

a cura di Antonio Borri

# La stabilità delle grandi statue: **IL DAVID DI MICHELANGELO**



## PREFAZIONE

Questo libro propone una insolita lettura della grandiosa statua del David di Michelangelo, statua che segnò, come disse il Vasari, la vittoria del mondo "moderno" sulla scultura greco-romana e che ci mostra un David in quel momento di grande intensità interiore che precede la lotta.

Essa fu inaugurata l'8 settembre del 1504 in Piazza della Signoria e divenne subito la statua più amata dai fiorentini tanto da diventare in breve tempo il simbolo della stessa città.

A causa della sua forma e dimensioni, è alta circa 5,17 m, è soggetta a tensioni di trazione in alcune sue parti e ciò pone un interessante ed originale problema di sicurezza strutturale in raffronto alle caratteristiche meccaniche del materiale con cui la statua è stata realizzata e soprattutto alle trasformazioni che lo stesso ha subito nell'arco di ben cinque secoli. Esaminare il quadro fessurativo e ipotizzarne l'origine, interpretarlo alla luce delle attuali conoscenze nell'ingegneria strutturale e tentarne una modellazione sono il presupposto per passare ad una possibile terapia. La questione è poi resa più complessa dalle problematiche sismiche che hanno interessato e che è prudente supporre che interesseranno ancora questo monumento la cui salvaguardia è indubbiamente la priorità assoluta.

Il libro compie un percorso completo, dalla ricostruzione storica dell'inclinazione della statua, per comprendere l'evoluzione nel tempo delle condizioni di stabilità, fino alle ipotesi progettuali, alla proposta cioè di realizzazione di un basamento che sia in grado di metterla al riparo da pericolose azioni sismiche, passando attraverso l'applicazione, davvero non banale, dei metodi che la Scienza delle Costruzioni oggi ci consente di utilizzare.

Franco Angotti

Presidente della Facoltà di Ingegneria  
dell'Università degli Studi di Firenze

## PRESENTAZIONE

*“L'ignoranza, per colui che conosce, vale quanto la conoscenza, dal momento che entrambe fan parte del problema del conoscere”*

(E. Fromm)

Quando, nei primi mesi del 2003, Luciano Marchetti (responsabile per le indagini statiche sul David, oltre che Presidente della Sezione Beni Culturali della Commissione Grandi Rischi) mi chiese di collaborare alle ricerche che erano state avviate in occasione dei 500 anni del capolavoro di Michelangelo, si può immaginare il mio entusiasmo di fiorentino, nato e vissuto a lungo in quella città.

Gli ultimi anni, passati immerso in una intensa e coinvolgente attività scientifica a Perugia (complice il terremoto del 1997, che aveva fornito importanti occasioni di ricerca) certo non avevano cancellato dalla memoria quelle immagini quasi quotidiane del David che avevano accompagnato la mia vita a Firenze.

Piazzale Michelangelo, dove con gli amici ci davamo appuntamento (con detti anche un po' coloriti) proprio sotto la copia in bronzo voluta da Giuseppe Poggi nel 1873; Piazza della Signoria, dove portavo i figli a rincorrere i piccioni tra il “Biancone” e la copia in marmo del David messa lì ai primi del Novecento. E poi la Galleria dell'Accademia, con le file ininterrotte di turisti in via Ricasoli, in paziente e ordinata attesa di vedere il Gigante.

L'idea di poter mettere le mie competenze di ingegnere e di scienziato a disposizione per un così alto compito e, magari, riuscire a fornire un qualche contributo alla sua conservazione era quanto di più stimolante potessi desiderare. Dopo quasi tre anni di studi, ricerche approfondite e molto impegno da parte mia e di tutti coloro che con me hanno operato per questo obiettivo, viene ora dato alle stampe questo volume che raccoglie e sintetizza i risultati raggiunti in merito alla stabilità del David.

