

# BASI ANTISISMICHE IN MARMO PER I BRONZI DI RIACE

di Gerardo De Canio

Nell'ambito di una convenzione stipulata con la Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Calabria, l'ENEA ha progettato e realizzato innovative basi antisismiche in marmo per i Bronzi di Riace in procinto di essere collocati in una nuova sede espositiva del Museo Archeologico Nazionale della Magna Grecia a Reggio Calabria.

**L**e nuove basi antisismiche dell'ENEA sono risultate particolarmente efficaci, in quanto in grado di offrire un maggiore isolamento sismico rispetto alla situazione attuale, una maggior durabilità e una minima manutenzione. Le basi antisismiche in marmo per i Bronzi di Riace fanno parte della famiglia di isolatori sismici sviluppati da ENEA per la protezione di strumentazioni delicate. Sono dispositivi passivi e/o semi-passivi di protezione sismica non invasivi, che possono essere celati alla vista nel caso di protezione di opere d'arte. Nella configurazione semi-passiva possono essere nascosti in condizioni normali ed azionati solo al momento opportuno da un segnale di allerta sismico in modo da anticipare l'evento. Sono particolarmente adatte per statue a prevalente sviluppo verticale con ridotta base di appoggio, quali i Bronzi di Riace o il David di Michelangelo, poiché rendono minime - o nulle - le vibrazioni alla base delle gambe, il punto più sollecitato di questo tipo di statue. I nuovi basamenti in marmo sono stati sottoposti a verifica su tavola vibrante presso i laboratori di "Qualificazione di Materiali e Componenti" del Centro Ricerche ENEA "Casaccia", dove sono disponibili grandi attrezzature per le prove sismiche sui modelli in scala 1:1.

Il progetto dei nuovi dispositivi antisismici è stato finalizzato al conseguimento dei seguenti obiettivi prestazionali, con il vincolo di compatibilità dei materiali e reversibilità dell'intervento:

1. massimo isolamento sismico nelle direzioni orizzontali e verticale,
2. semplicità di manutenzione,
3. durabilità.

Per il conseguimento di questi obiettivi l'approccio alla progettazione è consistito nell'affidare direttamente ai basamenti in marmo delle statue la funzione di isolamento sismico. E' stata quindi studiata una nuova geometria dei basamenti che affidasse alla soluzione architettonica anche la funzione strutturale di isolamento sismico, cioè una geometria che conferisse ai basamenti le seguenti caratteristiche:

- a) bassa rigidezza e bassa dissipazione,
- b) grandi spostamenti orizzontali,
- c) isolamento sismico nelle direzioni X,Y,Z con disaccoppiamento tra isolamento delle componenti orizzontali (X,Y) e smorzamento delle oscillazioni verticali (Z) del terremoto.

Il risultato della progettazione sono i nuovi basamenti, composti ciascuno da due blocchi di marmo sovrapposti (fig.1) sulle cui superfici interne sono state scavate, specularmente ai due blocchi, quattro calotte la cui geometria è un ellissoide di rotazione dove sono collocate quattro sfere, anch'esse in marmo, che con il loro rotolamento conferiscono i requisiti di grandi spostamenti, bassa rigidezza e basso attrito richiesti per massimizzare l'isolamento sismico.

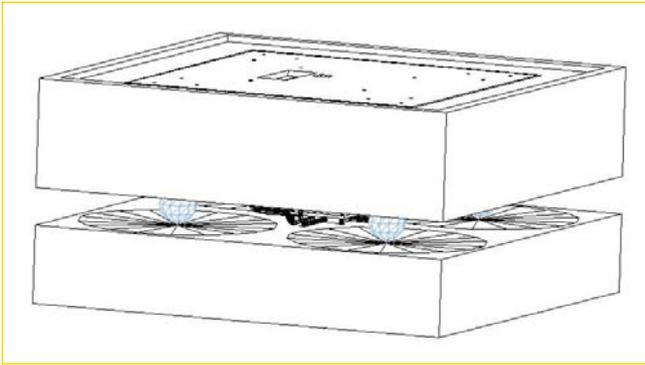


Figura 1 - Basamento in marmo per i Bronzi di Riace. Tra i due blocchi è stato inserito un elemento dissipativo a trefolo di fine corsa e nel blocco superiore è inserito un dispositivo di smorzamento delle accelerazioni verticali, in acciaio inox.

