

LA DINAMICA DEI SUOLI E GLI EFFETTI DEL SISMA SULL’ARCHITETTURA DI TERRA DELLA CITTADELLA DI BAM.

di

Randolph Langenbach

International Building Conservation Consultant,
Washington D.C. ed Oakland, California, USA.

Tutte le fotografie sono © di Randolph Langenbach tranne se diversamente in dicato.

ABSTRACT: La cittadella di Bam è un esempio notevole di architettura realizzata in terra che è stata danneggiata pesantemente durante il terremoto in Iran del 26 dicembre 2003. Queste carte presentano l’ipotesi che il crollo delle pareti è stato causato in gran parte da una combinazione degli effetti (1) dei successivi cambiamenti fatti alle pareti specialmente durante i recenti restauri che hanno provocato variazioni nella densità delle mura e la risposta alle vibrazioni dei differenti strati di terra cruda e (2) di vasti danni provocati dalle termiti e dalla perdita di coesione dell’argilla per degrado ed eccessivo essiccamento; il tutto ha interagito con le vibrazioni del sisma di frequenza insolitamente alta in modo tale che molte pareti sono letteralmente scoppiate per il cedimento dei loro nuclei interni. Nasce una riflessione circa la probabilità che vi siano simili rischi anche per altre strutture monumentali in terra.



Figura 1. La cittadella superiore dell’arce di Bam prima e dopo il terremoto. La foto presa prima del sisma è di James Conlon, 2003.

Durante i quattro mesi che hanno seguito il 26 dicembre 2003, quando un terremoto ha distrutto gran parte di Bam, città iraniana nel deserto, si è detto molto sulla stampa internazionale circa i danni alla maestosa e storica cittadella murata di Bam, realizzata in terra cruda (figura 1). In nessuno degli scritti, tuttavia, si è fatta alcuna osservazione circa le termiti. Mentre stavo visitando le rovine, durante *l'International workshop on Bam*, promosso dall'UNESCO, dall'ICOMOS e dall'organizzazione per la promozione del patrimonio culturale iraniano (ICHO), ho notato i segni di una infestazione di insetti nelle rovine della città. Gli archeologi iraniani che lavorano lì, hanno identificato gli insetti essere delle termiti e mi hanno spiegato che sono abbastanza comuni in Iran. Tuttavia erano pochi gli architetti restauratori o gli ingegneri con i quali ho parlato che erano informati di questo fatto.¹



Figura 2. Segno dei danni dovuti alle termiti in un muro della cittadella di Bam dove ci sono estesi depositi di palline fecali e tunnel dovuti agli insetti.

Benché non ci sia stato nessun interrogativo se le termiti avessero causato la distruzione della storica arce di Bam, la prova di una vasta aggressione nell'antico monumento in terra era inequivocabile (figura 2). Ciò fa nascere una domanda: *“Può l'infestazione aver contribuito a provocare la quantità straordinariamente grande di danni del terremoto?”*. Benché siano serviti soltanto 12 secondi al terremoto per ridurre questo maestoso complesso in mucchi informi di calcinacci, i semi della sua distruzione possono essere rintracciati nei molti secoli di continua

erosione, deperimento e ricostruzione che lì si sono avuti. Nel valutare il danneggiamento provocato da un sisma su un'architettura di terra, è spesso facile vedere nient'altro che non siano i guasti dovuti agli scuotimenti del movimento tellurico senza considerare qualsiasi altro motivo, come gli insetti, che possono aver ulteriormente indebolito le pareti di terra.

Molti ingegneri e sismologi hanno visto nell'intensità del terremoto di Bam il motivo sufficiente per spiegare gran parte di danni. Le registrazioni del sismografo mostrano che la componente verticale delle vibrazioni, nei pressi della cittadella, era più grande di quella orizzontale e ha raggiunto un livello quasi di 1 g. Con una tale intensità, i carichi sulle pareti in terra si sono ripetuti velocemente, dalla perdita di sovraccarico al raddoppio del loro peso. Poiché gli edifici sono progettati per portare ben oltre il peso proprio, in genere le forze sismiche verticali non sono considerate pericolose tanto quanto lo sono quelle laterali. Tuttavia, per le costruzioni in terra, quando il sovraccarico sulle pareti è ridotto o eliminato, le forze laterali possono essere molto più distruttive rispetto a se ci fosse soltanto un movimento orizzontale. In più, con forze verticali quasi di 1 g, le antiche mura sono state costrette a sostenere un peso quasi doppio ad ogni ciclo. Come sarà descritto oltre, lo stato di degrado dei nuclei interni di alcune di queste pareti può averle semplicemente rese incapaci di sostenere questo ulteriore peso momentaneo. Anche così, l'estensione dei crolli nella cittadella era più grande di quanto si sarebbe previsto. Quasi non c'era una via di mezzo. Praticamente ogni struttura ha avuto crolli parziali o totali in mucchi informi di calcinacci, mentre quelle parti che sono sopravvissute presentavano solo poche crepe.

