



DIAGNOSTICA E MONITORAGGIO DI STATI FESSURATIVI NELLE GRANDI STATUE MARMOREE

Giovanni Pascale

Alma Mater Studiorum, Università di Bologna
Scuola di Ingegneria e Architettura
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

Sommario

La conservazione delle opere d'arte è basata su una conoscenza accurata e continua del loro stato di salute e dei problemi che possono compromettere la loro durata nel tempo. Nella maggior parte dei casi le procedure diagnostiche sono orientate soprattutto all'esame del degrado superficiale dovuto a fattori come l'età, gli agenti atmosferici e l'inquinamento ambientale.

Nel caso delle grandi statue in marmo, però, assumono grande importanza anche i problemi legati al comportamento strutturale. Le rilevanti masse in gioco e le forme spesso snelle e articolate, infatti, fanno sì che i materiali siano soggetti a elevate sollecitazioni non solo in campo statico, ma anche e soprattutto in caso di sismi o vibrazioni di altra origine.

Questa memoria presenta un programma di diagnostica e monitoraggio attuato per alcuni anni presso la Galleria dell'Accademia di Firenze, che ha riguardato alcune statue di Michelangelo Buonarroti, tra cui il David e il Prigione Barbuto.

L'attività diagnostica svolta sul David aveva come finalità quella di valutare la gravità dello stato fessurativo presente nelle gambe e nel "broncone", il tronco modellato dietro la gamba destra che svolge una funzione statica molto importante per la stabilità della statua. Oggetto dello studio era quello di ottenere una stima della profondità delle fessure più evidenti, attraverso un'intensa campagna sperimentale eseguita mediante indagini ad ultrasuoni. Per il monitoraggio sono stati impiegati sistemi basati su sensori a fibra ottica.

Oltre al monitoraggio statico, è stato eseguito anche un monitoraggio dinamico in grado di attivarsi in occasione di eventi che comportino vibrazioni anomale.

I risultati hanno permesso di stimare con buona affidabilità la profondità delle fessure, e di valutare le variazioni nel tempo della loro ampiezza.

Per il monitoraggio del Prigione Barbuto, vista l'esigenza di sensori senza contatto, sono stati utilizzati sensori laser a triangolazione.

1 PROBLEMI STATICI DELLE STATUE MARMOREE

Per rendersi conto di alcune problematiche a cui sono soggette le statue, si consideri il Discobolo di Mirone. L'originale di questa famosa statua era in bronzo, realizzato nel V secolo a.c., ed è andato perso. Quelle giunte fino ai nostri tempi sono alcune copie in marmo di epoca romana, tra cui quelle di Figura 1, conservate presso il Museo Nazionale Romano, note rispettivamente come Discobolo di Lancellotti e Discobolo di Castelporziano, del II secolo d.c.



Figura 1: Discobolo di Lancellotti e Discobolo di Castelporziano

È facile rendersi conto come la forma molto articolata, con elementi a sbalzo come il braccio destro, renda più adatto per la realizzazione di questa opera un materiale come il bronzo che, oltre ad essere duttile e resistente a trazione, permette la realizzazione di elementi cavi, con conseguente alleggerimento. Per migliorare il comportamento statico, gli artisti hanno dovuto aggiungere elementi di appoggio. Ciononostante, Le copie in marmo hanno subito nel tempo fratture e riparazioni.

Osservando alcune importanti statue in marmo di epoche diverse, si nota sempre la presenza di elementi tali da allargare la base di appoggio, come tronchi di albero, colonne, anfore ed anche vesti (Figura 2). Tale necessità non c'è per le statue in bronzo (Figura 3). È facile intuire che la severità degli stati tensionali nelle statue marmoree aumenta notevolmente in caso di azioni sismiche. Anche le vibrazioni dovute al traffico cittadino influiscono sull'aggravamento di situazioni di danno già in atto.



Figura 2: esempi di grandi statue marmoree in cui elementi secondari sono stati utilizzati con funzioni statiche



Figura 3: esempi di statue in bronzo: non sono necessari elementi di appoggio

2 LE OPERE DI MICHELANGELO PRESSO LA GALLERIA DELL'ACCADEMIA DI FIRENZE

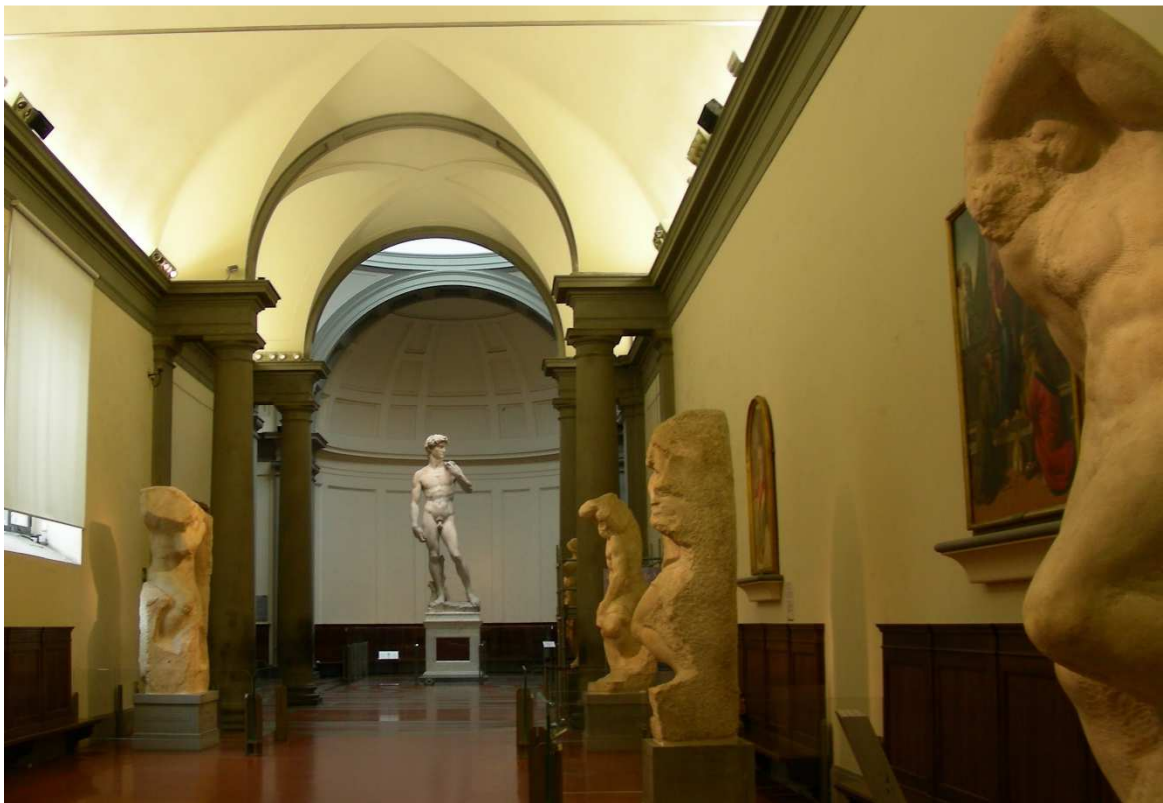


Figura 4: La Galleria dei Prigioni e la Tribuna del David nella Galleria dell'Accademia di Firenze

I Prigioni

I prigionieri sono quattro statue marmoree scolpite da Michelangelo a Firenze tra il 1520 e il 1532. Nel 1534 Michelangelo si trasferì a Roma e i Prigionieri rimasero incompiuti nel suo laboratorio. Alla morte dell'artista, furono collocati nella Grotta grande del giardino di

Boboli. Nel 1909 furono infine trasferiti nella Galleria dell'Accademia, dove si trovano tuttora [1].

