

PROGETTO DI RESTAURO
DEL COMPLESSO MONUMENTALE
DELLA FONTANA DEL NETTUNO

**Sulla struttura portante della fontana
del Nettuno e dei cunicoli di pertinenza**
Analisi della sicurezza strutturale relativa
al supporto della statua con riferimento alla
parte emergente, alla parte interrata, alle
pareti della vasca, ai cunicoli di accesso e
alla camera di manovra degli impianti idrici
comprehensive di indagini sui materiali.

Relazione a cura di:

Prof. Ing. Pier Paolo Diotallevi

Bologna, 07/05/2016



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Premessa

Con la relazione del 30 aprile 2016 è stata data una descrizione delle modalità di prelievo dei campioni delle murature inerenti la parte portante della fontana del Nettuno e delle sue principali opere accessorie. Le indagini allora riportate erano relative alle modalità di prelievo dei campioni di murature e la misurazione degli spessori delle parti interrato.

Nella presente relazione si riportano le lavorazioni eseguite sui campioni per la determinazione dei provini da sottoporre a prova e gli esiti delle prove stesse.

Nella seconda parte si riportano inoltre alcune considerazioni di carattere numerico in ordine alla valutazione degli stati di tensione cui il corpo delle fontana è soggetto sia per l'azione dovuta ai propri pesi, sia per un azione sismica caratteristica del sito di Bologna.

La lettura della presente relazione non può prescindere dalla lettura del documento presentato in data 30 aprile 2016 denominato "*Prime considerazioni sulla struttura portante della fontana del Nettuno e dei cunicoli di pertinenza*" comprensiva della relazione relativa al sopralluogo del 3 marzo e ad essa allegata.

1. PREDISPOSIZIONE DEI CAMPIONI DI PROVA

L'obiettivo principale delle prove eseguite sui campioni prelevati in situ è stato quello di valutare le capacità resistenti dei mattoni, delle malte e delle murature. E' opportuno ricordare che il numero di campioni sui quali si è potuto svolgere indagini di laboratorio è limitato e pertanto da esse non si possono svolgere valutazioni di carattere statistico. Tuttavia quanto è emerso permette di dare una indicazione sulle caratteristiche di quelle murature i cui valori possono essere assunti come un riferimento per una eventuale valutazione della sicurezza convenzionale dell'opera.

Tutte le prove eseguite in laboratorio hanno fatto riferimento a tre carote, prelevate nei cunicoli di accesso alla parte interna della fontana e a due porzioni di muratura, costituita da due mattoni accoppiati con malta, come descritto nella precedente relazione.

Nella fotografia n. 1 sono riportati i campioni, così come furono prelevati.

Dalle carote e dai campioni di muratura sono stati predisposti i provini che di seguito sono descritti. I campioni di laterizio sottoposti alla prova di compressione sono stati rettificati nella superficie di contatto con le piastre della pressa.



Foto 1

Di seguito i singoli campioni saranno individuati con il simbolo Cx.y in cui C indica che il campione di provenienza è una carota, x indica il numero della carota dalla quale è stato prelevato il campione e y indica il relativo numero di campione. Le dimensioni di seguito riportate sono indicative e saranno espresse in forma precisa nella parte relativa alla esecuzione delle prove di compressione.

Carota C1 (vedi fotografia n. 2)

Dalla carota C1 sono stati ottenuti:

- Un cilindro con uno strato mediano di malta e diametro pari a quello della carota - Campione C1.1 da sottoporre a prova brasiliana;
- Due cilindri aventi diametro di circa 38 mm e altezza di circa 73 mm con uno strato mediano di malta - Campioni C1.2 e C1.3;
- Tre cilindri di solo mattone con diametro di circa 38 mm e altezza media di circa 34 mm - Campioni C1.4, C1.5 e C1.6.