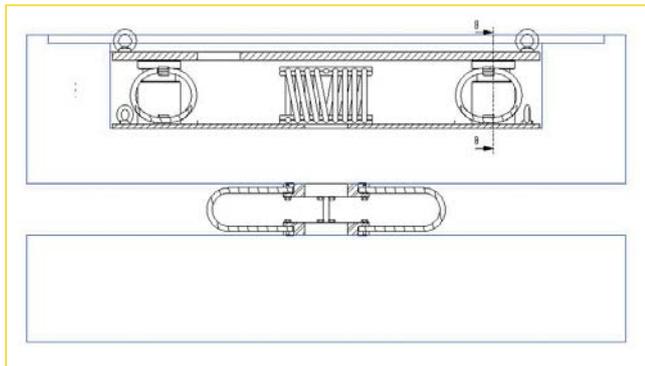


Figura 2 - Basamento con elemento dissipativo di fine corsa tra i due blocchi di marmo e dispositivo di smorzamento verticale inserito nel blocco superiore.



Figura 3a - Basamento posizionato sulla tavola vibrante per le prove sismiche.



Figura 3b - Acquisizione dei dati di spostamento tramite sistema 3D\_Vision.

In presenza di un terremoto sarà la parte sottostante della base a subire l'azione sismica, e si potrà muovere con il terreno senza trasmettere alla parte superiore le sollecitazioni, in quanto completamente assorbite dal movimento delle sfere all'interno delle cavità ricavate nel marmo. Il movimento delle sfere rende il sistema di protezione poco rigido e con un attrito molto ridotto, caratteristiche che minimizzano o rendono quasi nulle le sollecitazioni del terremoto. Il nuovo basamento antisismico in marmo è particolarmente adatto per le statue sviluppate in verticale che hanno una base di appoggio molto ridotta e che quindi sono particolarmente vulnerabili alle azioni sismiche orizzontali, le quali ne possono comprometterne l'equilibrio e causare il ribaltamento.

**RISULTATI DELLE PROVE SISMICHE SU TAVOLA VIBRANTE**

Le nuove basi antisismiche sono state sottoposte a verifica sperimentale sulle tavole vibranti presso i laboratori di "Qualificazione di Materiali e Componenti" del Centro Ricerche ENEA della Casaccia. Le tavole vibranti sono impianti sperimentali complessi, di grandi dimensioni, in grado di riprodurre i terremoti reali nelle componenti orizzontali e verticale. Per le prove sismiche delle basi sono stati applicati terremoti anche superiori al livello massimo previsto per il sito del Museo a Reggio Calabria, ottenendo un coefficiente di riduzione delle azioni sismiche pari al 15-20.

Nel corso della campagna sperimentale su tavola vibrante sono stati applicati tre terremoti artificiali spettro compatibili con lo spettro sismico di Stato Limite Ultimo (SLU), amplificati al piano espositivo del museo; sono stati inoltre applicati due terremoti Naturali con periodo di ritorno 2475 anni (*Max hazard*). Tutte le *time history* sismiche sono state amplificate al piano espositivo in condizioni di:

- Edificio integro,
- Edificio mediamente danneggiato,
- Edificio fortemente danneggiato (al limite del collasso).

Infine è stato applicato un sisma TRS (*Test Response Spectrum*) per la qualifica sismica di componenti di centrali nucleari di classe di sicurezza 1-E (cioè essenziali ai fini della sicurezza) secondo le specifiche IEEE-344. Le figure 4-a e 4-b rappresentano i risultati dei test con sismi naturali amplificati al piano espositivo con edificio integro.

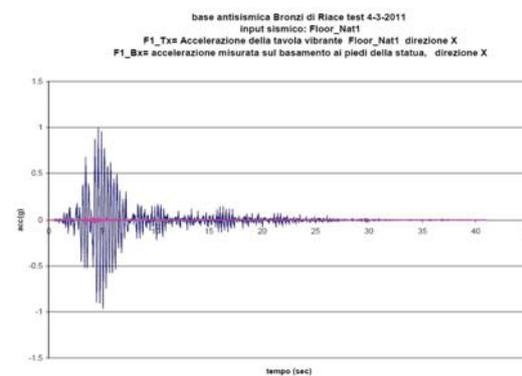


Figura 4a - Sisma naturale N°1 amplificato al piano espositivo, accelerazione misurata sulla tavola vibrante (F1\_Tx) e sul basamento ai piedi della statua (F1\_Bx)

