



## Use of FBG sensors for the monitoring of cultural heritage structures and monuments

### Impiego dei sensori FBG per il monitoraggio di beni di interesse storico artistico

C. Vendittozzi, F. Felli, A. Brotzu, G. Saviano

*Dipartimento I.C.M.A., Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma*

M. A. Caponero

*Centro Ricerche ENEA, Via Enrico Fermi 13, 00044 Frascati, Roma*

---

**ABSTRACT.** Fiber Bragg Grating sensors (FBG) are widely used for monitoring the stress states of engineering structures. Due to their fundamental features, primarily their small size, which enables minimal interference with the physical characteristic being measured and the element under investigation, and the very high sensitivity, up to  $0.1 \mu\epsilon$  (microstrain) for the mechanical deformation and up to  $0.1^\circ \text{C}$  for temperature changes, these sensors are particularly suitable for long term, real time, observation, of structures at risk, from modern civil buildings to historical and cultural heritage structures. Purpose of this paper is to show two applications of FBG sensors, one on a bronze statues, where were found cracks during the restoration phase. The second application is related to the use of an FBG sensors system to monitor some cracks detected in one of the towers of the Aurelian walls in Rome. In both applications, FBG sensors were applied on cracks, in order to check the deformations induced by known loads applied, on the damaged as well as on the undamaged parts, to evaluate risk that the presence of such cracks represents for the integrity of the statue, for the first case, and for the Aurelian walls for the second case, in the near future. The paper describes the obtained results, suggesting the FBG sensors as a nondestructive investigative tool for a range of key applications on historical heritage interests.

**SOMMARIO.** La salvaguardia delle strutture e dei beni appartenenti al patrimonio storico artistico rivestono un ruolo fondamentale nella gestione socio-culturale di un paese, in particolare delle strutture più antiche che necessitano di maggiori attenzioni. A partire da monumenti di interesse religioso ed artistico quali chiese e basiliche, eremi ed abbazie, ad antiche infrastrutture come ponti e acquedotti o mura perimetrali, fino a concludere con strutture civili più moderne comunque di interesse architettonico. Per tutte queste, processi di degrado dovuti all'azione del tempo, quindi ad agenti naturali, e all'intervento dell'uomo, portano ad un graduale deterioramento e al danneggiamento, comportando a volte, nei casi di strutture/costruzioni, un grave rischio di collasso e quindi di perdita definitiva di beni dal valore inestimabile. Tutto questo rende inevitabili una regolare manutenzione ed interventi di riparazione. La pratica, negli anni (nei secoli) ha evidenziato come molto spesso la valutazione delle condizioni dello stato di salute di un'opera nonché la scelta degli strumenti migliori per gli interventi di riparazione siano resi ancora più difficili dalla mancanza di una documentazione che descriva le tecniche di lavorazione ed i materiali impiegati nella realizzazione dell'opera stessa. A sopperire alle lacune nella documentazione originale può intervenire un adeguato sistema di monitoraggio del manufatto in grado di verificarne le condizioni di salute strutturale anche in tempo reale e che permetta di ottimizzare le fasi di conservazione e riparazione. Restando nell'ambito delle costruzioni, la conoscenza precisa del comportamento

---



di una struttura, in tempo reale, è di notevole importanza anche dal punto di vista della salvaguardia delle strutture circostanti, a garanzia della vita delle persone che le frequentano giornalmente (chiese, musei, ecc). Infatti la salvaguardia delle opere ed edifici di interesse storico-artistico può essere quindi vista sia come tutela del patrimonio culturale in se, sia come garanzia dell'incolumità dei fruitori degli stessi.

Un adeguato sistema di monitoraggio dovrebbe lavorare nelle stesse condizioni dell'opera che sta controllando, essere soggetto allo stesso ambiente più o meno aggressivo ed agli stessi eventi atmosferici. Dovendo convivere con l'opera stessa si dovrebbe rendere praticamente invisibile, per non alterarne l'aspetto e la funzionalità.

I sensori in fibra ottica, in particolare i cosiddetti sensori a reticolo di Bragg, FBG (Fiber Bragg Grating), risultano, essere in questo caso, la soluzione ideale. Le loro caratteristiche intrinseche, quali l'immunità alle interferenze elettromagnetiche, la resistenza alle aggressioni chimiche ambientali, la quasi totale assenza di perdite di segnale di trasmissione a lunga distanza e la stabilità della misura nel tempo, la moltiplicabilità (multiplexing) dei sensori su una singola catena di fibra e soprattutto le dimensioni molto ridotte, li rendono particolarmente adatti a lavorare per la salvaguardia di beni storico/artistici.

Il presente lavoro vuole proporre un sistema di sensori FBG, come valido strumento di indagine non distruttiva e come strumento di ottimizzazione della manutenzione periodica e degli interventi di restauro per le più disparate applicazioni nell'ambito dei beni culturali. Nella prima parte verranno presentate le caratteristiche fondamentali dei sensori FBG e i principi di funzionamento, nella seconda verranno presentati i risultati di due applicazioni; la prima su statue di bronzo, sulle quali sono state rinvenute, in fase di restauro, delle fessurazioni, e la seconda su una cinta muraria di epoca romana sulla quale erano presenti delle crepe critiche che potevano metterle a rischio l'integrità.

**KEYWORDS.** Fiber optic sensors; FBG; Cultural and historical heritage; Structural health monitoring; Crack prevention and monitoring.

## CARATTERISTICHE E PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEI SENSORI FBG

Inizialmente le fibre ottiche sono state utilizzate in prevalenza nelle telecomunicazioni, già da qualche anno si è pensato di sfruttare la loro notevole sensibilità all'influenza delle grandezze esterne (sollecitazioni meccaniche, temperatura, ecc) per lo sviluppo di nuovi sensori atti a misurare proprio tali grandezze.

Oggi, i sensori in fibra ottica sono potenzialmente più sensibili e flessibili dei sensori tradizionali; rispetto a quest'ultimi presentano infatti numerosi vantaggi: sono immuni da interferenze elettromagnetiche, essendo di vetro sono elettricamente e chimicamente passivi, possono sia venire inglobati all'interno del materiale da monitorare che incollati sulla sua superficie. Il principale vantaggio dei sensori a fibra ottica è quello di essere sostanzialmente insensibili ai rumori di tipo elettromagnetico, per questo sono particolarmente adatti in tutti quei casi in cui tali disturbi sono difficilmente eliminabili.

I sensori FBG sono fondamentalmente degli estensimetri in grado di misurare le deformazioni (strain gauge) delle strutture su cui sono applicati; dei diversi tipi di sensori su fibra ottica oggi presenti sul mercato, costituiscono la tipologia più utilizzata ed affidabile tra sensori di deformazione.

Tali misure sono realizzabili grazie alla presenza di reticoli foto-incisi nel nucleo (core) della fibra ottica, i così detti reticoli di Bragg (Bragg gratings). Il reticolo è realizzato attraverso il processo di foto-incisione durante il quale viene realizzata una variazione periodica dell'indice di rifrazione. I reticoli sono ottenuti esponendo lateralmente il core di una fibra monomodale ad una periodica esposizione a luce ultravioletta intensa. L'esposizione produce un aumento permanente dell'indice di rifrazione del nucleo della fibra, creando un indice di modulazione fisso in funzione del tipo di esposizione.

Tipicamente l'area della fibra interessata dal sensore è pari a circa 1.5-2 cm di lunghezza, essendo il periodo (passo del reticolo) di circa 500 nm, si ottengono circa 20000 cambiamenti di indice di rifrazione per centimetro, ovvero 20000 linee trasversali nella rappresentazione di Fig. 1.

Le bande con diverso indice di rifrazione si trovano tra loro ad una distanza nota  $\Lambda$  che costituisce il periodo caratteristico o passo del reticolo,  $p$ . L'indice di rifrazione ( $n_e$ , tipicamente 1.46) della fibra riflette solo il segnale con una precisa lunghezza d'onda proporzionale al periodo del reticolo chiamata lunghezza d'onda di Bragg ( $\lambda_b$ ). Le lunghezze d'onda



diverse da  $\lambda_b$ , invece, vengono trasmesse, ovvero attraversano il reticolo, Fig. 2. Le FBG, dunque, possono agire come filtri e selezionare una particolare frequenza presente sul segnale ed estrarla (riflessione all'indietro) dalle altre, [1, 2]. La lunghezza d'onda di Bragg è legata al  $p$  dalla semplice relazione:

$$\lambda_b = 2n_c \Lambda \quad (1)$$

dove  $n_c$  è legato all'indice di rifrazione del core; al variare del  $p$  cambia la lunghezza d'onda della luce riflessa.

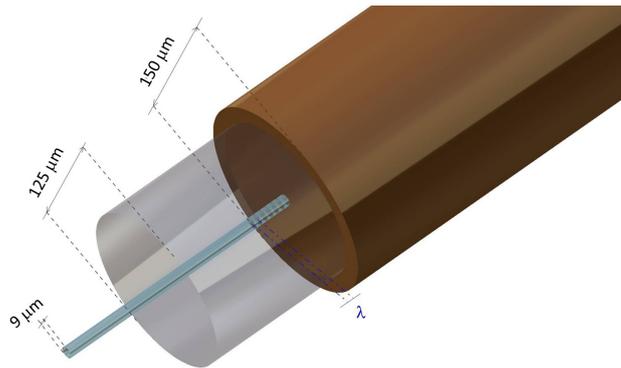


Figura 1: Rappresentazione 3D di un tratto di fibra ottica con reticolo di Bragg.

Figure 1: 3D representation of a segment of optical fiber with a Bragg grating.