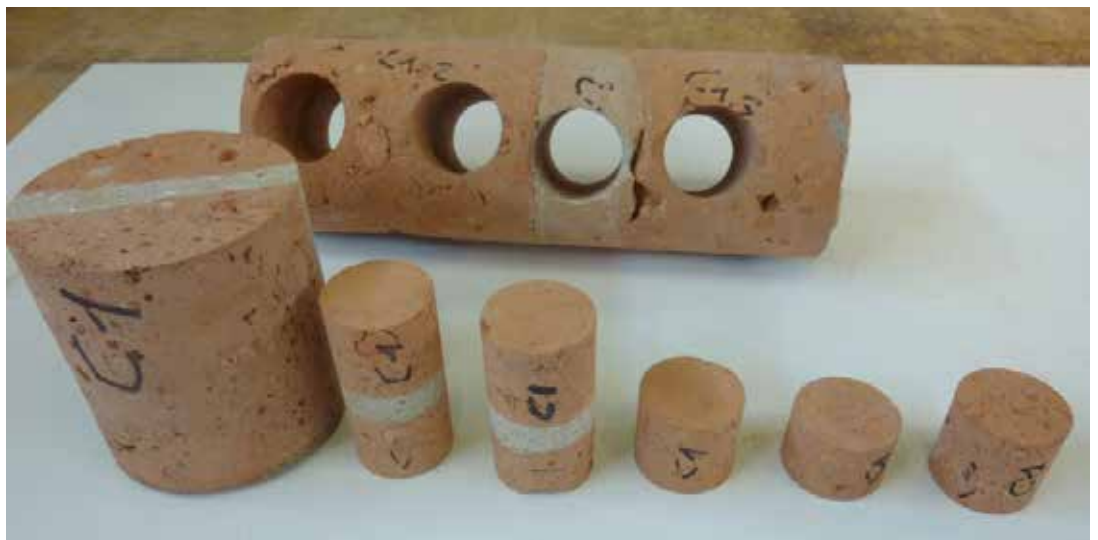


Foto 2

Carota C2 (vedi fotografia n. 3 e n.4)

Dalla carota C2 sono stati ottenuti:

- Due cilindri con strato mediano di malta e diametro pari a quello della carota – Campioni C2.1 e C2.2 da sottoporre a prova brasiliana;
- Tre cilindri di solo mattone aventi diametro medio di circa 25 mm e altezza di circa 25 mm – Campioni C2.3, C2.4 e C2.5;
- Otto campioni cilindrici di malta aventi diametro di circa 17 mm e altezza di circa 19,5 mm – Campioni da C2.6 a C2.13;

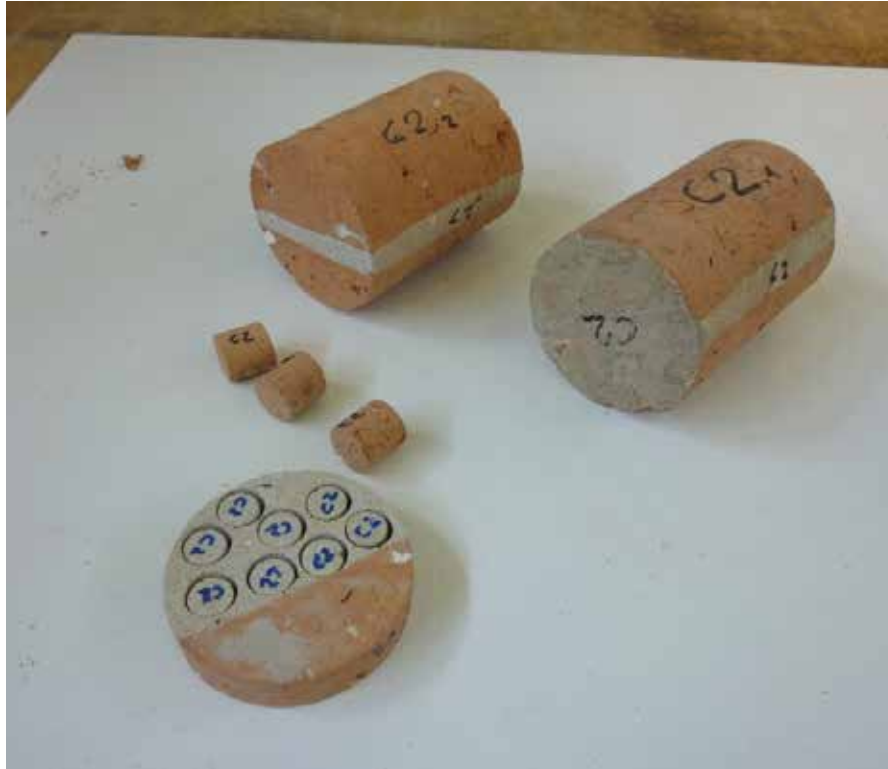


Foto 3



Foto 4

Carota C3 (vedi fotografia n. 5)

Dalla carota C3 sono stati ottenuti:

- Tre campioni di solo mattone aventi diametro di circa 38 mm e altezza di circa 38 mm - Campioni C3.1, C3.2 e C3.3.



Foto 5

Campioni di muratura (vedi fotografia n. 6, 7 e 8)

Dal prelievo di porzioni di muratura si sono ottenuti:

- Due campioni costituiti da una coppia di mattoni sovrapposti con l'interposizione della malta – Campioni A e B.

Al fine di poter sottoporre a prova di carico questi campioni si è reso necessario livellare la superficie con malta in modo tale da rendere piana la superficie del campione a contatto con le piastre della pressa. Nella fotografia n. 6 sono riportati i due campioni prima della stesura della malta e nelle fotografie n. 7 e 8 gli stessi campioni (A e B) con il letto di malta aggiuntivo necessario per l'esecuzione della prova di compressione.



Foto 6



Foto 7



Foto 8

2. GLI ESITI DELLE PROVE

Le prove eseguite sui campioni prelevati dalle carote sono di due tipi:

- Prove di compressione su cilindri
- Prove brasiliane su porzioni di carota.

Le prime hanno lo scopo di stimare la resistenza a compressione del laterizio e della malta, le seconde hanno lo scopo di determinare la resistenza a trazione del laterizio e a taglio della malta.

