

3. VERIFICHE SPERIMENTALI

Per valutare l'effettiva funzionalità dei dispositivi, è stata condotta una campagna di test sperimentali finalizzata all'ottimizzazione delle procedure di inserimento all'interno delle superfici musive e alla verifica strutturale nelle condizioni tipiche di utilizzo. Inoltre, sono stati condotti test finalizzati alla definizione delle proprietà del materiale. Parallelamente a tali prove è stato implementato e ottimizzato il modello numerico che ha permesso di valutare lo stato tensionale provocato dai carichi applicati e di individuare le zone in cui questi sforzi si concentrano maggiormente.

3.1. Training del dispositivo in NiTiNOL per impartire la memoria ad una via

Per approfondire le modalità di lavorazione e i trattamenti termici effettuati sul dispositivo necessari ad impartire la memoria di forma, e avendo a disposizione lo strumento necessario a vincolare le alette durante il trattamento nella posizione che devono assumere nella fase austenitica, è stato sperimentato il training di un provino precedentemente tagliato attraverso un processo di elettroerosione. Il training ad una via prevede un trattamento termico di 30 minuti ad una temperatura di 400 °C del dispositivo vincolato nella forma che deve assumere in fase austenitica. Per questo motivo è stato sufficiente inserire la spina nel dispositivo fornito dai laboratori di Berlino, bloccare le alette nella posizione "aperta" e mettere il tutto nel forno. Successivamente è stata eseguita una tempra in acqua.

Per verificare la memoria ad una via, il provino è stato portato ad una temperatura inferiore di quella di inizio fase martensitica (immergendolo in azoto liquido), ed è stato deformato fino a ridurlo ad una lamina. La temperatura ambiente è stata sufficiente a superare la temperatura di

inizio fase austenitica: le alette si sono così deformate fino ad assumere spontaneamente la forma impartita con il trattamento termico.

Il prossimo passo consisterà nella messa a punto di un ciclo di trattamenti che permetta una ricristallizzazione del reticolo per ottenere una curva sforzo-deformazione più simile a quelle tipiche dei materiali che presentano memoria di forma. Successivamente sarà possibile definire un ciclo di trattamenti necessari ad impartire la memoria a due vie.

3.2. Prove sperimentali per valutare l'efficacia della soluzione adottata

La prima tipologia di prove sperimentali a cui sono state sottoposte entrambe le geometrie del dispositivo è stata scelta partendo dalla necessità di conoscere il comportamento della spina all'interno del suo reale contesto. Sono stati realizzati, da parte di esperti restauratori (in particolare la rest. L. Tapini), campioni che riproducessero in ogni particolare la struttura a strati di un vero mosaico, inserendo realisticamente varie tipologie di distacco fra gli strati, dimostratosi uno dei problemi più seri per la conservazione delle strutture musive.

In questo modo è stato possibile verificare l'entità dei carichi massimi che una tale struttura può sostenere e, di conseguenza, quelli a cui può essere sottoposta la spina. La preparazione delle prove ha consentito, inoltre, di evidenziare le difficoltà che si possono incontrare in fase di inserimento del dispositivo. Infatti, può essere un problema la necessità di praticare tagli rettangolari tra le tessere del mosaico, ma questo limite viene superato agevolmente, ad esempio realizzando una serie di fori ravvicinati con punte da trapano di diametri ridotti.

La messa in opera della spina necessita in primo luogo che il pezzo venga adeguatamente raffreddato, per poterlo rendere piatto. Tale operazione è stata effettuata usualmente con l'ausilio di ghiaccio secco che consente il raggiungimento di temperature sufficientemente basse per avere il dispositivo completamente nella sua fase martensitica.

Dopo aver introdotto i dispositivi all'interno dei provini, sono state effettuate delle prove di trazione con carichi crescenti, registrati tramite una cella di carico, secondo una disposizione mostrata nella figura 4.

Tali prove hanno fornito risultati quantitativamente differenti, ma hanno permesso di ottenere grafici qualitativamente simili dell'andamento del carico in funzione del tempo e di individuare i valori del carico necessario per provocare il primo cedimento dell'intonaco. Per effettuare le analisi agli elementi finiti sulla spina, è stato scelto un valore medio dei carichi relativi al primo cedimento dell'intonaco, i quali possono essere individuati nei diagrammi della forza in funzione del tempo in corrispondenza dei punti dove la curva di crescita della forza presenta un tratto orizzontale.

È importante specificare che, poiché la spina è inserita in un materiale molto meno resistente, i valori dei carichi applicati sono molto inferiori a quelli di rottura del NiTiNOL. Lo scopo dei test, infatti, è stato di valutare in che modo questi carichi influiscano sulle proprietà della spina.

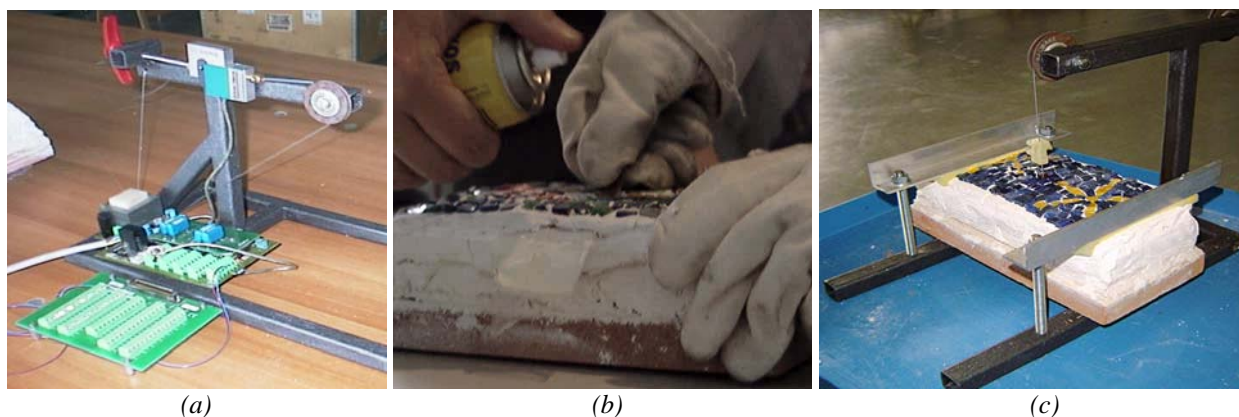


Figura 4.(a) dispositivo di misura del carico applicato, (b) inserimento della spina, (c) apparecchiatura di prova.

Un'ultima osservazione risultante dai test di laboratorio riguarda la forma raggiunta dal dispositivo dentro al foro: quest'ultima è parzialmente diversa da quella mostrata in figura 2, in

quanto la forza che le alette esercitano sull'intonaco non è sufficiente per riportare la spina nella configurazione austenitica memorizzata (come accadrebbe, invece, se l'intonaco fosse più friabile). Questo ha consentito la modifica del primo modello numerico realizzato, in modo da riprodurre in maniera molto più accurata la situazione reale.