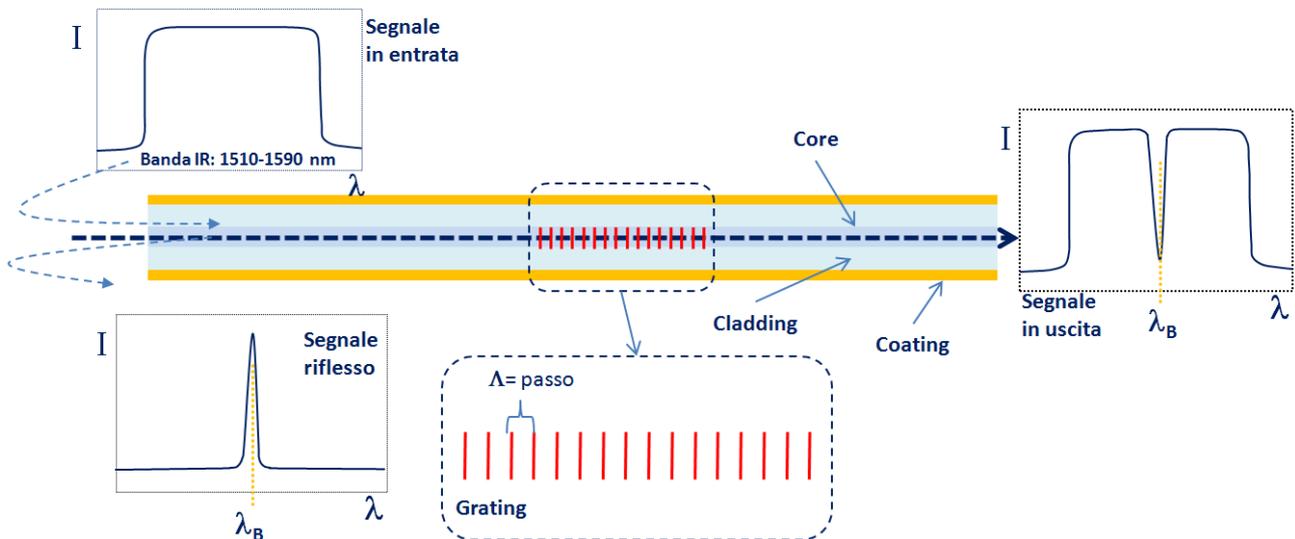


Figura 2: Principio di funzionamento di un reticolo di Bragg.

Figure 2: Working principle of a Bragg grating.

Il reticolo di Bragg agisce come sensore quando viene fissato ad una struttura che trasmette le sue deformazioni alla fibra ottica: un allungamento o una compressione del reticolo porta ad una modifica del suo periodo e implica quindi uno spostamento della lunghezza d'onda del segnale riflesso. Poiché il periodo iniziale del reticolo è un parametro noto, analizzando lo spostamento della lunghezza d'onda riflessa è possibile risalire alla deformazione applicata al reticolo, Fig. 3.

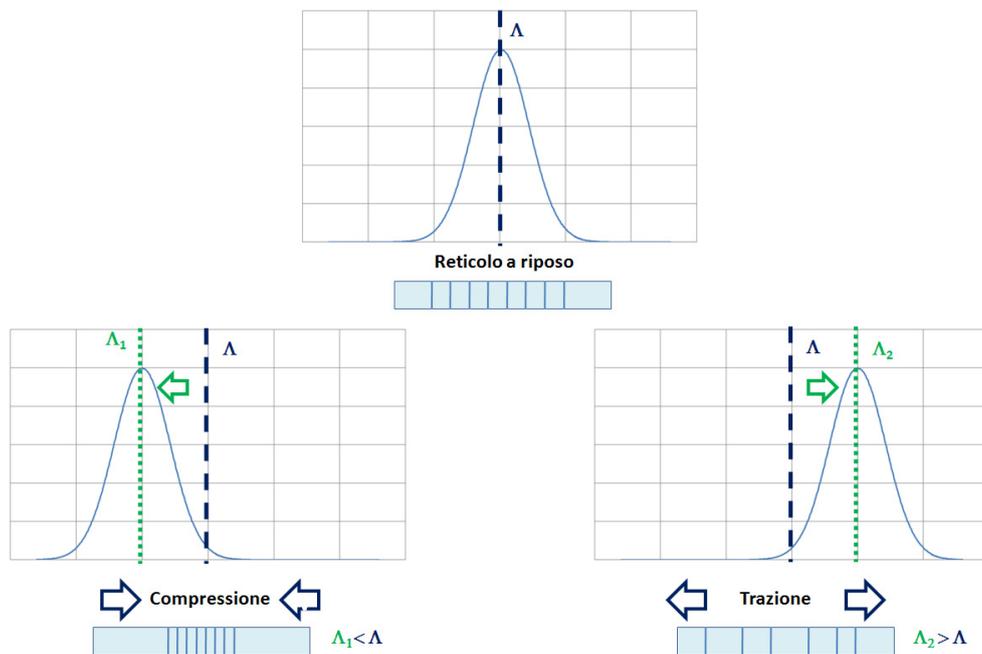


Figura 3: Variazione del  $\lambda$  del reticolo in funzione della sollecitazione meccanica.

Figure 3: Variation of the  $\lambda$  of the grating due to the mechanical stress.

La lunghezza d'onda riflessa può variare anche in funzione della temperatura, sia per effetto della dilatazione del vetro di cui è costituita la fibra, sia per la variazione dell'indice di rifrazione del vetro in funzione della temperatura, nella (1)  $n_c$  varia con la temperatura,  $\lambda$  varia con la deformazione. Pertanto il reticolo di Bragg può essere impiegato anche come sensore di temperatura.

#### Vantaggi dei sensori FBG

I sensori a fibra ottica presentano una serie di vantaggi rispetto ai tradizionali sensori basati su sistemi elettrici o meccanici che li rendono particolarmente adatti al monitoraggio dello stato di salute strutturale, [3-5], tra questi:

- ✓ Dimensioni: il diametro esterno di un sensore FBG misura 150 micron (nel caso di coating in poly-immide); ciò significa che tali sensori hanno una bassa intrusività e quindi si possono utilizzare, ad esempio, per posizionarli in spazi molto ristretti oppure possono essere inglobati in materiali compositi per ottenere "smart structures".
- ✓ Immunità alle interferenze elettromagnetiche: un reticolo di Bragg è un componente passivo, non necessita cioè di alimentazione per il suo funzionamento e inoltre il materiale con cui sono realizzate le fibre ottiche, il vetro, è un materiale dielettrico quindi i campi elettromagnetici non possono ovviamente indurre correnti elettriche in esso.
- ✓ Alta risoluzione e accuratezza: un sensore FBG presenta una capacità di rilevare una variazione molto piccola della grandezza da misurare (risoluzione) pari a 0,1 parti per milione ( $1 \times 10^{-7}$ ) e inoltre presenta un'elevata accuratezza nel determinare massimo scostamento tra il valore misurato e il valore reale della grandezza fisica misurata.
- ✓ Stabilità: i sensori a fibra ottica FBG sono caratterizzati da una propria stabilità intrinseca legata al materiale che costituisce la fibra ottica, il vetro. Trattandosi come detto di componenti passivi non presentano derive nel tempo dovute all'invecchiamento dei materiali, alla corrosione, all'azione degli agenti atmosferici quindi una volta installati possono essere impiegati per anni senza la necessità di ri-calibrazioni. Ciò consentirebbe, ad esempio, di montare i sensori su delle strutture e interrogare gli stessi a distanza anche di anni semplicemente portando l'unità di interrogazione sul luogo.
- ✓ Elevatissima moltiplicazione su singola fibra: è possibile integrare su una singola fibra ottica un numero di sensori molto elevato, in questo modo una singola catena di sensori, ovvero un singolo tratto di fibra ottica è in grado di sopperire alla necessità di un sistema di sensori articolato ed in grado di misurare diverse grandezze contemporaneamente (i.e. un set di FBG può comprendere sensori per misurare deformazioni, temperatura, umidità, variazioni di concentrazioni, ecc).



- ✓ Installazione a grande distanza: la fibra ottica è una delle portanti fisiche con la più bassa attenuazione di segnale quindi è possibile porre il sistema di interrogazione ad una distanza molto elevata (decine di km) dalla rete dei sensori. Tra gli ulteriori vantaggi possiamo annoverare la praticità ed economia nell'installazione, la non necessaria calibrazione iniziale o durante la vita del sensore, la possibilità di compensare gli effetti dovuti alla temperatura ecc.. Lo sviluppo dei sensori FBG come sensori di deformazioni ha avviato moltissime applicazioni grazie alle peculiarità descritte, [6].

## MURA AURELIANE – ROMA MUSEO DELLE MURA, PORTA S. SEBASTIANO

Un aspetto molto interessante dello *structures health monitoring* è rappresentato nell'ambito delle costruzioni di interesse storico, da strutture ingegneristiche quali ponti, acquedotti e fortificazioni, come cinta murarie, torrioni, ecc nelle quali è altrettanto importante sia monitorare la struttura per la salvaguardia della stessa che salvaguardare l'integrità dei visitatori o di quanti risiedono nell'area.

Viene descritto un sistema sperimentale, customizzato, di monitoraggio che è stato applicato ad alcune fessurazioni rilevate in una delle torri delle mura Aureliane, presso il museo di Porta S. Sebastiano a Roma, Fig. 4.

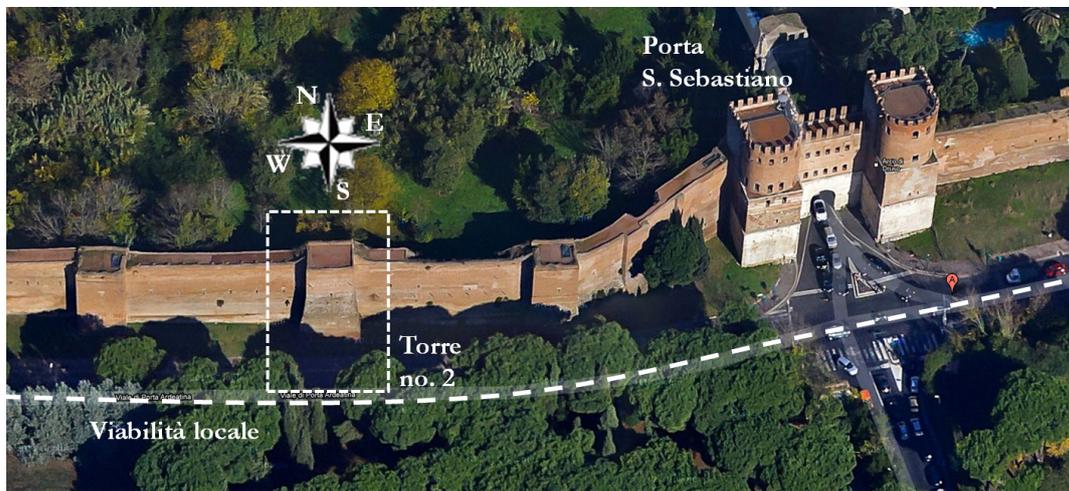


Figura 4: Porta San. Sebastiano, Roma.