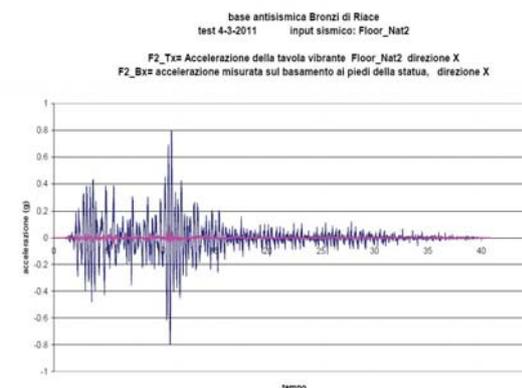


Figura 4b - Sisma naturale N°2 amplificato al piano espositivo, accelerazione misurata sulla tavola vibrante (F2\_Tx) e sul basamento ai piedi della statua.

La figura 5 è relativa ai test con sismi naturali amplificati al piano espositivo con edificio danneggiato. E' evidente l'efficacia del basamento antisismico ai fini della riduzione dell'azione sismica alla base della statua, in tutti i test sismici effettuati il picco di accelerazione alla base delle statue è stato inferiore a 0.08g.

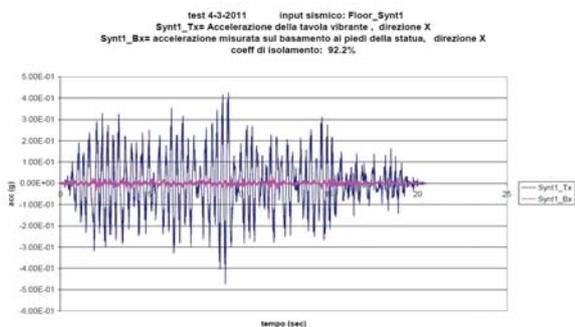


Figura 5 - Sisma artificiale spettro compatibile con lo Stato Limite Ultimo (SLU) dell'edificio amplificato al piano espositivo.

Poiché con i nuovi basamenti le azioni sismiche trasmesse alle statue sono ridotte di un fattore pari a circa 1/20, sarà possibile ridurre di 1/6 la forza applicata all'ascella Destra e di 1/3 la forza applicata all'ascella sinistra, inoltre non sarà necessario applicare le forze di ritenuta di 1800N ai cavi inguinali. Nelle figure 6, 7 ed 8 è riportata la nuova configurazione dei sistemi di collegamento delle statue alle rispettive basi in marmo.

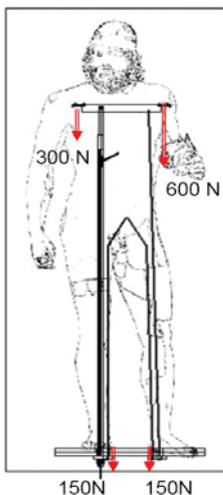


Figura 6 - Forze applicate per l'ancoraggio delle statue alle piastre del basamento, ascella destra: 300N, ascella sinistra: 600N. Cavi inguinali: 150N. Totale forze esterne applicate: 1200N. Nella precedente versione il totale delle forze applicate misurate dalle due celle di carico è pari a 3600N.

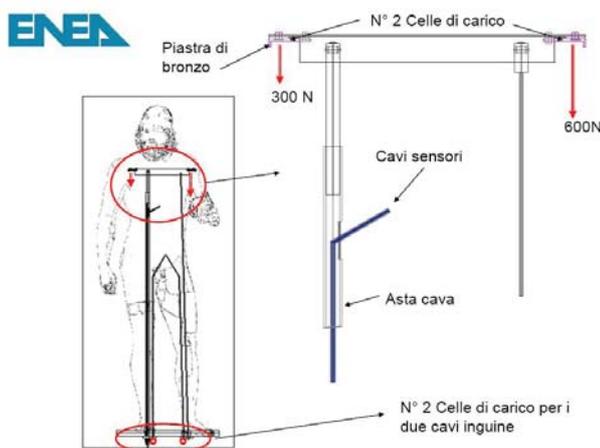


Figura 7 - Particolare del nuovo sistema di ancoraggio della statua alla piastra di base.