3.3. Calorimetria differenziale a scansione del provino di NiTiNOL

Per misurare le temperature di transizione a cui corrispondono l'inizio e la fine delle fasi austenitica e martensitica, e per valutare qualitativamente e quantitativamente l'influenza dei trattamenti termici su tali temperature, sono state effettuate numerose Calorimetrie Differenziali a Scansione (DSC) su provini di materiale sottoposti ciascuno ad un diverso trattamento.

La calorimetria differenziale a scansione è una tecnica in cui viene misurata, in funzione della temperatura del campione, la differenza tra i flussi termici nel campione e in un riferimento mentre entrambi sono sottoposti a un programma controllato di temperatura.

Le analisi hanno fornito tutti i dati relativi alle temperature di transizione sui provini di NiTiNOL trattati termicamente a temperature e per tempi differenti. Il confronto tra i dati ha permesso di definire il trattamento termico adatto all'impiego previsto cioè in funzione delle temperature di transizione a cui il dispositivo deve lavorare. In base ai risultati raccolti, sarà possibile, in futuro, definire il giusto trattamento termico a cui sottoporre il materiale a seconda delle temperature operative richieste nelle nuove applicazioni.

3.4 Prove di trazione

I provini utilizzati per le prove di trazione, visibili in figura 5, sono stati ricavati dalla stessa piastra in lega NiTi dalla quale sono state tagliate anche le spine di fissaggio oggetto di studio.



Prova	T (°C)	Modulo di Young (MPa)
1	26	41670
2	26	39560
3	26	39710
4	90	59770
5	90	57590
6	90	58360
7	100	61520
8	100	60580
9	100	60540

Prova	T (°C)	Modulo di Young (MPa)
1	26	32810
2	26	33090
3	26	32820
4	90	71220
5	90	70370
6	90	70400
7	100	71270
8	100	70400
9	100	71110

Figura 5. Campioni di NiTiNOL utilizzati nelle prove di trazione.

Tabella 1. Prove di trazione (Provini non trattati).

Tabella 2. Prove di trazione (Provini trattati termicamente).

Le dimensioni dei provini presentano una sezione di 4.08x0.56 mm e un tratto utile di 32 mm.

La macchina utilizzata per le prove è una INSTRON 4502 dotata di forno, con l'ausilio del quale è stato possibile raggiungere i 90 °C e i 100 °C di temperatura per portare il provino nella fase completamente austenitica e misurarne il modulo di Young. Le tipologie di prove, infatti, sono state due: prima è stato misurato il modulo di Young per diverse temperature e successivamente è stata portata a termine la prova di trazione (fino alla rottura del provino) per costruire interamente la curva sforzo-deformazione del materiale a temperatura ambiente.

La prima tipologia di prove (tabella 1) è stata eseguita in controllo di spostamento fino a portare il provino ad una deformazione dell'1% della lunghezza utile.

A temperatura ambiente il materiale non è nello stato austenitico ma è ancora nella fase di transizione. È per questo motivo che il modulo di Young risulta inferiore alle aspettative.

Per verificare che le trasformazioni di fase dipendono soltanto dalla temperatura a cui si trova il materiale e non dal tempo di permanenza, il provino è stato raffreddato fino a -120 °C in maniera da ottenere la piena fase martensitica e successivamente è stato lasciato a temperatura ambiente

per 2 minuti: la microstruttura del provino è ritornata nella fase in cui si trovava durante le precedenti prove.

Diversamente da quanto ipotizzato nelle prime analisi numeriche [2], il modulo di Young del materiale presenta valori inferiori, ma la ragione è da ricercarsi nella mancanza del completo raggiungimento della fase austenitica: è noto infatti che il modulo di Young del NiTiNOL cambia notevolmente al variare della fase presente. Abbiamo quindi ritenuto interessante portare il provino nella fase completamente austenitica ed effettuare nuovamente la prova di trazione. In questo caso, come anticipato, è stato necessario utilizzare il forno.

Dalle precedenti DSC è noto che la temperatura A_f di fine fase austenitica si verifica a 40 °C circa, ma il comportamento completamente austenitico, cioè quello per cui la lega si presenta come un normale metallo, si verifica a temperature di 50 °C sopra a A_f . Quindi il provino è stato portato prima a 90 °C, poi a 100 °C.

Dai risultati si può evidenziare, prima di tutto, la differenza con i valori ottenuti a temperatura ambiente, che vale circa 20 GPa, confermando le ipotesi di partenza. Ma è notevole anche la differenza che si ottiene aumentando di 10 °C la temperatura.

3.5 Curva sforzo-deformazione

L'ultima prova effettuata è stata la prova di trazione per costruire il diagramma sforzo-deformazione del materiale. La scelta è stata quella di effettuare la prova a temperatura ambiente perchè è questo il valore per il quale sono state effettuate le analisi e le prove di laboratorio. Tale temperatura è infatti quella di lavoro dei dispositivi.

In questo caso è stato necessario utilizzare la cella di carico da 10 kN perché quella da 1000 N non permetterebbe di raggiungere la condizione di plasticizzazione e la prova si interromperebbe quando la curva del materiale si trova ancora nella fase elastica. La prova di trazione è stata eseguita ad una temperatura di 26 °C, con una velocità di carico di 2 mm/min.

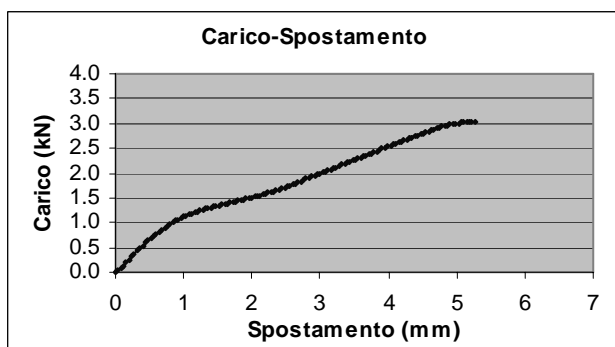


Figura 6. Diagramma carico-deformazione di provini non trattati.

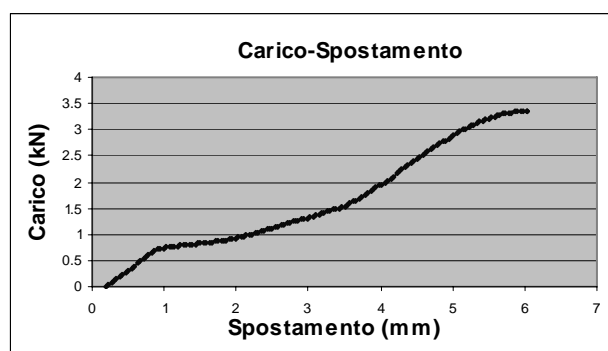


Figura 7. Diagramma carico-deformazione di provini trattati termicamente.

