

ANALISI TERMO-MECCANICA DI LEGHE DI NI-TI PER APPLICAZIONI BIOMEDICALI SOTTOPOSTE A CARICHI CICLICI

V. Pinto^{a,b}, R. Cappello^a,
S. Di Leonardo^b, G. Catalanotti^c,
G. Burriesci^{b,d}, G. Pitarresi^a

^a *Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Meccanica,
Viale delle Scienze, 90128 Palermo*

^b *Fondazione Ri.MED, Gruppo di Bioingegneria,
Via Bandiera, 11, 90133 Palermo*

^c *Universidade de Evora, Departamento de Engenharia Mecatrónica,
Evora, Portugal*

^d *University College London, UCL Mechanical Engineering,
Torrington Pl, London WC1E 7JE, Regno Unito*

Sommario

Le leghe di Nitinol appartengono alla classe delle leghe a memoria di forma ed esibiscono un comportamento superelastico sopra una data temperatura. Questa proprietà, combinata con la loro biocompatibilità, ha permesso la realizzazione di dispositivi medici innovativi, che però appartengono alla classe di rischio più alta. È importante quindi un'adeguata conoscenza del comportamento del materiale sotto le condizioni operative, che includono alte deformazioni e carichi ciclici di fatica a bassa ampiezza. Nel presente studio, un provino in Nitinol è stato testato sotto carico ciclico a diversi valori di deformazione media, analizzando il contenuto armonico della temperatura misurata da una termocamera ad infrarossi sulla superficie del campione. Le mappe della prima e seconda armonica mostrano caratteristiche peculiari correlate allo stato di fase del materiale ed alla storia pregressa di trasformazione di fase. Il lavoro investiga anche la natura della modulazione della temperatura, valutando se la teoria dell'effetto termoelastico è in grado di spiegare il comportamento osservato.

Abstract

Nitinol alloys belong to the class of shape memory alloys exhibiting a superelastic behaviour above a specific temperature. This property, combined with their biocompatibility, has allowed the creation of innovative medical devices, mostly used as endovascular prostheses, which belong to the highest risk class. Therefore, it is important to have adequate knowledge of the behavior of the material under operating conditions, which include high deformations and cyclic fatigue loads. In the present study, a Nitinol sample was tested under cyclic loading, and the harmonic content of the temperature, measured by an infrared camera on the sample surface, was analyzed. The maps of the first and second harmonics show peculiar features correlated to the phase state of the material and to its previous history of phase transformation. The work also investigates the nature of temperature modulation, questioning whether the thermoelastic effect theory can explain the observed behavior.

Parole chiave: Nitinol, Superelasticità, Termografia ad infrarossi, analisi armonica, effetto termoelastico.

1. INTRODUZIONE

Il Nitinol è una lega equiatomica di nichel-titanio caratterizzata dal comportamento superelastico e a memoria di forma. Queste proprietà uniche e la sua biocompatibilità contribuiscono a renderlo un

materiale di preferenza per la realizzazione di molti dispositivi medici in ambito cardiovascolare, ad esempio stent per angioplastica, endograft per il trattamento degli aneurismi e valvole cardiache transcateretere [1],[2].

Questi dispositivi sono compressi all'interno di un piccolo catetere per permettere di essere inseriti mediante una chirurgia trans-catetere minimamente invasiva. Il dispositivo, una volta rilasciato, si auto-espande, esercitando la forza necessaria sull'anatomia circostante per restaurare e mantenere il flusso sanguigno. In particolare, il materiale che costituisce il dispositivo rimane in uno stato di fase ibrido ed è soggetto a carichi ciclici di fatica principalmente legati al ciclo cardiaco ed alla relativa variazione di pressione sanguigna [3].

Questi dispositivi, appartenendo alla classe di rischio più alta, richiedono quindi una accurata caratterizzazione del materiale, per l'ottimizzazione del design del dispositivo.

In particolare, la superelasticità del Nitinol consiste nella capacità di recuperare deformazioni con ordini di grandezza molto più grandi dei metalli standard (6÷8 %). La curva di trazione-deformazione presenta inoltre delle ampie zone di plateau, che determinano la capacità di accomodare un ampio range di deformazione rimando a tensione costante. Questo comportamento è reso possibile dalla formazione di due regioni con diverse strutture cristalline e proprietà meccaniche: una austenitica, di partenza, e l'altra martensitica, introdotta ad uno specifico livello di tensione raggiunto. Quindi, le grandi deformazioni reversibili che caratterizzano il comportamento superelastico sono il frutto di una trasformazione reversibile di fase austenite-martensite indotta dal livello di stress. La trasformazione si enuclea in corrispondenza di specifiche zone, chiamate bande di Lüders, che progressivamente si espandono con l'allungamento del provino fino a che l'intero provino si è trasformato [4],[5]. A causa della natura localizzata e spazialmente distribuita di questi fenomeni, recentemente si è assistito ad un uso sempre più crescente delle tecniche a campo intero per lo studio di questo materiale, come la Digital Image Correlation (DIC) e la Termografia ad Infrarossi (IR-T) [6],[7].