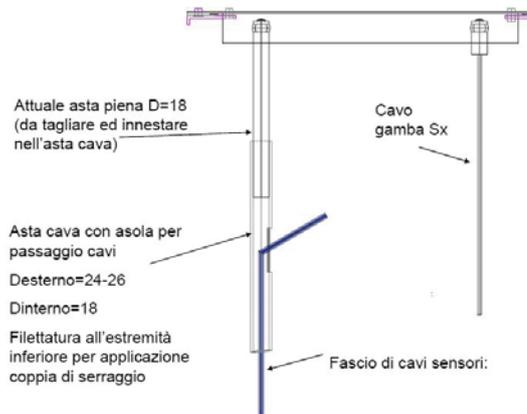


Figura 8 - particolare dell'asta di sostegno modificata rispetto alla configurazione precedente.

### SISTEMA INNOVATIVO 3D\_VISION PER I DATI DI SPOSTAMENTO

Primo esempio in Italia di laboratorio virtuale per la sperimentazione condivisa a distanza, con partecipazione diretta dei partner e scambio dei dati in tempo reale. L'acquisizione dei dati è realizzata mediante un sistema innovativo denominato 3D\_Vision, che utilizza una costellazione di telecamere NIR (Near Infrared) ad alta risoluzione (Fig. 9) per rilevare il moto nello spazio di speciali marcatori la cui traiettoria definisce il moto completo dei punti selezionati (spostamenti, velocità e accelerazioni, Fig. 10, 11) direttamente assimilabili via Internet attraverso l'infrastruttura ENEA-GRID nei data base e nei modelli numerici disponibili presso il Centro computazionale di RicErca sui Sistemi Complessi (CRESCO) (Fig. 12) ed in linea con l'approccio agli spostamenti nella progettazione strutturale in ingegneria sismica.



Figura 9 - Costellazione di telecamere ad alta risoluzione del sistema 3D\_Vision presso i laboratori di Qualificazione Materiali e Componenti del C.R. Casaccia.

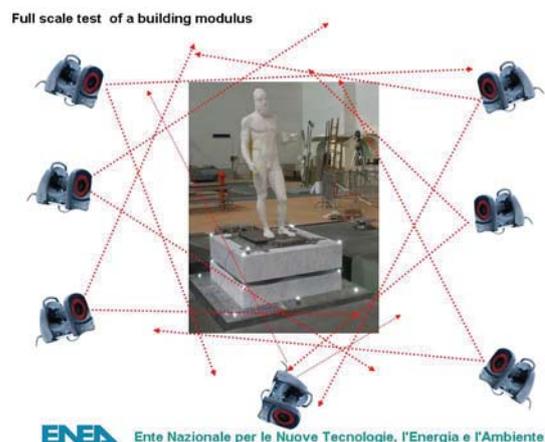


Figura 10 - Rilevamento del moto nello spazio di speciali marcatori la cui traiettoria definisce il moto completo dei punti selezionati.

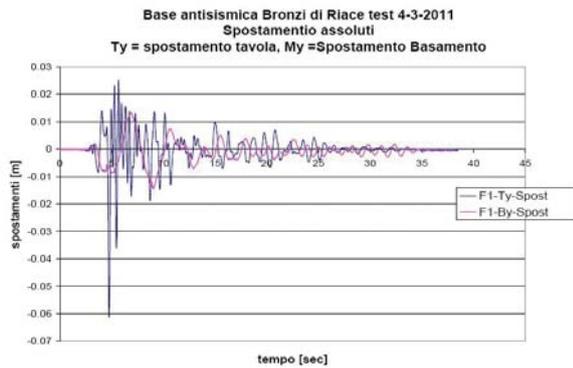


Figura 11 - Spostamenti della tavola vibrante e del basamento rilevati tramite il sistema 3D\_Vision.