Come si può vedere dal grafico di figura 6, nel quale è riportato l'andamento della deformazione in funzione del carico applicato, la curva ottenuta non presenta quello che si ritiene essere l'andamento tipico dei materiali a memoria di forma. Il tratto elastico è molto breve e soprattutto il plateau che dovrebbe seguire lo snervamento è poco evidente. È stato ipotizzato che la ragione dei risultati ottenuti sia da ricercare nei trattamenti termici che differenziano i provini utilizzati nelle prove di trazione dal materiale delle spine "operative". Queste, infatti, sono state sottoposte ad un trattamento di tempra e rinvenimento necessario a migliorare le caratteristiche meccaniche della fase austenitica e sono state trattate termicamente per impartire la memoria di forma. Il passo successivo è stato quindi quello di effettuare nuove prove di trazione, questa volta su provini trattati termicamente in maniera da simulare l'effetto del training.

Dalla tabella 2 risulta chiaro che la modifica delle temperature di transizione di fase dovuta ai trattamenti termici ha effetto anche sui valori del modulo di Young. In figura 7, invece, è riportata la curva carico spostamento ricavata da un provino trattato termicamente: si può osservare un plateau più evidente rispetto al provino non trattato.

4. ANALISI NUMERICHE

Una prima serie di analisi agli elementi finiti è stata condotta al fine di mettere a punto un modello numerico del dispositivo. Sono state effettuate analisi di tipo statico, simulando il materiale con un comportamento lineare elastico, tipico della fase austenitica.

Poiché la lega di cui è formato il dispositivo di ancoraggio presenta comportamenti che variano a seconda della temperatura di esercizio, la fase che è stata considerata di maggiore interesse è la fase che si può definire “operativa”, cioè quella che si manifesta dopo il completo recupero della forma memorizzata ma ad una temperatura che non consente ancora di ottenere il comportamento austenitico vero e proprio.

Infatti, il dispositivo in esame inizia il recupero della forma (per cui le alette sono aperte) a partire da A_s , ma la lega a memoria di forma presenta un comportamento detto *pseudoelastico* fino a quando vengono raggiunte temperature di circa 50 °C superiori al valore di A_f , cioè quella per la quale la struttura cristallina è completamente cubica (fase austenitica). La fase intermedia sopra descritta, nel diagramma tensione-deformazione, si può riconoscere dall’isteresi e dal completo recupero della forma una volta esaurito il carico applicato. Per temperature maggiori, invece, si ha una curva tensione-deformazione dello stesso tipo di quelle di un normale metallo. Alla luce di queste affermazioni si è ritenuto necessario configurare una curva che comprendesse anche il comportamento pseudoelastico, considerando, comunque, alcune semplificazioni legate all’uso del dispositivo e agli scopi di quest’analisi.

È stato perciò introdotto, all’interno del modello agli elementi finiti, il comportamento non lineare del materiale: l’andamento del diagramma sforzo-deformazione è stato approssimato prima in modo “bilineare” per descrivere solamente la fase austenitica, poi in modo “multilineare”, per descrivere anche la fase pseudoelastica.

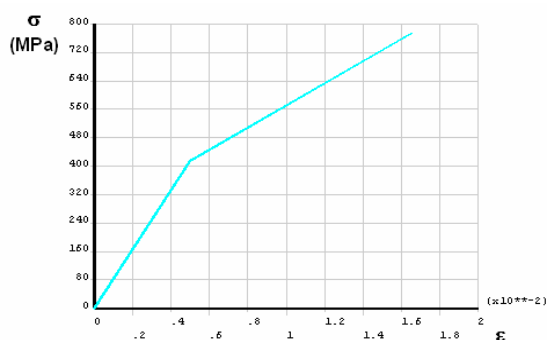


Figura 8. Curva sforzo deformazione bilineare.

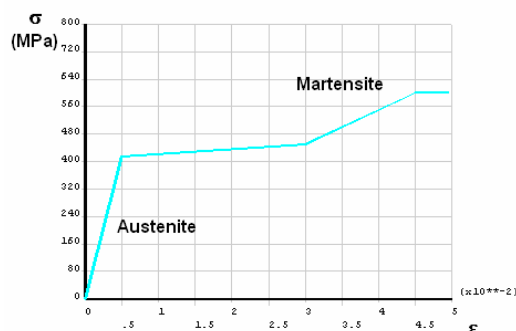


Figura 9. Curva sforzo deformazione multilineare.

Nella prima fase della modellazione, non avendo a disposizione i valori effettivi delle curve, sono stati utilizzati dati presenti in letteratura (tabella 3); successivamente, a seguito della campagna sperimentale citata in precedenza, è stato possibile utilizzare i diagrammi sforzo-deformazione reali del materiale. La curva questa volta è stata ricavata dalla curva carico-spostamento di figura 7 ed è rappresentata in figura 10.

PROPRIETA' DEL NiTiNOL	Austenite	Martensite
Modulo di Young (GPa)	83	Da 28 a 41
Limite di Snervamento (MPa)	415	Da 70 a 140
T di formazione (°C)	20	-10
Densità (g/cm ³)	6,5	6.45
Modulo di Poisson	0,3	0.33
Limite a rottura (MPa)	895	
Allungamento a Rottura	25% - 50%	5% - 10%

Tabella 3. Proprietà del NiTiNOL.

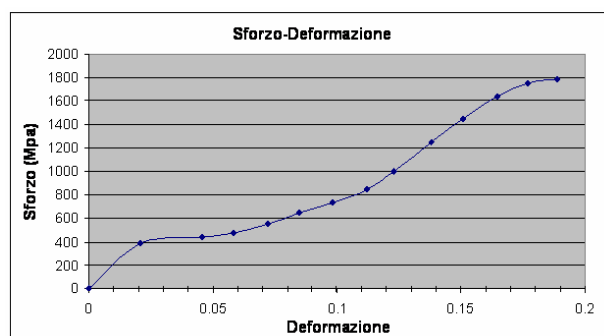


Figura 10. Diagramma carico-deformazione di provini trattati termicamente.

4.1 Modello numerico

Di seguito verranno riportati solamente i risultati relativi alla spina di dimensioni inferiori, in quanto tale configurazione è quella più critica dal punto di vista del campo di tensioni e spostamenti. Di questa tipologia di dispositivo di ancoraggio, in seguito alle osservazioni fatte in sede di sperimentazione in laboratorio, sono state analizzate sia la configurazione con le alette nella posizione estesa, sia quella relativa alla reale deformazione all'interno dell'intonaco. La prima delle due discretizzazioni sono mostrata nella figura 11.