Anche se alcuni particolari restano da indagare (e saranno indagati) per fornire una visione completa della situazione, soprattutto in prospettiva di eventuali possibili interventi di salvaguardia e di prevenzione, il quadro clinico della

stabilità della statua è delineato con precisione: la diagnosi appare evidente, come anche la prognosi.

Problematica è invece l'individuazione di una terapia "ottimale", ovvero di una soluzione dei problemi emersi, che sia soddisfacente sotto tutti i punti di vista. I primi risultati di questi lavori furono presentati nel giugno del 2004 in un Convegno organizzato dalla Galleria della Accademia e dal Collegio degli Ingegneri della Toscana (che peraltro fu fondato nell'Ottocento proprio dai personaggi che si interessarono delle problematiche statiche del David e del suo trasferimento).

In questo volume vengono ora proposte, seguendo lo stesso ordine di presentazione di quel Convegno, le conclusioni finali della ricerca, o, quanto meno, il loro stato attuale.

Prima di riassumere i vari contributi, voglio riportare qui, in ordine un po' sparso, alcune riflessioni personali maturate nel corso di questa esperienza.

Nel cercare di mettere in luce il percorso seguito per lo studio del David mi è tornato alla mente un aforisma dell'antropologo Lévi-Strauss: "Scienziato non è colui che sa dare le vere risposte, ma colui che sa porre le giuste domande". Non nascondo che la prima volta che ho letto questa frase mi è venuto da sorridere, ed ho pensato (in pieno delirio di onnipotenza ingegneristica): "meno male che oltre agli scienziati ci siamo anche noi ingegneri, che sappiamo dare le risposte!".

Confesso: non avevo capito, e la mia sola scusante è l'immaturità e l'inesperienza della (allora) verde età.

Mi è capitato di rileggere quelle parole di recente, e voglio fare ammenda di tanta giovanile presunzione evidenziando qui come i risultati più interessanti delle ricerche sul David sono scaturiti proprio grazie alla individuazione della "giusta" domanda.

Cosa aveva prodotto le lesioni sul David? Quesito certo di grande interesse: la comprensione del meccanismo che aveva messo in crisi il David era importante, non solo per il valore storico, ma anche per comprenderne fino in fondo il funzionamento statico.

Ma, molto più intrigante, una volta trovato che, senza più alcun dubbio, la causa delle lesioni era una inclinazione del basamento, è apparsa la domanda: di quale entità era stata questa inclinazione? Ovvero, *di quanto era inclinata la statua quando si erano aperte le fessure?*

Questa era la domanda "giusta". Essa non costituiva un mero esercizio accademico (apparentemente inutile in quanto ormai la statua era tornata nella corretta posizione) inteso solo a colmare una lacuna nei documenti storici. Attraverso quella domanda (trovando, ovviamente, anche il modo per avere la risposta) si poteva giungere (e così è stato) alla conoscenza di un aspetto "intimo" del David, ovvero di quella sua "debolezza" intuita e temuta per la sua criticità sin dall'inizio, quando la statua stava ancora dentro quell'enorme blocco di marmo, e sia Agostino di Duccio che Antonio Rossellino avevano rinunciato a lavorarlo: *la resistenza* di quel materiale.

E peraltro proprio questa caratteristica meccanica, rimasta sin qui del tutto ignota nella sua dimensione effettiva, costituiva l'elemento più importante ai fini del comportamento e quindi del destino del David.

Penso quindi che questo sia il risultato più significativo del lavoro svolto, tanto più rilevante quanto irraggiungibile per altre vie. Certo neppure pronunciabili percorsi di indagine diretta (prove a rottura!) e ben poco precisi e attendibili, almeno per un materiale "storicizzato" come questo, metodi diagnostici strumentali indiretti.

Attraverso un percorso inconsueto, ovvero con una ricostruzione virtuale di quella "forzata" e lesionante sperimentazione cui il David, suo malgrado, era stato soggetto nell'Ottocento, si è trovata la resistenza del materiale, o quanto meno se ne è individuato un plausibile limite superiore.

