

Interpretazione degli effetti sismici e analisi dinamica dei collassi in Ostia Antica

Laura Pecchioli^{1,2}, Giovanni Cangi³

¹ Winckelmann Institute, Classical Archaeology, Humboldt University, Berlin, Germany

² Brandenburg University of Technology, Cottbus-Senftenberg, Germany

³ Associated ITABC-CNR, Rome, Italy

Abstract

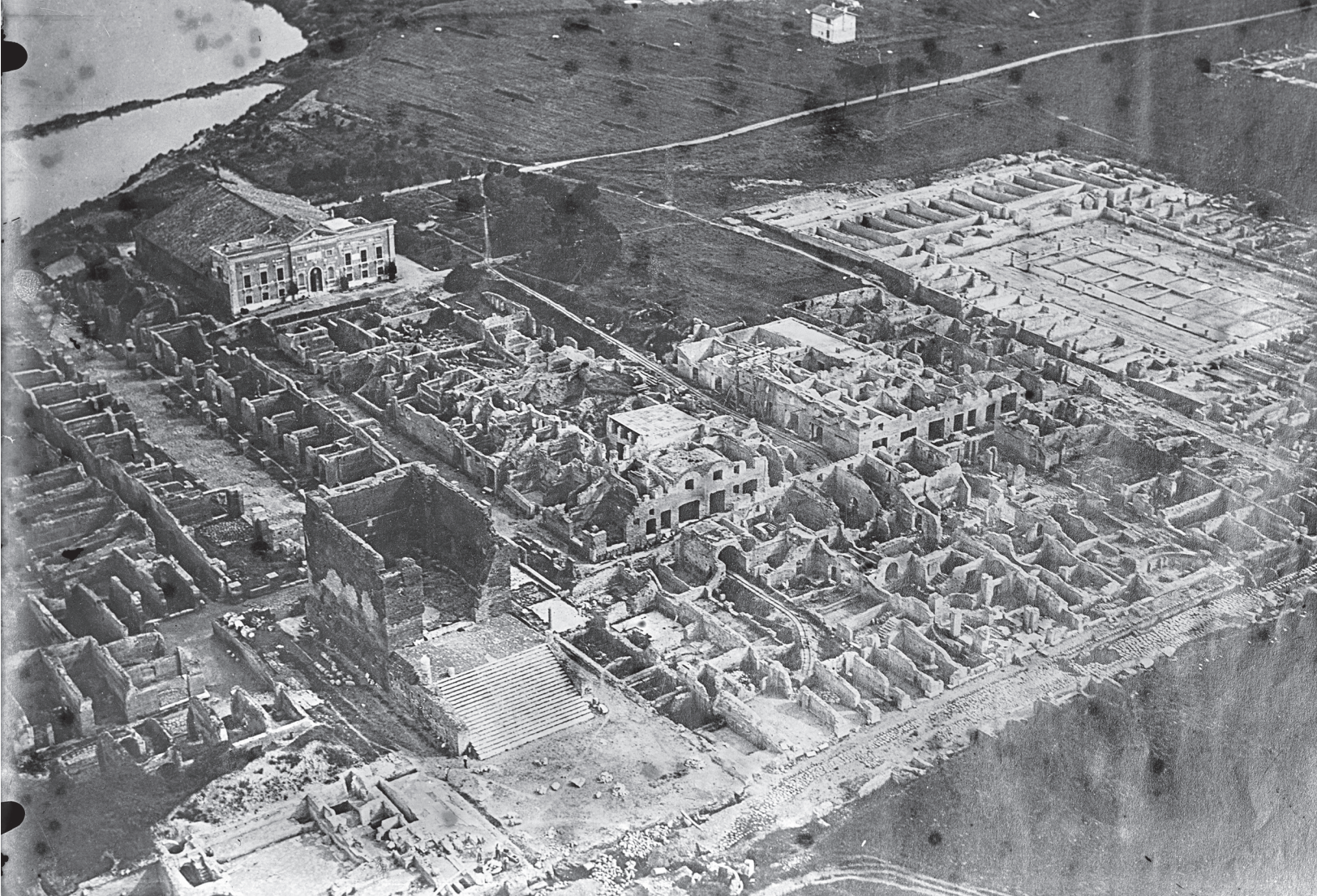
The working methods of Roman builders confirm the advanced knowledge of consolidation and repair techniques, so much so that quite a few of their buildings are still considered stable without undergoing further interventions. For those ancient structures that have collapsed, signs of destructive events remain, allowing a chronology of events to be reconstructed, as in the ancient Roman port of Ostia. The impression given by the excavations in Ostia regarding the causes and dynamics of collapse, which affected both ordinary and monumental buildings, is that of a center which, in addition to natural degradation due to progressive abandonment and the ravages of man, suffered the concomitant disastrous effects of several natural disasters. Therefore, the contribution focuses on some structural analysis results and two seismic measurement campaigns carried out in the archaeoseismological field to understand the causes and modes of collapse that affected several building structures.

Parole chiave

Natural disasters, repair techniques, Archaeoseismology, structural analysis, dynamic of collapse, seismic measurement, ancient structures.

I metodi di lavoro dei costruttori romani confermano la conoscenza avanzata delle tecniche di consolidamento e di riparazione, tanto che non pochi dei loro edifici sono ancora considerati stabili senza aver subito ulteriori interventi. Per quelle strutture antiche dissestate permangono i segni di eventi distruttivi che permettono di ricostruire una cronologia dell'accaduto, come nel caso dell'antico porto romano di Ostia.

L'impressione presso gli scavi di Ostia in merito alle cause e modalità di crollo, che hanno interessato l'edilizia ordinaria e monumentale, è quella di un centro che oltre al naturale degrado, dovuto al progressivo abbandono e alle devastazioni degli uomini, abbia subito la concomitanza degli effetti disastrosi di più calamità naturali. Per comprendere le cause e le modalità di crollo che hanno interessato diverse strutture edilizie, il contributo si focalizza su alcuni risultati di un'analisi strutturale e su due campagne di misurazione sismica eseguite nell'ambito archeosismologico¹.