Figure 4: S. Sebastiano gate, Rome.

Le mura Aureliane, sono un'opera di fortificazione risalente al 270 a.c., come tali, nel corso dei secoli, si è dovuto ricorrere a numerosi interventi di restauro e ristrutturazione, per intervenire sia sui danni del tempo che su quelli prodotti dagli agenti atmosferici, e dalle sollecitazioni tutt'altro che naturali, dovute in particolare alle vibrazioni derivanti dal traffico circostante. Per verificarne lo stato di salute strutturale, in tempo reale, si è proposto un sistema di monitoraggio costituito da sensori FBG.

Si è scelto di intervenire sulla torre no. 2, visibilmente danneggiata da diverse fessurazioni che ne attraversano le 4 pareti laterali costituenti il perimetro della torre stessa (a sezione quadrata), e per la quale è già prevista, nel prossimo futuro, una campagna di restauro.

La torre risulta evidentemente danneggiata. Sulle due pareti opposte (Est ed Ovest) del camminamento sono presenti due crepe che la attraversano longitudinalmente. Come anticipato, lo scopo della campagna di acquisizioni è quello di verificare l'effettivo stato di attività delle suddette crepe, la risposta alle sollecitazioni meccaniche indotte dal traffico della strada limitrofa e quelle dovute alle variazioni climatiche ambientali, eventi atmosferici quali pioggia e variazioni di temperatura, giorno notte e cambiamenti stagionali. Il monitoraggio è svolto nell'ambito di una collaborazione scientifica volta a verificare la validità del sistema di misura in tale applicazione, per un monitoraggio su lungo periodo nell'ambito della salvaguardia dei beni storico/architettonici.

Il sistema è costituito da 4 sensori in fibra ottica, FBG che lavorano accoppiati a due a due, un sensore per la lettura delle deformazioni meccaniche ed un sensore per la compensazione termica che permette di distinguere gli effetti dovuti alle sole variazioni di temperatura. I sensori dedicati alla misura delle deformazioni meccaniche agiscono come dei veri e

propri fessurimetri, sono collegati a sistema di acquisizione mediante linea di dorsale provvisoria in fibra ottica attestata nei locali del museo e monitorati continuamente con frequenza di campionamento pari a 1Hz. Le due coppie di sensori sono state posizionate su due pareti opposte della torre interessata dalle crepe. Il fessurimetro denominato S1 è installato all'interno della torre su una fessurazione presente sulla parete est, il fessurimetro denominato S2 è installato all'interno della stessa torre su una fessurazione presente sulla parete opposta, parete ovest.



Figura 5: Posizionamento di un sensore FBG a cavallo della fessura da monitorare.

Figure 5: Placement of an FBG sensor on a crack.

I grafici riportati nelle figure mostrano la *time history* del grado di apertura delle fessurazioni e della variazione di temperatura rilevata in corrispondenza dei fessurimetri; i valori sono riferiti alla condizione in essere alle ore 09:30 giorno corrispondente all'inizio del monitoraggio; la *time history* riporta i dati acquisiti in 24h, fino alle ore 09:00 del giorno successivo, con intervallo di campionamento pari a 30 minuti. La campagna di acquisizioni è durata complessivamente circa cinque mesi.

Dai grafici risulta una evidente correlazione fra variazione di temperatura e dilatazione (Fig. 6 e 7); le dilatazioni misurate risultano compatibili con le normali dilatazioni termiche attese per la tipologia della opera muraria in oggetto.

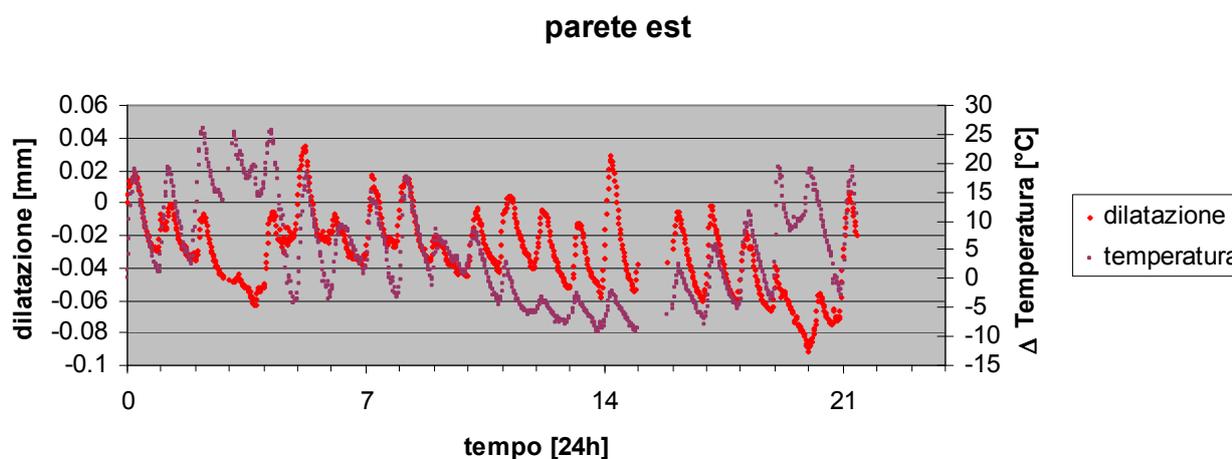


Figura 6: Monitoraggio di fessurazione sulla parete est della Torre 2.

Figure 6: Monitoring of a crack on the east wall of the tower no. 2.

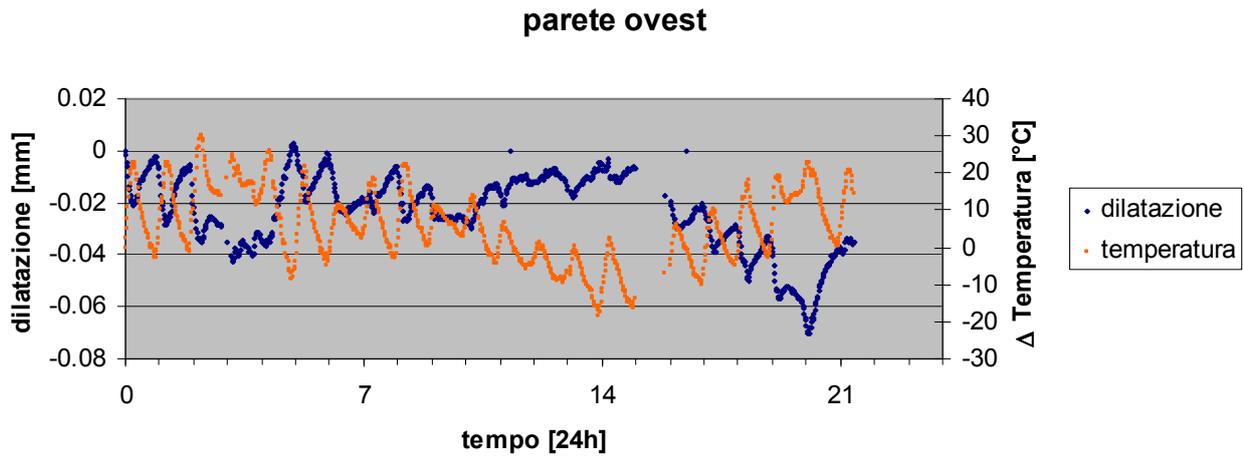


Figura 7: Monitoraggio di fessurazione sulla parete ovest della Torre 2.

Figure 7: Monitoring of a crack on the west wall of the tower no. 2

La Fig. 8 evidenzia la correlazione fra tutti i parametri misurati. Nei due punti di misura le variazioni di temperatura evolvono 'in fase', con modeste differenze quantitative attribuibili alla differente esposizione a fenomeni ambientali. Le dilatazioni delle due fessurazioni evolvono in evidente 'opposizione di fase', fornendo indicazione che il complesso murario della torre risponde alle sollecitazioni termiche ambientali con movimento torsionale.

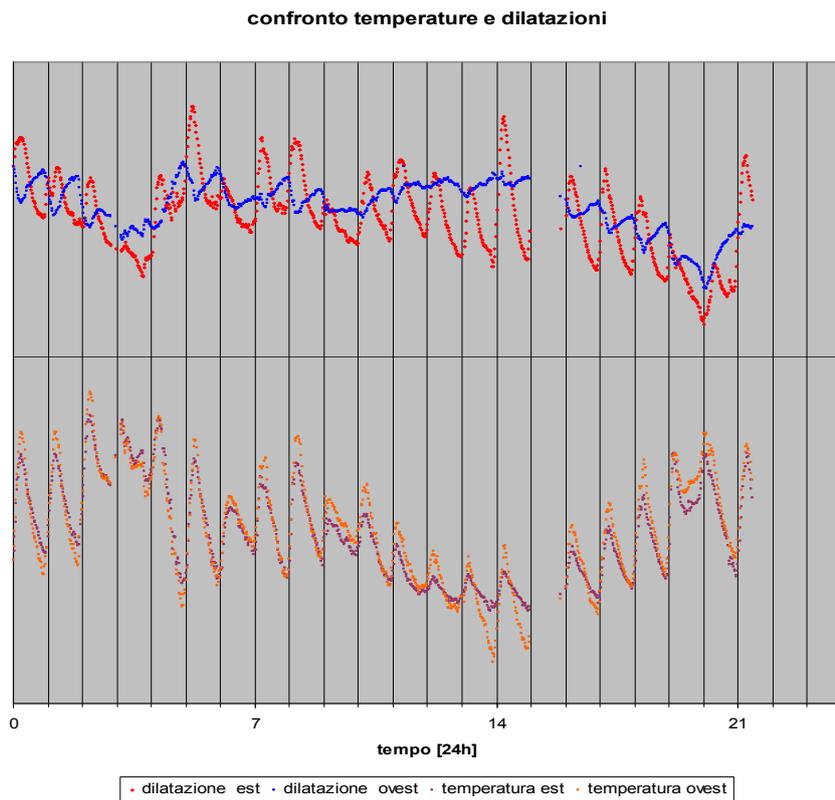


Figura 8: Monitoraggio di fessurazioni sulla parete ovest e sulla parete est della Torre 2.