Noto questo dato fondamentale è stato poi possibile analizzare la situazione attuale della statua e prevederne con adeguata precisione il comportamento alle azioni ambientali (in particolare: le azioni sismiche), e quindi, con strumenti scientifici ed approcci che lasciano ben poco margine a dubbi, si è potuto mostrare quale futuro attende il David.

Spetta ora ad altri il compito di porsi le "giuste" domande sul da farsi e di trovare le adeguate risposte.

Certo, adesso che il meccanismo causa-effetto (inclinazione-lesioni) è chiaro e, soprattutto, quantificato, impressiona la vulnerabilità del Colosso: è bastato che il basamento si inclinasse di un angolo di modestissima entità per metterlo a dura prova e quasi portarlo alla rovina.

D'altra parte impressiona anche la sua capacità di superare prove ardue come questa, dopo secoli e secoli di esposizione alle intemperie, a cicli termici, a vibrazioni, a dilavamenti, a panche tirategli addosso, a cedimenti fondali, a martellate di folli, etc.

Va detto però, con grande chiarezza, che il destino del David, così restando le cose, è infaustamente definito. E sarà difficile non tenere conto di questa previsione, tranquillizzati solo dal fatto che l'esperienza diretta di un sisma fiorentino è lontana nel tempo e nessuno sa quando ci sarà.

Ben pochi dei contemporanei hanno vissuto l'esperienza del terremoto in quella città (l'ultimo sisma forte è del 1919), *anche oggi non c'è stato il terremoto*, e quindi, si potrebbe dire, stiamo pure tranquilli.

Come il noto tacchino "induttivista" di Popper, felice e contento perché: *anche oggi il suo padrone (il fattore) gli ha portato da mangiare*, e quindi se ne stava sereno e tranquillo, incapace di prevedere quello che sarebbe accaduto a Natale...

E non "consoli" il pensiero che se venisse giù il David cascherebbe mezza Firenze... Non è questa la situazione reale: in una scala delle maggiori situazioni di vulnerabilità il David si trova nelle prime posizioni e può subire gravi danni (lesionato e bloccato come è alla base da un poco opportuno intervento ottocentesco) molto prima di altri manufatti che sono ben più stabili di lui.

Pensare che andrà sempre bene perché sino ad oggi è andata bene significa-

rebbe non conoscere la storia, non conoscere le implacabili leggi della meccanica e della probabilistica, e significherebbe anche non essersi accorti di vicende come quelle che ci hanno interessato da contemporanei, con eventi (prevedibili) che hanno causato perdite di capolavori millenari (vedi la città di Bam in Iran).

Qui la prevenzione, oltre che doverosa, è possibile.

Dire però quale sia la soluzione da adottare non è né semplice né scontato. In condizioni "normali", l'isolamento sismico alla base rappresenta la strada più efficace ed efficiente. Le particolari condizioni al contorno (necessità di mantenerne la fruibilità al pubblico, obbligo di una assoluta sicurezza per la statua nelle fasi del cantiere, e quindi necessità di "bloccare" e, forse, sollevare il David, con tutto quello che ne consegue) impongono di indagare a fondo su questa via, come su ogni possibile alternativa.

Concludo con una sintetica presentazione dei contributi dei vari Autori, le cui diversità di competenze hanno costituito e costituiscono la chiave di volta per uno studio di questo tipo. Mai come in questo caso, infatti, è fondamentale un approccio di tipo multidisciplinare per poter analizzare le varie problematiche e individuarne le possibili soluzioni.

Franca Falletti, nel lavoro che apre il volume, tratteggia con cristallina chiarezza le vicende storiche che maggiormente hanno influito sui problemi statici del David, dalla sua nascita sino ai giorni nostri. La disamina delle fonti a stampa sullo stato di conservazione del David ha messo subito nella giusta direzione le indagini volte ad individuare le cause delle lesioni.