Edificato storico: insieme vulnerabile e fonte di conoscenze

Fin dall'antichità diverse località del Mediterraneo sono sempre state colpite da calamità naturali, come i terremoti e l'uomo ha sempre cercato istintivamente di cancellarne i ricordi. Forse anche per questo le informazioni, sulle fonti letterarie ed epigrafiche su tali eventi sono relativamente scarse. Gli antichi terremoti sono menzionati senza una precisa ubicazione geografica, e registrati in un'unica località che ne ha risentito gli effetti anche lontani, ed erroneamente in quel luogo viene calcolata spesso l'origine dell'evento sismico (Guidoboni, 2000). Spesso questi osservatori sismici *ante litteram* erano importanti centri politici o commerciali, oppure altri luoghi che, a seconda del periodo, detenevano e catalizzavano la presenza regionale delle fonti. D'altra parte un approccio pratico ed intuitivo ha regolato l'arte di costruire e rinforzare le strutture murarie nel caso di disastri naturali. Possiamo affermare che nelle varie regioni sismiche del mondo si sono consolidate diverse culture della resistenza ai terremoti, che presentano evidenti tratti comuni e specifiche differenze. In comune hanno l'obiettivo di migliorare la resistenza dei manufatti alle forze orizzontali prodotte da un sisma. Tale obiettivo, tuttavia, viene perseguito in alcune culture aumentando la rigidità e/o le dimensioni delle strutture, in altre alleggerendole e permettendone la deformazione.

Fig. 1
Foto scattata dal dirigibile
Zeppelin (1919), B-2430, PAOA

Nelle società antiche le conoscenze tecniche costituivano patrimonio diffuso della comunità ed il sapere era meno specialistico (Bianchini, 2010). Non vi è da meravigliarsi che anche nell'edificato abitativo si ritrovino le tecniche che si sono rivelate efficaci per i monumenti. I costruttori antichi ignoravano probabilmente i concetti come sollecitazione puntuale e di tensione di snervamento, ma avevano constatato che in caso di terremoto, i muri costruiti accuratamente con determinati accorgimenti (come elementi di collegamento trasversali, pietre squadrate, assi di legno inserite ad intervalli regolari) resistevano meglio di quelli costruiti in ciottoli, o in pietre irregolari debolmente connesse. In particolar modo nel caso degli angoli degli edifici avevano appurato che venivano danneggiati per primi, a meno che non fossero rinforzati.

Cultura sismica della ridondanza e della rigidità

Le costruzioni in muratura utilizzano tecnologie sismoresistenti che esprimono prevalentemente una cultura sismica 'della ridondanza e della rigidità'. Una muratura, se costruita a regola d'arte, ha una eccellente resistenza alla compressione, ma presenta una minore resistenza alle forze orizzontali, quelle che generano le sollecitazioni taglianti e torsionali². Tali tecniche risultano largamente diffuse nel mondo intero oltre ad essere antiche di millenni e caratterizzano l'architettura vernacolare di tutti i paesi sismici del Mediterraneo. In genere gli antichi coltivavano l'idea di realizzare costruzioni solide, secondo il concetto vitruviano e per questo anche antisismiche, senza distinguere troppo fra i due aspetti, con la convinzione che la solidità fosse requisito sufficiente per far fronte ai diversi eventi calamitosi. Ad oggi è noto che la resistenza delle strutture murarie dipende essenzialmente dalla capacità di assorbire le sollecitazioni taglianti e torsionali indotte dal sisma. Il che significa, che l'energia³ trasmessa dal sisma viene trasformata in calore⁴. Sappiamo che, a parità degli altri fattori che caratterizzano la scossa, le sollecitazioni subite dai manufatti sono direttamente proporzionali all'energia che viene scaricata su di loro. Aspetto quest'ultimo che: da un lato dipende dall'energia propria dall'onda sismica, dal mezzo interposto e dalla natura del suolo e dall'altro dalla quota di energia che l'edificio cattura, quota che dipende dalla massa del manufatto. Sappiamo anche che la deformazione delle strutture contribuisce a trasformare l'energia catturata in spostamenti e in calore. Per rendere il manufatto capace di assorbire la quota di energia catturata ma non metabolizzata, quella cioè che provoca la rottura, nella cultura della ridondanza le sezioni resistenti degli elementi strutturali vengono maggiorate rispetto a quelle strettamente necessarie ad assorbire i carichi ordinari. Occorre sottolineare che l'aumento delle dimensioni della muratura produce però anche un incremento della massa del manufatto e quindi dell'energia catturata. La quota non metabolizzata si riduce, ma non viene completamente eliminata. E' quindi necessario un ulteriore incremento delle dimensioni, che permette di metabolizzare tutta l'energia catturata, sia la quota residua che quella derivante dall'ulteriore incremento delle dimensioni delle strutture. E' questo il processo logico che ha generato le tecniche costruttive sismoresistenti 'per ridondanza', un carattere dell'architettura delle regioni sismiche italiane rilevata dai trattatisti fin dal XVIII secolo (Ferrigni et al., 2017).

Individuazione e analisi dei dissesti in Ostia

Ostia, come città portuale, rappresentava la capitale sul Mediterraneo con funzioni di centro commerciale (Boin, 2013; Pavolini, 2016). Nei secoli i cambiamenti della costa e la natura alluvionale del suolo hanno ripetutamente richiesto alla città di adeguarsi.

I crolli diffusi degli edifici civili e monumentali danneggiati venivano così periodicamente riparati.

Negli scavi di Ostia è mancata una lettura critica strutturale che avrebbe permesso di ricostruire in modo più realistico la sequenza della dinamica dei collassi degli edifici. Le lesioni nelle strutture sopravvissute, i fuori piombo delle pareti originarie e i profili di crollo consentono di apprezzare anche la qualità delle costruzioni e l'attenzione rivolta alla solidità degli edifici. Resta comunque difficile distinguere nei resti delle costruzioni antiche, le tecniche inquadrabili nelle normali regole costruttive, da quelle che si caratterizzano esplicitamente per finalità antisismiche. Si ritiene che il modo più realistico per analizzare una costruzione sia quello di considerare schemi di calcolo più semplici ed intuitivi, coerenti con le modalità con le quali gli edifici antichi sono stati realizzati. Modalità di indagine che trovano la propria preziosa fonte informativa e di validazione nel rilievo dei danni agli edifici già colpiti dal terremoto. Attraverso questi ultimi è possibile identificare i cinematismi che hanno interessato un edificio: valutando in dettaglio le condizioni geometriche, la qualità dei materiali, la tipologia e la tessitura delle murature e delle relative connessioni e le modifiche intercorse nel tempo. Un metodo, peraltro, utilizzato empiricamente anche dai maestri muratori fin dai tempi più antichi, che in tal modo individuavano le soluzioni più idonee per evitare il ripetersi di quel danno (Giuliani, 2012). L'analisi dei quadri di fessurazione e dei crolli hanno rappresentato un necessario passaggio per supportare l'ipotesi dei terremoti. Un aspetto della ricerca non ancora mai approfondito in modo adeguato, da collegare all'analisi dei dissesti e crolli causati da eventi sismici, riguarda la direzione di propagazione dell'onda sismica e i vettori di crollo delle strutture. Il centro abitato di Ostia è caratterizzato da un impianto a reticolo quadrato e di strutture orientate in parallelo e quindi non si hanno molte direzioni di confronto per individuare una direzione di intensità sismica⁵ (Fig. 1). Il tipico andamento a scacchiera dell'insediamento romano ha giocato probabilmente un ruolo determinante degli effetti del danno, influenzando la direzione delle deformazioni. Tale valutazione rientra in un quadro più ampio, che tiene conto di un trasferimento dell'impulso sismico cosiddetto 'effetto domino'. Inoltre è dimostrato che in casi di tecniche di costruzione comparabili, gli edifici antichi mostrano modelli di danno simili a quelli nei recenti terremoti in Umbria e Marche (1997) e de L'Aquila (2009), e come in contesti antichi come quello del 62 d.C. di Pompei (Cangi, 2005).