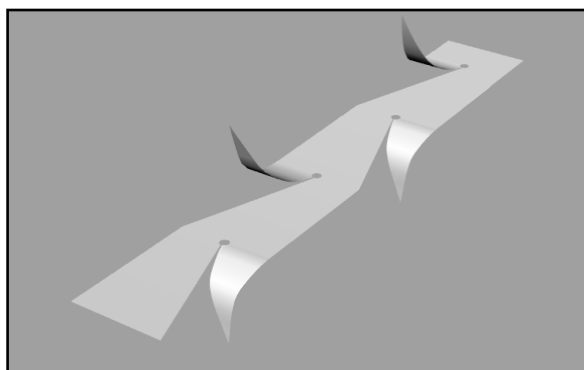


Figura 11. Spina completamente deformata.

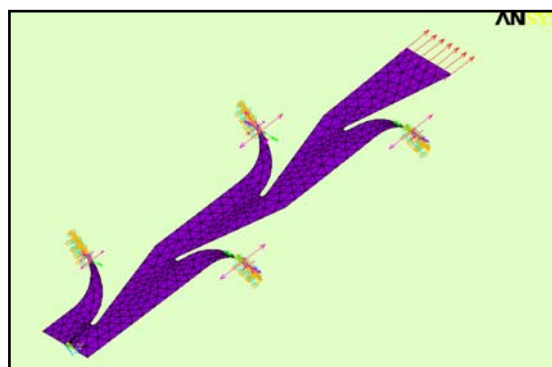


Figura 12. Vincoli e carichi agenti sul dispositivo.

La scelta dell'intensità dei carichi si basa, oltreché su considerazioni qualitative, anche su risultati precedenti [1], mentre la collocazione geometrica e le condizioni al contorno dei dispositivi derivano da una schematizzazione preliminare delle reali modalità di inserzione illustrate precedentemente. Osservando la spina inserita nel foro, infatti, è stato possibile definire in maniera accurata le condizioni al contorno, cioè sia i vincoli che le forze agenti sulla spina, e con questi svolgere le analisi: sono vincolate tutte le quattro alette, in particolare le estremità, che sono le uniche ad entrare in contatto con le pareti del foro e ad ancorarsi ad esse. I carichi sono stati definiti applicando una forza complessiva di trazione di 100 Newton equivalenti ai valori di primo cedimento dell'intonaco, ricavati dalle analisi sperimentali.

4.2. Confronto tra i risultati

I risultati ottenuti in alcune analisi mostrano tensioni elevate; tuttavia, come è stato confermato durante le prove in laboratorio, tali valori non lasciano deformazioni permanenti.

Di seguito sono riportati soltanto i risultati che si riferiscono alle analisi effettuate implementando il materiale ottenuto dai test sperimentali: per ulteriori approfondimenti si rimanda a [2].

Sono riportati i valori degli spostamenti massimi e delle massime tensioni di von Mises nelle varie configurazioni. Tali valori sono concentrati nella zona di incastro che, per la schematizzazione numerica effettuata, è molto più rigida della situazione reale. I valori più significativi delle tensioni sono quelli presenti nell'intorno dei fori di scarico alla base delle alette, come riportato in tabella 4 e mostrato nelle figure 13 e 14.

Geometria	Spostamento max (mm)	Massima tensione di von Mises (MPa)	Tensioni di von Mises nel foro più sollecitato (MPa)
Deformata	1,26	317	105
Parzialmente Deformata	0,79	159	159

Tabella 4. Risultati delle analisi effettuate sul dispositivo.

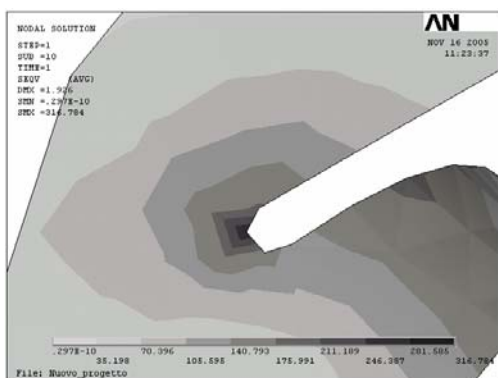


Figura 13. Spina completamente deformata, dettaglio della zona del foro.

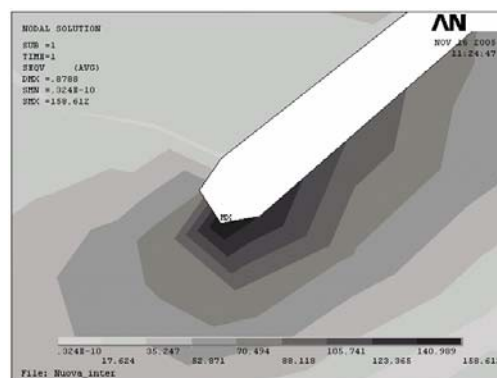


Figura 14. Spina parzialmente deformata, dettaglio della zona del foro.

Analizzando la tabella precedente è evidente che la forma della spina influenza significativamente i valori delle tensioni e delle deformazioni conseguenti all'applicazione dei carichi.

I risultati delle prove di laboratorio hanno portato a modifiche notevoli nella caratterizzazione del modello numerico. In ogni caso, i valori sperimentali e quelli numerici confermano l'affidabilità del dispositivo per gli scopi a cui è destinato. Infatti, le tensioni limite che si raggiungono restano, nel caso peggiore, inferiori al 20% della tensione massima a rottura registrata per questo particolare materiale. Inoltre, i valori indicati nelle tabelle sono quelli massimi e risultano concentrati in zone molto ristrette. Infatti, le analisi fin qui effettuate non tengono conto di alcune peculiarità della situazione reale, quali, ad esempio, le complesse condizioni di vincolo all'interno del mattone e dell'intonaco. In particolare alle estremità delle alette non sono impediti tutti i gradi di libertà, ma esse si possono assestare all'interno dei fori che hanno formato penetrando nell'intonaco durante la deformazione.

5. VANTAGGI DEL DISPOSITIVO E POSSIBILI MIGLIORAMENTI

A seguito della campagna di test sperimentali e numerici effettuati, è stata dimostrata l'efficacia del dispositivo in SMA ideato per il restauro di superfici musive con presenza di distacchi nell'intonaco sottostante. L'inserimento della spina crea, grazie all'ancoraggio dovuto alle alette, un collegamento estremamente resistente per il supporto degli strati esterni di mosaico. Per la fase sperimentale sono stati realizzati, in collaborazione con la Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara, dei campioni che rispecchiano la vera struttura a strati di un tipico mosaico parietale. In questo modo è stato possibile verificare i carichi massimi che una tale struttura può sostenere e, di conseguenza, quelli a cui può essere sottoposta la spina. La preparazione delle prove ha consentito, inoltre, di evidenziare le difficoltà che si possono incontrare in fase di inserimento del dispositivo.