Nel contributo di Giampaolo Trotta vengono ricordate le figure storiche degli ingegneri e degli architetti che nell'Ottocento si interessarono, a vario titolo, prima delle indagini statiche e poi del trasferimento del David alla Galleria dell'Accademia. Fu proprio in quegli anni che nacque, grazie ad alcuni di quei personaggi, il Collegio degli Ingegneri e degli Architetti in Firenze, divenuto poi Collegio degli Ingegneri della Toscana.

I successivi due capitoli, quello dello scrivente e quello di Andrea Grazini, sono qui presentati separati tra loro solo per illustrare più chiaramente, distinguendoli, i diversi contributi: il percorso metodologico relativo alla diagnosi delle lesioni, l'analisi della stabilità del David alle azioni ambientali e la modellazione della statua e del suo comportamento.

Si deve alle rilevanti capacità dell'ing. Grazini nell'impiego dei modellatori solidi e nelle analisi FEM la chiarezza dei risultati ed il loro stesso conseguimento, reso certo non facile dalla complessità e dalle particolarità del modello di riferimento.

Al momento di andare in stampa del presente volume è stata completata anche l'analisi dinamica completa della statua utilizzando il modello tridimensionale. Non c'è tempo per riportarne qui i risultati; basti dire che l'analisi eseguita conferma in pieno quanto già trovato con i modelli descritti in questo volume. Fabio Radicioni, Guido Fastellini e Silvia Grassi illustrano nel loro contributo le metodologie e le tecniche di rilievo fotogrammetrico con le quali, con

grande perizia, sono giunti a determinare l'inclinazione assunta dalla statua nella metà dell'Ottocento. Il loro punto di partenza sono state le fotografie che insieme alla Dottoressa Falletti avevamo cercato e reperito negli archivi fiorentini degli Alinari e della famiglia Hautmann (cui va un particolare ringraziamento per la disponibilità dimostrata).

Con il contributo di Alessandro Martelli si entra nel dibattito di cosa sia possibile fare per prevenire il rischio sismico di opere d'arte come questa attraverso l'esame delle problematiche della protezione sismica del patrimonio storico-artistico (edifici e singole opere d'arte) e l'illustrazione dei sistemi (isolamento sismico, dissipazione d'energia, leghe a memoria di forma, "shock transmitter", etc.) che la tecnologia rende oggi disponibili per la difesa delle strutture e di singoli oggetti dal terremoto.

Claudio Mazzieri mostra poi un importante caso di applicazione delle tecniche di isolamento sismico già realizzato, quello dei Bronzi di Riace, illustrando il progetto, la realizzazione e le verifiche delle piattaforme antisismiche e del sistema di vincolo dei bronzi alle piattaforme stesse.

Luciano Marchetti, attento coordinatore e supervisore delle indagini svolte, chiude il volume con un contributo che esamina uno dei possibili percorsi per la riduzione del rischio sismico del David: quello di un isolatore posto al di sotto del basamento ottocentesco, delineando, nelle conclusioni, la via da seguire: la necessità di una indagine conoscitiva adeguatamente approfondita su tutti i vari aspetti del problema, con particolare riguardo alle problematiche che possono emergere nella realizzazione vera e propria dell'intervento.

In appendice è poi riportata, per una più ampia divulgazione dei risultati ottenuti, una sintesi in inglese delle parti riguardanti le indagini diagnostiche e di stabilità della statua.

A conclusione di questa presentazione voglio esprimere un particolare ringraziamento alla Direttrice della Galleria della Accademia, Dottoressa Franca Falletti, alla cui acuta vivacità intellettuale e disponibilità queste ricerche devono molto.

Prof. Ing. Antonio Borri

Ordinario di Scienza delle Costruzioni  
Presidente del Centro Studi Sisto Mastrodicasa

### 3. DIAGNOSI DELLE LESIONI E ANALISI DELLA STABILITÀ DEL DAVID DI MICHELANGELO

*Antonio Borri<sup>1</sup>*

Il presente lavoro riassume le considerazioni e le analisi diagnostiche riguardanti il quadro fessurativo che, a partire dalla metà dell'Ottocento, fu rilevato sulla statua del David di Michelangelo.