Una ricognizione sistematica dell'abitato ha permesso di cogliere le tracce significative del tipo di danno di un evento calamitoso di rilevante intensità. Al momento in base all'analisi meccanica delle murature, nove casi sono stati interpretati per danno sismico. I casi sono stati selezionati e analizzati al fine di rilevare le direzioni delle sollecitazioni orizzontali che hanno causato il loro cedimento. Nell'interpretare i risultati, si deve considerare che i danni subiti sono probabilmente il risultato di terremoti cumulativi che possono avere avuto diversi epicentri e direzioni di propagazione. Le interpretazioni devono prendere in considerazione la specifica configurazione strutturale dell'edificio danneggiato, così come i possibili effetti di torsione legati alla distribuzione della massa e alle proprietà meccaniche degli elementi strutturali.

I vettori di collasso forniscono indicazioni sulla direzione di propagazione delle onde sismiche, ma non possono essere considerati come riflesso di specifici eventi sismici. Infatti, abbiamo rilevato una direzione dominante S-SE e direzioni secondarie N-NW e W-SW (Pecchioli et al., 2018). Una propagazione principale S-SE, coerente per esempio con la geometria della frattura che ha interessato la volta di una stanza delle Terme del



a



b

Fig. 2
Fenomeni di subsidenza del terreno
a Reg. I Forum (Ostia Forum Project)
b Reg. V.

Foro⁶, è dedotta anche dalla deformazione che ha interessato le vicine colonne cadute, ricomposte del loro ipotetico riposizionamento nel restauro. In corrispondenza dei giunti di frattura, queste colonne mostrano le tipiche cerniere plastiche generate da sollecitazioni di taglio, che causano lo schiacciamento e l'espulsione del cuneo plasticizzato. Tale risultato è una conseguenza dei cicli di deformazione dovuti all'alternanza di forza di compressione e trazione, generati dall'oscillazione della colonna, che producono la disintegrazione del materiale. Il prevalente allineamento dei vettori di collasso lungo la direzione NNW-SSE può suggerire una propagazione ortogonale dal piano di faglia WSW-ESE, che ricerche indipendenti (Ciotoli et al., 2015) hanno ipotizzato confinare a Nord con l'area di Ostia.

Natura del terreno ed effetti di sito in Ostia

Un aspetto importante nella risposta di un edificio alle scosse sismiche è legato alle caratteristiche geologiche del terreno e l'area metropolitana di Roma ne è un esempio. Come eventi sismici di riferimento da collegare a quelli di Ostia, tale area fin dall'antichità ha mostrato effetti e gradi di danno diversi da zona a zona⁷, in virtù proprio anche dei sedimenti alluvionali su cui giacciono le aree urbane, favorendo fenomeni di amplificazione della scossa sismica (Galadini et al., 2006). Dalle fonti storiche non si può dire quali danni specifici possano essere attribuiti ad un singolo terremoto, ma normalmente cinque sono i noti terremoti storici principali tra il VI e il IX secolo (443, 484, 508, 801, 847). Il resoconto degli eventi purtroppo però può risultare essere incompleto a causa della mancanza di documentazione storica nel lungo periodo di tempo trascorso dalla caduta