Le modalità di esecuzione delle prove sono state quelle indicate dalle normative UNI vigenti in materia.

Prove
di compressione

Nelle fotografie n. 9, 10, 11 e 12 sono riportate le immagini di alcune prove eseguite.

La media dei valori di resistenza alla compressione su campioni con diametro di circa 25 mm e pressoché pari altezza prelevati dalla carota C2 (campioni C2.3, C2.4 e C2.5) è di circa 18 MPa con un valore minimo di 11,3 MPa.

La media dei valori di resistenza alla compressione su campioni di laterizio con diametro di circa 38 mm e pressoché pari altezza, prelevati dalla carota C1 (campioni C1.4, C1.5 e C1.6) è di circa 24,6 MPa con un valore minimo di 21,8 MPa.

La media dei valori di resistenza alla compressione su campioni di laterizio con diametro di circa 38 mm e pressoché pari altezza, prelevati dalla carota C3 (campioni C3.1, C3.2 e C3.3) è di circa 49,7 MPa con un valore minimo di 43,4 MPa.

La media dei valori di resistenza alla compressione su campioni di laterizio con diametro di circa 38 mm e altezza pressoché doppia contenenti l'interposizione di un letto di malta, prelevati dalla carota C1 (campioni C1.2, C1.3) è di circa 14,1 MPa con un valore minimo di 14,1 MPa.

La media dei valori di resistenza alla compressione su campioni di malta con diametro di circa 16-17 mm e altezza di circa 19 mm, prelevati dalla carota C2 (campioni C2.6, C2.7, C2.8, C2.9, C2.10, C2.11, C2.12 e C2.13) è di circa 12,6 MPa con un valore minimo di 7,6 MPa.

Anche i campioni di muratura (campioni A e B) sottoposti a prova di compressione evidenziato una resistenza media di 14,9 MPa con un valore minimo di 14,2 MPa.

Foto 9 sx
Foto 10 dx

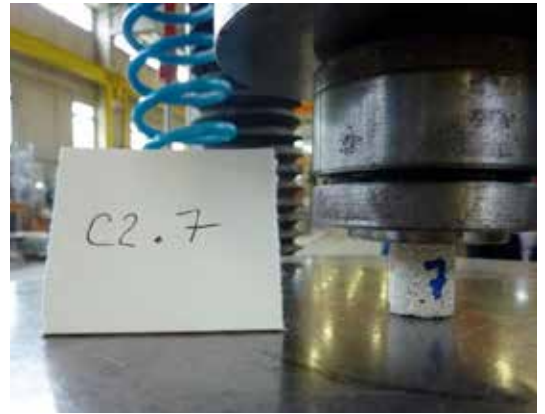


Foto 11 sx
Foto 12 dx



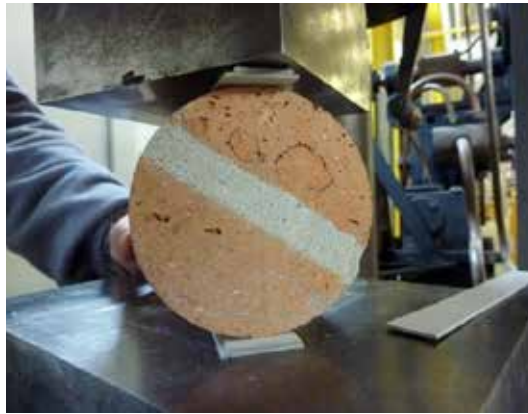
La resistenza alla compressione dei campioni di mattoni e malta ha evidenziato valori assai elevati che peraltro si sono confermati in tutti i campioni sottoposti a carico.

Prove brasiliane

Sui campioni denominati C1.1, C2.1 e C2.2 sono state eseguite prove brasiliane sulle porzioni delle carote prelevate in posizione C1 e C2. I campioni erano diametralmente attraversati da un letto di malta (vedi foto n. 2, 3 e 4) che nello svolgimento della prova è stato disposto con una inclinazione di 45° rispetto alla direzione di applicazione della forza. L'obiettivo della prova era quello di valutare la resistenza a taglio della malta qualora la rottura fosse avvenuta per scorrimento sul letto di malta.

Nella fotografia n. 13 è riportato il dispositivo di prova e nella fotografia n. 14 è riportata la modalità di rottura che si è ripetuta in modo simile per i tre campioni, raggiungendo il collasso per fessurazione verticale.

Foto 13 sx
Foto 14 dx



L'esito della prova ha permesso di determinare la resistenza a trazione della muratura che è risultata, come peraltro era da attendersi, relativamente modesta con valore medio di 1,18 MPa e valore minimo di 0,75 MPa.

Conclusioni
sugli esiti
delle prove

I valori di resistenza registrati durante l'esecuzione delle prove sopra descritte hanno evidenziato una buona capacità resistente della muratura e delle sue componenti, valori che potranno essere assunti come riferimento nelle verifiche di sicurezza degli elementi strutturali che compongono le parti murarie poste a sostegno della statua del Nettuno e dell'intera fontana.