Dopo aver ripercorso le principali vicende che possono averne influenzato la stabilità e lo stato deformativo, sono discussi i risultati delle analisi FEM eseguite sul modello strutturale.

Dalla analisi dei risultati si è pervenuti alla identificazione delle condizioni statiche che hanno generato le lesioni nella parte inferiore della gamba sinistra e sul "broncone" del David.

È stata quindi analizzata la situazione attuale, sia dal punto di vista deformativo che da quello tensionale, giungendo a valutare la stabilità della statua anche per quanto riguarda la risposta strutturale ad eventuali azioni di tipo sismico del livello previsto per l'area in oggetto.

#### 3.1. PREMESSA

Nell'intraprendere lo studio sulla stabilità del David di Michelangelo emergono evidenti tre caratteristiche particolari di questo capolavoro, caratteristiche che ne condizionano fortemente il comportamento meccanico:

- la qualità del marmo, di scarsa resistenza e di facile degrado ("un marmaccio", come coloritamente ma efficacemente definito dagli esperti di questo materiale), specie se esposto per secoli, come in questo caso, a variazioni termiche e alle intemperie;
- la forma stessa della statua, dove lo sporgere in avanti e di fianco di questo "giovinetto di forme colossali preparato a scagliare una pietra", e la snellez-

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università di Perugia. Presidente del Centro Studi Sisto Mastrodicasa.

za nella zona delle caviglie (a differenza di altre grandi statue “paludate” nella parte inferiore) portano, anche nella situazione attuale, cioè con il basamento perfettamente orizzontale, a rilevanti tensioni di trazione in zone che proprio per questo motivo si sono già lesionate e fessurate;

- è la “vita attesa” del David, cioè quale durata temporale debba avere un sifatto capolavoro. Dalla lunghezza di questa vita derivano le tipologie ed i livelli dei rischi sia ambientali che antropici che devono essere messi in conto nella analisi.

Così, ad esempio, mentre per valutare il rischio sismico per un qualsiasi manufatto ci si pone un orizzonte di tempo limitato (tipicamente si assume come riferimento per una costruzione civile un terremoto che ha una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, da cui deriva un periodo di ritorno di 475 anni), nel caso del David la durata da considerare appare infinita, e questo porta certo ad assumere come sisma di riferimento il valore massimo atteso per l'area fiorentina.

Esiste poi una quarta particolarità (evidenziata nel corso del presente studio) che per il David può giocare un ruolo molto negativo: l'ancoraggio del basamento della statua alla fondazione, ancoraggio realizzato nel 1873, che, bloccandone la base, obbliga la statua, in caso di azioni dinamiche orizzontali, ad inflettersi e a deformarsi, invece di oscillare rigidamente.

Combinando insieme queste particolarità, e ricordando una frase del matematico Emil Gumbel: “è impossibile che l'improbabile non avvenga mai” (esprimibile anche come: “quello che ha una pur piccola probabilità di avvenire avverrà certamente”), si comprende come la situazione debba essere attentamente considerata, se si ha a cuore la salvaguardia di opere come questa.

Per questo motivo, quando, in occasione dei cinquecento anni del David, sono state svolte varie indagini sullo “stato di salute” di questo capolavoro (v. [1]), la ricerca ha preso in considerazione in modo approfondito le diverse problematiche relative alla stabilità presente e futura della statua.

Il lavoro che segue riassume i risultati principali di questa ricerca e degli ulteriori studi condotti su tale argomento dall'autore del presente articolo e da altri ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia<sup>2</sup>, con il coordinamento e la supervisione dell'Ing. Luciano Marchetti, Presidente della Sezione Beni Culturali della Commissione Grandi Rischi.