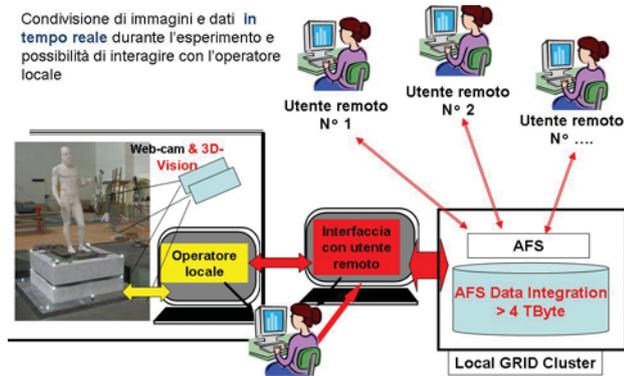


Figura 12 - Schema concettuale del sistema di sperimentazione condiviso a distanza presso i laboratori ENEA di qualificazione di materiali e componenti.

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Con i precedenti isolatori in gomma vulcanizzata il coefficiente di attenuazione delle azioni sismiche era dell'ordine di 2.5-3 e le forze di ritenuta applicate alla barra di sostegno ed ai tiranti erano 1800N sotto le ascelle + 1800N all'inguine. Tali forze erano necessarie per contrastare la forza dovuta all'attrito di scorrimento e/o il momento ribaltante.

Nella nuova configurazione di isolamento sismico con basamento in marmo il coefficiente di riduzione dell'azione sismica è dell'ordine di 15-20, pertanto è possibile ridurre le forze di stabilizzazione delle statue rispetto allo scorrimento orizzontale ed al momento ribaltante, demandando alle forze di ritenuta la sola funzione di ancoraggio alla piastra di base e di compensazione del peso mancante dello scudo (braccio Sinistro) e della lancia (braccio Destro). Pertanto la nuova configurazione delle forze è la seguente:

	Nuovo valore della forza	Valore precedente
Ascella Destra	0.3 KN	1.8 KN
Ascella Sinistra	0.6 KN	1.8 KN
Inguine	0.3 KN	1.8 KN

In precedenza il valore delle forze applicate era misurato da celle di carico poste sotto la piastra di base. In realtà le celle di carico misuravano le forze derivanti dalla tensione dei cavi in quello specifico punto sotto la piastra, non la forza effettiva applicata alle ascelle ed all'inguine, la quale era sensibilmente più elevata.

Nella nuova configurazione le celle di carico misureranno la forza applicata direttamente al punto di appoggio della stampella di ripartizione del carico alle ascelle, pertanto il momento di serraggio dell'asta di sostegno e del cavo ascellare sarà regolato in funzione dell'effettiva forza misurata alle ascelle.

Ai cavi inguinali sarà demandata la sola funzione di ancoraggio dei bronzi al basamento e le celle di carico saranno applicate ad ambedue i cavi. La forza applicata sarà di 150N per ogni cavo, sufficiente alla loro messa in tensione senza indurre uno stato tensionale aggiuntivo alle gambe.

## L'AGENZIA ENEA

L'ENEA è l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA). L'Agenzia ENEA è finalizzata alla ricerca e all'innovazione tecnologica nonché alla prestazione di servizi avanzati nei settori dell'energia, con particolare riguardo al settore nucleare, e dello sviluppo economico sostenibile.

Le sue attività riguardano le seguenti tematiche:

- Efficienza energetica e risparmio energetico, Fonti rinnovabili, tecnologie per l'energia
- Nucleare: fusione nucleare; tecnologie per la fissione nucleare
- Ambiente e clima: cambiamenti globali e sviluppo sostenibile
- Biotecnologie, agroindustria e protezione della salute
- Sicurezza e salute
- Nuovi materiali
- Ricerca di Sistema Elettrico.

Le competenze ad ampio spettro e le avanzate infrastrutture impiantistiche e strumentali degli undici Centri di Ricerca ENEA, distribuiti su tutto il territorio nazionale operano nell'ambito dei programmi dell'Agenzia e sono a disposizione del mondo scientifico e imprenditoriale del Paese.

## ABSTRACT

### Earthquake-resistant marble bases

ENEA has designed and implemented innovative earthquake-resistant marble bases for Bronze Statues, which will be placed in a new venue of the National Archaeological Museum of Magna Greece in Reggio Calabria.

## PAROLE CHIAVE

BRONZI DI RIACE, BASI ANTISISMICHE, 3D\_VISION, ENEA

## AUTORE

GERARDO DE CANIO  
GERARDO.DECANIO@ENEA.IT

UNITÀ TECNICA TECNOLOGIE DEI MATERIALI  
LABORATORIO QUALIFICAZIONE DI MATERIALI E COMPONENTI - ENEA