Si ricorda che il prelievo dei campioni si è stato effettuato, per necessità, in corrispondenza dei cunicoli e della camera di manovra e non direttamente dalle murature che sostengono il corpo della fontana. Tale modalità di prelievo è stata dettata dalla impossibilità di posizionare le attrezzature necessarie all'interno dei ristretti spazi del vano interno della fontana stessa.

Si ritiene tuttavia che gli esiti riscontrati nelle murature prelevate possano essere estesi anche a quelle che costituiscono il corpo della fontana ed il sostegno della statua del Nettuno essendo con esse coeve.

3. MODELLAZIONE DELLA FONTANA

Al fine di stimare e dare indicazioni sulla sicurezza del corpo della fontana sono state predisposte modellazioni per la determinazione del regime tensionale conseguente alla presenza delle diverse parti che costituiscono la fontana stessa.

Il corpo della fontana è costituito da muratura di mattoni e la parte esterna, quella visibile, è ricoperta da lastre di pietra naturale decorate con modanature e bronzi di diversa foggia. Nella seguente figura n. 1 è riportato una fotografia della intera fontana con l'indicazione delle parti di bronzo ed il relativo peso desunto dalle indagini che furono eseguite in occasione del restauro del monumento negli anni ottanta del secolo scorso.

Dal confronto degli esiti delle misure eseguite con laser-scanner dal prof. Bitelli, di cui una

sezione è riportata nella figura n. 2, è stato possibile dedurre gli spessori complessivi della parte lapidea. Lo schema di tale sezione è riportato nella figura n. 3. In quest'ultima sono riportate le dimensioni dedotte dai citati rilievi.

A queste dimensioni si è fatto riferimento per la valutazione della sicurezza dell'opera. Non è stato possibile definire lo spessore dei rivestimenti con le lastre di pietra naturale della parte di muratura; tuttavia si è stimato che lo spessore delle lastre sia di circa 12 cm come appare dall'esame ravvicinato, svolto mediante piattaforma mobile, svolto in data 3 marzo. Dalle prove eseguite sui campioni di muratura prelevati in situ e descritti al paragrafo precedente si è potuto valutare il peso specifico delle murature che è risultato dell'ordine di 1600 kg/m³.

La modellazione della struttura è stata condotta secondo due criteri indipendenti per verificarne l'attendibilità. Il primo criterio è stato quello di operare "manualmente" rappresentando il corpo della fontana come l'insieme di due prismi di sezione orizzontale quadrata, cavi e sovrapposti l'uno sull'altro in corrispondenza della variazione di sezione della fontana. Una rappresentazione schematica dei due prismi cavi è riportata in figura n. 3. Chiameremo questo modello come "modello semplificato".

Un secondo modello è stato realizzato con l'uso di un programma agli elementi finiti che riproduce lo schema della disposizione delle murature. Chiameremo questo modello "modello FEM". Sono stati utilizzati elementi finiti bidimensionali in grado di rappresentare sia uno stato piano di tensione sia il regime flessionale (con elementi tipo shell).

Modello FEM

La presenza della statua è stata modellata con un'asta vincolata alla sommità del corpo della fontana la cui lunghezza termina in corrispondenza del presunto baricentro della statua del Nettuno; in quel punto è stato concentrato il carico dell'intera statua. Nella figura n. 4 è riportato il modello agli elementi finiti (modello FEM) e la rappresentazione solida del modello stesso.



Figura 1

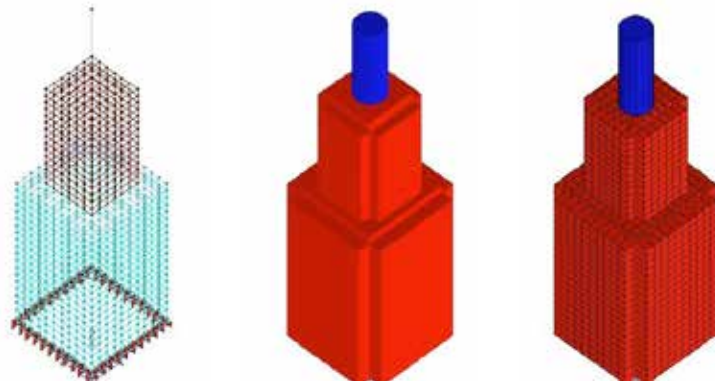


Figura 4

Con il modello sopra riportato è stata svolta un'analisi agli elementi finiti per due fondamentali condizioni di carico: pesi propri della struttura ed analisi del comportamento sismico globale.

Per gli effetti dei pesi propri si è fatto riferimento alla valutazione degli stati tensionali valutati secondo la combinazione di carico rara (ovvero si sono adottati i valori dei carichi corrispondenti anche a quelli utilizzati nel metodo delle tensioni ammissibili). Tale criterio di verifica, seppure non contemplato nelle attuali normative vigenti per le costruzioni di muratura si ritiene sia più consona al tipo di verifiche che si intendono condurre, ovvero percepire quale sia lo stato generale dell'opera senza naturalmente pretendere che essa possa essere valutata con gli stessi criteri di una nuova costruzione e soprattutto con i criteri delle norme vigenti. Le valutazioni svolte dunque hanno più il carattere di valutazioni di percezione che non di rispondenza alle norme. Eventuali futuri sviluppi in questo senso potranno essere forniti da coloro che verranno chiamati ad effettuare eventuali interventi sull'opera.

