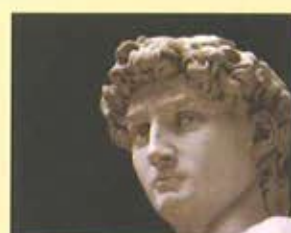


a cura di Antonio Borri

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













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.