Figure 8: Monitoring of cracks on the east and west walls of the tower no. 2.

I risultati potranno essere utilizzati in una prossima campagna di restauro in modo da indirizzare i restauratori nella scelta delle tecniche e degli strumenti migliori per intervenire sulle fessurazioni.



## STATUA EQUESTRE DI VITTORIO EMANUELE II - BRONZO - NAPOLI

La campagna di misura effettuata a Napoli, sulla statua equestre in bronzo di Vittorio Emanuele di Savoia, ha avuto lo scopo di verificare lo stato di alcune cricche rivelate al momento del restauro e di seguire, monitorare, il trasferimento della statua dal cantiere di restauro fino al luogo di esposizione finale. In particolare durante il tragitto si è monitorato lo stato della zampa restaurata sulla quale erano state scoperte le cricche. In Fig. 9 un'immagine del trasferimento della statua al cantiere di restauro, con l'indicazione della zona interessata dal danno.



Figura 9: Fase di trasferimento della statua al cantiere di restauro, zona interessata dalle cricche.

Figure 9: Transferring phase of the statue to the restoration site, circled in red the area affected by cracks.

Durante una fase di restauro è stata rilevata la presenza di fessurazioni (cricche) nel bronzo in corrispondenza del tendine flessore della zampa posteriore sinistra. È stato ipotizzato che tali fessurazioni si siano formate durante il sollevamento della statua dal basamento originale per il trasferimento alla sede del cantiere, ma già innescate dalla corrosione dell'asta di acciaio presente nella zampa come armatura/rinforzo della stessa.

La zampa posteriore sinistra, interessata dalla presenza di cricche, rappresenta uno dei tre appoggi principali della statua, sostenuta dal triangolo di appoggio costituito dalla zampa anteriore destra, la zampa posteriore sinistra e la zampa posteriore destra.

Scopo della campagna di monitoraggio è stato valutare se il lavoro di restauro sulla cricca avesse messo in sicurezza la stabilità della statua durante lo spostamento e il riposizionamento nella sede definitiva.

Il monitoraggio è stato effettuato utilizzando sensori estensimetrici ottici (FBG, Fiber Bragg Grating, ovvero fibre ottiche con reticoli di Bragg).

La zona interessata dal difetto copre un'area di circa 35x10 cm. La zona danneggiata è stata riprodotta nel disegno di Fig. 10 che aiuta ad individuarne la posizione, la conformazione delle fessurazioni; nella stessa, a destra, è riportato lo schema di disposizione dei sensori utilizzati. In Fig. 11 sono riportati degli ingrandimenti dell'area interessata dalle cricche.

Un'analisi SEM EDS preliminare, del materiale prelevato dalla zona corrosa, intorno alle cricche, ha rivelato la presenza di ossidi di Fe, probabilmente provenienti dalla corrosione della staffa interna di sostegno, rappresentata in Fig. 12; sono stati individuati anche, in misura minore, frammenti costituiti da prodotti minerali del Cu provenienti dal metallo della statua.



È stata rilevata anche la presenza di elementi come Al, Si, S, Ca, Cl, ecc, da imputarsi agli inquinanti presenti nell'ambiente urbano dove è situata la statua stessa.

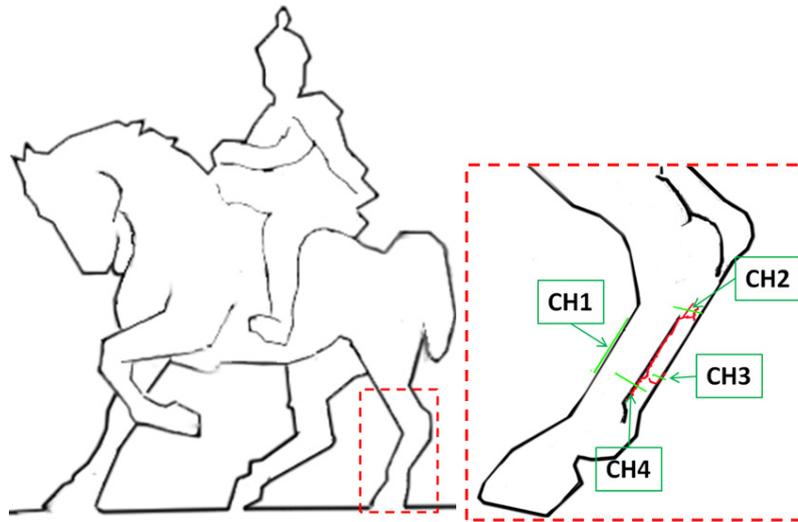


Figura 10: Schema posizionamento dei sensori FBG.

Figure 10: FBG sensors positioning scheme.

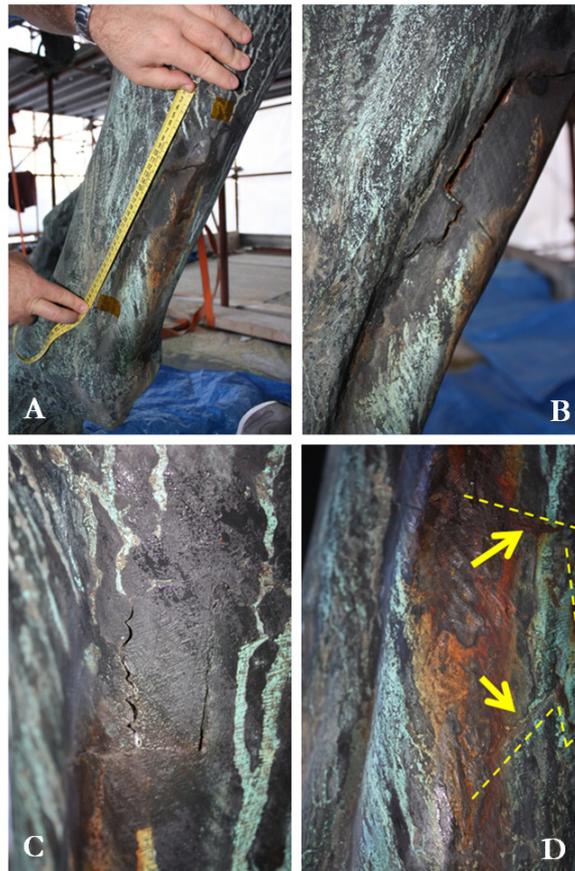


Figura 11: Area interessata dalle fessurazioni.

Figure 11: Area affected by cracks.

### *Ipotesi della dinamica di formazione della Cricca*

Quanto rilevato induce una prima ipotesi della la dinamica con cui si è sviluppata la cricca.

La barra di rinforzo interna, che si ipotizza vada dal basamento a circa metà della zampa interessata è stata notevolmente corrosa.

I prodotti di corrosione hanno generato un aumento del volume all'interno della zampa producendo una pressione favorevole all'apertura della cricca. Il supporto corroso, inoltre, avendo caratteristiche meccaniche inferiori, riduce le proprietà strutturali complessive.

L'azione combinata della dilatazione della barra di ferro sul bronzo stesso, e la perdita della capacità strutturale, che ha fatto gravare maggiormente il carico sulla zampa di bronzo, al momento del sollevamento della statua per il trasferimento, potrebbe aver provocato l'insorgenza di tali cricche.

La procedura di intervento ha previsto, per la prima fase, l'utilizzo di 3 sensori FBG per verificare se le cricche fossero o meno ancora attive.

### *Prima fase di acquisizione*

I sensori sono stati applicati secondo lo schema presentato in Fig. 10:

#0-CH1: sensore di compensazione termica, posta sulla zampa danneggiata ma dal lato opposto rispetto alle cricche rilevate (Fig. 13 A);

#1-CH2: ortogonale a no. 3 cricche parallele tra loro (Fig. 12 B) che corrono lungo l'asse principale della zampa;

#2-CH3: ortogonale all'innescio di cricca più recente (Fig. 12 C);

#3-CH4: ortogonale alla parte più bassa della cricca più vecchia, che risultava incrudita da un intervento precedente in cui si era provato a forzarla per allargare la fessura e monitorare l'interno della zampa (Fig. 12 D).

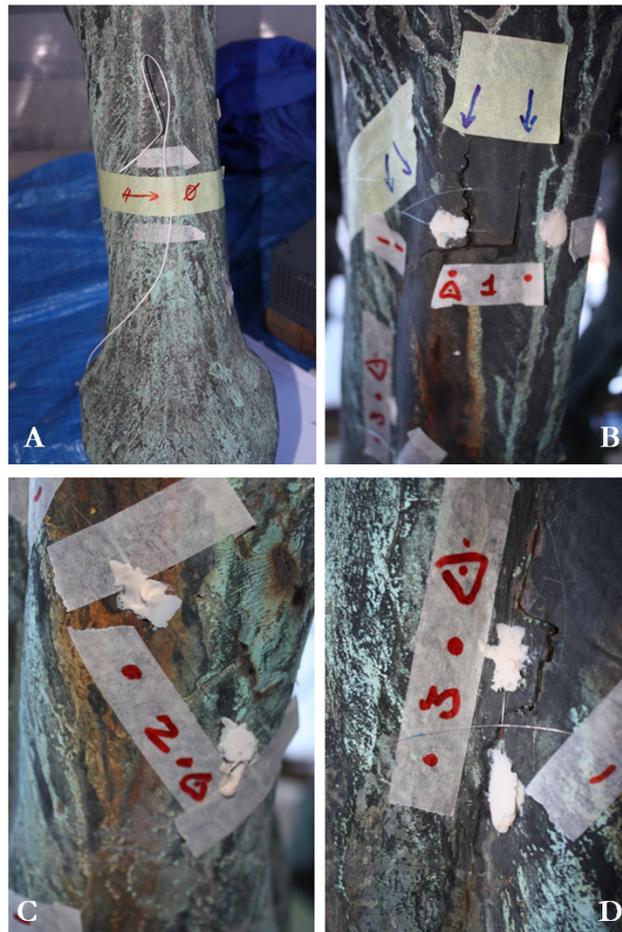


Figura 12: Dettaglio della posizione dei sensori sulle cricche.