Nella seguente figura n. 5 è riportato lo stato tensionale conseguente ai carichi verticali.

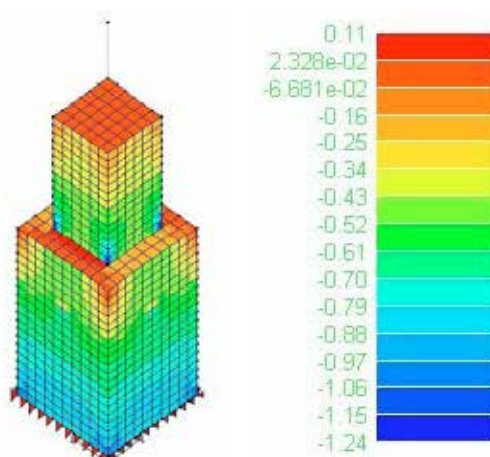


Figura 5

Da essa si evince che il valore massimo della tensione verticale sulle murature è dell'ordine di $1,3 \text{ kg/cm}^2$ ($0,13 \text{ MPa}$), valore assai modesto se confrontato con i valori di resistenza desunti dalle prove eseguite in laboratorio.

Sullo stesso modello è stata eseguita, a scopo preliminare ed orientativo, anche l'analisi

sismica al fine di cogliere gli elementi essenziali per la valutazione del comportamento della fontana in occasione dell'evento sismico atteso a Bologna.

L'indagine è stata con riferimento allo spettro di risposta valutato per una vita nominale di 50 anni, nella zona di Bologna e per un terreno di tipo C. I parametri desunti dalla normativa portano a considerare i dati seguenti per l'SLV:

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_c [s]
SLO	30	0.053	2.478	0.258
SLD	50	0.067	2.482	0.272
SLV	475	0.166	2.404	0.310
SLC	975	0.212	2.436	0.315

e pertanto l'accelerazione massima dello spettro di risposta elastico è pari a 0,399g.

Con riferimento alle indicazioni delle normativa riportate al paragrafo C8.7.1.2 delle *Istruzioni per l'applicazione delle nuove "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008, si assume un valore del coefficiente di struttura, espresso dalla relazione $q = q_0 \alpha_v / \alpha_1$, pari a 2,25 essendo $q_0=1,5$ e $\alpha_v / \alpha_1=1,5$ come indicato in assenza di "più precise valutazioni".

L'analisi dinamica della struttura indica il periodo proprio fondamentale di vibrazione pari a 0,13 s che evidenzia una elevata rigidezza della costruzione.

Dall'analisi sismica con spettro di risposta non elastico ottenuto con $q=2,25$ risulta che lo stato tensionale massimo in compressione della muratura è di circa 2,5 kg/cm² (0,25 MPa) mentre le tensioni di trazione sono pressoché nulle; anche in questo caso si conferma che lo stato tensionale massimo è ampiamente compatibile con le resistenze misurate sui campioni di muratura.

Nella figura n.6 è riportata la distribuzione delle tensioni con la combinazione di carico sismico.

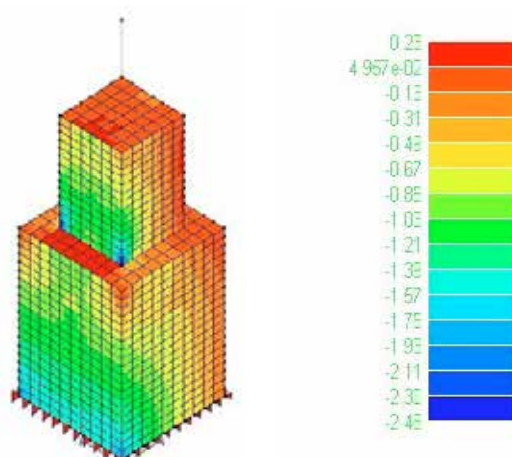


Figura 6

Si rileva che i punti maggiormente sollecitati sono quelli allo spiccatto del tronco superiore della fontana rispetto al troco inferiore e alla base. Su tali zone occorrerà porre l'attenzione da parte di coloro che in futuro si occuperanno del comportamento della fontana nei confronti della statica.

Le precedenti valutazioni sono state svolte con riferimento alla vita media della costruzione di 50 anni e per una costruzione di II classe. La scelta è stata effettuata al fine di una preliminare valutazione dei livelli di sicurezza cui il complesso fa riferimento.

Come affermano le attuali istruzioni, prima citate (Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 C.S.LL. PP.) e relative alla normativa sulle costruzioni (NTC2008), che non si ritiene sia completamente applicabile a strutture del tipo in esame, si ricorda che al paragrafo C2.4.2, nell'ultimo capoverso si cita:

Per edifici il cui collasso può determinare danni significativi al patrimonio storico, artistico e culturale (quali ad esempio musei, biblioteche, chiese) vale quanto riportato nella "Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni" del 12.10.2007 e ss.mm.ii.