I vantaggi maggiori evidenziati dalla campagna di prove riguardano la verifica della ridotta intrusività della spina rispetto alle metodologie classiche di restauro basate su tasselli di dimensioni maggiori. Le alette garantiscono, infatti, una armatura interna tra gli strati di intonaco, che ne consente l'utilizzo senza l'aggiunta dei consolidanti chimici impiegati usualmente nei fori dove sono inseriti gli ancoraggi tradizionali. Inoltre, le dimensioni e la forma rettangolare del profilo della spina facilitano il riposizionamento delle tessere preliminarmente distaccate in modo da nascondere il più possibile l'intervento di restauro.

L'impiego della spina si configura come permanente non essendo previsto, infatti, che essa possa essere estratta dalla sua collocazione, se non con un procedimento intrusivo. La dimostrazione della sua maggior resistenza rispetto al campione di mosaico preso in esame e la constatazione che le forze massime a cui viene sottoposta non influenzano in modo permanente la lega, porta a concludere che non è necessaria una particolare manutenzione del dispositivo. Inoltre, come già osservato, i materiali a memoria di forma presentano una elevata resistenza meccanica ed una buona resistenza all'ambiente che si traduce in un bassissimo tasso di corrosione.

Analizzando i risultati delle esperienze di laboratorio sulla spina, è stato possibile concludere che le alette non hanno riportato deformazioni permanenti o difetti evidenti.

Le prove sperimentali sono state fondamentali anche per una migliore definizione dei modelli numerici utilizzati.

La curva sforzo-deformazione del materiale di cui è costituito il dispositivo è stata caratterizzata inizialmente in modo generale, in quanto ciò era sufficiente per gli scopi di questo lavoro. Una definizione più accurata delle reali caratteristiche del materiale è stata ricavata dai risultati ottenuti in laboratorio ed in particolare dalle calorimetrie differenziali a scansione (DSC) che permettono di ottenere le vere temperature caratteristiche del materiale, e dalle prove a trazione.

Successivamente andranno approfondite le caratteristiche meccaniche degli strati di intonaco, al fine di predisporre analisi numeriche ancora più realistiche – come i metodi di risoluzione esplicita – che tengano in considerazione le vere condizioni di vincolo mediante la modellazione del contatto tra le superfici del dispositivo e gli strati di intonaco.

Poiché sono in fase di sviluppo anche altre applicazioni dell'ancoraggio studiato, come nel caso di manufatti (quali affreschi) in cui gli strati distaccati risultino di dimensioni inferiori rispetto al caso dei mosaici, sono in fase di valutazione alcune modifiche della geometria. Infatti, nel caso di distacchi meno profondi, una soluzione proposta è quella di ridurre il numero delle alette a due o tre.

Tali modifiche non sono, però, di immediata applicazione, in quanto, come visto nei casi studiati, durante il recupero della forma nascono particolari deformazioni delle superfici che devono essere valutate per evitare distribuzioni di tensioni troppo elevate che potrebbero causare il danneggiamento dei manufatti.

6. DISPOSITIVI IN SMA PER APPLICAZIONI NEL CANTIERE APERTO A POMPEI

Nel sito archeologico di Pompei sono iniziati nel mese di settembre 2004 i restauri delle celebri botteghe di via dell'Abbondanza². L'importante progetto - che vede la stretta collaborazione fra la Soprintendenza Archeologica di Pompei, la Facoltà di Architettura e il Centro DIAPREM dell'Università di Ferrara, la Facoltà di Architettura *Valle Giulia* dell'Università di Roma La Sapienza e la II Facoltà di Ingegneria (sede di Forlì) dell'Università di Bologna - ha come obiettivi primari la salvaguardia delle famose vestigia architettoniche, la sperimentazione di metodologie e materiali nel restauro e la formazione di diverse figure professionali che operano nel campo del restauro. Si è inteso, dunque, contribuire allo studio, alla conservazione ed alla valorizzazione degli ambienti di vita e delle pitture parietali, che rappresentano una parte importante dell'inestimabile patrimonio archeologico pompeiano, per contribuire a tramandare il lascito del passato in tutta la sua suggestione poetica ed evocativa.

L'Università affianca la Soprintendenza Archeologica in una stretta condivisione di obiettivi comuni, attraverso anche il coinvolgimento di aziende private e fondazioni per il finanziamento delle ricerche e dei lavori di restauro³.

² Il progetto di restauro è denominato *Da Asellina a Verecundus: ricerca, restauro e monitoraggio sulle pitture di alcune celebri botteghe di via dell'Abbondanza a Pompei (Regio IX, Insulae 7 e 11). Indagini e campagna di sperimentazione sui materiali, sulle metodologie d'intervento e protezione*. È stato redatto dal Centro DIAPREM (Arch. N. Santopuoli) e approvato dal Soprintendente Prof. Dr. P.G. Guzzo, e sono coinvolti per la Soprintendenza Archeologica di Pompei il Dr. A. d'Ambrosio, il Dr. E. De Carolis ed il Rest. S. Vanacore e per i restauri la Triade di Napoli (Rest. D. De Vincenzo e Rest. E. Concina). Per le indagini sulla caratterizzazione dei materiali e la valutazione dello stato conservativo e il ricoscimento delle morfologie del degrado e per gli studi e le analisi chimico-fisiche dei campioni è stata attivata una collaborazione con i laboratori scientifici della Soprintendenza per il patrimonio storico, artistico e demotnoantropologico per le province di Bologna, Ferrara, Forlì, Ravenna e Rimini (Dr. D. Cauzzi) e con il dr. G. C. Grillini. Inoltre, le facciate in cui sono collocate le pitture da restaurare sono state oggetto nel corso del 2003, 2004 e del 2005 di *stage* didattici, in cui studenti di vari corsi (Facoltà di Architettura *Biagio Rossetti* dell'Università di Ferrara, Facoltà di Architettura *Valle Giulia* e Scuola di Specializzazione in Restauro dell'Università di Roma "La Sapienza"), sotto la direzione dei docenti (Prof. Arch. N. Santopuoli e Prof. A. C. Spiridione) sono stati coinvolti nelle attività di rilievo e di studio delle pitture murali.

³ Per gli interventi di restauro hanno contribuito la Kacyra Family Foundation (Orinda, California, USA), la Fassa Bortolo, la Makrolon (Bayer Sheet Europe GmbH) e la Guardian Industries Corp. (Carleton, USA). In particolare, la

I fronti interessati dagli interventi sono posti lungo via dell'Abbondanza e a margine della parte non scavata della regio IX, *insula* 11, e presentano un'altezza massima di 6,0 metri e uno sviluppo lineare complessivo di circa 65 metri.