L'obiettivo di questo studio è analizzare il comportamento termomeccanico del Nitinol sottoposto a carico ciclico sinusoidale. Si osserva che la temperatura viene modulata in fase con la modulazione del carico. Tale variazione reversibile di temperatura, nei materiali solidi, è tipicamente legata all'effetto termoelastico, per cui lo scopo del lavoro è quello di analizzare il contenuto armonico della temperatura rispetto alle previsioni delle teorie analitiche note dell'Effetto Termoelastico, per stabilire quanto esse siano in grado di modellare il peculiare comportamento termomeccanico osservato sperimentalmente.

A tal proposito, sono state acquisite le mappe a campo intero della temperatura tramite IR-T, ed è stato analizzato il contenuto armonico della temperatura alla frequenza di carico (*Prima Armonica*) ed al doppio di tale frequenza (*Seconda Armonica*). Si è quindi analizzata la natura delle mappe di ampiezza e fase delle due armoniche, sia rispetto alle previsioni della Teoria del Secondo Ordine dell'Effetto Termoelastico, sia rispetto allo stato del materiale ed alla distribuzione delle fasi austenitiche e martensitiche presenti nel momento delle acquisizioni.

L'analisi svolta ha prodotto due risultati principali: i carichi ciclici determinano una marcata modulazione della temperatura la cui caratteristica peculiare è di essere in fase con il carico; le mappe della fase della *Seconda Armonica* presentano un salto di circa 180° tra zone in fase austenitica e martensitica, permettendo di mappare lo stato di fase dell'intero provino. Ciò non è pienamente predetto dalle teorie note dell'effetto termoelastico, determinando il sospetto che la modulazione di temperatura possa essere indotta anche da altri effetti diversi da quello puramente termoelastico.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Setup sperimentale

Un campione di forma rettangolare (5.6 mm×100 mm×0.45 mm) è stato ricavato per taglio ad elettroerosione da una placchetta di Nitinol. Il provino è stato quindi testato in una macchina di prova elettrodinamica Instron Electropulse E10000, applicando un carico quasi-statico in controllo di spostamento a 0.5 mm/min, intervallato, a determinati stadi di deformazione, da un carico ciclico. Questo, in particolare, è determinato applicando allo spostamento dell'attuatore una modulazione sinusoidale ad ampiezza costante, pari a 0.3 mm, e frequenza di 3 Hz, per una durata di 150 sec. Durante l'applicazione del carico ciclico, sono stati acquisiti dei termogrammi tramite una termocamera ad

infrarossi a sensore raffreddato FLIR x6540sc, operata con frequenza di campionamento 200 Hz, ed un *integration time* di 659 μ s. Il setup sperimentale è mostrato in Figura 1.

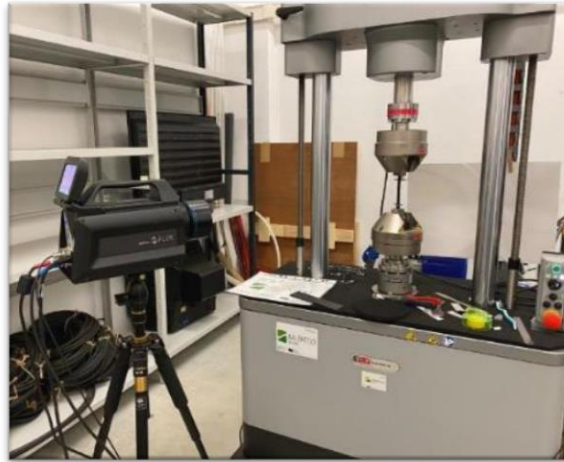


Figura 1. Setup Sperimentale.

2.2 Piano sperimentale

Il provino è stato sottoposto a due prove di trazione in sequenza. Nella prima, il provino è caricato quasi-staticamente sino ad un livello massimo di deformazione a trazione poco superiore al 3 %, per poi essere scaricato. La seconda prova ha seguito la stessa rampa triangolare (carico-scarico) del primo test, intervallata da quattro cicli sinusoidali di deformazione ad ampiezza costante.