Figure 12: Detail of the position of sensors on the cracks.



In tutti i grafici di seguito riportati, è rappresentato, in ascissa, il tempo in secondi, la durata della prova, in ordinate le deformazioni (in  $\epsilon$ , strain), ottenute dalle variazioni di lunghezza d'onda ( $\Delta\lambda$ ) registrate dai sensori FBG.

Il sensore #0-CH1 è stato usato per compensare la temperatura, questo sensore, non è vincolato strettamente alla statua di bronzo, ma solo appoggiato alla stessa per leggere le variazioni termiche ed escluderle dalla misurazione di quelle meccaniche date dagli altri sensori. Le condizioni di temperatura si sono mantenute stabili (vista anche la condizione di non esposizione diretta al sole ed agli agenti atmosferici della statua).

Le sollecitazioni applicate sull'area danneggiata sono state del tutto casuali, si è proceduto colpendo la statua ripetutamente a distanze diverse dall'area interessata, oppure spingendo o tirando la zampa in corrispondenza del garretto, o ancora appendendosi alla zampa anteriore sinistra (unica sollevata dal basamento). Altra soluzione per verificare la sensibilità delle cricche e del sistema di misurazione è stata quella di salire sulla groppa del cavallo.

Nei primi grafici a seguire, riportati in Fig. 13, vengono mostrati i risultati di una prima prova, definita di sensibilità, in cui sono stati fatti salire sulla groppa del cavallo, quattro operai del cantiere.

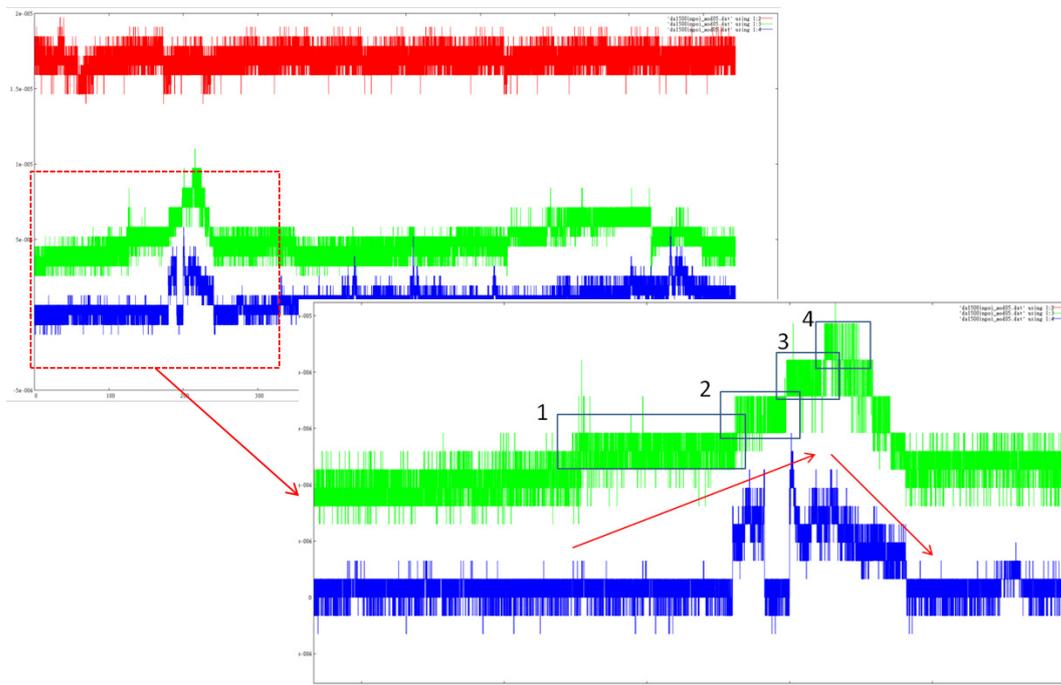


Figura 13: Prova di accuratezza dei sensori FBG.

Figure 13: Accuracy test of the FBG sensors.

Nella figura si è evidenziato un picco ritenuto rilevante per la misurazione effettuata.

In questa fase si è fatto salire sul dorso del cavallo 4 persone presenti al momento della prova, operai del cantiere.

Le 4 persone, tutte di corporatura media, del peso medio che va di 70 agli 80kg (complessivamente 280-320kg) che corrispondono a variazioni delle deformazioni misurate fino ad un massimo di  $\sim 950 \mu\epsilon$ , microstrain.

Dall'ingrandimento si deduce la risposta delle cricche alle sollecitazioni successive, dovute alla salita non contemporanea delle quattro persone già menzionate e la successiva discesa (più rapida rispetto alla salita).

I grafici riportati sono stati ottenuti processando i dati acquisiti, compensazione termica, misura del  $\Delta\lambda$  (variazione della lunghezza d'onda) e rappresentano, come anticipato, la variazione dello strain nella zampa (danneggiata) sollecitata nel tempo; quindi, in ascissa la durata della prova in secondi, in ordinata le deformazioni (in strain, ovvero microstrain  $\mu\epsilon$ ).

Nei due grafici a seguire, Fig. 14 (nella Fig. 15 un ingrandimento della risposta del sensore), viene riportato l'effetto dovuto a due tecnici che spingono la zampa danneggiata dal lato opposto all'area interessata, colpendo ripetutamente la zampa stessa (primi 375sec di Fig. 15). Successivamente il carico viene eliminato per poi riapplicarlo per altri 10 sec, in questo caso è solo una persona a spingere.

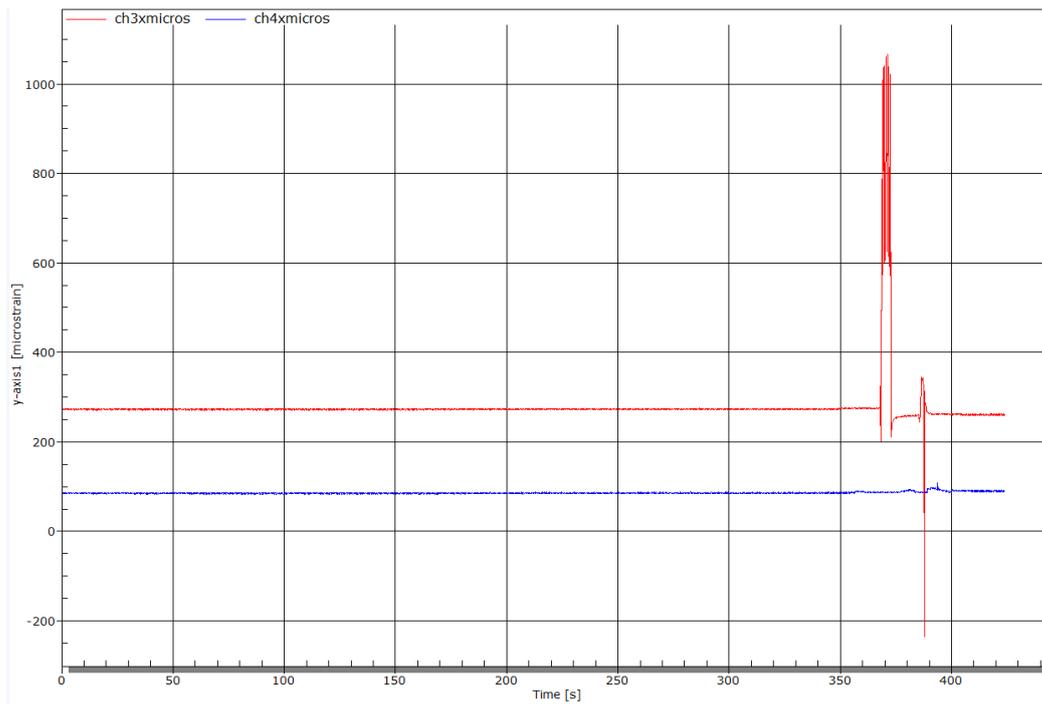


Figura 14: Risposta dei sensori alle sollecitazioni random dal lato opposto all'area danneggiata.

Figure 14: Sensors Return signal for random stresses on the opposite side of the damaged area.

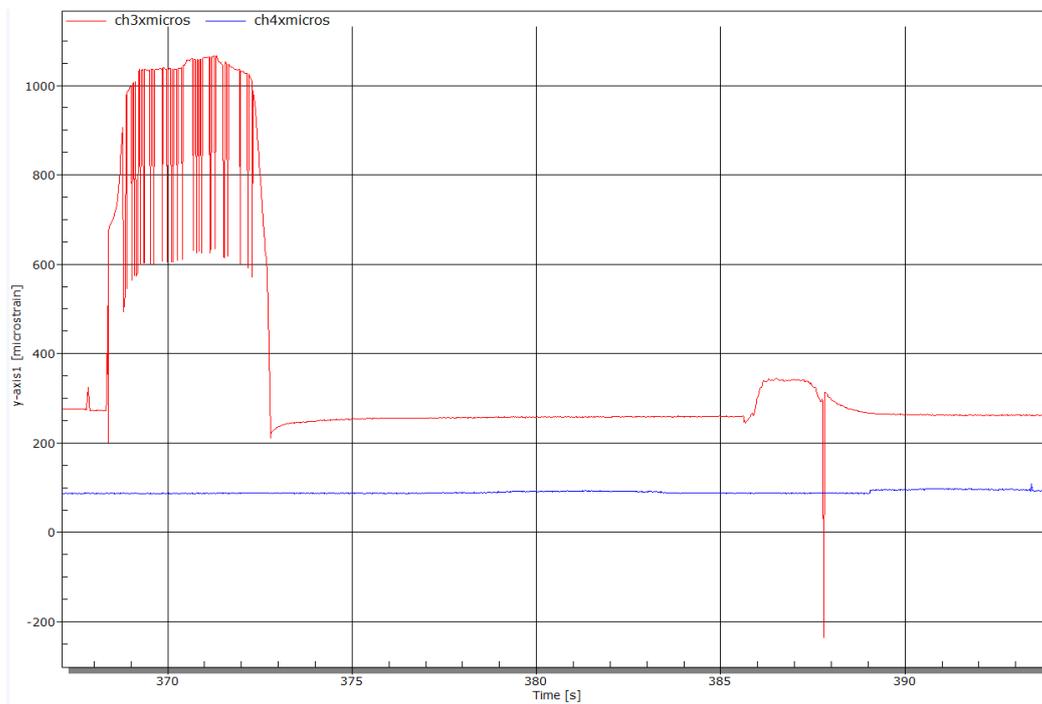


Figura 15: Particolare della risposta in Fig. 14.