---

<sup>2</sup> Con l'autore del presente articolo hanno collaborato alla ricerca: l'ing. Andrea Grazini per quanto riguarda la modellazione e l'analisi FEM, il Prof. Fabio Radicioni, l'ing. Guido Castellini e l'ing. Silvia Grassi per il rilievo fotogrammetrico della inclinazione della statua. I loro contributi sono riportati in questo stesso volume, come anche quello dell'ing. Luciano Marchetti, relativo alle possibili tipologie di intervento.

### 3.2. SINTESI DEL LAVORO SVOLTO E DEI RISULTATI OTTENUTI

Allo scopo di fornire una breve sintesi del lavoro svolto si vuole qui riassumere il percorso seguito ed i risultati ottenuti nella ricerca, anticipando quanto verrà poi presentato in dettaglio nelle parti successive del presente articolo e negli altri contributi.

Nella prima fase lo studio ha riguardato la individuazione delle possibili cause che possono aver dato origine alle lesioni ancor oggi visibili in alcune zone del David, in particolare nella parte posteriore della gamba sinistra e sul "broncone".

È apparso però subito evidente che una accurata diagnosi delle lesioni avvenute nel passato poteva fornire informazioni importanti per comprendere il "funzionamento" meccanico ed i limiti fisici del David, e, in particolare, poteva consentire di risalire alle caratteristiche di resistenza di quel materiale.

Capire cosa era avvenuto nel passato poteva quindi fornire importanti indicazioni in merito al comportamento per azioni che nel futuro dovessero interessare la statua.

Attraverso la ricerca storica, grazie ad un riesame critico dei documenti esistenti (in particolare le relazioni delle varie Commissioni che nel periodo 1852-1873 se ne occuparono) e grazie anche ad un nuovo rilievo del quadro fessurativo e alla analisi FEM che sarà in seguito descritta, è stata definitivamente avvalorata l'ipotesi, peraltro già avanzata nel 1871, che a causare le fessurazioni sia stata una inclinazione della statua, avvenuta quando questa si trovava in Piazza della Signoria.

Si è cercato qui di "datare" e di accertare l'origine di tale inclinazione, giungendo ad ipotizzare le cause più probabili. La risposta che appare oggi maggiormente sostenibile è che la causa delle lesioni sia da ricercare in una inclinazione avvenuta dopo il 1843 (data in cui viene eseguita una operazione di pulitura e non viene fatta menzione di alcuna lesione) e prima del 1851 (data in cui vi è una prima chiara denuncia del problema), inclinazione originata a causa di cedimenti differenziali del terreno al di sotto della fondazione. La causa prima di questi cedimenti appare associabile sia all'alluvione del 1844, sia all'aggravio dovuto al calco in gesso che venne eseguito nel 1847.

Se qualche incertezza in merito alla causa originaria della inclinazione può essere ancora legittima, evidente è invece il legame inclinazione-lesioni avvenute: una piena conferma è stata fornita proprio nel presente studio, mostrando come il modello strutturale FEM del David (costruito a partire dal rilievo con il laser eseguito dall'ISTI-CNR di Pisa, in collaborazione con l'Università di Stanford) "risponda" ad una inclinazione in avanti della statua con i massimi delle tensioni di trazione esattamente nelle zone fessurate.

È da sottolineare che la comprensione dell'origine e della meccanica delle lesioni oggi presenti non ha solo un'importanza storica: la capacità del modello strutturale a riprodurre puntualmente il quadro fessurativo presente costituisce

una buona validazione del modello stesso, e lo rende uno strumento attendibile per successive analisi sul comportamento del David in presenza di sollecitazioni di vario tipo, incluse quelle dinamiche.

Ancor più interessante è il fatto che l'inclinazione subita dalla statua nella metà dell'800 può essere vista per il David come una vera e propria prova sperimentale (pur se involontaria) "dal vero" del suo comportamento meccanico: per quella certa inclinazione (purtroppo non ben quantificata nei documenti storici) la statua ha subito evidenti fessurazioni, superando in ben determinati punti la resistenza a trazione di quel materiale.