La distruzione delle strutture in terra ed in muratura durante i grandi terremoti è spesso ritenuta come inevitabile. Quindi, lo studio delle cause delle devastazioni si ferma spesso all'analisi delle forze laterali rapportate alla capacità delle strutture in argilla non rinforzate senza considerare altri fattori, come le patologie preesistenti. Tuttavia un'anomalia importante nella distribuzione dei danni nella cittadella di Bam merita un'ulteriore approfondimento - *quelle strutture che non erano state mantenute o restaurate di recente sono sopravvissute con un livello di danni significativamente inferiore a quelle che erano state restaurate e perfino*

¹ Nella lingua Farsi, “Arg” sta per “Cittadella”.

rinforzate durante gli ultimi anni. (Figure 3, 11, 18 e 27).



Figura 3. Antiche strutture in terra non restaurate che includono il muro dello Shahr-bast in lontananza dopo il terremoto. Questi organismi erano solo leggermente danneggiati.

Nonostante la sua storia come luogo fortificato, tutte le pareti e le costruzioni nella cittadella vennero realizzate in terra cruda e, così, erano deboli e fragili. Tuttavia, pure se si riconosce questo fatto, la quantità delle distruzioni era comunque notevole. Ci sono stati pochi terremoti in passato per prepararci alle rovine viste sia nella cittadella sia città moderna ad essa adiacente. Difficilmente c'era una sola costruzione, antica o moderna che fosse, che non aveva avuto una distruzione totale. Anche molti degli edifici a struttura d'acciaio, costruiti durante l'ultima decina d'anni, sono finiti con l'averle le loro travi accartocciate sui mucchi delle macerie di pareti e pavimenti. Nel caso dell'antica cittadella, è rimasto ben poco delle costruzioni. Un mare di resti informi si estendeva fino a dove l'occhio poteva vedere (figure 4 e 13). Anche la Casa del Governatore e la Torre, poste a cavalcioni della collina, che formavano l'immagine simbolica principale del sito sono sparite, lasciando rovine che assomigliavano a rocce naturali affioranti, non toccate dalle mani d'uomo (figura 1). (Si veda la figura 29 per la posizione dei luoghi).

Cosa è accaduto per causare tutto il questo? È spiegato dalla sola intensità sismica? In un esauriente progetto di ricerca durato dieci anni promosso dal Getty Conservation Institute circa il comportamento sismico ed i sistemi di salvaguardia degli edifici storici realizzati con la tecnica dell'adobe, i ricercatori hanno concluso che *“spesso si crede che una struttura muraria*

*non rinforzata (quale quella in adobe o mattoni) sia sicura soltanto quando è completamente intatta, cioè se non presenta grosse crepature. L'analisi usuale suppone che, una volta che si sono sviluppate le lesioni, i materiali hanno perso la resistenza e la continuità - e quindi la costruzione è pericolosa. Tuttavia, un organismo a spesse pareti in mattoni crudi non è instabile neanche dopo che le crepe si siano sviluppate completamente e mantiene ancora le sue considerevoli caratteristiche di stabilità anche in questo stato”*².



Figura 4. Veduta delle rovine della cittadella di Bam.

Poiché al terremoto sono stati necessari poco più di 10 secondi per buttare a terra gran parte dell'arce di Bam, le importanti scoperte sulle strutture in adobe del progetto Getty chiaramente qui non possono essere applicate. Perché la cittadella è risultata essere così instabile? Le strutture ed i bastioni, con le loro massicce pareti di terra, non sarebbero dovute rimanere in piedi anche se pesantemente lesionate? Sono state semplicemente sopraffatte dalla superficie insolitamente grande per un terremoto di intensità 6,5, oppure è questa un'eccezione inquietante ai risultati del progetto Getty sulle risposte sismiche delle strutture in adobe? Ed in entrambi i casi, questo significa che il resto dei monumenti iraniani più celebrati, molti dei quali sono in gran parte costruiti in terra cruda, devono condividere lo stesso destino di Bam?