In Figura 2 sono mostrate le zone del provino che, a seguito dello spostamento massimo raggiunto nel primo test, si sono trasformate da austenite a martensite.

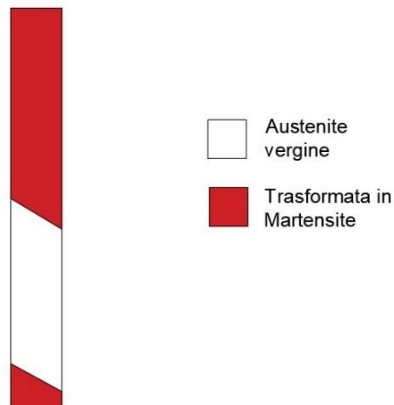


Figura 2. Stato di fase del materiale al massimo dello spostamento applicato nel primo test.

In Figura 3 è invece rappresentato l'andamento della curva forza-spostamento nel secondo test. In tale grafico i vari carichi ciclici sono indicati con colore diverso. Tali carichi ciclici sono posizionati a specifici stati di deformazione mostrati in Figura 3: a metà tra il plateau superiore e inferiore durante la fase di carico austenitica (ciclo 1), a partire dal plateau superiore in corrispondenza di uno spostamento pari a circa 1.7 mm (ciclo 2), sul plateau superiore in corrispondenza di uno spostamento pari a circa 3.3 mm (ciclo 3), a partire dal plateau inferiore in corrispondenza di uno spostamento pari a circa 1.7 mm (ciclo 4).

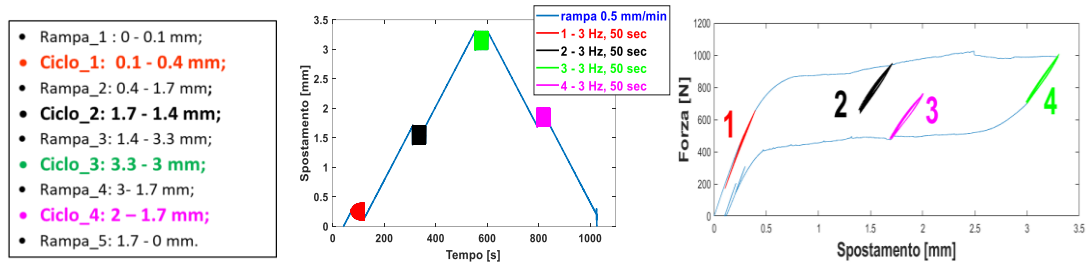


Figura 3. Curve spostamento-tempo e forza-spostamento relative al secondo test.

Si osserva che durante le fasi di applicazione ciclica del carico, i fronti di trasformazione di fase non progrediscono e rimangono nella posizione raggiunta poco prima dell'inizio del ciclo. In Figura 4 sono mostrate le zone del provino relative allo stato di fase durante i quattro cicli. In particolare, nel ciclo 1 il materiale si trova in fase austenitica, in quanto la trasformazione di fase non è ancora iniziata. Nonostante questo, è possibile notare una diversa risposta del materiale dove la trasformazione di fase è avvenuta durante il test preliminare. Nel ciclo 2, la trasformazione di fase è iniziata, a partire dal grip superiore della macchina di prova. Nel ciclo 3, la fase martensitica è ormai presente in tutta la regione precedentemente già trasformata durante il test preliminare. Infine, nell'ultimo ciclo è appena iniziata la trasformazione di fase inversa da martensite ad austenite.

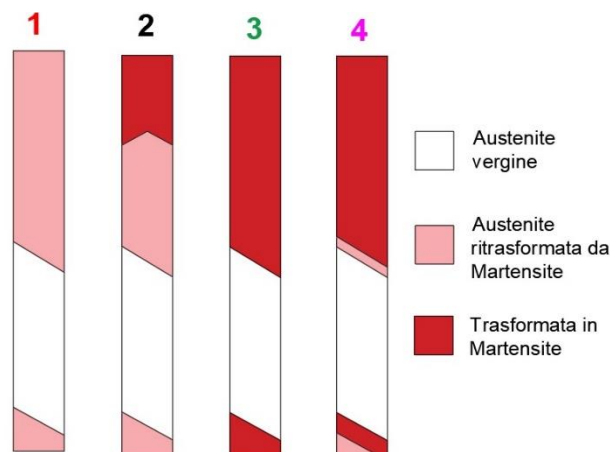


Figura 4. Mappatura dello stato di fase del materiale nei quattro periodi di carico ciclico.