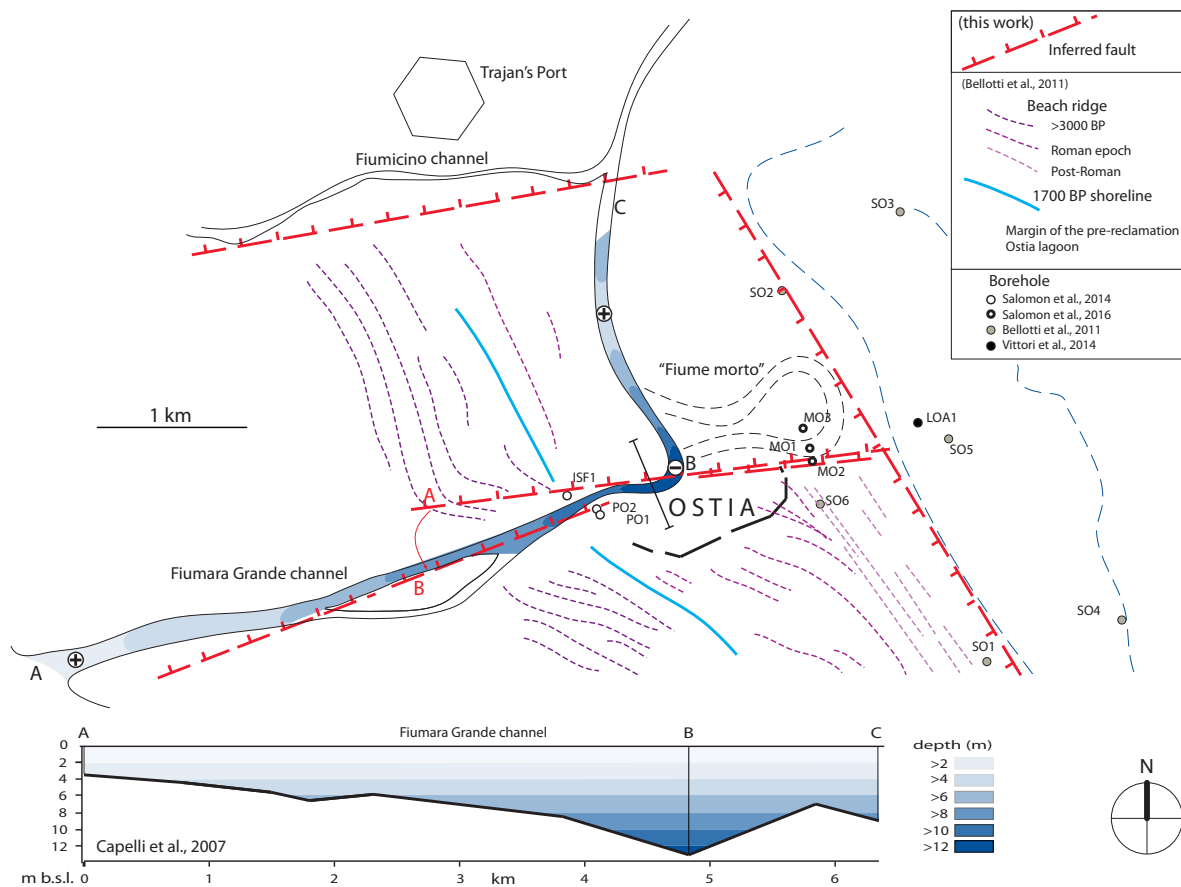


Fig. 3
 Sezioni dei sedimenti alluvionali e la presenza della faglia B in direzione W-SW/E-NE (INGV, Roma)

dell'Impero e per tutto il Medioevo (Molin e Guidoboni, 1989; Guidoboni et al., 2018); in realtà, nessun forte terremoto con epicentro a Roma è riportato dopo l'anno 847 d.C. nel catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980 d.C. (Boschi et al., 1995). Dalla seconda metà del XIX secolo diversi studi hanno interessato molto l'evoluzione del delta del Tevere cercando di ricostruire i cambiamenti e le linee di riva, che non possono esimersi dal non essere incrociati con i dati dei diversi sondaggi, svolti sui depositi tardo pleistocenici e olocenici e quelli di tipo geologico e storico del periodo romano. Nel contesto ostiense negli ultimi quattro anni sono state eseguite, nell'ambito di un progetto⁸, due campagne di microzonazione sismica⁹, con l'obiettivo di fornire informazioni sulla geologia del sottosuolo e sulla capacità di amplificare localmente le scosse del terreno. La prima campagna di misurazioni risale al 2017 e fu condotta scegliendo alcune aree campione¹⁰ dai risultati di un'analisi dinamica dei collassi più rilevanti di alcuni monumenti, dall'identificazione di alcuni fenomeni di subsidenza del terreno (Fig. 2) e dalle tracce di riparazioni e lesioni ancora evidenti nelle murature¹¹. Tali indagini registrarono i dati stratigrafici¹² rilevando alcun fenomeno di amplificazione¹³. La maggiore distanza da Ostia alle principali sorgenti sismiche appenniniche suggeriva che i danni fossero causati da sorgenti locali. Gli effetti sismici osservati indicavano però che i terremoti avessero avuto epicentri e direzioni di propagazione diversi (Pecchioli et al. 2018). Come risultato di un'attenta ricostruzione geomorfologica si giunse alla conclusione che il movimento di una faglia avesse causato terremoti locali (Marra et al. 2019). Una linea di faglia ipotizzabile W-SW/E-NE, al confine settentrionale della città, sarebbe quindi già stata attiva in antichità (Fig. 3).

A distanza di tre anni sono state ripetute le misurazioni su due nuovi campioni¹⁴ (Piccolo Mercato e nei Portici Est e Ovest di Pio IX). Dal rilevamento sono stati confermati i risultati precedenti per i nuovi campioni di aree, ma l'interpretazione del secondo sismologo supporta l'ipotesi di un terremoto appenninico (distanza 80-100 km), molto energetico con magnitudo superiori a 7.0 con effetto devastante.

Breve cenno allo scenario dei crolli tra scavi e restauro

Sulla scorta di questi contributi, indiretti o più espliciti, sembra opportuno dimostrare che il valore delle rovine di Ostia è legato anche ai segni dei dissesti, che raccontano delle vicende della città intera e dei singoli edifici (Pecchioli, 2019). Purtroppo questo tipo di lettura è parzialmente compromessa, come in altri contesti simili, dalle vicissitudini della città (disastri naturali, invasioni, abbandono, cava a cielo aperto). Gli interventi di scavo spesso sono stati condotti con criteri non sempre rigorosi ed i restauri con scelte ricostruttive poco distinguibili. In particolare l'esteso e rapido cantiere di scavo eseguito in preparazione dell'Esposizione Universale del 1942, che portò alla luce in pochi anni una vasta quantità delle rovine, fu basato su un approccio di principi sulla 'liberazione del monumento' e sul metodo della trincea, che hanno causato una perdita di una notevole quantità di testimonianze storiche-archeologiche (Rinaldi, 2015). In ogni caso non è possibile ricostruire lo scenario dei crolli avvenuti, ma analizzando i ruderi ricomposti nella posizione originale, dall'ampia documentazione storica fotografica e dai Notiziari di Scavo, è possibile ricostruire la dinamica di diversi collassi.

Purtroppo i restauri nel contesto ostiense non hanno sempre dato valore testimoniale ai crolli e alle lesioni nelle murature come tracce storiche da documentare, ma viceversa interpretati come segni di degrado da eliminare o correggere. Peraltro situazioni simili si rilevano anche a Pompei, dove però si sono conservati gli affreschi e gli intonaci di supporto, dove le lesioni antiche sono rese ancora più evidenti dalle alterazioni prodotte sulle pellicole pittoriche.

Ad offrire lo spunto per una riflessione che segue percorsi diversi da quelli tradizionali sono delle note storiche degli scavi, che permettono di aprire un nuovo fronte di indagine che investe l'ambito strutturale e la lettura critica dei dissesti subiti dalle costruzioni durante gli scavi stessi.

La prima nota è una relazione di Guido Calza e Italo Gismondi, durante gli scavi tra il 1938 nel 1940. In tale nota Calza sostiene che lo scavo di Ostia è diverso da quello di Pompei e di Leptis Magna, in quanto l'antica città avrebbe subito un degrado lento a seguito del progressivo abbandono da parte dei suoi abitanti, quando perse importanza commerciale e fu soggetta alle incursioni dei predoni. Al contrario Pompei si presenta nella sua originaria configurazione fissata al I sec. d.C..

Secondo Calza, Ostia sarebbe crollata poco a poco per mancanza di manutenzione, con le macerie dei tetti dei piani superiori crollate e accumulate sui piani inferiori, ma osserva anche molti elementi architettonici caduti a notevole distanza, a differenza di Pompei, dove i frammenti degli edifici si ritrovano vicino alla loro collocazione originaria e sostanzialmente sulla stessa proiezione orizzontale.