Lo Schiavo Barbuto, o Prigione Barbuto (Figura 5), rappresenta una figura impegnata nello sforzo di liberarsi dalla massa informe della materia che lo ricopre. La statua presenta una frattura visibile lungo tutto il perimetro, con andamento obliquo, all'altezza del bacino (Figura 6).



Figura 5: il Prigione Barbuto



Figura 6: la frattura

Non si hanno notizie certe sulle cause e sul periodo in cui si è verificata la frattura, che comunque è stata stuccata in diversi periodi, anche recenti.

In occasione di uno dei periodici interventi di pulitura, si è osservato che in alcune posizioni la fessura si era riaperta interrompendo la continuità della stuccatura. Si notava inoltre un lieve disallineamento tra le superfici marmoree sopra e sotto la frattura. Ciò ha fatto pensare a uno scorrimento tra le due parti della statua.

Si è quindi pensato ad un monitoraggio della frattura, con l'obiettivo di comprendere se le imperfezioni osservate fossero imputabili a una perturbazione occasionale (è da tenere presente, a questo proposito, che alcuni anni prima erano stati eseguiti lavori di rifacimento della pavimentazione e dei basamenti delle statue), oppure se si trattasse di un fenomeno ancora in evoluzione.

Il David

La statua (Figura 7) fu scolpita da Michelangelo Buonarroti tra il 1501 e il 1504 e rappresenta l'eroe biblico Davide in attesa di affrontare il gigante filisteo Golia. Inizialmente il David fu collocato in Piazza della Signoria, davanti a Palazzo Vecchio [3]. Nella seconda metà dell'Ottocento tre commissioni di esperti, chiamate a studiare lo stato di conservazione dell'opera, rilevarono l'esistenza di fessure sulla superficie del marmo. Una possibile causa di questa presenza fu individuata nell'inclinazione in avanti della statua di oltre 28 cm in sommità. Per questo motivo nel 1873 fu deciso il trasferimento dell'opera all'interno della

Galleria dell'Accademia, dove fu collocata su un nuovo piedistallo nella corretta posizione verticale.

Attualmente il David presenta numerose fessure nel “broncone”, termine con cui viene indicato il tronco modellato dietro la gamba destra, che svolge una funzione statica molto importante per la stabilità della statua (Figura 8). Presenta anche uno stato fessurativo di minore entità nella parte posteriore della gamba sinistra.



Figura 7: il David di Michelangelo Buonarroti



Figura 8: rilievo dello stato fessurativo nella parte inferiore del broncone

3 MONITORAGGIO DEL PRIGIONE BARBUTO

Strumentazione

Dovendo salvaguardare l'integrità della superficie marmorea, si è operato con l'obiettivo di evitare l'uso di sensori che richiedessero l'impiego di collanti o altri sistemi di fissaggio al marmo [2]. Si sono quindi utilizzati sensori di spostamento senza contatto. Si tratta di sensori laser a triangolazione (Figura 5) con le seguenti caratteristiche tecniche:

- Micro-Epsilon OptoNCDT 1401-10, fornito dalla Luchsinger s.r.l.;
- campo di misura 10 mm;
- risoluzione, in misura statica, 1 μm .

Dovendo misurare uno spostamento relativo, si sono utilizzati due sensori, posizionati uno sopra e uno sotto la superficie di frattura, in direzione pressoché parallela alla stessa (Figura 6). I raggi luminosi emessi dai sensori sono stati proiettati direttamente sulla superficie

marmorea. I due sensori sono stati applicati ad una apposita staffa metallica fissata al muro dietro alla statua.

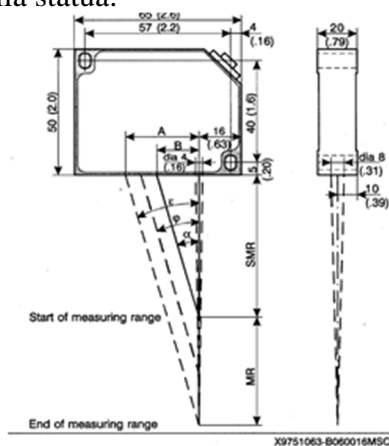


Figura 9: sensore laser a triangolazione



Figura 10: coppia di sensori per il monitoraggio di spostamenti relativi

L'acquisizione è stata eseguita mediante scheda National Instruments integrata in un computer posizionato in prossimità della statua. Si è realizzato un apposito software in grado di fornire in uscita direttamente lo spostamento relativo dovuto a un eventuale scorrimento.

Accanto ai sensori è stato posizionato un sensore di temperatura universale con campo di misura compreso tra -20° e $+70^{\circ}$.

Risultati

Le acquisizioni dei valori misurati sono state eseguite ad intervalli di 30 minuti. Il monitoraggio si è protratto per oltre 14 mesi, da ottobre 2007 a dicembre 2008.

In Figura 11 sono riportati i valori dello spostamento relativo e della temperatura in funzione del tempo.

In alcuni periodi l'acquisizione dei valori è stata impedita da blocchi del sistema dovuti a cause esterne, come interruzioni dell'alimentazione o altro. In questi casi, nei grafici, i valori sono stati raccordati con tratti rettilinei.

Analisi e conclusioni

I grafici mostrano andamenti molto simili. In entrambi si notano oscillazioni con andamento prevalentemente correlato alle stagioni, come risulta dal fatto che le variazioni dello spostamento relativo sono in fase con quelle della temperatura. Tali variazioni raggiungono valori di qualche centesimo di millimetro, ma un dato più attendibile è il confronto tra i valori medi misurati nei periodi in cui si è avuta sovrapposizione tra i monitoraggi eseguiti in due anni successivi: il periodo tra metà ottobre e metà dicembre del 2007 e del 2008. Tale differenza è di poco superiore a 1 centesimo di millimetro.

Si può concludere che i movimenti relativi tra la parte superiore e quella inferiore del "Prigione Barbuto", in corrispondenza della linea di frattura osservata, sono di entità trascurabile e non riferibili ad uno scorrimento in atto in corrispondenza della superficie di frattura. Pertanto, nel complesso, la situazione non mette in evidenza situazioni di pericolo per la statua.

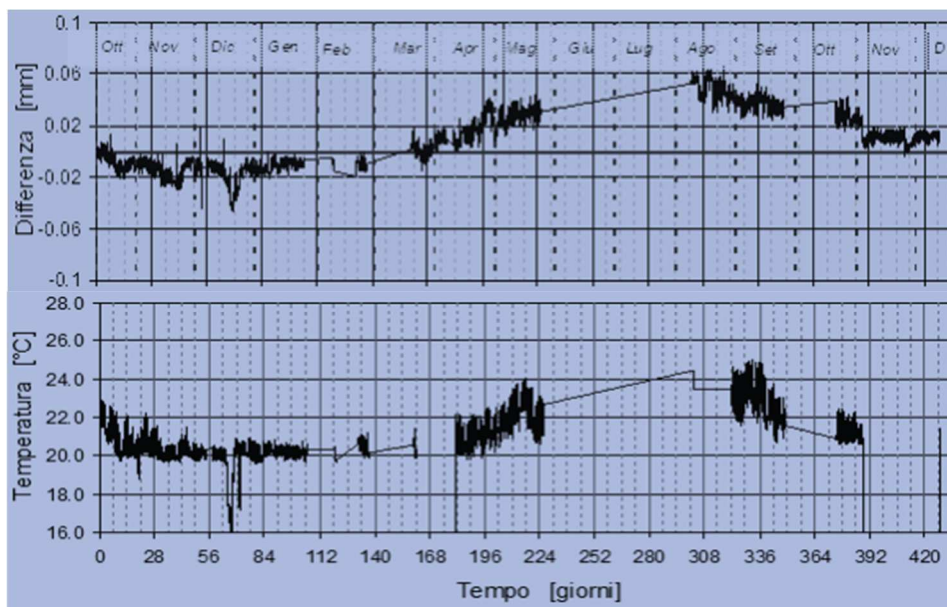


Figura 11: spostamento relativo e temperatura in funzione del tempo

4 DIAGNOSTICA DEL DAVID

La situazione statica del David è oggetto di studio da molto tempo, fin da quando la statua era collocata in Piazza della Signoria. In tempi più recenti, uno studio approfondito è stato eseguito da un gruppo coordinato da A. Borri [4], [5].