Le pitture e le scritte elettorali presenti sulle facciate oggetto d'intervento sono state riportate alla luce durante le operazioni di scavo condotte nel 1912 dallo Spinazzola. In particolare, gli interventi riguardano: i) l'officina *coactiliaria* o bottega dei feltrai di *Verecundus* (Regio IX, VII, 7-5), con la raffigurazione della Venere Pompeiana sulla quadriga di elefanti, ii) l'officina *infectoria* o tintoria con fornace (Regio IX, VII, 2), iii) l'officina *coactiliaria* o bottega dei feltrai (Regio IX, VII, 1). Sull'architrave dell'ampio vano d'ingresso si trovano le rappresentazioni dei volti dipinti delle divinità protettrici: Sole, Giove, Mercurio e Luna. Sul piedritto a sinistra è visibile la Venere Pompeiana con amorini dorati mentre, a destra è rappresentata una processione augurale in onore di Cibele; iv) il *compitum* con fontana, dedicato alle divinità dell'Olimpo (Regio IX, XI, 1) e v) il *thermopolium* di *Asellina*, rivendita di bevande calde (Regio IX, XI, 2) con le famose iscrizioni elettorali e la raffigurazione pittorica degli oggetti d'uso quale insegna dell'attività.

Dal 1912 a oggi, a cura della Soprintendenza Archeologica, sono stati eseguiti diversi interventi di salvaguardia e conservazione. Nonostante ciò, attualmente abbiamo individuato diffusi fenomeni d'imminente degrado a causa soprattutto dell'umidità assorbita in continuazione dalle murature di supporto, ancora addossate agli strati di lapillo e polveri vulcaniche non rimosse al tempo degli scavi, quando nel XIX sec. è stata costruita la cosiddetta casina dell'Aquila.

Sulla base degli importanti risultati ottenuti con le diverse campagne di rilevamento, che hanno riguardato tra l'altro anche le pitture murali e i graffiti (indagine allargata negli anni 2000-2002, anche agli ambienti più importanti della Casa dei Casti Amanti e di quella del Centenario), è stato redatto un piano per lo svolgimento di indagini, sperimentazioni e monitoraggio dello stato conservativo dei dipinti murali, delle scritte elettorali e degli attuali sistemi di protezione adottati nel corso degli anni.

I sistemi protettivi finora adottati consistono in lastre di vetro o plexiglas fissate direttamente sulla muratura originale delle facciate mediante zanche metalliche (ferro, ottone, ecc.), mirate alla protezione dell'azione diretta degli agenti atmosferici sulle superfici dipinte.

Scopo del cantiere è stata, quindi, la verifica dell'efficacia di tali presidi ed, inoltre, la puntuale valutazione dello stato di conservazione dei dipinti e delle murature, per poi arrivare alla definizione del progetto conservativo con la realizzazione di saggi e prove d'intervento, a cui è seguita la redazione del progetto esecutivo.

La struttura muraria oggetto dell'intervento è costituita da elementi in pietra e laterizio e risulta accostata al muro di contenimento dell'area non scavata su cui sorge la casina dell'Aquila. La situazione ambientale determina un'elevata quantità di acqua nelle murature: le ragioni sono da ricercarsi sia nella risalita capillare dal terreno, che nella veicolazione delle piogge meteoriche trattenute dalla parte non scavata, aggravate dalla tipologia altamente drenante dei materiali di cui è costituita (lapillo, pozzolana, pomice, conci calcarei, ecc).

Le murature di contenimento sono state realizzate al momento dello scavo (primo decennio del XX secolo) e in periodi successivi, utilizzando materiale locale di recupero: si hanno, quindi, murature miste in cui i blocchi lapidei sono legati da malta probabilmente di natura cementizia.

Fassa Bortolo, basandosi su un rapporto di collaborazione scientifica già in corso con il centro di ricerca DIAPREM del Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara, è stata direttamente coinvolta nel restauro e nella protezione delle pitture murali. L'azienda, oltre a finanziare i lavori di restauro delle pitture murali, metterà a disposizione dei progettisti e della direzione lavori il proprio staff tecnico ed i propri laboratori per la realizzazione di sperimentazioni e di analisi scientifiche.

In particolare, tra le problematiche rilevate nei fronti oggetto d'intervento, oltre alla presenza di umidità vanno segnalati i cicli secco-umido, che favoriscono la fuoriuscita dei sali in superficie, rendendo diffuso ed estremamente dannoso il problema dell'efflorescenza.

All'interno del cantiere sono stati effettuati test e prove sperimentali riguardanti le varie operazioni previste per il successivo restauro, come la pulitura ed il trattamento biocida, il consolidamento della superficie e dei distacchi degli strati di intonaco, le prove di malte per le integrazioni e le stuccature, al fine di individuare i prodotti ed i materiali più idonei. La scelta di tali prodotti è avvenuta associando le prove pratiche in cantiere ai risultati delle analisi di laboratorio eseguite dal geologo G. C. Grillini, dal chimico Dr. D. Cauzzi e dal laboratorio scientifico e dal centro ricerche della Fassa Bortolo. Queste analisi hanno comportato il prelievo di alcuni campioni di intonaci e di materiali applicati sulla superficie in passati interventi di restauro, al fine di determinarne l'esatta composizione e di definire la natura degli interventi conservativi precedenti, permettendo di indirizzare la metodologia d'intervento.

Lo stato di conservazione delle strutture e degli intonaci è stato valutato in modo puntuale e documentato con tavole tematiche nella fase iniziale del cantiere di restauro, inoltre, dopo la rimozione delle lastre protettive, si è proceduto con analisi visive ravvicinate dei manufatti e con indagini diagnostiche non distruttive come la termografia e la spettrofotometria, fino ad arrivare alle analisi di laboratorio dei campioni di materiale rappresentativo.

Sul paramento murario dei fronti oggetto del cantiere sono stati rilevati diffusi fenomeni di degrado, fra cui distacchi e vuoti negli strati preparatori di intonaco, laddove la malta originale si è polverizzata al di sotto degli intonaci, a causa della forte presenza di umidità e degli interventi non idonei eseguiti in passato (iniezioni, probabilmente a base cementizia, che nel corso del tempo hanno provocato i vuoti), così pure nella struttura muraria, dove ci sono fratturazioni che interessano i blocchi lapidei. Partendo dal presupposto di voler realizzare soluzioni d'intervento poco invasive e potenzialmente reversibili, si è valutata la possibilità di avviare una sperimentazione progettando nuovi e appositi ancoraggi tecnologici per affrontare il problema del distacco delle superfici intonacate e degli affreschi, e così pure la questione del riassetto di singoli parti di conci fratturati. Infatti, i dispositivi già realizzati in precedenti sperimentazioni [1] e le procedure di manutenzione e/o restauro stabilite hanno consentito l'attuazione di interventi in forme meno invasive e con un maggior grado di reversibilità rispetto a quelli tradizionali, sulla base del concetto di "rispetto per la materia costitutiva dell'opera d'arte", uno dei cardini della moderna teoria del restauro a partire da Cesare Brandi. Pertanto, la sperimentazione nel cantiere di via dell'Abbondanza, ha considerato, oltre che la compatibilità fisico-chimica tra i componenti, l'utilizzo di materiali con un comportamento elastico idoneo all'applicazione su materiali antichi, soprattutto per quanto concerne il principio della reversibilità, ovvero la possibilità di rimuovere ogni intervento eseguito sulle strutture originali. Inoltre, pur nel rispetto del principio di distinguibilità, un ulteriore fattore per la buona riuscita di interventi di integrazione è il raggiungimento di un soddisfacente risultato dal punto di vista estetico e percettivo.