Appare questa, quindi, una occasione importante per conoscere per via indiretta (l'unica possibile, non potendo eseguire prove dirette sulla statua) qualcosa delle caratteristiche meccaniche del marmo del David, ed in particolare il valore di rottura a trazione.

Ma per determinare questo valore occorre conoscere l'esatta entità della inclinazione subita dal David, e qui, purtroppo, i documenti storici non aiutano ad identificarla, a causa di evidenti imprecisioni e contraddizioni.

Ma del periodo in cui la statua si trovava ancora in Piazza della Signoria, inclinata e lesionata, esistono dei documenti fotografici: del resto era proprio quello il momento in cui prendeva avvio la fotografia e certamente doveva esserci qualche immagine di una statua così importante.

Con una ricerca presso gli archivi fotografici storici degli Alinari a Firenze e presso i discendenti di un altro fotografo dell'epoca (Anton Hautmann) sono state individuate ed acquisite numerose immagini della statua quando era ancora nella sua posizione originaria, in un periodo in cui era stato già denunciato l'insorgere delle fessurazioni (e quindi era già inclinata).

Da queste fotografie, grazie alle moderne tecniche di rilievo fotogrammetrico, è stato possibile rilevare con precisione (con la tecnica che verrà mostrata in un successivo contributo) l'inclinazione della statua rispetto alla verticale (ovvero rispetto alla situazione di basamento orizzontale): si trattava di circa un grado in avanti.

Nota l'inclinazione è stato possibile ricavare, attraverso il modello strutturale FEM già ben collaudato, la tensione raggiunta nelle zone fratturate in questa situazione: tale valore (di circa  $2 \text{ N/mm}^2$ ) rappresenta un limite superiore per la tensione di rottura del materiale con cui è stato realizzato il David, in quanto per una inclinazione pari od inferiore ad un grado si sono avute fratture nelle zone soggette a trazione.

Rimaneva, per completare la conoscenza del comportamento meccanico del marmo del David e poter quindi operare delle analisi strutturali ben fondate, ancora un dubbio di un certo rilievo.

La statua era rimasta per secoli alle intemperie, e questo fatto certo ha influito sul comportamento meccanico del marmo, in particolare dello strato esterno più superficiale. Sapere quindi che la parte esterna del materiale si era rot-

ta a trazione per un determinato valore non consentiva di valutare il comportamento nella sua globalità, in quanto le zone interne potevano avere resistenze sostanzialmente diverse.

Per cercare di chiarire, per quanto possibile, questo aspetto (in sintesi: quale differenza di comportamento ci si può attendere, per un marmo di quel tipo, tra lo strato esterno soggetto alle intemperie per secoli e le parti interne dello stesso, certo più protette), sono stati effettuati dei test su un elemento marmoreo "simile" (per quanto possibile) al marmo del David, sia per caratteristiche fisiche, sia per essere stato, come il David, per secoli alle intemperie. Tale elemento è stato reperito tra quelli dismessi e non più utilizzati presso l'Opera di S. Maria del Fiore (Opera del Duomo) a Firenze, nella stessa fabbrica quindi dove Michelangelo realizzò il suo capolavoro.

Su tale elemento sono state fatte varie prove sperimentali, ed il confronto dei risultati delle prove eseguite sui provini presi nelle zone superficiali esterne dell'elemento e di quelle eseguite sui provini presi all'interno dello stesso ha consentito di valutare le possibili differenze di comportamento in gioco.

È singolare la sostanziale coincidenza dei valori della tensione di rottura a trazione trovata per i provini presi sulla parte più esterna con il valore che, nel modello strutturale FEM, risulta essere quello di rottura per il marmo del David: anche qui si è trovato circa  $2 \text{ N/mm}^2$ . Il risultato più significativo è però che le parti interne (non degradate dagli agenti atmosferici) si sono rotte per poco più di  $3 \text{ N/mm}^2$ , valori quindi maggiori, ma non così diversi da quelli ottenuti per le parti esterne. È logico quindi supporre che anche per il marmo del David la differenza di resistenza tra strato esterno e quello interno sia dello stesso ordine di grandezza.