Un'importante premessa a tutte le considerazioni sul comportamento strutturale del David consiste nella constatazione, confermata da prove eseguite su provini provenienti dalla stessa cava da cui proviene il blocco utilizzato per la realizzazione del David, delle scadenti proprietà meccaniche del marmo, che presenta valori della resistenza a trazione di 3-4 N/mm², mentre per il marmo bianco di Carrara la resistenza a trazione è mediamente superiore a 10 N/mm². Questa circostanza trova conferma nei valori della velocità delle onde ultrasoniche, che nelle indagini descritte nel seguito è risultata mediamente di 2500 m/s, mentre il marmo bianco di Carrara presenta generalmente valori di 5000-6000 m/s.

Le indagini eseguite sul David sono state motivate dal fatto che, nel corso di un restauro eseguito nel 2003, sono state osservate molte fessure che, per confronto con fotografie eseguite in epoche precedenti, apparivano di ampiezza incrementata.

Le conseguenti analisi strutturali [5] si basano su un rilievo eseguito con tecnologia laser-scanner da parte dell'ISTI-CNR di Pisa in collaborazione con l'Università di Stanford. Questo rilievo ha permesso di ottenere un modello tridimensionale sul quale si è basata una modellazione ad elementi finiti, che ha consentito di valutare il comportamento strutturale del David nella situazione attuale ed anche in quella precedente in Piazza della Signoria, quando la statua era inclinata in avanti.

L'analisi, condotta in condizioni di perfetta verticalità, mostra che i punti con maggiori tensioni di trazione sono situati nelle zone posteriori del broncone e, in misura minore, della caviglia sinistra. Da ciò appare evidente come il broncone rappresenti un elemento vitale per la statua, senza il quale la stessa non riuscirebbe a sopportare le trazioni causate dall'eccentricità dei carichi. Il broncone è stato quindi accuratamente posizionato da

Michelangelo in modo da assorbire le tensioni di trazione che nascono dalle distribuzioni delle masse.

Ulteriori analisi in campo dinamico, riportate in [5], hanno messo in evidenza come, con un terremoto di progetto avente PGA pari a 0,15g, valore rappresentativo di un sisma non particolarmente distruttivo, il David si troverebbe in condizioni di forte rischio.

Per affinare le valutazioni sulla sicurezza strutturale della statua, in campo statico e dinamico, è importante conoscere con maggiore accuratezza lo stato fessurativo, soprattutto per quanto riguarda lo spessore dello strato danneggiato. Per questo è stata avviata un'attività diagnostica finalizzata alla stima della profondità delle fessure più preoccupanti.

Strumentazione

Le indagini a ultrasuoni sulle fessure della statua [7], [8], [9], [10], [11] sono state effettuate mediante lo strumento IMG 5100 CSD, che utilizza sonde a bassa frequenza, normalmente tra 25 e 500 kHz. L'impiego di basse frequenze, e quindi di lunghezze d'onda elevate, consente di avere una buona penetrazione all'interno del materiale, ma influisce negativamente sulla risoluzione. Per questo è necessario operare con particolare attenzione e sensibilità nell'analisi dell'onda. Le sonde utilizzate in questa campagna di prove hanno una frequenza di 55 kHz e sono dotate di concentratore esponenziale. La prima motivazione di questa scelta è quella di ridurre la superficie di contatto con il marmo, in modo da poter operare sulla superficie curva ed irregolare del broncone. La seconda è quella di poter esercitare una pressione elevata durante la prova, per superare l'inconveniente di dover utilizzare materiali di accoppiamento non ottimali. Nel caso del David, infatti, dovendo assolutamente evitare ogni alterazione del marmo, si è dovuto utilizzare un accoppiamento a secco, mediante l'impiego di plastilina con l'interposizione di nastri adesivi in carta utili sia ad evitare il contatto diretto del materiale accoppiante con il marmo, sia a indicare le posizioni di prova.

Metodi di prova

Per la valutazione della profondità delle fessure si è utilizzato il metodo TOFD (Time of Flight Delay) [12], [13], consistente nel confronto del tempo di volo misurato su percorsi integri e su altri intersecanti la fessura. Questa tecnica è stata utilizzata in due diverse varianti. La prima (Metodo 1), consiste nell'eseguire due misure del tempo di volo, su percorso intersecante la fessura (tempo T_1), l'altra in zona integra (tempo T_2) posizionando le sonde su stazioni di misura a uguale distanza (Figura 12).

La stima della profondità h della fessura può essere ottenuta dalla relazione seguente:

$$h = \frac{x}{T_2} \sqrt{T_1^2 - T_2^2} \quad (1)$$

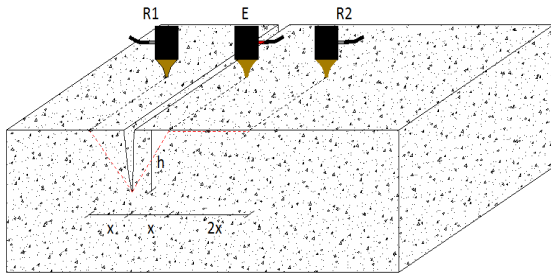


Figura 12: Metodo 1

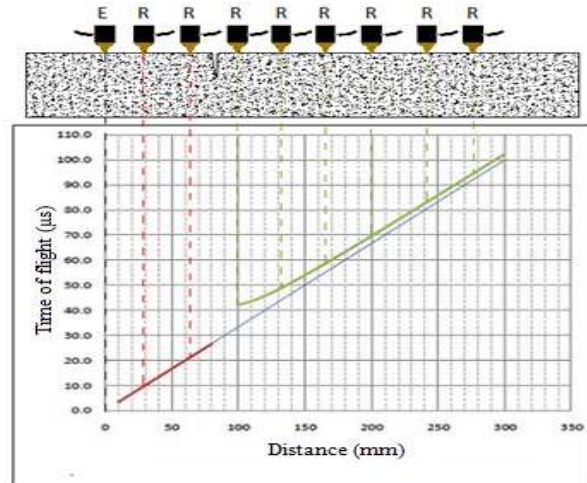


Figura 13: Metodo 2

La tecnica fornisce valori attendibili, a condizione che:

- si possa ragionevolmente assumere che la fessura sia pressoché perpendicolare alla superficie esterna;
- le due facce della fessura siano ben distinte e senza punti di contatto.

La seconda tecnica (Metodo 2) consiste nel mantenere fissa la sonda emittente in una postazione e traslare quella ricevente in più posizioni, prima e dopo la fessura. I dati acquisiti vengono poi inseriti in un diagramma spazio – tempo ottenendo un diagramma del tipo di quello riportato in Figura 13.