Figure 15: Detail of the return signal of Fig. 14.

Successivamente si è letta la risposta alla sollecitazione indotta appendendosi alla zampa anteriore sinistra, unica sollevata dal basamento, Fig. 16 e 17.

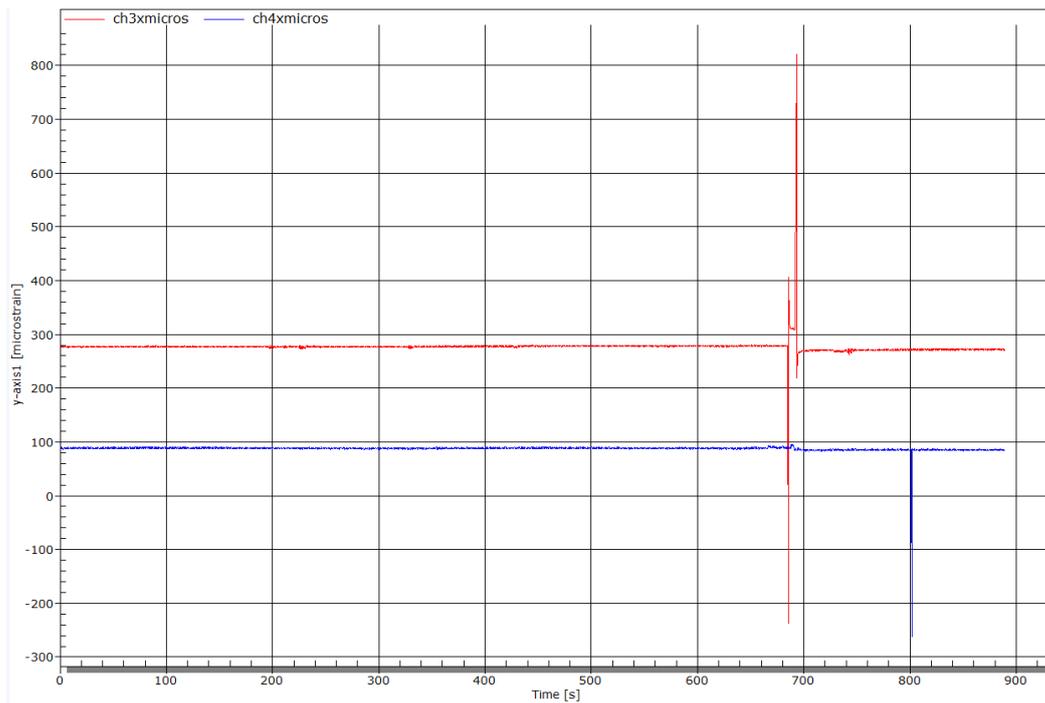


Figura 1: Risposta dei sensori alle sollecitazioni sulla zampa anteriore.

Figure 1: Sensors return signal from stresses on the foreleg.

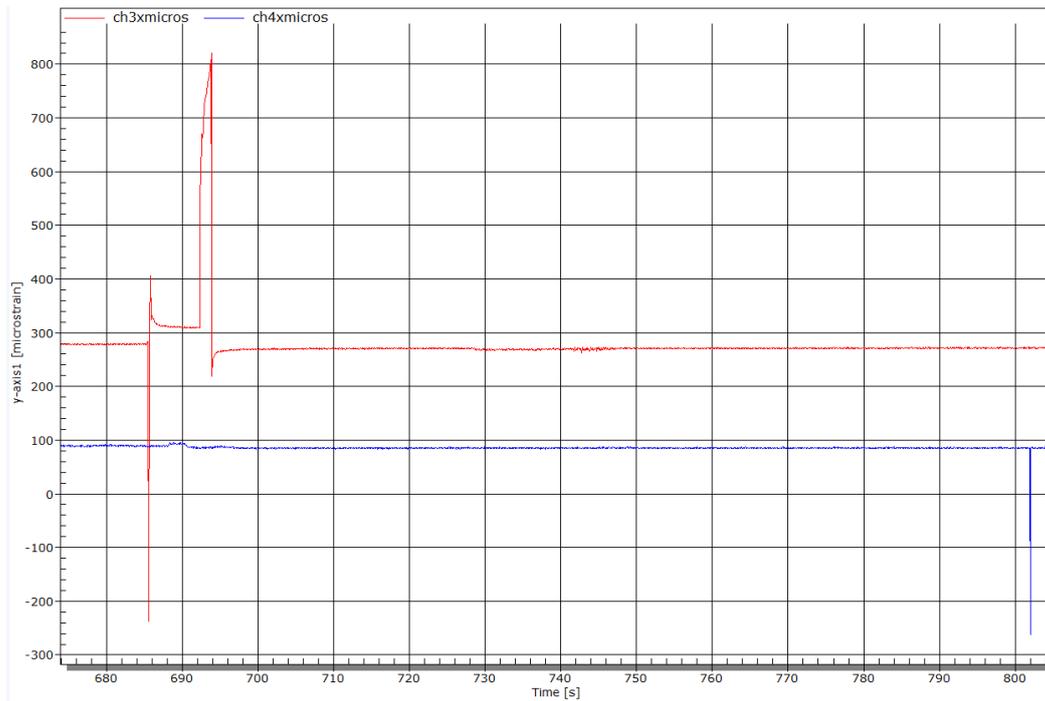


Figura 17: Particolare della risposta in Fig. 16.

Figure 17: Detail of the return signal of Fig. 16.

Anche da questo grafico si evince, come dai precedenti, che il sensore che riporta valori maggiori è quello posizionato a cavallo della cricca più recente (Fig. 12 C).

Le altre sono sì sensibili ma rispondono in maniera meno evidente, le fessurazioni risultano comunque attive, e le risposte sono proporzionate ai carichi casuali applicati, a seconda dei casi dagli 80 kg circa di una singola persona fino al massimo di 320 kg dei 4 operai (tali valori sono comunque solo stimati)

#### *Seconda fase di acquisizione*

Nella seconda fase di acquisizioni si è voluto verificare lo stato della zampa restaurata, monitorando la stessa durante il suo riposizionamento nella sede finale.

In questa seconda fase sono stati applicati 3 estensimetri ottici in corrispondenza della saldatura alla gamba posteriore sinistra della statua, un sensore in posizione orizzontale (sensore no. 1), un sensore in verticale (sensore no.2), entrambi in Fig. 18. Il terzo sensore è stato messo in solo contatto termico, utilizzando del nastro adesivo, per compensare le variazioni di strain dovute alle differenze di temperature.



Figura 18: Dettaglio della posizione dei sensori sull'area restaurata.

Figure 18: Detail of the position of sensors on the restored area.

La statua è stata inizialmente imbragata sotto la pancia del cavallo, avvolgendo anche le zampe, per permettere il sollevamento del basamento e quindi il successivo posizionamento delle cinghie sotto lo stesso. A questo punto è stata sollevata completamente con entrambi gli schemi di imbragatura (sottopancia e sotto basamento, Fig. 19) per posizionarla sull'arca che l'ha trasportata fino alla sede definitiva.

Sull'arca è stata vincolata saldamente con altre cime per evitare qualsiasi rischio. Per il posizionamento sul piedistallo in piazza della borsa si è proceduto ri-sollevandola, per poi adagiarla su uno strato di cemento, non ancora del tutto consolidato.

#### *Carichi in gioco (peso della statua e del basamento)*

Il peso complessivo della statua è di circa ~4500kg.

Possiamo stimare il peso complessivo del basamento per ~500kg.

Cavallo e cavaliere pesano ~4000 kg.

La distribuzione dei carichi non è facile da definire. L'insieme di cinghie utilizzate per il sollevamento e per l'ancoraggio sull'arca possono complicare la distribuzione degli sforzi.



Figura 19: Particolare dell'imbragatura della statua nelle fasi di sollevamento e trasporto.

Figure 19: Detail of the sling of the statue during lifting and transportation phases.

### *Risultati misure*

Nei grafici successivi vengono riportate le acquisizioni più significative della fase di trasferimento e riposizionamento. Il primo grafico (Fig. 20) mostra la fase di sollevamento del cavallo per inserire le cinghie sotto il basamento, il secondo (Fig. 21) mostra l'inizio dello spostamento della statua verso il supporto temporaneo nel cantiere a ridosso del Maschio Angioino, l'acquisizione è stata interrotta prima che la statua venisse poggiata nuovamente per ragioni di sicurezza, il terzo grafico (Fig. 22) mostra le rilevazioni con la statua sul camion alle 12:34, il quarto (Fig. 23) mostra le rilevazioni prima che la statua venisse movimentata verso la piazza alle 22:50 e il quinto (Fig. 24) mostra le letture avute con la statua già posizionata a piazza della Borsa.

Nel grafico di Fig. 20 è riportato l'andamento della fase iniziale della misurazione.

Inizialmente sui sensori è stato fatto lo zero di riferimento.

La statua è stata sollevata da sotto la pancia per permettere il fissaggio del basamento, il carico agente sui sensori è dato dal basamento (più inclinato che sollevato).