A questo punto gli elementi necessari per una analisi strutturale adeguata, mediante le note e ben collaudate tecniche FEM erano completi.

I risultati dell'analisi statica della statua nella sua attuale posizione mostrano una situazione di sostanziale verifica di stabilità, pur con coefficienti certo non adeguati alla importanza del manufatto.

Per quanto riguarda l'analisi dinamica occorre qui considerare attentamente quella quarta particolarità del David, già anticipata: nel 1873, quando venne portata nella Galleria, la statua venne bloccata alla sottostante fondazione mediante due zanche metalliche conficcate nella parte posteriore del basamento michelangiolesco. Questo intervento di "ancoraggio" ha bloccato il David al piedistallo ottocentesco, e quindi, non potendo oscillare liberamente (e rigidamente) su di esso, in caso di sollecitazioni dinamiche la statua è costretta a inflettersi nella parte superiore, con inevitabili ulteriori aperture delle fratture già presenti, e possibili evoluzioni negative per la sua integrità.

Ed infatti l'analisi dinamica eseguita ipotizzando un sisma pari al massimo previsto nell'area fiorentina (con una accelerazione di picco pari a  $0,21 \text{ g}$ ) mostra una probabilità di danneggiamento molto elevata.

► Questo libro propone una insolita lettura della grandiosa statua del David di Michelangelo, statua che segnò, come disse il Vasari, la vittoria del mondo "moderno" sulla scultura greco-romana.

A causa della sua forma, delle sue dimensioni e della "debolezza" del suo materiale, la statua da sempre soffre di problemi di stabilità.

Gli Autori, a conclusione di una serie di approfondite ricerche, forniscono un quadro completo della situazione statica, dalla ricostruzione storica dell'inclinazione che portò alle lesioni presenti oggi sulla statua all'esame delle condizioni attuali e alla previsione del comportamento futuro, giungendo fino alle ipotesi progettuali di un intervento che appare sempre più indispensabile per la conservazione di questo capolavoro.

- **Antonio Borri** - *Ordinario di Scienza delle Costruzioni - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia - Presidente del Centro Studi Sisto Mastrodicasa*
- Franca Falletti** - *Direttrice della Galleria dell'Accademia - Polo Museale Fiorentino*
- Guido Fastellini** - *Dottorando - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia*
- Silvia Grassi** - *Dottoranda di Ricerca - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia*
- Andrea Grazini** - *Dottore di Ricerca - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia*
- Luciano Marchetti** - *Soprintendente per i BAC Regione Lazio, Presidente Sez. Beni Culturali Commissione Grandi Rischi*
- Alessandro Martelli** - *Responsabile Sez. "Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti" dell'ENEA - Docente di Costruzioni in Zona Sismica, Facoltà di Architettura, Università di Ferrara*
- Claudio Mazzieri** - *Ingegnere, Ansaldo S.p.A.*
- Fabio Radicioni** - *Ordinario di Topografia - Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Perugia*
- Giampaolo Trotta** - *Architetto libero professionista, Firenze*

### La collana

Il Centro Studi Sisto Mastrodicasa ([www.mastrodicasa.com](http://www.mastrodicasa.com)) è intitolato alla memoria dell'ing. Sisto Mastrodicasa, pioniere del consolidamento. È un organismo senza fini di lucro fondato dall'Università di Perugia insieme agli Ordini professionali degli Architetti e degli Ingegneri dell'Umbria, con lo scopo di promuovere studi ed applicazioni nel settore del consolidamento e del restauro del patrimonio edilizio e monumentale, e di divulgare le metodologie più avanzate per la diagnosi e l'analisi di manufatti storici.