Il tratto prima della fessura ha andamento rettilineo, mentre quello successivo alla fessura presenta un iniziale andamento curvo dovuto alla presenza della fessura. La curva tende poi asintoticamente al prolungamento della prima retta in quanto, allontanandosi dalla fessura, l’influenza del difetto è sempre minore. La profondità h della fessura può essere ottenuta mediante la seguente formula, nella quale con L viene indicata la distanza della sonda emittente dalla fessura e con T_1 e T_2 i tempi ricavati dalle equazioni delle due curve in corrispondenza di tale distanza.

$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (2)$$

Aree di analisi

Come accennato in precedenza, il David presenta diverse fessure e aree deteriorate nella sua parte inferiore. In Figura 14 sono mostrate le parti indagate, identificate da numeri tra 1 e 8. La parte più critica è quella posteriore del broncone, dove sono presenti molte fessure ad andamento prevalentemente orizzontale, oltre ad alcune aree microfessurate. Un’altra zona critica è quella di appoggio del piede sinistro sul basamento (Figura 15, zona 7 di Figura 14). Quest’ultimo è stato scolpito assieme alla statua, con la quale costituisce un unico blocco. In questa zona sono state indagate alcune sezioni verticali e altre inclinate, con lo scopo di valutare uno stato fessurativo visibile nel punto in cui il piede si stacca dal basamento.

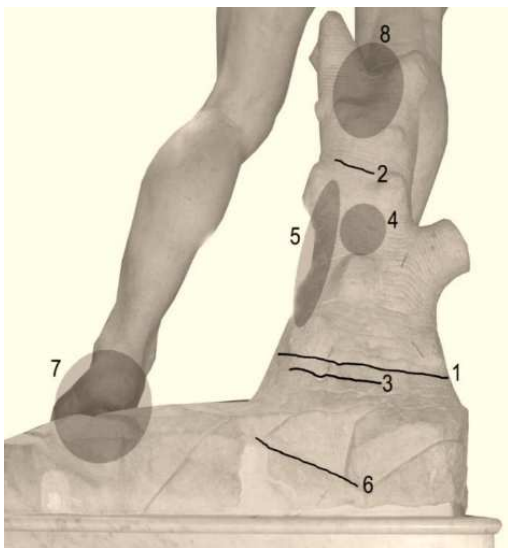


Figura 14: Fessure e altre zone soggette ad indagine nel broncone



Figura 15: zona di attacco del piede sinistro con il basamento

L'indagine ha comportato l'esecuzione di un elevato numero di determinazioni sperimentali. Nel seguito si riportano, a titolo di esempio, le analisi più significative eseguite per lo studio della fessura più preoccupante nel broncone e di quella all'attacco del piede sinistro.

Analisi delle fessure nel broncone

La fessura numero 1, situata nella parte inferiore del broncone (Figura 14), è stata analizzata inizialmente attraverso il metodo 1. Per stimarne la profondità, sono state scelte 40 posizioni lungo la fessura, come mostrato in figura. Nella stima delle profondità della fessura si è tenuto conto della traiettoria non rettilinea tra le due sonde. La lunghezza del percorso è stata mantenuta costante, pari a 60 mm, ponendo ogni trasduttore a 30 mm dalla fessura. Alcune prove preliminari hanno fornito un valore medio della velocità degli ultrasuoni di circa 2500 m/s in zone integre vicino alla fessura.

Nella

Figura 16 sono mostrati i risultati ottenuti. In questo diagramma, il punto 0 si trova nella posizione in cui l'ampiezza della fessura appare massima. Nella figura i valori rilevati sono rappresentati con punti blu. La linea nera è la migliore interpolante, ottenuta con il metodo dei minimi quadrati assumendo un polinomio di quarto grado, e le due curve rosse sono i limiti di confidenza al 90%. I valori massimi della profondità sono di poco inferiori a 20 mm e si trovano intorno alla posizione 0.

Allontanandosi da questa zona, la profondità diminuisce gradualmente in accordo con la riduzione visibile dell'ampiezza. È importante notare che la profondità rilevata potrebbe essere inferiore a quella reale, in caso di contatto tra le due facce della fessura. Di conseguenza, si presume che il limite superiore di confidenza sia la curva più rappresentativa.

In Figura 17 è visualizzata una sezione orizzontale della gamba destra e del broncone, all'altezza della fessura 1, con l'andamento della fessura risultante dall'indagine. La parte rossa rappresenta la profondità ottenuta con la migliore interpolante di

Figura 16. La curva blu è il limite superiore di confidenza.

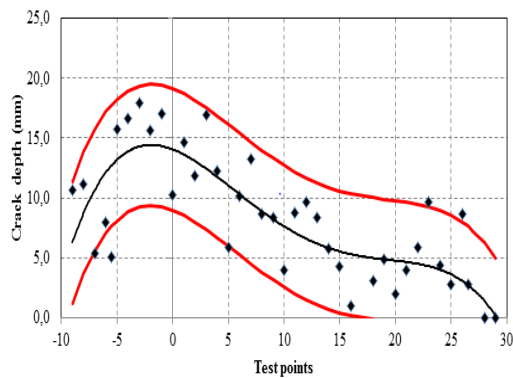


Figura 16: Valori della profondità della fessura 1 lungo lo sviluppo della fessura

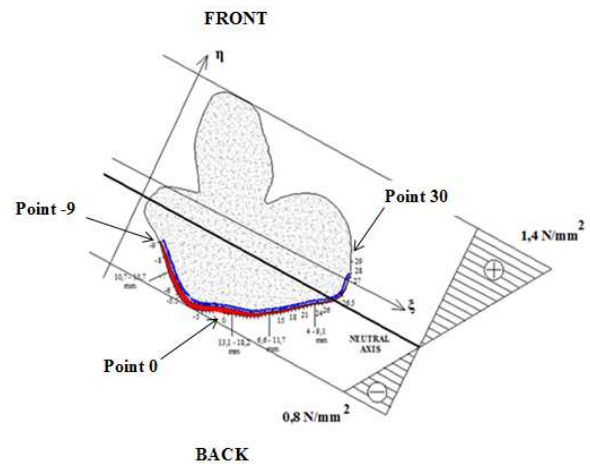


Figura 17: Sezione orizzontale della gamba destra e del broncone in corrispondenza della fessura 1

Per meglio interpretare i risultati, è necessaria la conoscenza dello stato tensionale della sezione. Per questo motivo è stata effettuata un'analisi lineare, tenendo conto del peso proprio della statua. Nella Figura 17 ξ e η sono gli assi principali di inerzia della sezione e la linea retta spessa è l'asse neutro. Dal diagramma risulta che la massima tensione di trazione è di $0,8 \text{ N/mm}^2$ e si verifica proprio nella zona in cui è stata stimata la massima profondità della fessura. Questo valore è notevolmente inferiore alla resistenza alla trazione per il marmo utilizzato, che può essere assunto pari a circa $3 \div 4 \text{ N/mm}^2$, secondo le informazioni disponibili nella letteratura scientifica. Le tensioni di trazione hanno giocato un ruolo significativo nella formazione della fessura, anche in considerazione del fatto che, quando la statua era situata in Piazza della Signoria, l'inclinazione in avanti ha causato un aumento di tensione di trazione nella parte posteriore delle gambe. Tuttavia, probabilmente questa non è l'unica causa di fessurazione. Infatti, se così fosse, il profilo dell'apice della fessura dovrebbe avere un andamento quasi parallelo all'asse neutro. Invece, segue il contorno della sezione. Altre possibili cause dello sviluppo del processo di fessurazione possono consistere nell'influenza degli agenti atmosferici e delle variazioni termiche, che la statua ha subito quando era situata in Piazza della Signoria.