- Il sensore verticale (in blu, #1) lavora in trazione,  $\sim +70 \mu\epsilon$  (con andamento crescente),
- il sensore orizzontale (rosso, #2) in compressione,  $\sim -70 \mu\epsilon$  (stabile); com'era logico aspettarsi.

Per motivi di sicurezza prima del sollevamento della statua si è dovuto interrompere l'acquisizione, per permettere il fissaggio delle cinghie in maniera più agevole.

In Fig. 21 il risultato dell'acquisizione sui sensori con il cavallo sollevato prima solo da sotto la pancia e poi, subito dopo l'inversione dell'andamento delle tensioni, anche da sotto il basamento.

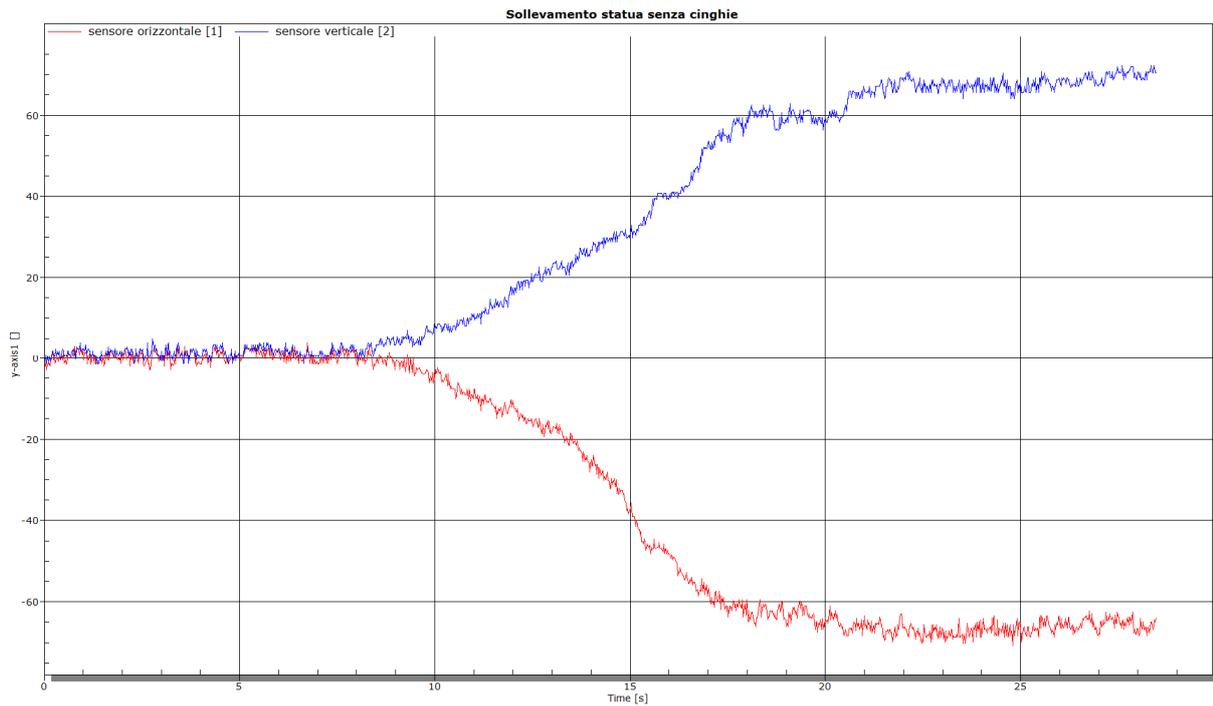


Figura 20: Time history, fase iniziale della acquisizione.

Figure 20: Time history, acquisition initial phase.

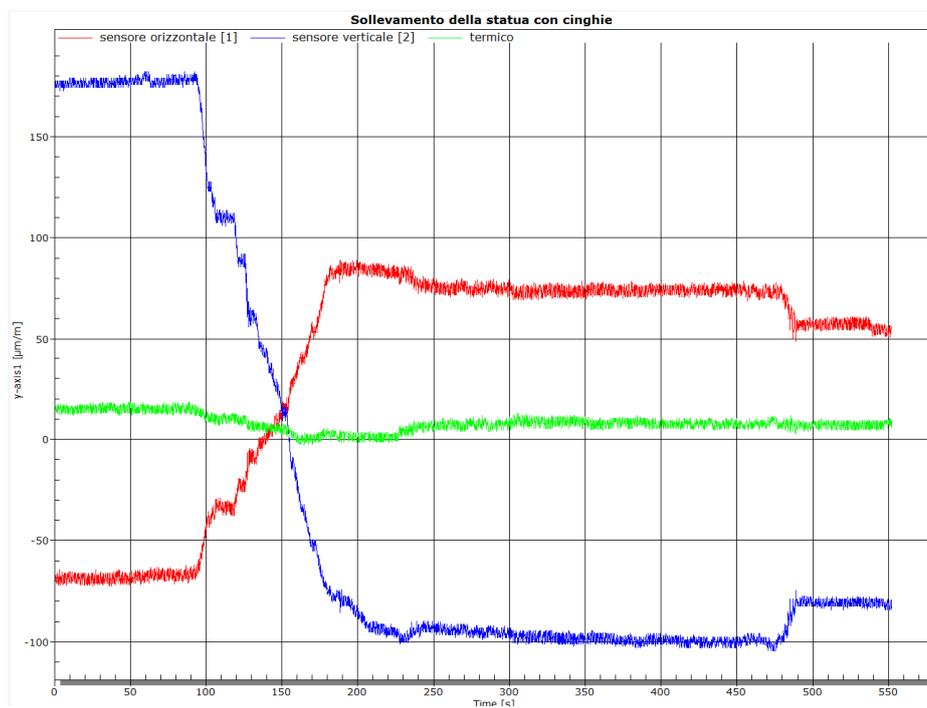


Figura 21: Time history, fase di sollevamento della statua.

Figure 21: Time history, statue lifting phase.



Nei primi istanti il sensore no.1 sta ancora lavorando in trazione, la deformazione è arrivata a  $\sim +170 \mu\epsilon$ , sul sensore no.2 il valore della deformazione si è mantenuto pressoché costante (la fase di aggiustamento delle cinghie ha comportato una distribuzione disomogenea del carico).

Nel momento in cui viene sollevata anche da sotto il basamento i segni delle deformazioni si invertono. le zampe sono schiacciate a sandwich tra le imbragature, il sensore verticale, no. 1 va in compressione, quello orizzontale, no. 2, in trazione. Negli ultimi istanti un piccolo salto dovuto all'assestamento delle cinghie.

Prima della chiusura i valori misurati sono stati:

#1  $\sim -75 \mu\epsilon$

#2  $\sim +60 \mu\epsilon$

Pressoché simmetrici.

Nei grafici a seguire, 22 e 23, sono riportate le letture dei sensori con il cavallo posizionato e legato saldamente all'arca. i valori si mantengono stabili e coerenti tra mattina e pomeriggio. Una volta adagiato sul camion, come evidenziato dai grafici stessi, le tensioni si sono nuovamente invertite.

Nel grafico di Fig. 24 l'ultima lettura prima della chiusura. La statua è stata posizionata nella sede definitiva.

La rimozione delle cinghie e la presenza di cemento fresco sulla base ha comportato una lieve variazione nei valori registrati. In particolare il sensore no.1, in trazione, è passato da 220 a 120  $\mu\epsilon$ , decrescente, il sensore no.2, in compressione, è passato da -80 a -65  $\mu\epsilon$ , lievemente crescente.

Presumibilmente nei giorni successivi, tale tendenza ha proseguito verso un valore di equilibrio prossimo allo zero iniziale. I grafici mostrano una coerenza nelle misure che lascia supporre una buona coesione della saldatura di restauro con la struttura stessa della statua: gli andamenti opposti riportati nei grafici sono appunto segnali di una risposta meccanica della parte in accordo con quanto atteso; alcune discrepanze, seppur di lieve entità, sono visibili nei grafici da 22 a 24, probabilmente dovute a una diversa distribuzione del peso della statua sul camion prima e sul basamento poi, la differenza più marcata sul secondo sensore è forse dovuta alla presenza di alcuni faretto utilizzati per illuminare la zona posteriore a cui il sensore no. 2 era esposto. I valori di strain termico registrati con il sensore no. 3 sono in linea con le misurazioni prese con un termometro digitale in cantiere (circa 19 °C la mattina, e 14°C la sera). Considerando che la sollecitazione di circa 320 kg aveva prodotto sulle cricche attive una deformazione di circa 950  $\mu\epsilon$ , e che i 500 kg dati dal basamento, durante il sollevamento, hanno prodotto sull'area restaurata valori massimi compresi tra i 150 e i 220  $\mu\epsilon$ , si può concludere che la riparazione ha avuto esito positivo sulla parte strutturale della zampa interessata dalle fessurazioni.

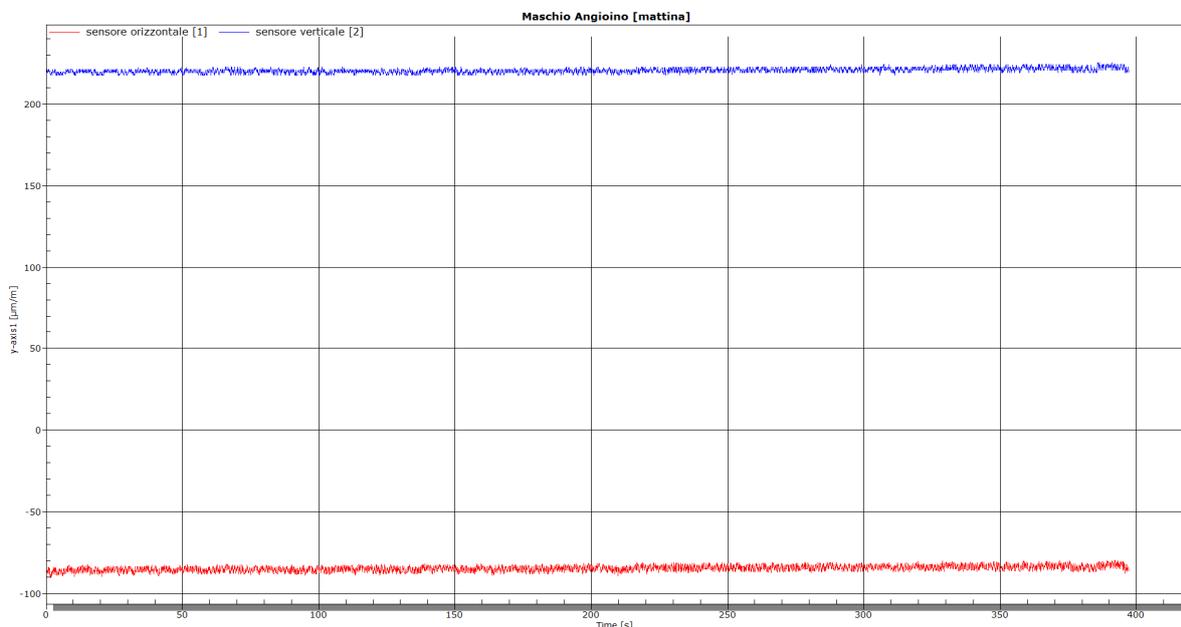


Figura 22: Time history, Statua posizionata sull'arca, acquisizione del mattino.