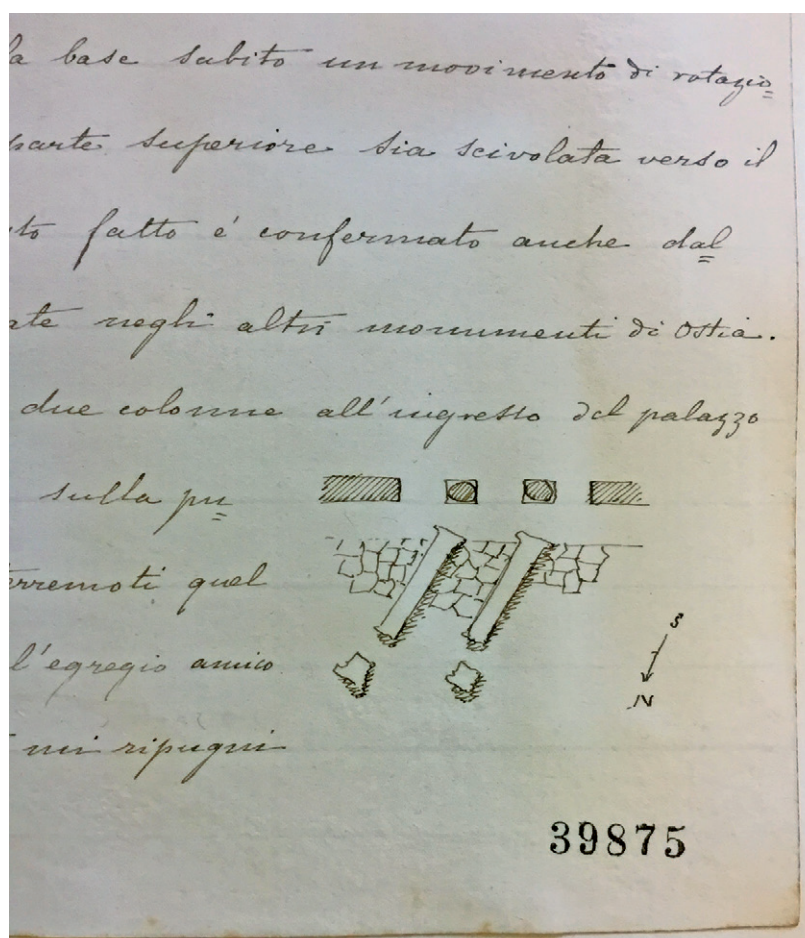
In questa luce, gli appunti scritti e le bozze di Rodolfo Lanciani sono un rilevante rapporto di valutazione degli effetti sismici ad Ostia (Lanciani, 1918). Durante gli scavi del 1871 per il Palazzo Imperiale, egli ricostruì la dinamica di crollo di muri e colonne (Fig. 4), interpretando la loro caduta come dovuta ad un terremoto con una direzionalità N-S. In altri scavi effettuati al Tempio di Vulcano e al Casone del Sale, Lanciani descrisse la

pagina a fronte

Fig. 4

Note di Rodolfo Lanciani (1918).

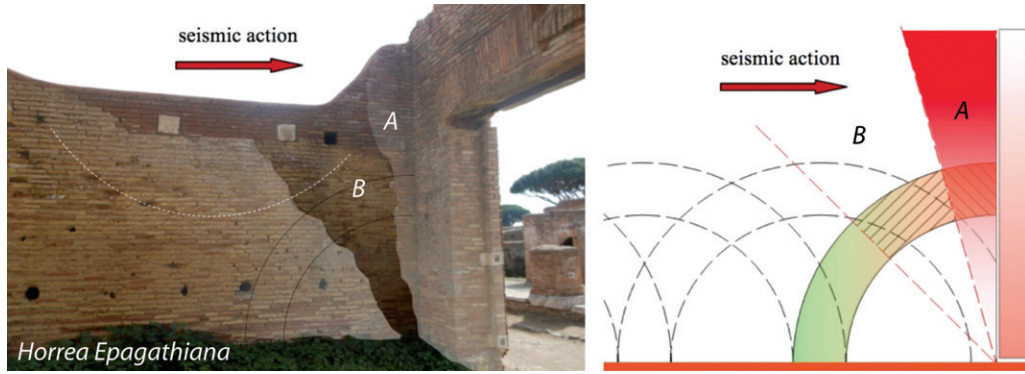
Foto: Istituto Nazionale di Archeologia e Storia dell'Arte, Fondo Lanciani, colloc. Roma XI, 31.



dinamica di crollo delle strutture murarie suggerendo un cedimento causato dal sisma e una direzionalità da N-S a NE-SW per il terremoto, che egli tentò di correlare con l'evento del 443 CE registrato a Roma (Molin e Guidoboni, 1989). Infine, una nota distinta riguardante il colonnato del Piccolo Mercato Lanciani descrive il comportamento torsionale di un pilastro (Pecchioli et al., 2018), che è un tipico effetto dovuto alla componente di taglio della sollecitazione, come anche osservato nel caso della colonna di Marco Aurelio a Roma. È evidente che a spostare gli elementi architettonici lontano dalla posizione originaria sono in genere le azioni sismiche, che causano lo svertamento dei materiali e l'allontanamento dei corpi sommitali. La sua impressione assume un valore maggiore, considerato pure che nella seconda metà del XIX secolo gli ingegneri avevano ancora notevole dimestichezza con le strutture murarie.

Modello ad archi virtuali

Sotto l'aspetto tecnico si osserva che nelle murature laterizie di mattoni pieni prevale la tendenza alla formazione di lesioni di scorrimento, dato che l'ingranamento dei mattoni assicura in genere una discreta azione di trattenuta, che impedisce lo strappo fra il primo e il secondo settore (Fig. 5). Tale fenomeno è dovuto alla tendenza delle lesioni di formarsi lungo i giunti di malta, più deboli rispetto alla resistenza che fornisce l'impasto laterizio dei singoli mattoni.



a

Fig. 5
a, b Il modello degli archi virtuali applicato alle strutture murarie di Horrea Epagathiana e del Piccolo Mercato.
c Comportamento a rottura di strutture in muratura in laterizio sotto una componente sismica complanare dello sforzo.