² L. TOLLES, E. KIMBRO, W. GINEL, *Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2002.

LA CITTADELLA E LA CITTÀ MURATA DI BAM

L' cittadella di Bam è stata riconosciuta essere il più grande complesso di terra del mondo. Diversamente da molti monumenti in argilla che sono rivestiti in mattoni o pietra, le strutture nella cittadella sono composte interamente di terra cruda. Questa costruzione era fatta in due tecniche distinte - muratura in mattoni crudi, *kheshht* in lingua Farsi e costruzioni in pisé o massone, ovvero "*chineh*"³ (figura 5).



Figura 5. Mura in *chineh* all'interno della cittadella di Bam che erano solo poco danneggiate dal terremoto.

Anche archi, volte e cupole vennero costruiti con mattoni essiccati al sole usando una tecnica costruttiva che evitava la necessità di fornire strutture intermedie. Entrambi i tipi potevano essere trovati in molti degli organismi, a volte a strati dove il lavoro successivo, compreso quello di restauro del ventesimo secolo, era stato fatto con la tecnica *kheshht*, mentre quello originario in *chineh* (figure 7 e 17).

I notiziari nel mondo hanno dato l'impressione che siano state decine di migliaia le persone morte nelle antiche costruzioni di fango. Invece, quasi tutti i 30.000 morti per il terremoto stavano in costruzioni che avevano meno di trenta anni di vita⁴. Per cinquanta anni, prima che avvenisse il

³ H. GUILLAUD, "Technical Mission to Bam and its Citadel", in *UNESCO-ICHO Joint Mission to Bam and Its Citadel*, ICHO, 2004, p. 37. *Chineh* è spesso tradotto in *chiney*.

⁴ Il dato ufficiale sui morti ammonta a 26.000, il

terremoto, la cittadella è stata un sito archeologico. Al momento del sisma, avvenuto alle 5:27 di mattina, solo tre persone stavano dormendo nel complesso della cittadella. Le due guardie che riposavano nella guardiola sono rimaste uccise, mentre l'intendente capo, che stava dormendo in ufficio, è stato salvato dalle macerie. Se il terremoto si fosse avuto durante il giorno ci sarebbero stati indubbiamente molti più morti.



Figura 6. Veduta del tardo periodo Qajar (diciannovesimo secolo) che mostra i soldati nella cittadella interna.

Per il fatto di essere un sito archeologico, molte delle strutture nella cittadella erano già in rovina prima del terremoto. La città murata era stata abbandonata gradualmente nel diciannovesimo secolo quando la gente è migrata verso le case situate nei dattereti vicini. Gradualmente, le case e le costruzioni pubbliche della cittadella sono cadute in rovina con un lento processo di erosione delle pareti di terra e delle cupole. Soltanto le strutture poste a cavallo della roccia hanno continuato ad essere usate come base militare fino allo sgombero per ordine dello Shah Reza alla fine della dinastia Qajar nel 1925 (figura 6).

A partire dal 1953, il sito è stato riconosciuto come luogo di notevole importanza storica per la nazione ed è iniziato un graduale processo di conservazione e di restauro. La maggior parte del lavoro è stato condotto negli ultimi 25 anni. Alcune delle rovine all'ombra della cittadella militare sono state completamente ricostruite. L'ultima fase in questo processo fu l'intonacatura delle superfici esterne con uno strato di intonaco di fango rinforzato con paglia. La maggior parte dei restauri moderni sembrano essere stati condotti

conteggio non ufficiale è arrivato a 43.000.

con mattoni essiccati, piuttosto che con la tecnica *chineh*.

I DANNI ALLA CITTADELLA DI BAM

Le osservazioni che seguiranno, circa i danni alla cittadella di Bam, sono state fatte dopo una serie di brevi visite svolte durante i sette giorni dei lavori dell'UNESCO-ICOMOS-ICHO nel mese di aprile del 2004. Le spiegazioni sulle cause delle rovine sono ipotesi basate su questo veloce sopralluogo. Queste, tuttavia, non potevano essere fatte durante una visita tanto breve, ma si spera che queste osservazioni possano contribuire a definire i confini per una ulteriore ricerca.