Pertanto le valutazioni svolte hanno solo carattere orientativo e dovranno essere riviste da coloro che verranno incaricati della valutazione del comportamento statico della struttura e della predisposizione di interventi. I livelli di sicurezza cui la struttura dovrà rispondere non sono quindi necessariamente quelli riportati in questa relazione, ma dovranno essere concordati sia con l'Ente proprietario del bene sia con gli Enti preposti alla salvaguardia ed alla tutela dei beni artistici e monumentali.

Quanto si è potuto esprimere in questa relazione è solo un primo orientamento basato su criteri di verifica corrente e sulle indagini che è stato possibile eseguire.

Sulla base di queste indagini e delle conseguenti valutazioni è possibile affermare che attualmente gli stati di sollecitazione del copro, valutati con i criteri sopra descritti, sono compatibili con le caratteristiche di resistenza valutate sui materiali per quel che attiene al corpo della fontana.

Come già in precedenza restano ancora incertezze su alcuni aspetti locali della sicurezza in quanto non è stato possibile eseguire adeguate indagini.

Il primo riguarda il collegamento dei rivestimenti lapidei del corpo della fontana. Non è stato possibile accertare come le diverse lastre siano collegate al corpo della fontana stessa e peraltro, come risulta anche dalla documentazione fotografica prodotta nella relazione del 3 marzo scorso, le lastre di rivestimento si presentano distaccate in corrispondenza dei bordi.

Un parere su questi collegamenti potrà essere espresso solo in seguito ad indagini specifiche che potranno essere eseguite quando verrà resa possibile l'esame ravvicinato delle lastre e

la loro eventuale rimozione nonché la determinazione diretta degli spessori delle murature.

Anche sulle dimensioni effettive delle murature (in particolare gli spessori), assunte come murature resistenti, permane qualche incertezza non conoscendo nello specifico lo spessore della lastre di rivestimento ed la loro modalità di collegamento al corpo di sostegno. Il controllo definitivo del livello di sicurezza della struttura potrà essere completato solo dopo tali indagini e da chi avrà l'onere di predisporre gli eventuali interventi.

Modello semplificato Una stima approssimata delle verifiche condotte con il modello agli elementi finiti è stata condotta anche facendo riferimento ad un criterio di analisi statica per la valutazione degli effetti del sisma.

Poiché il periodo della costruzione, come peraltro prevedibile, è di soli 0,13 s significa che stiamo considerando una costruzione che tende ad avvicinarsi, nel suo comportamento sismico, ad quello di una struttura infinitamente rigida e pertanto il suo movimento è assai prossimo a quello del terreno. Ne consegue che le forze sismiche sono ragionevolmente rappresentabili come proporzionali alle masse.

Sulla base di questa ipotesi si è assunto che l'accelerazione di progetto sia pari a 0,398 g (valore massimo dello spettro di risposta per il sito Bologna) e che il coefficiente di struttura q sia pari, come nel modello FEM, a 2,25.

Dal confronto con gli esiti del modello FEM si può riscontrare che la sostanziale coincidenza con i relativi risultati, rendendo quindi attendibile, per le ipotesi fatte, le valutazioni ottenute.

4. CAMERA DI MANOVRA

Altro elemento significativo del complesso inerente la fontana del Nettuno è la camera di manovra ove attualmente sono contenuti i sistemi di distribuzione e controllo dell'acqua.

Come evidente dalle fotografie 15 a e 15 b essa attualmente si trova in precarie situazioni per quel che attiene alla volta essendo puntellata a garanzia della sicurezza.

La volta della camera di manovra è conformata a botte su un impianto rettangolare le cui dimensioni interne in pianta sono di circa 1,90 m per 3,50. L'altezza della parete all'imposta della volta è di circa 1,80m.



Foto 15a sx
Foto 15b dx

La volta ha una freccia di circa 50 cm ed è costituita da una muratura con mattoni disposti a “spina di pesce” per uno spessore, rilevato in occasione delle indagini con sondaggi diretti, di circa 15 cm. L’estradosso della volta si trova a circa 60 cm al di sotto del piano di calpestio della piazza.

Studiando la striscia unitaria di volta si possono valutare le seguenti azioni:

- Peso proprio della volta 0,15 x 1800	270 kg/mq
- Riempimento (0,5/2 + 0,6) x 2000	1.700 kg/mq
- Carico variabile	2.000 kg/mq

Carico totale	3.970 kg/mq

Con tale carico lo sforzo massimo di compressione, considerando un arco incernierato alle estremità, vale ipotizzando una freccia dell’arco di $f = 50 + 15/2 = 57,5\text{cm}$ ed una luce di calcolo $l = 1,9 * 1,05 = 2\text{ m}$

$N \approx q * l^2 / 8f \approx 3450\text{ kg/cm}^2$, cui corrisponde una tensione media

$\sigma\text{ media} = N / 100 * 15 = 2,3\text{ kg/cm}^2$.