2.3 Post-Processing

La sequenza di termogrammi acquisita durante l'applicazione dei carichi ciclici è stata elaborata previa importazione su MATLAB. L'analisi del segnale ha avuto l'obiettivo di estrarre le mappe di ampiezza e fase della prima armonica (ovvero l'armonica alla frequenza di carico: 3 Hz) e della seconda armonica (6 Hz), tramite due metodologie di signal processing differenti: la Discrete Fourier Transform (DFT) e il Least Square Fitting (LSF). Per applicare la DFT, il numero di frame e la frequenza di campionamento è stata ottimizzata in modo da evitare l'insorgere di spectral leakage [8]. Il LSF, invece, si basa sull'assunzione di un modello analitico per il segnale e sull'identificazione dei parametri del modello che minimizzano una funzione di errore [9],[10]. Con entrambi i metodi sono state ottenute le mappe di ampiezza e fase della prima e seconda armonica.

Per valutare la modulazione della temperatura rispetto alla modulazione del carico, sono state selezionate, come mostrato in Figura 5, tre Regions Of Interest (ROIs) differenti sul termogramma: una in prossimità di una barretta di centraggio del provino, che è connessa alla traversa mobile della macchina di prova, una in corrispondenza della regione austenitica ed una in corrispondenza della regione martensitica. La Figura 5 mostra anche l'andamento della temperatura media da ognuna delle

tre ROI, dalla quale si evince lo stretto legame tra modulazione del segnale di carico e modulazione della risposta di temperatura del materiale.

La ROI identificata come LOAD sfrutta una modulazione del segnale dovuta allo spostamento dell'attuatore mobile della macchina di prova. La barretta orizzontale collegata al grip mobile è più calda rispetto allo sfondo, per cui una ROI che include parte di tale barretta e parte dello sfondo produce un segnale di temperatura che segue la stessa modulazione del segnale di spostamento della macchina di prova [11]. Tale segnale è quindi rappresentativo del carico ciclico applicato ed è utilizzato nel presente studio per calcolare le eventuali differenze di fase tra armoniche di temperatura ed armoniche di carico.

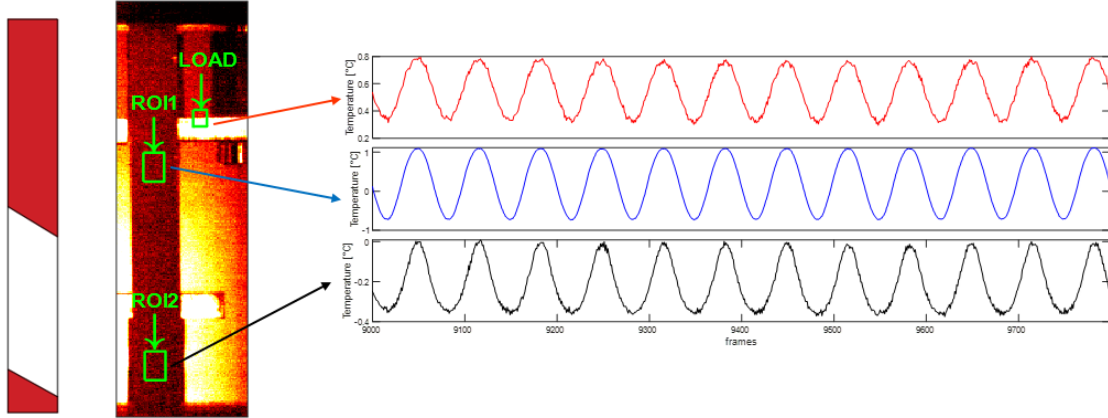


Figura 5. Definizione delle ROI identificate sul termogramma e andamento del rispettivo segnale medio di temperatura.

2.4 Modellazione termomeccanica

Per la modellazione del comportamento termomeccanico del Nitinol, è necessario, innanzitutto, considerare l'equazione della conduzione di calore nella materia solida, scritta sotto forma di bilancio di potenze:

$$\rho C_\varepsilon \dot{T} - k \nabla^2 T = D_m + T \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \dot{\varepsilon}_{ij} + T \rho \frac{\partial^2 H}{\partial T \partial x} \dot{x} + q_s \quad (1)$$