Successivamente, la stessa fessura è stata analizzata con il metodo 2, ottenendo risultati analoghi.

Valori simili della profondità sono stati ottenuti anche per la fessura 3 di Figura 14. Si può quindi concludere che questa zona è influenzata da alcune fessure orizzontali, aventi una profondità massima di circa 20 mm, originate dalle rientranze scolpite dall'artista per simulare la corteccia del tronco d'albero.

Analisi della zona di contatto tra il piede sinistro e il piedistallo

L'obiettivo di questa analisi è quello di rilevare la possibile presenza di fessure e degradazione nella zona di contatto tra il piede sinistro e il piedistallo (area 7 nella Figura 14). Alcuni test preliminari hanno fornito un valore medio di velocità dell'impulso di circa 2750 m/s.

Sono state studiate sezioni oblique e altre verticali, queste ultime con l'obiettivo di valutare la profondità della fessura visibile dall'esterno.

Si riportano i risultati di queste ultime determinazioni. Le sezioni sono state tracciate con l'aiuto di un livello laser (Figura 18). L'indagine si è svolta su tre diverse sezioni. I punti di applicazione delle sonde sono stati successivamente identificati e ogni sezione è stata disegnata con l'ausilio di una ricostruzione laser scanner (Figura 19).



Figura 18: Tracciamento di una sezione verticale mediante livello laser

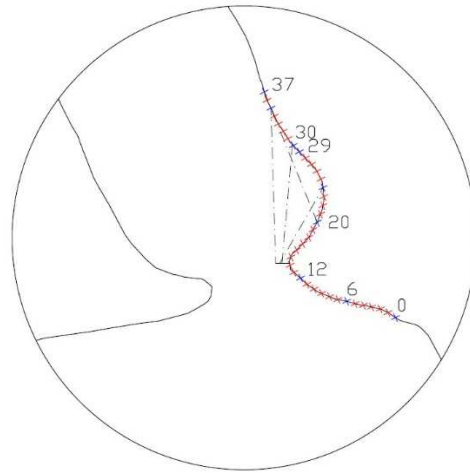


Figura 19: Ricostruzione di una delle sezioni mediante rilievo laser scanner

Tabella 1: Valutazione della profondità della fessura all'attacco del piede sinistro con il basamento

Emittente	Ricevente	TOF 1	TOF 2	Profondità stimata
Punto	Punto	μs	μs	mm
12	25	62,8	78,3	24,2
12	30	78,4	82,2	10,4
12	35	103,2	104,5	11,0
6	25	93,6	110,0	25,1
6	30	109,4	115,4	15,2
6	35	133,0	137,2	17,6
Media				17,3
Deviazione standard				6,3

È stato applicato il metodo TOFD (Time of Flight Delay), ma, a causa della forma della sezione, non è possibile utilizzare le tecniche usuali, e in particolare i metodi 1 e 2 descritti in precedenza. Per questo motivo è stata sviluppata una tecnica specifica, descritta nel seguito. Molte determinazioni di TOF (Time of Flight) sono state effettuate fra coppie dei punti situati rispettivamente sopra e sotto la fessura. I risultati sono riportati nella Tabella 1 per una delle sezioni studiate.

Per ogni coppia di punti la Tabella 1 riporta:

-il tempo di volo TOF 1 calcolato in base alla lunghezza del percorso, assumendo il materiale non fessurato, in base alla velocità media degli impulsi misurata nel marmo intorno alla zona in esame, pari a 2750 m/s;

-il tempo di volo TOF 2 misurato.

La lunghezza del percorso degli ultrasuoni, e conseguentemente il TOF1, vengono ricalcolati considerando la presenza di una fessura. Si esegue questa operazione ipotizzando diverse profondità della fessura, fino a quando il TOF1 ricalcolato non coincide con il TOF2 misurato. I risultati sono mostrati nell'ultima colonna della Tabella 1 per ogni coppia di punti. I risultati riportati nella tabella forniscono un valore medio della profondità stimata di 17,3 mm, con una deviazione standard di 6,5 mm.

La stessa procedura è stata seguita per le altre due sezioni vicine a quella precedente.

I valori ottenuti sono piuttosto dispersi, in conseguenza di diversi fattori come la forma irregolare della sezione e la possibile presenza di punti di contatto tra i bordi della fessura. Tuttavia, i valori medi ottenuti nelle tre sezioni sono compresi tra 15 e 20 mm.

Conclusioni

In conclusione, la campagna diagnostica mediante indagini a ultrasuoni, di cui in questo paragrafo sono state riportate alcune fasi, ha permesso di definire con buona accuratezza lo stato fessurativo presente nelle gambe del David.

Le analisi hanno fornito valori della profondità contenuti entro i 20 mm per le fessure più preoccupanti nel broncone e all'attacco del piede sinistro col basamento.

Questi valori non sono molto preoccupanti per la stabilità dell'opera, ma potrebbero diventare molto pericolosi in caso di forti sollecitazioni in campo dinamico, come quelle derivanti da un forte terremoto.

5 MONITORAGGIO DEL DAVID

Il monitoraggio aveva come obiettivo il controllo di eventuali variazioni di ampiezza delle fessure. In considerazione dell'esigenza di adottare un sistema non invasivo, riducendo al minimo anche l'impatto visivo, sono stati impiegati sensori a fibra ottica.

Configurazione strumentale

La configurazione strumentale è costituita dai seguenti componenti:

- sensori a fibra ottica;
- unità di lettura;
- hardware e software per acquisizione e trasmissione dei dati acquisiti.

Sono stati utilizzati sensori Bragg Grating, il cui funzionamento è basato sulle alterazioni periodiche dell'indice di rifrazione nel nucleo (core) della fibra ottica. Questi sensori sono sensibili contemporaneamente a variazioni di deformazione e di temperatura. È quindi necessario avere a disposizione un reticolo di riferimento libero.

L'unità è costituita dall'interrogatore dei Bragg Grating e da un PC collegato in rete. Il sistema era progettato in modo da acquisire in due modalità: statica e dinamica. La seconda si attiva automaticamente in caso di sisma oltre un'intensità prefissata, e acquisisce con una frequenza di 30 volte al secondo. Il passaggio dalla modalità statica a quella dinamica è pilotato da un dispositivo Smartbrick [7], posizionato sul piedistallo.

Installazione del sistema

L'installazione è stata preceduta da un'attenta analisi dello stato fessurativo, al fine di scegliere le posizioni più opportune in cui applicare i sensori.

A seguito dell'analisi, è emerso che le lesioni più significative si trovano sul broncone, per cui si è deciso di applicare i primi tre sensori sul broncone stesso, e in particolare:

- uno sulla fessura più evidente per misurarne le variazioni di apertura;
- uno sul marmo in una posizione non fessurata e non sollecitata meccanicamente, avente unicamente la funzione di misurare la deformazione del marmo per effetto delle variazioni di temperatura;
- uno libero, posizionato in prossimità della parte alta del broncone, per la compensazione termica degli altri due.

In Figura 20 è rappresentato il broncone, in cui sono riportate le posizioni dei sensori applicati sulla fessura, situata nella parte bassa, e sul marmo non fessurato in alto a destra. Si può notare che la fibra sul marmo non fessurato è stata posizionata in una protuberanza del broncone che si può ritenere praticamente non sollecitata, consentendo così alla fibra di misurare unicamente la deformazione termica.