Figura 7. Veduta delle mura esterne crollate di una torre circolare. La costruzione con la tecnica *khesht* degli strati più esterni si sono separati da quelli più interni, che sono più simili ad una combinazione di periodi edificatori fatti con metodi differenti, e caduti giù.

A prima vista, il danneggiamento della cittadella è così vasto da sfidare qualsiasi tentativo di classificazione o di interpretazione. Le strutture sono state polverizzate, lasciando spesso solo cumuli di calcinacci alla base dei rari muri e dei pilastri restati in piedi. Pochi pareti sono restate nella loro altezza originaria e molte di quelle strutture che erano state completamente ricostruite sono tornate ad essere rovine, con molti meno resti rispetto allo stato nel quale erano cinquanta anni prima dei lavori di ripristino.

Dopo un'esplorazione del sito, sono iniziati ad emergere alcune realtà circa i danni: (1) le strutture circolari, come le torri dei bastioni, hanno risposto peggio delle lunghe pareti

rettilinee e delle strutture rettangolari (figura 1); (2) la Casa del Governatore e le altre strutture nella parte più alta della collina sono state distrutte in modo più esteso di quelle poste più basso (figura 1); (3) nella cittadella, quasi ogni struttura che è rimasta in piedi ha mostrato segni dell'inizio di crollo per collasso dall'interno verso l'esterno come provato dalla prevalenza delle crepe verticali (figure 7, 8, 16 e 17); (4) la maggior parte delle cupole e delle volte in mattoni di terra nel complesso, molte delle quali erano state ricostruite nel ventesimo secolo, erano crollate. La più grande cupola nell'insieme, quella della ghiacciaia, un edificio che era all'esterno della città murata e che era stata trasformata in sala conferenze, era crollata come se le fosse stato tirato un pugno.



Figura 8. Pilastro in una sezione parzialmente crollata del Caravanserraglio che mostra lo scoppio degli strati più esterni dovuti all'espansione interna del nucleo per le vibrazioni del terremoto.

Per ciò che riguarda esempi interessanti di strutture sopravvissute, poteva non aiutare ma si è notato: (5) la ricostruzione in mattoni di un'opera architettonica con volte interne sopra un'antica cisterna d'acqua nel centro del cortile delle scuderie (figure 9 e 10) è sopravvissuta senza traccia alcuna di crepe dovute al sisma. Nelle fotografie aeree prese nel 1974, la cisterna era scoperta e l'edificio attuale è una ricostruzione recente in laterizi. (6) I bastioni esterni, sui lati meridionale, orientale ed occidentale della città murata, hanno sofferto una grande quantità di

danni, con la perdita delle loro torri e la distruzione completa delle merlature sommitali e dei cammini di ronda, mentre i bastioni che guardano a nord stavano in condizioni migliori (figura 18). (7) Nell'edificio noto come "Piccolo Caravanserraglio", è collassato il secondo livello del lato che aveva una serie di contrafforti lungo la parete esterna, mentre il lato opposto, che non ne aveva, è rimasto quasi intatto (figura 19).



Figure 9 e 10. Stato precedente (novembre 2003) e successivo (aprile 2004) del cortile delle stalle dove si vede la struttura sopra alla cisterna che era stata ricostruita da poco in laterizi (foto del 2003 di James Conlon).

Forse le cose più affascinanti e significative sono: (8) quelle strutture che erano state mantenute, ripetutamente modificate ed ingrossate nel tempo (come gli edifici della cittadella interna) e quelle che erano state parzialmente o interamente rinforzate e restaurate alla fine del ventesimo secolo (come i bastioni e le costruzioni esterne della città più bassa) si sono comportate decisamente *peggio* rispetto alle più antiche - sia all'interno sia all'esterno della cittadella - che non erano state toccate.