Facendo alcune semplificazioni (Trasformazione adiabatica $\rightarrow \nabla^2 T = 0$; Dissipazione nulla $\rightarrow D_m = 0$; Ampiezza di carico sufficientemente piccola da essere inclusa in una risposta del materiale puramente elastica, insufficiente ad attivare la trasformazione di fase $\rightarrow \mathbf{x} = 0$; Nessuna sorgente di calore esterne $\rightarrow q_s = 0$), l'equazione è semplificata nel seguente modo [12]:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (2)$$

Nel valutare la derivata del tensore delle tensioni rispetto alla temperatura, Wong et al. [13] hanno incluso anche la dipendenza dei parametri elastici (modulo di Young E e coefficiente di Poisson ν) dalla temperatura, pervenendo ad una formulazione nota in letteratura come Legge del Secondo Ordine dell'Effetto Termoelastico:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = \left[-\alpha + \left(\frac{\nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) \sigma_I \right] \dot{\sigma}_I + \left[\frac{(1+\nu)}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right] \sigma_i \dot{\sigma}_i \quad (3)$$

Nella presente applicazione si può ragionevolmente ipotizzare che lo stato di tensione sia mono-assiale, con qualche probabile eccezione limitata alle zone vicine al fronte di trasformazione. Considerando quindi nella formula (3) uno stato di tensione monoassiale σ :

$$\rho C_\varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = - \left[\alpha - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \sigma \right] \dot{\sigma} \quad (4)$$

Considerando nella formula (4) una legge tempo-variante della tensione mono-assiale sinusoidale, del tipo $\sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t)$, si ha:

$$\rho C_\varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = - \left[\alpha - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} (\sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t)) \right] (\sigma_a \omega \cos(\omega t))$$

$$\Delta T = -T_0 \sigma_a \left[\frac{\alpha}{\rho C_\varepsilon} - \frac{1}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \frac{1}{\rho C_\varepsilon} \sigma_m \right] \sin(\omega t) - T_0 \sigma_a^2 \left[\frac{1}{4E^2} \frac{\partial E}{\partial T} \right] \cos(2\omega t)$$

$$\Delta T = -T_0 \sigma_a [k_0 - k_1 \sigma_m] \sin(\omega t) + [-T_0 \sigma_a^2 [k_2] \cos(2\omega t)] \quad (5)$$

Otteniamo quindi, come è possibile vedere nella formula (5), la somma di due termini: il primo alla frequenza fondamentale e il secondo al doppio di tale frequenza. Il segno del coefficiente di $\sin(\omega t)$ nel primo termine determina se il carico e la temperatura sono in fase o in opposizione di fase per quanto riguarda la prima armonica (ω).

L'evidenza sperimentale riscontrata in questo lavoro (vedi Figura 5) e confermata in altri lavori di letteratura [14], mostra che le prime armoniche dei segnali di temperatura e di carico sono in fase tra di loro. Ciò è possibile solamente nel caso in cui il primo termine tra parentesi quadre in eq. (5) risulti negativo e ciò è vero solo se $\frac{\partial E}{\partial T}$ è positivo e, in particolare, maggiore di $\frac{E^2 \alpha}{\sigma_m}$. Se ciò si verifica, anche k_2 risulta positivo.

Quindi, secondo la Teoria di Ordine Superiore dell'Effetto Termoelastico, la prima e la seconda armonica dei segnali di temperatura devono avere fasi tali da rispettare l'andamento schematizzato in Figura 6. In tale figura, per semplicità di rappresentazione, le ampiezze delle due armoniche sono normalizzate ad 1, mentre le fasi sono modulate secondo $\sin(\omega t)$ (curva blu) e $-\cos(2\omega t)$ (curva rossa).

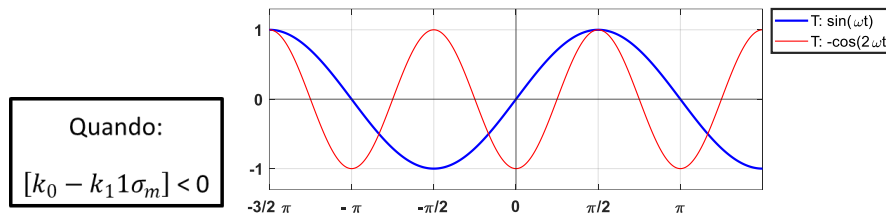


Figura 6. Rappresentazione schematica della previsione della prima e seconda armonica del segnale di temperatura secondo le previsioni della teoria termoelastica del secondo ordine.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Di seguito vengono mostrate e commentate le mappe a campo intero che mostrano l'ampiezza e la fase della prima e della seconda armonica, per tutti e quattro gli intervalli di carico ciclico definiti in Figura 3.