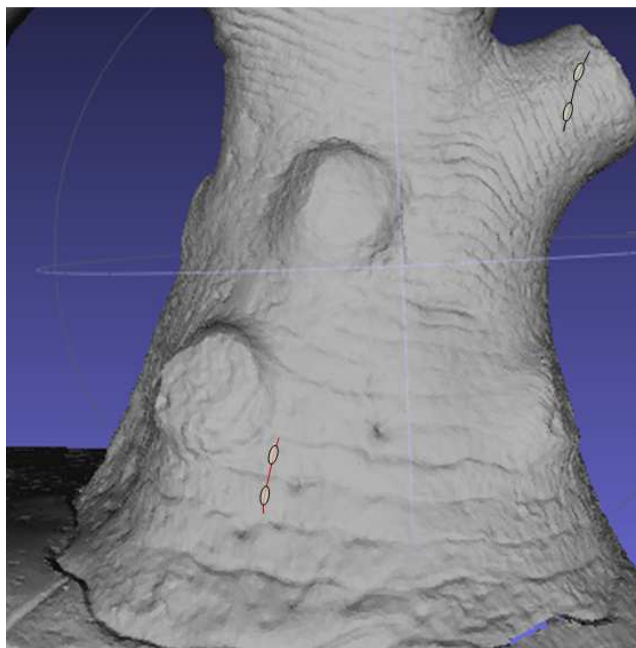


Figura 20: Posizioni dei sensori.



Figura 21: Applicazione dell'adesivo sul broncone.

Una volta decise le posizioni dei sensori, si è proceduto alla loro installazione. Le operazioni sono state eseguite sotto la supervisione della restauratrice Cinzia Parnigotti. La scelta dell'adesivo da utilizzare è stata oggetto di un precedente studio eseguito in laboratorio¹, avente lo scopo di individuare l'adesivo più adatto tenendo conto dei seguenti fattori:

- trasparenza;
- facilità di rimozione;

¹ Lorenzo Zanolì: "Applicazione di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di stati fessurativi: il caso del David di Michelangelo", Tesi di Laurea, Università di Bologna, 2010.

- capacità di impedire lo sfilamento della fibra;
- assenza di deformazioni viscosi;
- stabilità nel tempo.

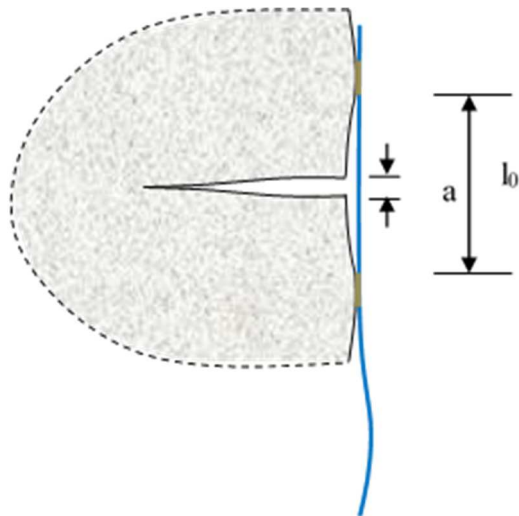
La scelta è caduta sul cianocrilato M-Bond 200, adesivo bicomponente. Per prima cosa è stato necessario stendere il catalizzatore mediante un pennello a punta sottile sui punti della superficie di marmo scelti per l'incollaggio e dopo alcuni minuti si è potuto procedere ad applicare l'adesivo direttamente sulla superficie catalizzata, sempre mediante l'utilizzo di un pennello. In Figura 21 è rappresentata la fase di applicazione dell'adesivo in corrispondenza della fessura più importante presente sul broncone.

Le distanze tra i punti di incollaggio delle fibre sul broncone sono pari a circa 18 mm per la fibra applicata sulla fessura e a 25 mm per quella disposta sul marmo non fessurato. I tre sensori erano collegati in serie sulla stessa fibra, sfruttando la possibilità di multiplexing di questo tipo di sensore.

I dati rilevati dai sensori sono espressi in termini di lunghezza d'onda (nanometri) della luce riflessa e sono stati in seguito convertiti in termini di deformazione (microstrain). Una volta note le deformazioni rilevate dal sensore sulla fessura e da quello sul marmo non fessurato, si è proceduto alla loro depurazione dall'effetto della variazione di temperatura utilizzando i valori rilevati dalla fibra libera.

Calcolo delle variazioni di ampiezza della fessura

Con riferimento alla Figura 22, si indica con:



- a l'apertura della fessura;
- l_0 la lunghezza iniziale del tratto di fibra compreso tra i due punti di incollaggio;
- Δa la variazione di apertura della fessura;
- Δl la variazione di lunghezza del tratto di fibra compreso tra i due punti di incollaggio;
- Δt la variazione di temperatura;
- α il coefficiente di dilatazione termica del marmo;
- ϵ_c la deformazione misurata dal sensore posto sulla fessura;
- ϵ_m la deformazione misurata dal sensore posto sul marmo non fessurato.

Figura 22: calcolo della variazione di apertura della fessura

Risulta:

$$\Delta l = \epsilon_c \cdot l_0 \quad ; \quad \Delta a = \Delta l - \alpha \cdot \Delta t \cdot l_0$$

Il secondo termine della precedente relazione dipende dalla deformazione termica subita dal marmo per effetto delle variazioni di temperatura e può essere valutato a partire dalla deformazione misurata dal sensore posto sul marmo non fessurato.

Risulta quindi:

$$\Delta a = \epsilon_c \cdot l_0 - \epsilon_m \cdot l_0 = (\epsilon_c - \epsilon_m) \cdot l_0$$

Risultati

Nel seguito vengono presentati i risultati finora acquisiti in termini di variazione nel tempo dei parametri misurati.

Si è fissato come inizio del monitoraggio il quindicesimo giorno, trascurando i primi 14 giorni di rilevazione in quanto i valori ottenuti in questo periodo risentono dell'assestamento della strumentazione.

Il monitoraggio è durato dal giugno 2010 al febbraio 2012. I dati acquisiti sono stati elaborati separatamente per periodi di durata dai due ai tre mesi. Sono stati poi riuniti per le elaborazioni conclusive.

A titolo di esempio si riportano i dati acquisiti nel periodo dal Settembre al Novembre 2010.

Nel grafico di Figura 23 sono riportati i dati di tutto il periodo, mentre in Figura 24 sono riportati i dati di una finestra temporale di 10 giorni all'interno del periodo stesso.

Per migliorare la leggibilità dei grafici, ad ognuna delle curve è stata sovrapposta un'altra curva che rappresenta la media mobile calcolata su un periodo scelto in funzione del tipo di grafico.