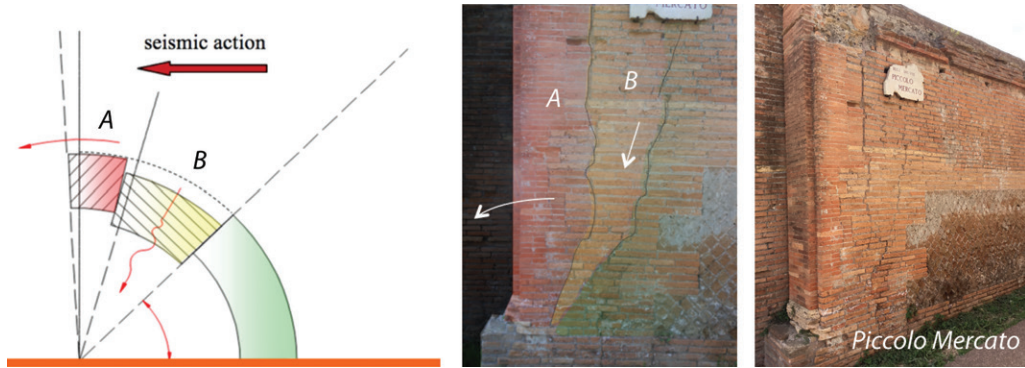
pagina a fronte

Fig. 6

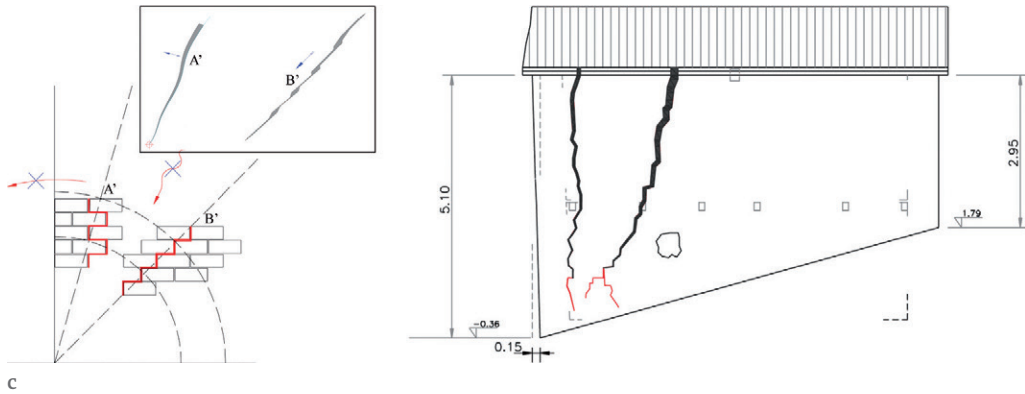
Ribaltamento della facciata in Via della Domus del Tempio Rotondo.

a PA-OANT, AF, neg. B3082

b stato attuale, 2021



b



c

Sul piano tecnico come evidenze di dissesto sismico, si riconosce l'innesco di un meccanismo di testata¹⁵ delle pareti che produce lo strappo e il ribaltamento di un cuneo di estremità e lo scorrimento di un secondo cuneo che viene trascinato nel cinematismo. Il fenomeno si spiega perfettamente con il modello ad archi virtuali (Cangi, 2005; Pecchioli et al., 2018), che aiuta a comprenderne anche l'evoluzione al collasso delle pareti. Il fatto che ad Ostia si presentino strappi fra il primo e il secondo settore sta ad indicare che non si tratta di murature di laterizi piena, ma di paramenti laterizi con un nucleo di calcestruzzo, che si configura come un materiale piuttosto omogeneo e privo di giunti. Pertanto, a differenza delle murature di soli mattoni, nella massa di calcestruzzo non vi



a



b

sono profili di rottura preferenziali. Dal tipo di fessurazione, si possono ricavare informazioni indirette sulle caratteristiche della muratura, anche se riparate, purché identificabili nella configurazione (Giuliani, 2016).

Il comportamento monolitico delle murature a doppio paramento in Ostia, ad esempio quelle a sacco, è uno degli interventi più utili nei confronti del ribaltamento fuori dal piano, frequente e che coinvolge soprattutto la muratura esterna. Nelle costruzioni storiche realizzate a regola d'arte, l'obiettivo spesso era raggiunto con l'inserimento di elementi di collegamento in pietra (diatoni) con passo regolare, disposti ortogonalmente alle due pareti.

Fenomeno del ribaltamento di facciata

Si rilevano in Ostia varie situazioni complesse di danno, come il meccanismo di ribaltamento delle pareti di facciata. Tale fenomeno interessa tutta l'edilizia storica colpita dal sisma e si presenta con caratteristiche simili in realtà territoriali differenti, perché deriva da un processo di dissesto spontaneo che lo rende quasi fisiologico (Fig. 6). In genere il fenomeno si manifesta con il trascinarsi dei muri ortogonali sollecitati da azioni complanari, dove si staccano tre settori separati da lesioni di diversa natura¹⁶ (Figg. 5a, b): quella superiore, che separa il cuneo¹⁷ di rotazione dal cuneo intermedio (detto di scorrimento), si apre dal basso verso l'alto; la seconda lesione, più distesa, si mantiene uniforme ed è caratterizzata dallo scorrimento dei lembi lungo la linea di fessurazione. Il cinematicismo indotto è quello ricostruito nel modello cinematico, che invita ad assimilare la testata di muro ad un semiarco equivalente dall'equilibrio instabile. Solo la capacità di trattenuta della muratura, determinata dalla seppur modesta resistenza a trazione, oltre che dal bilanciamento offerto dal peso della porzione strappata, può impedire che il fenomeno si inneschi spontaneamente.

Sotto l'effetto del sisma si registra un incremento significativo delle spinte, per cui a quelle statiche si aggiungono le componenti dinamiche, pertanto il fenomeno risulta difficile da controllare in assenza di adeguati elementi di ritegno¹⁸. Di conseguenza si possono generare lesioni di strappo e di scorrimento come quelle osservate in vari apparecchi murari ostiensi. Le azioni esterne creano quasi sempre stati deformativi

e movimenti irreversibili. Tuttavia, se le rotazioni possono essere recuperate, almeno in parte, gli scorrimenti hanno sempre carattere permanente e non si possono correggere attraverso interventi ordinari (Cangi, 2019).