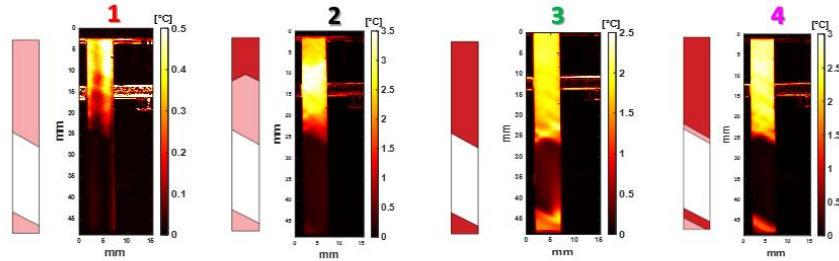
3.1 Mappe di ampiezza e fase prima armonica

Come mostrato in Figura 7, le mappe di ampiezza della prima armonica (E) mostrano un segnale più elevato nelle zone martensitiche, ma anche nelle zone austenitiche che precedentemente avevano subito una trasformazione in martensite, in questo caso durante il test preliminare.

Le mappe di fase della prima armonica (Φ_E) mostrano invece un comportamento peculiare nel ciclo 1, con un salto di fase di 180° tra la zona di austenite vergine e la zona di austenite precedentemente trasformata in martensite durante il test preliminare. Negli altri cicli è possibile vedere invece dei salti

di fase più piccoli che sono, tuttavia, più accentuati in corrispondenza dei fronti di trasformazione e che riescono a riprodurre bene la progressione incrociata dei fronti di trasformazione, che spesso si presenta come meccanismo intrinseco per ridurre il momento flettente spurio sul piano, dovuto all'inclinazione del fronte di trasformazione [12].

Mappe di ampiezza della prima armonica (E)



Mappe di fase della prima armonica (Φ_E)

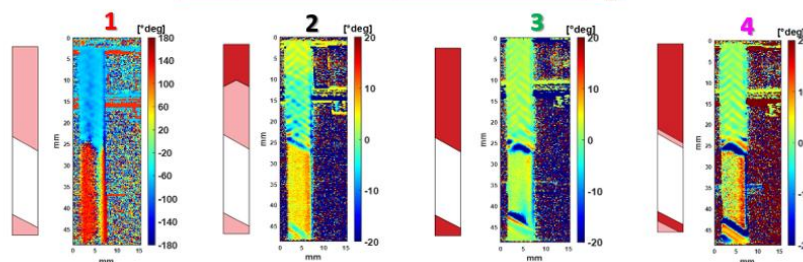
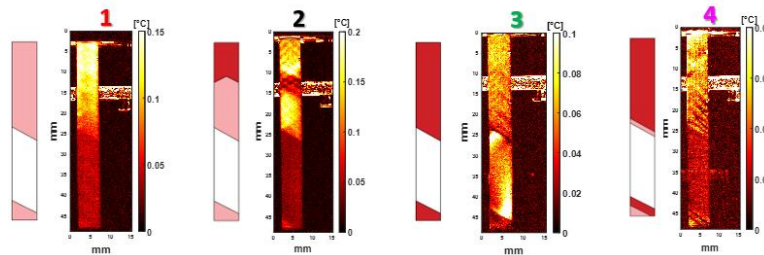


Figura 7. Mappe di ampiezza e fase della prima armonica.

3.2 Mappe ampiezza e fase seconda armonica

In Figura 8 sono invece mostrate le mappe di ampiezza (D) e fase (Φ_D) della seconda armonica. È possibile vedere che i valori di D sono di circa 2 ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori di E e che, anche nel caso delle mappe di Φ_D , è presente un salto di 180° tra le zone austenitiche e martensitiche. Si può quindi apprezzare come la fase della seconda armonica sia in grado di mappare in modo molto accurato le zone ove il materiale è in fase austenitica o martensitica.

Mappe di ampiezza della seconda armonica (D)



Mappe di fase della seconda armonica (Φ_D)

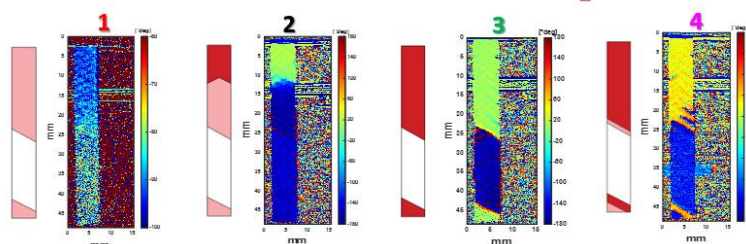


Figura 8. Mappe di ampiezza e fase della seconda armonica.