Figura 22: Time history, the statue is placed on the truck, morning acquisition.

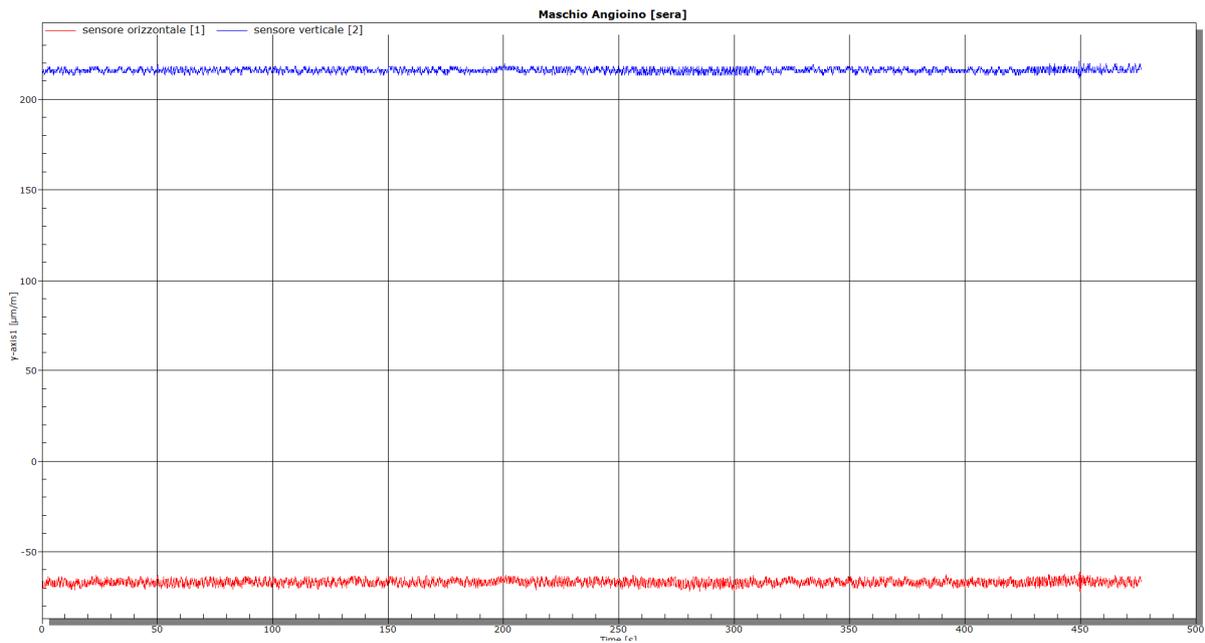


Figura 23: Time history, Statua posizionata sull'arca, acquisizione serale.

Figure 23: Time history, the statue is placed on the truck, evening acquisition.

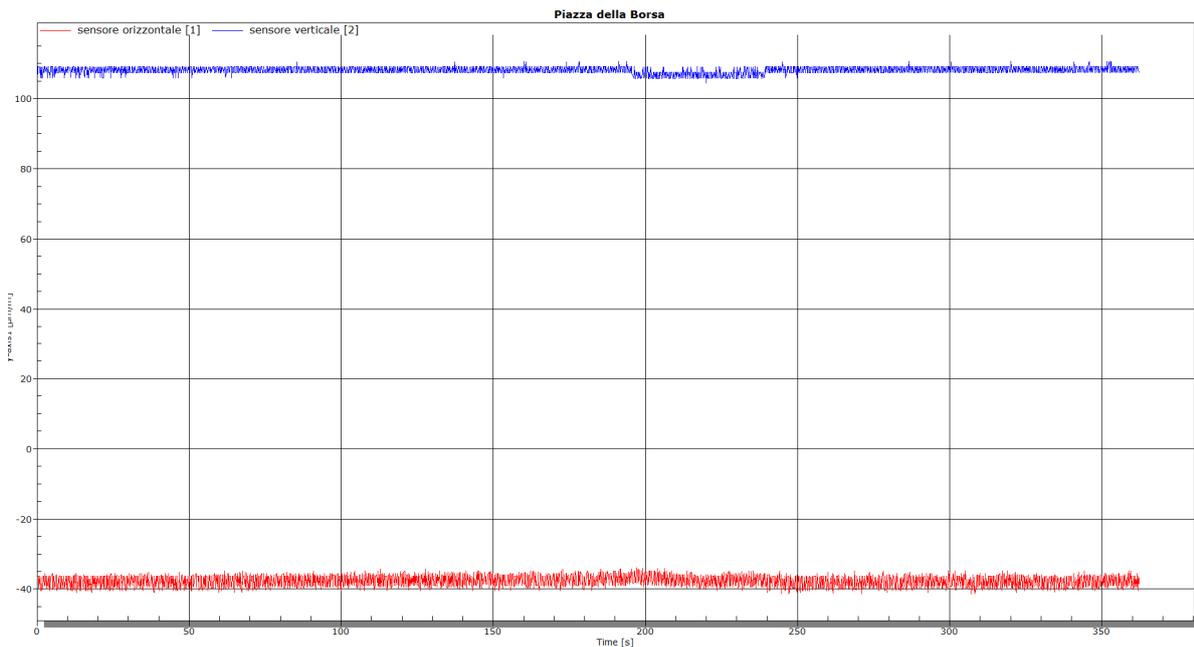


Figura 24: Time history, Statua posizionata sul piedistallo, acquisizione serale.

Figure 24: Time history, the statue is placed on the plinth, evening acquisition.

## CONCLUSIONI

**N**ell'articolo sono state presentate due applicazioni, su beni di interesse storico artistico, di sistemi di sensori FBG. Nel primo esempio è stato valutato un insieme di sensori utilizzati per monitorare lo stato di attività di alcune crepe presenti in una delle torri del camminamento delle mura Aureliane, presso il museo di porta S. Sebastiano a Roma. Il sistema di misura è costituito da un set di 4 sensori FBG, 2 sensori dedicati all'acquisizione delle deformazioni



meccaniche, due sensori FBG, accoppiati ai precedenti, utilizzati per la compensazione termica. I sensori hanno permesso di verificare lo stato di attività delle crepe e di valutare il rischio che le stesse comportano per l'integrità della torre, fornendo chiare indicazioni ai restauratori per una prossima campagna di restauro. Nel documento sono stati presentati risultati relativi a sole 24 ore di acquisizione, rispetto ad una campagna che ha avuto una durata complessiva di circa 5 mesi. Anche nel secondo esempio, un sistema di sensori FBG è stato utilizzato per monitorare lo stato di attività di alcune fessurazioni (cricche) rinvenute su una fusione in bronzo, la statua di Vittorio Emanuele II a piazza della Borsa a Napoli. I risultati sono stati di ausilio per i restauratori nel decidere il momento più opportuno per intervenire nella riparazione della zona danneggiata e per seguire la fase di trasporto della statua stessa dal cantiere di restauro fino alla sede di esposizione finale. In entrambi i casi i sensori sono stati posizionati in maniera strategica a cavallo delle fessurazioni, ovvero nei punti dove ci si aspettavano le maggiori sollecitazioni, in modo che agissero come veri e propri fessurimetri/distanziometri. Nel caso della statua di bronzo, viste le dimensioni ridotte dell'area interessata dal monitoraggio, è bastato un solo sensore di compensazione termica a supporto dei 3 sensori FBG utilizzati per la lettura delle deformazioni meccaniche. I sensori FBG presentano alcuni vantaggi rispetto ai sensori elettrici per quanto riguarda il monitoraggio dei beni culturali. In particolare, sono poco invasivi, adatti a campagne di misurazione di lungo periodo, resistenti a corrosione e agenti atmosferici. Gli esempi mostrati dimostrano la versatilità del sistema, adatto a monitoraggi sia in ambienti interni che all'aperto, sia per opere di architettura che per sculture bronze. Possono essere utilizzati anche per il monitoraggio di parametri ambientali (temperatura e umidità) all'interno di luoghi sensibili.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] K.O Hill, G. Meltz, *Journal of Lightwave Technology*, 15 (1997)
- [2] Bennion, J.A.R. Williams, L. Zhang, K. Sugden, N.J. Doran, *Optical and Quantum Electronics*, 28 (1996)
- [3] F.Felli, A. Brotzu, In: *Workshop IGF Problematiche di Frattura nei materiali per l'Ingegneria*, Forni di Sopra (UD), Italia, (2010) 193.
- [4] F.Felli, M.A. Caponero, D. Colonna, A.Brotzu, N.Gabarro G. Maddaluno, In: *3° Europea Workshop "Structural Health Monitoring"*, (2006) 922.
- [5] H. F. Lima et Alii, In: *Third European workshop of Optical Fiber Sensors*, Napoli, Italy ISBN 9780819467614, (2007)
- [6] F. Felli, A. Brotzu, M.A. Caponero et Alii, *IEEE Sensor Journal*, 8(7) (2008) 1299.