Anche in questo caso ci troviamo di fronte a stati tensionale modesti per la volta anche in considerazione di valori elevati del carico sul piano della piazza che possiamo assimilare a quelli stradali.

Pur con questi valori modesti degli stati tensionali si riscontra, come riportato nella fotografia n. 15, la presenza di una puntellatura di sicurezza segno di precedenti provvedimenti di precarietà della volta stessa.

Sulla base di quanto rilevato si rende necessario un provvedimento per il rafforzamento della volta della camera di manovra. Esso potrà essere progettato da colui che riceverà l’incarico da parte dell’Ente proprietario del bene.

In questa sede si possono formulare suggerimenti per il rafforzamento della volta.

Una prima ipotesi è quella di inserire putrelle metalliche subito al di sotto dell’imposta della volta con appoggi nello spessore dei muri contro terra di sostegno della stessa. Sull’estradosso delle putrelle si potrà realizzare una muratura di mattoni fino a raggiungere l’intradosso

della volta costituendo così un insieme di centine di sostegno. Questo appare il sistema più semplice e meno costoso per metter in sicurezza la volta. Si intende che tale progetto dovrà essere predisposto con le opportune calcolazioni e verifiche di sicurezza.

Un secondo sistema per il rafforzamento della volta potrebbe essere quello di iniettare dall'intradosso della volta e tramite opportuni fori in essa realizzati, malta di cemento in modo tale da saturare con essa tutti gli eventuali vuoti che si trovano sopra di essa e costituire quindi una ulteriore cappa resistente agli stati di sollecitazione.

Anche questo metodo di intervento potrà essere definito e quantificato in sede operativa. E' comunque certo che un intervento debba essere eseguito.

5. CUNICOLI

Il cunicolo di accesso al di sotto della fontana del Nettuno, cunicolo che si diparte dalla Sala Borsa e termina sotto il centro della fontana rappresenta anch'esso un elemento oggetto della presente relazione.

Il cunicolo ha una larghezza media di 80 cm, una altezza variabile e tale per cui non sempre è possibile procedere al suo interno in posizione eretta. Lo spessore della volta è, al pari della camera di manovra, di circa 15 cm, mentre le pareti, per le indagini svolte, hanno spessore di due teste di matttone.

L'estradosso della volta del cunicolo si trova ad circa un metro dal piano della piazza sovrastante; la volta ha una freccia di circa 32 cm.

Procedendo con le verifiche degli stati di tensione della volta per soli carichi verticali, così come si è proceduto per la camera di manovra, risulta che lo stato tensionale è assai modesto dell'ordine ancora dei 2 kg/cm².

Nel cunicolo e nella relativa volta non sono stati riscontrate lesioni, fessurazioni o cedimenti che possano far ipotizzare, come per la camera di manovra una situazione di precarietà statica.

6. ATTACCO FRA STATUA DEL NETTUNO E FONTANA

L'ancoraggio della statua del Nettuno al supporto murario che costituisce l'ossatura della fontana avviene attraverso due tiranti superiormente ancorati alla piastra di base della statua ed inferiormente ancorati a due traverse metalliche vincolate alla parte superiore del corpo della fontana stessa.

Purtroppo non è stato possibile eseguire un accurato rilievo del collegamento in quanto non raggiungibile ad una prossimità tale da permettere misure e valutazioni delle dimensioni degli elementi portanti. Nelle fotografie n. 16a e 16b è visibile quanto si è potuto vedere, ma non misurare.



Foto 16a sx
Foto 16b dx

L'attacco della statua, che venne sistemato durante la ristrutturazione degli anni ottanta, appare particolarmente delicato per diverse ragioni:

- lo stato degli ancoraggi metallici in acciaio appaiono molto degradati ed aggrediti dalla ossidazione;
- la posizione dell'attacco è collocata nel tronco più alto del corpo della fontana, corpo che ha anche le dimensioni minori in pianta e quindi più suscettibile a risentire degli effetti di eventuali eventi sismici. Si ricorda che le maggiori tensioni verticali di compressione si rilevano proprio allo spiccatto di questo secondo tronco;
- l'attacco della statua è costituito da soli due ancoraggi, come è rilevabile anche dall'esterno e riportato nella fotografia n. 17 e pertanto nei confronti di azioni orizzontali (quali il sisma) l'attacco non presenta lo stesso livello di sicurezza in tutte le direzioni, ovvero per qualunque direzione di provenienza della forza orizzontale;
- nulla è dato di sapere se i profilati orizzontali di ancoraggio delle barre verticali poste per la stabilizzazione della statua sono adeguatamente inseriti nella muratura del tronco più alto del corpo della fontana.