3.3 Confronto con le previsioni della teoria termoelastica

La Figura 9 mostra l'andamento delle fasi di quattro segnali: il segnale di spostamento restituito direttamente dal sensore LVDT della macchina di prova (indicato in figura con Displacement), il segnale medio temperatura dalla ROI LOAD già definita in Figura 5 (indicata in figura come ROI), il segnale medio di temperatura dalla ROI posizionata nella zona trasformata in martensite (indicata in figura come ROI_M) ed infine il segnale medio di temperatura dalla ROI posizionata nella zona con fase austenitica (indicata in figura con ROI_A). Il grafico nella prima riga di Figura 9 riporta invece la previsione teorica ottenuta dal modello teorico introdotto nella sezione 2.4.

Si osserva innanzi tutto che le fasi di prima e seconda armonica dei segnali Displacement e ROI sono molto simili tra loro. Ciò porta a due conclusioni: da un lato la scelta di sfruttare tale effetto per ricavare un segnale di temperatura (la ROI LOAD di Figura 5) che sia effettivamente rappresentativo della modulazione del segnale di spostamento sembra essere corretta, dall'altro si osserva come la macchina di prova materiali introduca una seconda armonica come segnale spurio, sebbene il segnale settato sul controller sia di tipo puramente sinusoidale.

Per quanto riguarda le fasi di prima e seconda armonica di ROI_A e ROI_M si osserva che solo la ROI_A restituisce un comportamento in accordo con la teoria termoelastica esposta in Sezione 2.4. È curioso invece evidenziare come la ROI_M, che presenta uno sfasamento della seconda armonica di 180° rispetto a ROI_A, risulti essere in fase con la seconda armonica dei segnali di spostamento (ovvero Displacement e ROI).

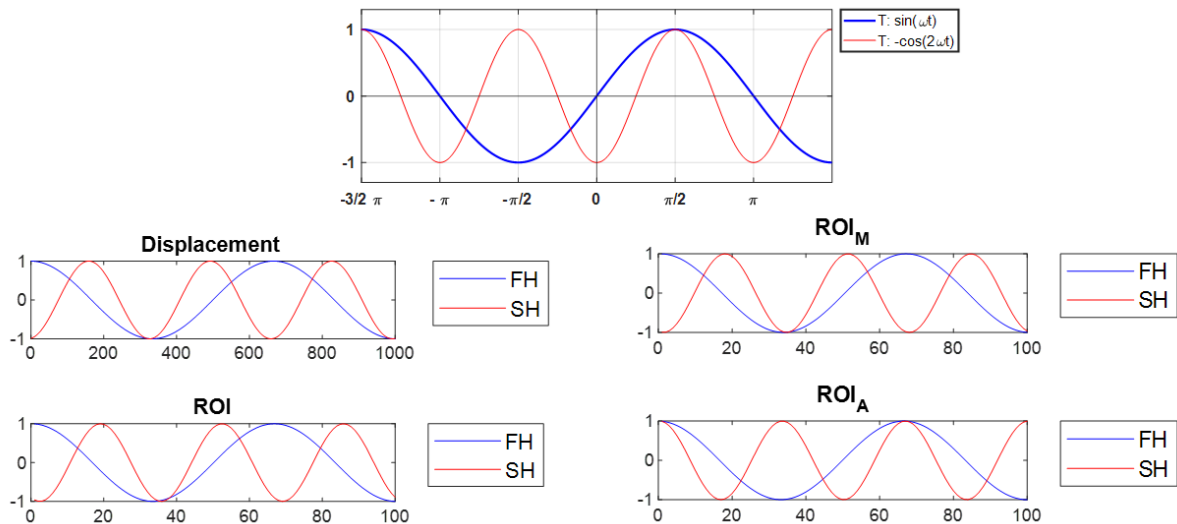


Figura 9. Confronto delle fasi della prima e seconda armonica dei segnali di spostamento, carico e temperatura di ROI_M e ROI_A con le fasi del segnale di temperatura in opposizione di fase con il carico e quando sono rispettate le previsioni della teoria termoelastica del secondo ordine.

4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato il contenuto armonico del segnale di temperatura su un provino di trazione in Ntinol parzialmente trasformato, ove sono presenti zone in fase austenite e zone in fase martensite.

Una prima notevole osservazione riguarda il fatto che il segnale di temperatura presenta una modulazione che è indotta dalla modulazione del segnale di carico. C'è quindi un forte effetto di variazione reversibile della temperatura, che nei materiali solidi è tipicamente legato all'effetto termoelastico.