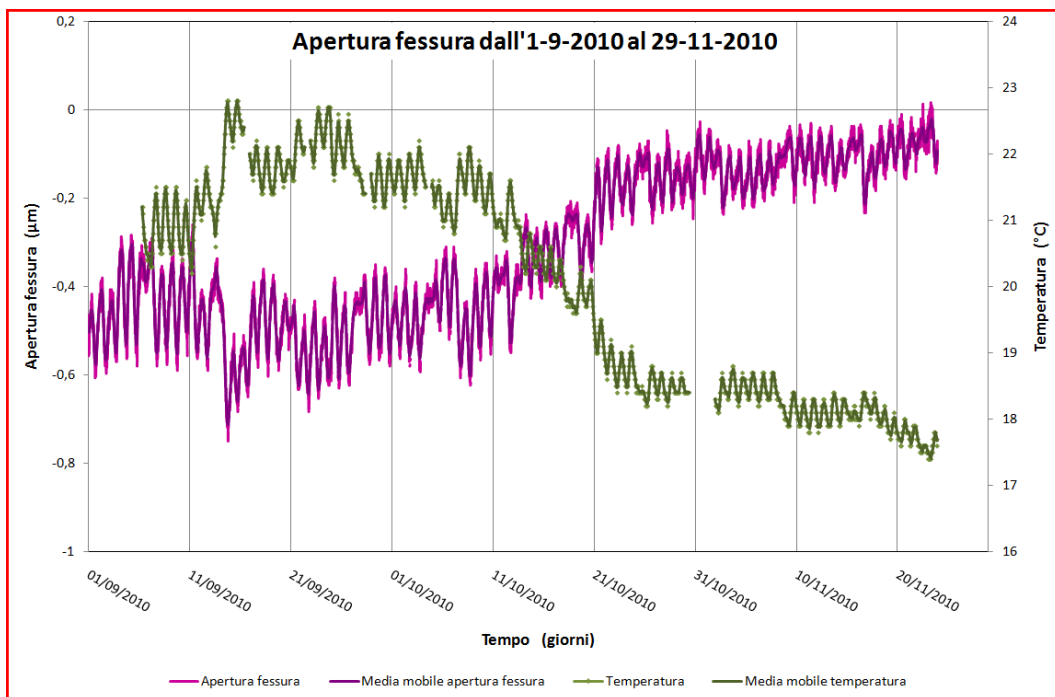


Figura 23: variazioni di apertura della fessura nel periodo 01/09/2010 – 29/11/2010

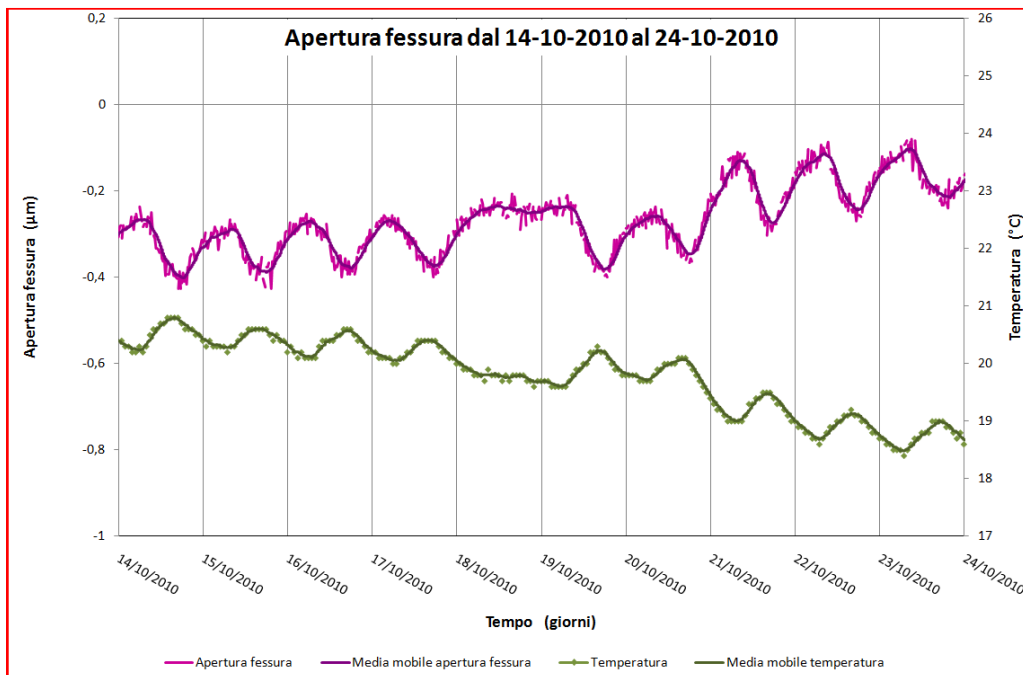


Figura 24: variazioni di apertura della fessura nel periodo 14/10/2010 – 24/10/2010

Analisi dei dati del monitoraggio

Da un'analisi dei risultati si può osservare che gli andamenti dell'apertura della fessura e della temperatura si trovano in opposizione di fase. In corrispondenza della fessura monitorata, infatti, un aumento della temperatura comporta una dilatazione del marmo, che va ad interessare la fessura stessa provocandone una diminuzione di apertura. Probabilmente su questo incide anche il fatto che l'incremento di temperatura non è uniforme all'interno del materiale. La parte interna della statua, infatti, risentendo meno delle variazioni di temperatura, subisce una dilatazione inferiore rispetto alle zone superficiali. Inoltre, queste ultime, a causa dell'azione nel tempo degli agenti atmosferici, hanno probabilmente subito una modificazione delle proprietà meccaniche e fisiche, con alterazione del modulo elastico e forse anche del coefficiente di dilatazione termica.

Al fine di valutare in modo più accurato il legame tra gli andamenti dell'apertura della fessura e della temperatura, è stata effettuata un'analisi mediante regressione.

In Figura 25 è riportato il diagramma temperatura-variazione dell'apertura della fessura relativo a tutto il periodo di monitoraggio.

La regressione lineare presenta un valore del coefficiente di correlazione R pari 0,964, rappresentativo di un'ottima correlazione tra le due grandezze. Analizzando la pendenza della retta di regressione è possibile osservare che ad una diminuzione di temperatura di 1°C corrisponde un incremento di apertura della fessura di circa $0,1\ \mu\text{m}$.

È stato poi effettuato (

Figura 26) un confronto tra i valori delle due grandezze relativi allo stesso periodo di tempo del 2010 e del 2011. Il periodo considerato è stato quello compreso tra il 28 giugno e il 17 novembre dei due anni. In figura è possibile osservare in blu i valori ottenuti nel 2010 e in rosso quelli relativi al 2011.

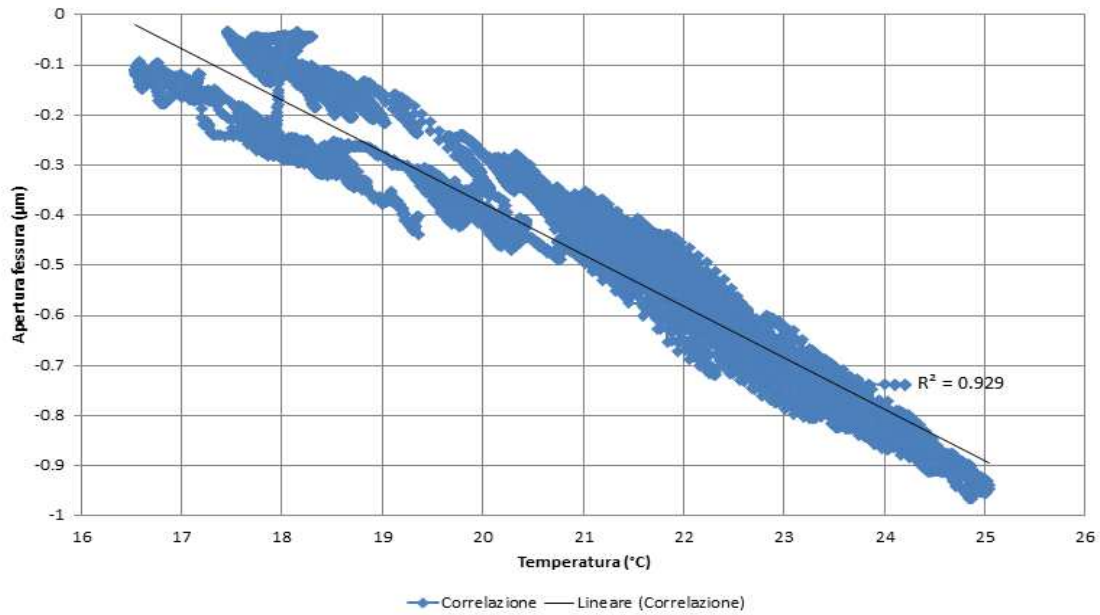


Figura 25: correlazione temperatura- variazione di apertura della fessura nel periodo 10/6/2010 – 15/2/2012