In Ostia ritroviamo diffuso il ribaltamento composto sopra descritto; fenomeno in cui la parete perimetrale, oggetto del cinematismo di ribaltamento dovuto alle azioni fuori dal piano, è ben ammorsata alle murature ortogonali, e per questo una porzione di queste viene trascinata nel cinematismo. Tra i danni più rilevanti sono state individuate quattro categorie:

1. spostamenti di elementi strutturali lungo i piani di faglia (chiare tracce nelle strutture con carattere di spostamento orizzontale)
2. Danni causati da urti (parti di strutture spostate e inclinate, muri rotti, rovesciati, rotazioni di muri orientati verticalmente, rotazioni di oggetti orientati verticalmente come colonne, monumenti, ecc.)
3. Effetti da terremoto secondario: abbassamento del suolo con cedimenti differenziali
4. Infine tracce di abbandono di un insediamento e le prove di riparazione e ricostruzione¹⁹ come quarta categoria

Valutazioni in merito al dissesto di archi e volte

Nel sottolineare l'importanza degli archi nell'architettura romana si corre il rischio di cadere nella retorica, ma in realtà questo aspetto merita di essere studiato in modo scientifico e più approfondito, con la consapevolezza che dal funzionamento degli archi e quindi delle volte, deriva la capacità intrinseca delle costruzioni di resistere anche alle azioni sismiche. Il comportamento degli archi e delle volte dipende dalla geometria, dai materiali e dalla tecnica costruttiva, oltre che dai vincoli esterni e dalla capacità delle strutture, su cui si impostano, di mantenere l'equilibrio. Si tratta di un problema complesso, la cui comprensione richiede conoscenze della loro meccanica elementare, del funzionamento ottimale e delle possibili anomalie.

Entrando ad Ostia da Porta Romana si colgono immediatamente i segni di un'architettura dominata dalla meccanica degli archi, di quelli visibili, che contribuiscono a creare l'immagine della città romana e di quelli nascosti, che si generano spontaneamente nelle masse murarie in condizioni di equilibrio e sotto l'effetto del sisma per assicurare l'equilibrio d'insieme. Ostia antica offre esempi interessanti di questo modo di costruire, che nel tempo si è affermato ed esteso in tutto l'Impero con esempi di architetture straordinarie. Si sono potute rilevare tracce di danni tipici riconducibili agli effetti di azioni sismiche orizzontali. Fenomeni che si possono manifestare anche per effetto di spinte statiche, laddove siano presenti elementi quali archi e volte, piuttosto comuni nell'edilizia di epoca romana, ma che solo attraverso l'incremento prodotto dal sisma raggiungono valori talmente elevate da causare crolli e dissesti.

Senza dubbio i romani avevano individuato nella meccanica degli archi²⁰ un punto di forza delle costruzioni, da sfruttare per la loro capacità di assicurare la stabilità grazie alla creazione di stati di precompressione orizzontali, quando opportunamente bilanciati. Nel tempo e oggi soprattutto, le strutture spingenti sono ritenute causa principale dei dissesti in fase sismica, ma questo è un concetto da rivedere proprio attraverso lo studio dell'edilizia antica.

La dimestichezza nel controllare le spinte statiche si rivela utile allo stesso modo per bilanciare le componenti sismiche orizzontali, che producono effetti del tutto simili.

E' su questo aspetto che si misura la differenza più evidente fra l'edificio tradizionale concepito secondo il criterio costruttivo trilitico utilizzato nella Grecia antica, privo di spinte e le costruzioni romane, che dal contrasto fra elementi strutturali traggono un punto di forza, se opportunamente controllato.

Conclusioni

L'edificato storico rappresenta un archivio di conoscenze utili insieme ai quadri fessurativi ed alle tracce di dissesti. La città romana di Ostia offre un'occasione unica per studiare un'ampia gamma di danni strutturali che interessano diverse tipologie di edifici antichi. La lettura strutturale costituisce un'opportunità di ricerca da sfruttare e da condurre con un approccio interdisciplinare, per filtrare le informazioni con l'apporto di competenze diverse e per favorire una lettura completa e articolata.

E' ipotizzabile che i terremoti siano stati una concausa alle crisi e agli sviluppi della città. L'analisi incrociata degli attuali risultati conferma una correlazione tra la posizione della faglia e le direzioni del collasso, con un ribaltamento dei muri come tipo di fenomeno di crollo più diffuso. Una seconda ipotesi basata su un'origine appenninica con un'alta intensità offre comunque ulteriori interessanti possibilità di sviluppo²¹. Oggi gli studi di vulnerabilità e gli scenari di danno sono efficacemente utilizzati per la pianificazione urbana e per la stesura dei piani di prevenzione. I modelli di danno post-disastro nelle città antiche presentano situazioni catalogabili che possono completare l'analisi sulla dinamica dei collassi per le eventuali soluzioni di riparazione preventiva.

Crediti dell'articolo

Sebbene gli autori abbiano condiviso lo stesso approccio metodologico, si devono a Laura Pecchioli i capitoli 'Edificato storico: insieme vulnerabile e fonte di conoscenze', 'Cultura sismica della ridondanza e della rigidezza', 'Natura del terreno ed effetti di sito in Ostia'; a Giovanni Cangi i capitoli 'Modello ad archi virtuali', 'Valutazioni in merito al dissesto di archi e volte'; a entrambi i capitoli 'Individuazione e analisi dei dissesti in Ostia', 'Breve cenno allo scenario dei crolli tra scavi e restauro', 'Fenomeno del ribaltamento di facciata' e le Conclusioni.

Ringraziamenti

Ringraziamo la Soprintendenza Speciale per il Colosseo, il Museo Nazionale Romano e l'Area archeologica di Roma (Parco Archeologico di Ostia Antica) e la Gerda Henkel Stiftung per la loro collaborazione e il prezioso supporto.

Bibliografia

- BIANCHINI M. 2010, *Le tecniche edilizie nel mondo antico*, Editrice Dedalo Roma.
- BOIN, DOUGLAS R. 2013, *Ostia in late antiquity*, Cambridge University Press.
- BOSCHI E. ET AL. 1995, *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, (ING RomaSGA Bologna), pp. 973.
- CANGI G. 2019, *Recupero e Conservazione*, «ReC Magazine», Rivista bimestrale (ISSN 2283-7558), Luglio/Agosto, n. 154, Costruzioni storiche in muratura. Modellazione strutturale schematica.
- CANGI G. 2014, *Tecniche antisismiche nell'antichità*, in A. CENTRONI (A CURA DI), *Attualità delle aree archeologiche: Esperienze e proposte: Atti del VII Convegno Nazionale ARCo 2013*, Sezione Protezione dai Rischi Ambientali, Cangemi Editore, Roma.