Foto 17

Sulla base di quanto precedentemente esposto si ritiene che una verifica accurata debba essere svolta dal progettista degli interventi dell'eventuale consolidamento del complesso. In questa sede si possono dare solo delle indicazioni sulla possibile soluzione, indicazioni che naturalmente dovranno essere confrontate anche con coloro che hanno la responsabilità della salvaguardia del bene artistico-monumentale e con i quali dovranno essere concordati, secondo anche quanto già in precedenza richiamato in termini di disposizioni normative, le tipologie di intervento ed i livelli di sicurezza che si intendono raggiungere.

Quanto agli interventi che in questa sede ed alla luce delle indagini svolte possono essere proposti si ritiene che il dispositivo di ancoraggio della statua possa essere progettato dello stesso tipo di quello esistente con opportune varianti che ne garantirebbero una maggiore efficienza:

- le barre di ancoraggio dovrebbero essere portate a quattro (nella figura 17 si rileva che la piastra di base presenta due fori non utilizzati per inserire barre di ancoraggio);
- il livello di ancoraggio inferiore, con traversi immorsati nella muratura, delle barre verticali dovrebbe essere portato a livello più basso e verosimilmente verso la base del tronco inferiore del corpo della statua in modo tale da poter sfruttare tutto il peso del corpo della fontana per contrastare gli effetti delle azioni orizzontali;
- le barre di ancoraggio devono essere di diametro il maggiore possibile, compatibilmente con i fori presenti sulla piastra di base e presollecitati con stati di tensione modesti; la dimensione sovrabbondante dei tiranti ha lo scopo di conferire rigidità al sistema di ancoraggio;
- la presollecitazione deve essere tale da poter disporre sempre di uno stato di tensione di trazione nei tiranti verticali indipendentemente dalle variazioni termiche che possono investire il sistema di ancoraggio;
- la presollecitazione degli ancoraggi verticali comporta anche un beneficio per la muratura che vede la possibilità di annullare l'eventuale parzializzazione della sezione resistente di muratura a seguito della presso-flessione indotta da carichi orizzontali.
- il sistema di ancoraggio deve essere protetto sia dalla ossidazione sia da correnti vaganti;
- il sistema di ancoraggio deve essere realizzato con materiale che sia compatibile con l'accoppiamento con la piastra di bronzo.

7. CONCLUSIONI

Le conclusioni che di seguito sono riportate sono conseguenti anche alle valutazioni espresse nella relazione consegnata dopo il sopralluogo del 3 marzo scorso ed il contenuto della precedente relazione del 29 aprile. Questi precedenti documenti si considerano parte integrante di questa relazione, la quale, come già accennato, non può prescindere da quei documenti già consegnati e senza i quali non è completa.

Le considerazioni svolte riguardano il solo copro della fontana ed il cunicolo di accesso dalla Sala Borsa; altri cunicoli, riscontrati durante i sopralluoghi, non sono compresi in queste valutazioni.

L'esame della parte portante e della struttura del corpo della fontana porta alle seguenti considerazioni conclusive che comunque lasciano ancora aperto un margine di approfondimento necessario in quanto alcune indagini e valutazioni potranno essere eseguite solo a seguito della possibilità di esaminare da vicino alcune parti della costruzione. Si elencano di seguito i principali risultati:

- le caratteristiche meccaniche delle murature risultano di valore elevato anche se le indagini condotte non possono essere assunte con valore statistico;
- gli stati di tensione delle murature per carichi verticali solo compatibili con le caratteristiche misurate;
- è necessario controllare il grado di collegamento delle lastre di rivestimento della fontana con la sottostante struttura muraria;
- provvedimenti dovranno essere assunti per rimediare al quadro fessurativo riscontrato nel collegamento fra le lastre di rivestimento e la parte interna di muratura;
- con le ipotesi assunte per la verifica sismica il copro di murature della fontana non evidenzia particolari situazioni critiche;
- la valutazione della sicurezza della fontana potrà essere completata solo quando gli organi preposti alla sua tutela come bene storico e artistico si saranno espressi sui tipi di interventi possibili e sui livelli di sicurezza che intendono raggiungere;
- è necessario intervenire con rinforzi nella camera di manovra;
- è necessario un intervento per rendere i locali oggetto di questa indagine non più soggetti a dispersione di acqua sia essa proveniente dall'impianto di alimentazione della fontana sia essa di tipo meteorico. La presenza di acqua danneggia la durabilità del complesso;
- si ritiene opportuno eseguire da parte di tecnici manutentori di eseguire periodici sopralluoghi al fine di riscontrare eventuali degradi o danneggiamenti delle strutture;
- è necessario provvedere alla rivisitazione del sistema di attacco della statua al corpo della fontana;
- si ritiene necessario provvedere ad approfondire il collegamento delle lastre lapidee di rivestimento della fontana anche eventualmente, in fase di restauro, con la rimozione di

lastre per verificarne la consistenza ed il collegamento.

Lo scrivente si rende disponibile ad incontrare il progettista incaricato di eseguire le opere di risanamento del complesso

Prof. Ing. Pier Paolo Diotallevi

Si ringraziano i Tecnici del Laboratorio del DICAM che hanno condotto i prelievi e le prove di laboratorio: Roberto Carli e Roberto Bianchi.