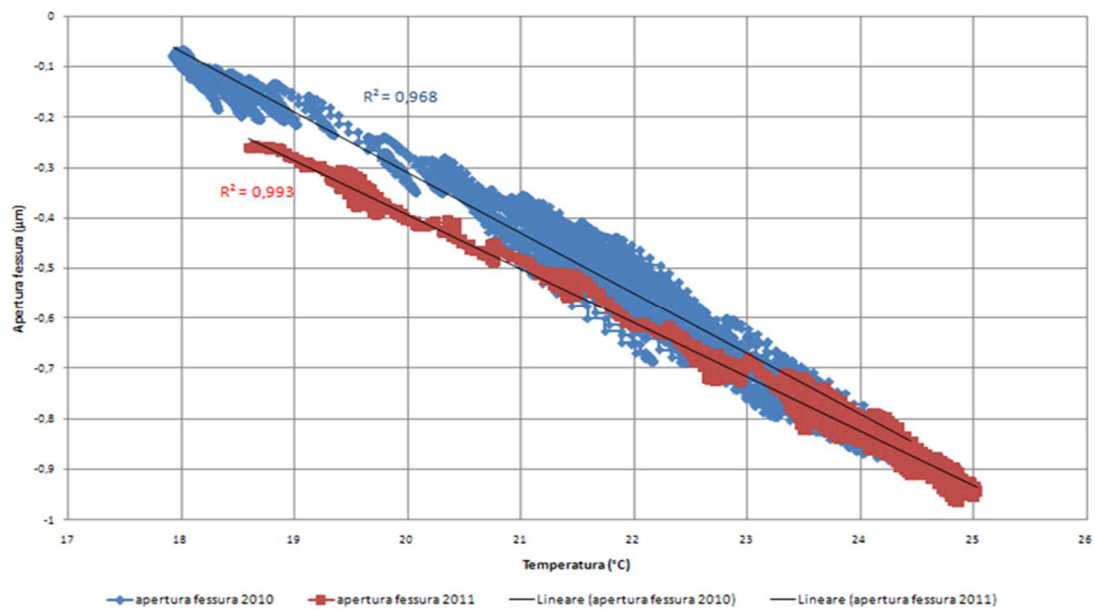


Figura 26: confronto tra i valori ottenuti in uno stesso periodo di tempo del 2010 e del 2011

Da un'analisi della figura si può osservare ancora, per entrambi i periodi, un'ottima correlazione tra temperatura e apertura della fessura, con valori del coefficiente di correlazione R pari, rispettivamente, a 0,984 per il 2010 e a 0,966 per il 2011.

Si può rilevare, inoltre, la presenza di uno scarto tra i valori rilevati nei due anni successivi, che si riduce all'aumentare della temperatura, rimanendo sempre su valori molto bassi, dell'ordine di 0,1 µm. I valori di apertura della fessura, addirittura, mostrerebbero una lieve

riduzione nell'anno 2011 rispetto a ai valori ottenuti nel 2010. Si tratta comunque di valori dello stesso ordine di grandezza della risoluzione strumentale. Questo risultato indica che la fessura non ha un comportamento preoccupante, essendo rimasta pressoché stabile nei due anni considerati. Nel periodo di osservazione, non si sono verificati sismi di intensità tale da attivare il monitoraggio dinamico.

6 CONCLUSIONI

L'attività svolta presso le opere marmoree di Michelangelo Buonarroti presso la Galleria dell'Accademia di Firenze ha messo in evidenza come le procedure per la diagnostica e il monitoraggio delle strutture possano essere applicate anche sulle opere d'arte, con riferimento al loro comportamento meccanico.

Ciò che maggiormente differenzia le diverse applicazioni sono i sensori utilizzati, che nel caso di opere d'arte devono essere minimamente invasivi, senza contatto, con minimo impatto visivo e completamente removibili.

In particolare, le indagini finalizzate alla valutazione della gravità dello stato fessurativo che interessa la parte inferiore del David hanno permesso di ottenere informazioni importanti sulla profondità delle fessure più preoccupanti, che generalmente è contenuta entro i 20 mm circa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Berto, T. Favaretto, A. Saetta, F. Antonelli, L. Lazzarini (2012), Assessment of seismic vulnerability of art objects: The "Galleria dei Prigioni" sculptures at the Galleria dell'Accademia in Florence, *Journal of Cultural Heritage*, 13; pp. 7-21.
- [2] G. Pascale, F. Bastianini, A. Lolli, R. Carli (2011), Use of optic sensors for structural monitoring of big statues, AIMETA 2011, Bologna, September 12-15, 2011, Paper N° 399 (In Italian).
- [3] MIBAC (2004), *Exploring David*, Giunti.
- [4] A. Borri (2005), *La stabilità delle grandi statue: il David di Michelangelo*, DEI, Rome (in Italian).
- [5] A. Borri, A. Grazini (2006), Diagnostic analysis of the lesions and stability of Michelangelo's David, *Journal of Cultural Heritage*, 7; pp. 273-285.
- [6] G. Corti, P. Costagliola, M. Bonini, M. Benvenuti, E. Pecchioni, A. Vaiani, F. Landucci (2014), Modelling the failure mechanisms of Michelangelo's David through small-scale centrifuge experiments, *Journal of Cultural Heritage*, in press.
- [7] G. Pascale, F. Bastianini, R. Carli (2011), Monitoring Marble Cracking in the David by Michelangelo, Art'11 10th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage, April 13th-15th 2011, Paper N° NDT 44, Firenze.
- [8] Pascale G., Lolli A., "Cracking Assessment in The David by Michelangelo", 5th International Conference on NDT of HSNT - IC MINDT 2013, Athens, Greece, May 20-22, 2013.
- [9] A. Lolli, G. Pascale, "Metodi non distruttivi per l'analisi di stati fessurativi: il caso del David di Michelangelo", Conferenza Nazionale sulle prove non Distruttive, Monitoraggio e Diagnostica, 23-26 ottobre 2013, Trieste.
- [10] G. Pascale, A. Lolli, F. Bastianini, "Crack Monitoring in Michelangelo's David", 11th International Conference Art'14, Madrid, June 6-9, 2014.

- [11] G. Pascale, A. Lolli, Crack assessment in marble sculptures using ultrasonic measurements: Laboratory tests and application on the statue of David by Michelangelo, *Journal of Cultural Heritage* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.02.005>.
- [12] B. Christaras (1998), Non-destructive methods used for the estimation of the damage (weathering and cracks) of the building and ornamental stones, *Conseil de l'Europe-PACT55*; pp. 213-220.
- [13] I.N. Prassianakis, S.K. Kourkoulis, I. Vardoulakis (2000), *Marble monuments examination using the NDT method of ultrasounds*, 15th WCNDT, Rome, Italy.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori rivolgono un sentito ringraziamento alla Fondazione “Friends of Florence” per il supporto economico alle indagini diagnostiche sul David.

Si ringraziano, inoltre, la Dott.^{ssa} Franca Falletti, Direttrice della Galleria dell'Accademia nel periodo di attuazione del programma di monitoraggio, per avere fornito tutto l'aiuto e la collaborazione per lo svolgimento delle attività e il Dr. Roberto Scopigno dell'ISTI CNR di Pisa per avere messo a disposizione il modello 3D eseguito con laser scanner in collaborazione con la Stanford University.