6.1. Dispositivo per l'ancoraggio di strati di intonaco

È stato progettato ed è in fasi di realizzazione un dispositivo in SMA da inserire nelle parti di intonaco interessate da fenomeni di distacco e/o sollevamento, anche a causa di interventi precedenti non idonei (ad esempio, iniezioni probabilmente a base cementizia). L'inserimento dei dispositivi deve mantenere inalterata la situazione attuale e consentire la reversibilità dell'intervento. Nel progettare il prototipo si è studiata la sua geometria, considerando la consistenza e la sezione della muratura, con una lunghezza tale da raggiungere la struttura muraria e consentire l'ancoraggio ai conci della muratura, senza gravare sugli strati d'intonaco.

Uno dei possibili dimensionamenti preliminari dell'ancoraggio è stato: $150 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$.

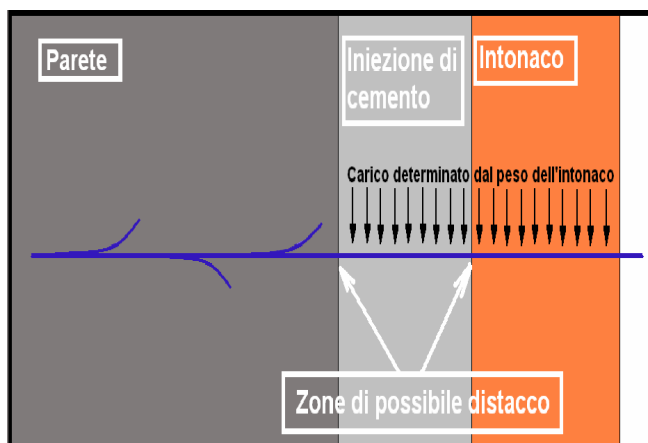


Figura 15. Schema di applicazione del dispositivo.

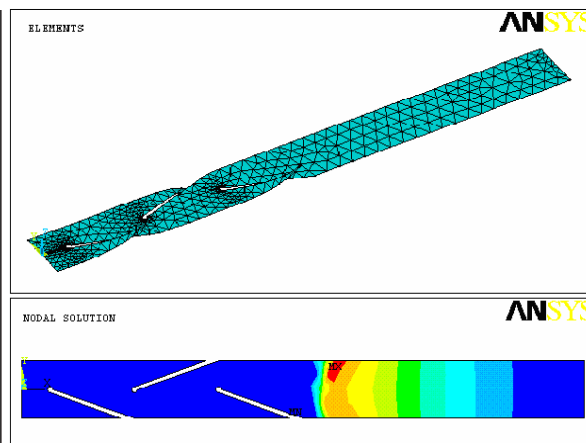


Figura 16. Modello discretizzato e andamento delle tensioni.

Le prime analisi numeriche sul modello discretizzato hanno fornito risultati significativi, un esempio dei quali è riportato in figura 16.

Infatti, come era prevedibile, sia la distribuzione di tensione all'interno del dispositivo che lo spostamento risultante dall'applicazione dei carichi risultano molto elevati: una nuova soluzione proposta è stata quella di rinforzare il tratto piano del dispositivo, cioè quello atto a sostenere il peso dell'intonaco, con una nervatura.

Una possibile regione interessata da fenomeni di distacco (in corrispondenza di alcune integrazioni), dove l'inserimento di un dispositivo come quello proposto potrebbe essere utile, è situata nel dipinto murale raffigurante la Venere Pompeiana con amorini dorati posta nel fronte esterno dell'officina *coactiliaria* o bottega dei feltrai (Regio IX, VII,1) mostrato in figura 17.



Figura 17. Venere Pompeiana con amorini dorati posta nel fronte esterno dell'officina *coactiliaria* o bottega dei feltrai (Regio IX, VII,1): sono cerchiare le zone in cui potranno essere inseriti i dispositivi.



Figura 18. Officina *coactiliaria* o bottega dei feltrai (Regio IX, VII,1): conci del paramento che presentano fenomeni di fessurazione.

6.2. Dispositivo in SMA per l'ancoraggio in blocchi lapidei

È stato progettato ed è in fase di realizzazione anche un dispositivo di ancoraggio in SMA con memoria due vie da inserire all'interno di blocchi lapidei che presentano fenomeni di fratturazione, al fine di riassembleare le parti distaccate. In particolare, tale dispositivo potrebbe rivelarsi utile in presenza di conci fratturati non sottoposti a fenomeni dinamici, nel qual caso le soluzioni necessarie diventano più complesse.

Ad esempio si osservino le situazioni proposte in figura 18. Per questi due casi la soluzione potrebbe essere un dispositivo da inserire quando, allo stato austenitico (temperatura superiore a quella ambiente), si trova nella forma di una piastra piana, il quale, poi, passando allo stato

martensitico man mano che la temperatura scende fino ad arrivare a quella ambiente, assume la forma “deformata” in cui le alette sono aperte.

Al momento attuale le analisi numeriche preliminari hanno evidenziato uno stato di tensione più che accettabile nelle zone maggiormente esposte alle forze in gioco.

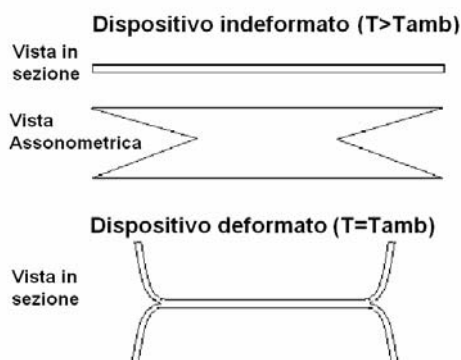


Figura 19. Geometria proposta per il dispositivo.

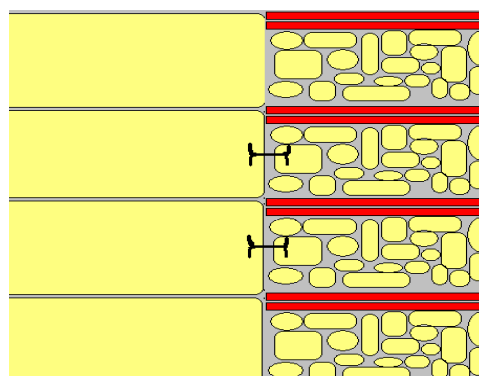


Figura 20. Montaggio del dispositivo.