- CANGI G. 2005, *Manuale del Recupero Strutturale e Antisismico* – DEI, Tipografia del Genio Civile di Roma, Roma.
- CIOTOLI G. ET AL. 2015, *Tiber delta CO₂-CH₄ degassing: a possible hybrid, tectonically active Sediment-Hosted Geothermal System near Rome*, J. Geophys. Res. Solid Earth 121.
- FERRIGNI F., DELLA PIETRA A., SORRENTINO M.C. 2017, *Rafforzamento appropriato dell'edificato storico in zona sismica*, LAReHBA Project, Local Appropriate Retrofitting of Historical Built-up Areas.
- GALADINI F., HINZEN K.-G., STIROS S. 2006, *Archaeoseismology: Methodological issues and procedure*, In: «Journal of Seismology», Vol. 10, Issue 4, 395–414.
- GIULIANI C.F. 2011, *Provvedimenti Antisismici Nell'antichità*. In: «Rivista Di Topografia Antica», 21: Atti Del VII Congresso Di Topografia Antica, Parte III, (2012).
- GIULIANI C.F. 2016, *Il quadro fessurativo nello studio dei monumenti antichi*, «Quaderni di archeologia e di cultura classica», n. 4, Tiburis Artistica Editrice.
- GUIDOBONI E. 2000, *Historical Seismology as an instrument for the knowledge on the earthquake effects on historical buildings*. In: *Memorias. Ponencias presentadas en el Curso International Proteccion del patrimonio construido en zonas sismicas*, T. Guevara Editor, Universidad de Caracas, Caracas (Venezuela), 159-178.
- GUIDOBONI E., FERRARI G., MARIOTTI D., U.A. 2018, CFTI5Med, *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. In: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).
- LANCIANI R.A. 1918, *Segni di terremoto negli edifizii di Roma Antica*. In: «Bullettino della Commissione Archeologica comunale». vol. 45, pp. 3–28.
- MARRA F., MILANA G., PECCHIOLI L., U.A. 2019, *Historical faulting as the possible cause of earthquake damages in ancient Ostia (Rome, Italy): a combined structural, seismological and geological analysis*. In: PECCHIOLI, PANZERA AND POGGI (EDS), *Cultural heritage and Earthquakes: bridging the gap between Geophysics, Archaeoseismology and Engineering*, «Journal of Seismology».
- MOLIN D., GUIDOBONI E. 1989, *Effetto fonti effetto monumenti a Roma: i terremoti dall'antichità a oggi*, in: E. GUIDOBONI (A CURA DI), *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area mediterranea*. Storia archeologia sismologia, SGA Storia Geofisica Ambiente.
- PAVOLINI C. 2016, *Per un riesame del problema di Ostia nella tarda antichità: indice degli argomenti*, in FERRANDES, A.F. AND PARDINI, G. (EDS), *Le regole del gioco. Tracce Archeologi Racconti. Studi in onore di Clementina Panella*, Rome, 385–405.
- PECCHIOLI L., CANGI G., MARRA F. 2018, *Evidence of seismic damages on ancient Roman buildings at Ostia: An arch mechanics approach*. In: «Journal of Archaeological Science: Reports», 21, 117-127.
- PECCHIOLI L. 2019, *Analyse der mittelalterlichen Instandsetzungsmaßnahmen und der stratigraphisch-archäologischen Untersuchungen nach Einsturzkatastrophen in Ostia Antica*. In: DANIEL SCHNELLER/GUIDO LASSAU (HRSG.): *Erdbeben, Feuer, Wasser und andere Katastrophen. Ihr Einfluss auf die Stadtentwicklung und Stadtgestalt im Spätmittelalter und in der Frühen Neuzeit*. Beiträge der Tagung in Basel 1./2. Februar 2018. Bern 2019, ISBN 978-3-03797-597-8, <<https://peristyle.ch>>.
- RINALDI E. 2015, *Conservare e 'rivelare' Ostia: per una rilettura dei restauri della prima metà del Novecento*, in «Restauro Archeologico», Vol. 23, n. 2.

Note

¹ <https://lisa.gerda-henkel-stiftung.de/der_puls_der_erde?nav_id=7556>

² Una muratura può sopportare una forza tagliante massima, che dipende anche dalla superficie alla quale è applicata e dall'attrito unitario interno, che a sua volta dipende dalla tecnologia con cui è stata realizzata.

³ Energia di natura meccanica.

⁴ Per effetto dell'attrito interno delle murature. Attrito che le pietre ben squadrate, le tavole interposte e le gabbie angolari fanno aumentare sensibilmente.

⁵ In pratica più è distante l'epicentro e più l'onda sismica si caratterizza per una direzione principale, mentre quando l'epicentro è locale il sisma si manifesta con effetto tumultuoso in ogni senso, compreso quello verticale.

⁶ Stanza 16

⁷ Ciò che vediamo oggi a Roma è il risultato di danni sismici, dal Colosseo al Tempio di Marte Ultore nel Foro di Augusto, nella Basilica Ulpia (Palazzo Roccagiovine), nella Crypta Balbi o nell'Auditorium di Adriano ecc.

⁸ <https://lisa.gerda-henkel-stiftung.de/dr._laura_pecchioli>

⁹ L'energia che investe il sito dipende da quella liberata all'ipocentro (magnitudo) e dalla natura sia delle formazioni rocciose interposte sia del suolo locale (effetto sito), mentre quella che investe il manufatto è solo una parte di quella trasmessa dal suolo ed è proporzionale alla massa del manufatto. Possiamo quindi definire 'energia impattante' quella scaricata dall'onda sismica nel sito ed 'energia catturata' la quota che agisce sul manufatto.

¹⁰ A completamento furono condotte anche in Portus in prossimità di crolli evidenti.

¹¹ Nel Forum e adiacenze e nelle Regioni II, III e IV

¹² Confermando le stime dello spessore dei sedimenti alluvionali di circa 30 m.

¹³ I fenomeni di risonanza fra onda sismica incidente e modi di vibrare del terreno comportano fenomeni di aumentata risonanza fra i modi di vibrare del terreno e della sovrastruttura. Le situazioni geologiche e morfologiche del terreno quindi hanno una loro incidenza sul fenomeno.

¹⁴ Due pilastri rispettivamente nei portici di Pio IX e nei pressi dell'Insula degli Aurighi.

¹⁵ Porzione superiore della muratura

¹⁶ Settori: porzioni di muratura

¹⁷ Porzione di muratura a forma di cuneo

¹⁸ Dispositivi di ancoraggio

¹⁹ Hinzen K., 2011, Archäoseismologie – Auf der Suche nach Spuren vorinstrumenteller Erdbeben, Paderborn; München; Wien; Zürich: Schöningh, pag. 15

²⁰ Meccanica degli archi: la configurazione degli archi virtuali non risponde in alcun modo alla struttura fisica della muratura, costituita in realtà dalla sovrapposizione di filari orizzontali. Nonostante questa apparente incongruenza, il modello si rivela particolarmente efficace nel simulare la risposta alle azioni sismiche complanari; questo perché l'innesco dei cinematici indotti dalle spinte orizzontali è riconducibile alla meccanica degli archi.

²¹ Marra et al., 2021