Sono stati ricavati e mappati i valori di ampiezza e fase di due componenti armoniche del segnale di temperatura, precisamente la prima armonica alla frequenza del carico applicato e la seconda armonica al doppio della frequenza di carico. Tali mappe mostrano tutte delle distribuzioni che sono legate alla fase cristallina presente nel materiale. La correlazione migliore si è ottenuta con la distribuzione della fase della seconda armonica che presenta un salto di 180° tra zone con fase di tipo austenite e martensite.

Tale comportamento è stato messo a confronto con le previsioni di un modello analitico corrispondente alla Teoria Termoelastica del Secondo Ordine. Tale teoria è in grado di prevedere quanto osservato sperimentalmente sulla prima armonica, ovvero che segnale di carico e temperatura sono in fase. Relativamente alla seconda armonica, solo la zona in fase austenite rispetta la previsione teorica.

La capacità di utilizzare le informazioni provenienti dalle armoniche di temperatura in strutture di Nitinol sottoposti a carichi dinamici, e quindi di poter sfruttare la correlazione tra modulazione di carico e modulazione di temperatura, può avere implicazioni importanti relativamente alla caratterizzazione sperimentale di tali materiali. La tecnica termografica unita alle metodologie di signal processing hanno la caratteristica di essere facili da implementare, fornendo informazioni a campo intero quasi in tempo reale.

Rimane da approfondire e chiarire meglio il ruolo dell'effetto termoelastico e di altre modalità di accoppiamento termomeccanico, quali l'effetto pseudo-calorico, così come il ruolo del contenuto armonico spurio del segnale di carico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Wadood, "Brief overview on nitinol as biomaterial," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016. 2016.
- [2] L. Petrini and F. Migliavacca, "Biomedical Applications of Shape Memory Alloys," *J. Metall.*, vol. 2011, p. 501483, 2011.
- [3] D. Stoeckel, A. Pelton, and T. Duerig, "Self-expanding Nitinol stents: Material and design considerations," *Eur. Radiol.*, vol. 14, no. 2, pp. 292–301, 2004.
- [4] L. Zheng, Y. He, and Z. Moumni, "Effects of Lüders-like bands on NiTi fatigue behaviors," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 83, pp. 28–44, 2016.
- [5] L. G. Machado and D. C. Lagoudas, *Modeling of SMAs*. 2008.
- [6] B. Reedlunn, S. Daly, L. Hector, P. Zavattieri, and J. Shaw, "Tips and tricks for characterizing shape memory wire part 5: Full-field strain measurement by digital image correlation," *Exp. Tech.*, vol. 37, no. 3, pp. 62–78, 2013.
- [7] D. Delpueyo, A. Jury, X. Balandraud, and M. Grédiac, "Applying Full-Field Measurement Techniques for the Thermomechanical Characterization of Shape Memory Alloys: A Review and Classification," *Shape Mem. Superelasticity*, vol. 7, no. 4, pp. 462–490, Dec. 2021.
- [8] A. Breitenbach, "Against spectral leakage," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 25, no. 2, pp. 135–142, 1999.
- [9] S. Di Leonardo, R. Cappello, G. Burriesci, and G. Pitarresi, "Investigation of the thermomechanical response of cyclically loaded niti alloys by means of temperature frequency domain analyses," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 24, 2021.
- [10] R. Cappello, G. Meneghetti, M. Ricotta, and G. Pitarresi, "On the correlation of temperature harmonic content with energy dissipation in C45 steel samples under fatigue loading," *Mech. Mater.*, p. 104271, Mar. 2022.
- [11] B. R. Boyce and J. R. Lesniak, "Thermoelastic measurement techniques enabled by self-reference," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 7, pp. 125–127, 2019.
- [12] S. Di Leonardo, G. Pitarresi, and G. Burriesci, "Standard mechanical testing is inadequate for the mechanical characterisation of shape-memory alloys: Source of errors and a new corrective approach," *Mater. Des.*, vol. 216, p. 110538, 2022.
- [13] A. K. Wong, R. Jones, and J. G. Sparrow, "Thermoelastic constant or thermoelastic parameter?," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 48, no. 8, pp. 749–753, 1987.
- [14] J. M. Dulieu-Barton, J. Eaton-Evans, E. G. Little, and I. A. Brown, "Thermoelastic Stress Analysis of Vascular Devices," *Strain*, vol. 44, no. 1, pp. 102–118, 2008.