6.3. Applicazione di giunti in SMA per la movimentazione di lastre in policarbonato

All'interno del cantiere è in fase di analisi il problema della protezione delle superfici affrescate, attraverso l'utilizzo di lastre trasparenti in policarbonato prodotte dalla Makrolon (Bayer Sheet Europe GmbH). A questo proposito, due degli autori (N. S., L. S.) hanno svolto uno studio che ha dimostrato l'efficacia di tale sistema di protezione nel cantiere della Casa del Centenario [10]. In particolare, sono in fase di sviluppo dispositivi a memoria di forma al fine di consentire un posizionamento ottimale delle lastre di protezione ed un loro agevole smontaggio e rimontaggio, in quanto l'affresco necessita di una manutenzione periodica.

La ragione della progettazione e della sperimentazione di tali dispositivi sta nel fatto che sulla superficie di un affresco durante i mesi estivi si possono raggiungere temperature elevate, a causa dell'esposizione diretta alla radiazione solare, il cui effetto viene accresciuto dalla eventuale presenza di lastre trasparenti di protezione che inducono un *effetto serra*.

Per ridurre il problema sopra descritto, si è deciso i) di utilizzare come superfici di protezione speciali lastre in policarbonato con un'azione di filtraggio della parte ultravioletta dello spettro, e ii) di movimentare la lastra in modo *intelligente* al variare della temperatura con dispositivi in SMA, per consentire una migliore circolazione dell'aria.

Il dispositivo è formato da due molle, una a memoria di forma e l'altra in normale acciaio: la differenza di rigidità tra le due, al variare della rigidità della molla a memoria di forma, consente alla lastra di avvicinarsi e allontanarsi dalla parete.

Lo schema di figura 21 mostra le componenti fondamentali di questo *smart system*: si tratta di due perni su quali sono montate le due molle e la piastra stessa, il tutto fissato con una vite facilmente smontabile nel caso in cui sia necessario rimuovere la piastra, e che, allo stesso tempo, permette di bloccare il dispositivo.

Il movimento è reso possibile dalla proprietà della molla in SMA che modifica la sua rigidità al variare della temperatura, passando da un valore inferiore (figura 21 in alto) ad un valore superiore alla rigidità della molla esterna in acciaio (figura 22 in basso). In particolare, le tre rigidità devono essere:

$$k_M < k_{acc} < k_A$$

dove con k_M si indica la rigidità della lega a memoria di forma nello stato martensitico, con k_A quella della lega in fase austenitica e con k_{acc} quella dell'acciaio. Per determinare le temperature di transizione, i materiali adatti, ed i valori delle suddette rigidità stiamo sviluppando uno studio articolato che comprende anche la simulazione del microclima fra la lastra e la superficie dell'affresco.

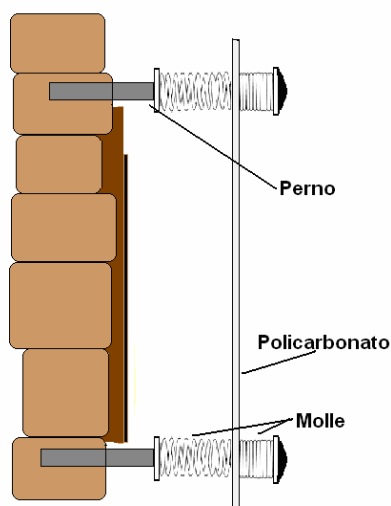


Figura 21. Schema della struttura parete - piastra in policarbonato.

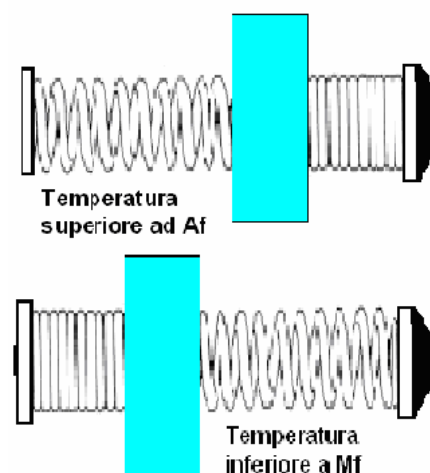


Figura 22. Particolari delle molle.

BIBLIOGRAFIA

1. I Müller, A. Musolff, N. Santopuoli, L. Seccia, "Shape memory alloys for the conservation of cultural heritage: new applications also for a real reversibility in the restoration operation", *Scienza e beni culturali XIX 2003*, Edizioni Arcadia Ricerche, 2003.
2. V. Virgilli, Tesi di laurea, "Analisi numerica e verifiche sperimentali di un dispositivo a memoria di forma per il restauro di opere d'arte", Università degli studi di Bologna, Seconda Facoltà di Ingegneria (sede di Forlì), Ottobre 2004. Relatori: Ing. Prof. E. Troiani, Prof. L. Seccia, Arch. Prof. N. Santopuoli, Prof. C. Alessandri.
3. L. Seccia, E. Troiani, V. Virgilli, "Analisi numeriche e verifiche sperimentali di dispositivi a memoria di forma", XVIII Congresso Nazionale AIDAA, Volterra, 19-22 settembre 2005.
4. S. Seelecke, I. Müller, "Thermodynamic Aspects of Shape Memory Alloys", *Math.&Comp. Modeling, Peprgamon Press*, Oxford, New York, 2001.
5. Otsuka and Wayman, "Shape Memory Materials", Cambridge University Press, 1998.
6. J. Perkins and D. Hodgson, "The Two-Way Shape Memory Effect", *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, ed. by T.W. Duerig, et al, (Butterworth-Heinemann, 1990), pp. 195-206.
7. Yinong Liu and P.G. McCormick, "Factors Influencing the Development of Two-Way Shape Memory in NiTi", *Acta Metallurgica*, 38, (1990), pp. 1321-1326.
8. I. Chopra, "Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 11, November 2002.
9. Rossi S., Deflorian F., D'Orazio D., Gialanella S., "Surface treatment to improve the corrosion resistance of shape memory NiTi wires". In: *16th International corrosion congress*, Beijing (China):[2005]. Atti del convegno "International corrosion congress, 16th", Beijing, China, 19 - 24 September, 2005 Note: paper02-09. - Pubbl.su CD-Rom.
10. N. Santopuoli, L. Seccia, "Indagini spettrofotometriche e colorimetriche non distruttive sulle pitture murali della domus del Centenario: monitoraggio e creazione di una banca dati", vol. 1 della collana di studio *Progetto Pompei - Insula del Centenario: "Indagini diagnostiche geofisiche e analisi archeometriche su muri, malte, pigmenti, colori, mosaici"*, a cura di S. Santoro, in corso di stampa.