Le strutture non alterate né restaurate, includevano la maggior parte di quelle nel sobborgo nord occidentale della città murata, noto col nome di "Konari", e quelle strutture di nordest, appena fuori dalla cittadella, che comprendono l'alta parete di "Shahrbast" (figure 3 e 20) situate vicino alla ghiacciaia, ed il "Khale Dokhtar" (figura 28) posto sulla riva opposta del fiume verso nord. Alcune di queste opere architettoniche mai restaurate, e sopravvissute al terremoto, sono di massa ed altezza considerevoli e, senza dubbio, sono state sottoposte ad un movimento tellurico con le stesse caratteristiche di quello che ha interessato il resto della cittadella, ma sono rimaste in piedi, ad eccezione di alcune parti minori che sono cadute giù. (Anche in queste poche parti collassate del Khale Dokhtar e di altri edifici, erano chiari i segni delle termiti) (figure 3, 11, 20 e 27).



Figura 11. Resti non restaurati del Konari nelle vicinanze della cittadella di Bam che è sopravvissuta al sisma con pochi danni.

La domanda che è nata spontanea dopo queste considerazioni è stata: *C'è un solo motivo che può spiegare tutto quanto osservato?* Durante il breve studio del luogo, due fatti indipendenti hanno contribuito alla mia valutazione di che cosa può aver causato tanti danni, in aggiunta alle vibrazioni sismiche verticali ad alta frequenza. Uno fu la scoperta di infestazioni di termiti durante la mia prima visita alla cittadella ed il fu l'aver vissuto l'esperienza nella più grande scossa di assestamento che si era sentita nel sito in molte settimane. La scossa, di magnitudo 3,8 della scala

Richter⁵, ha colpito il sito alle 7:10 del mattino del 20 aprile. Fortunatamente fu quello un giorno durante il quale un piccolo gruppo di noi aveva visitato il posto appena dopo l'alba. Stando in piedi nel mezzo della cittadella, la scossa è stata avvertita come una vibrazione verticale ad alta frequenza. Può essere descritta come se si fosse su di una piattaforma sopra ad un motore che si stava mettendo in moto, ma senza che ci fosse la combustione in tutti i cilindri. È durata solo per quattro o cinque secondi. Si è alzata una piccola quantità di polvere, ma non si è avuto nessun danno ulteriore.

Questa vibrazione era all'estremo opposto dello spettro del genere di terremoto che ha colpito, ad esempio, la Città del Messico nel 1985 o San Francisco nel 1989. Propagatesi direttamente da sotto la cittadella più che da una certa distanza, le onde hanno causato scuotimenti verticali e vibrazioni ad alta frequenza. Le registrazioni del terremoto con uno strumento posto a Bam nei pressi dell'arce, indicano forti vibrazioni verticali, comprese tra 15 e 20 hertz (cicli al secondo), una frequenza più alta rispetto a quelle orizzontali che erano di circa 10 hertz⁶. Da sola una forte scossa con alta frequenza verticale è capace di provocare danni estesi alle strutture portanti in terra ed alle murature, ma ci doveva essere una spiegazione plausibile per l'assurda constatazione che le parti non restaurate del complesso si sono comportate meglio rispetto a quelle rinforzate e restaurate. È qui che le termiti entrano in gioco.

Per prima cosa ho notato i danni dovuti agli insetti su uno dei bastioni al centro dell'organismo che è sopravvissuto intatto al terremoto, la "seconda parete del quartiere del Governatore". Su questo muro c'era una piccola zona che era stata aperta, lasciando esposto il nucleo interno. Su questa sezione recentemente venuta fuori erano visibili i fori dovuti agli insetti e la sua intera superficie era coperta da palline fecali.

Ho fatto questa osservazione con un grossolano esame visivo. Durante una passeggiata fuori dalla cittadella, selezionando a caso le

murature, ho cercato di vedere se i segni delle termiti potessero essere trovati su altre superfici spaccate. Ogni volta, i danni dovuti agli insetti erano chiari su ciascuna delle superfici interne esposte recentemente che erano state aperte dal terremoto. Questa riprova era costituita tanto dai tunnel nella parte di mura ancora in piedi quanto da una grande quantità di palline fecali sulla faccia fra le parti cadute e quelle in piedi. La stessa terra era estremamente friabile in queste zone. Era chiaro che le superfici fra molte delle parti cadute delle pareti e quelle ancora in piedi erano state il punto di contatto tra un lavoro più antico ed uno successivo. Questa aveva contenuto molti dei canali lasciati dalle termiti che hanno dato l'accesso a quei tunnel che conducono più in profondità in quello che è (solitamente) il materiale più vecchio che stava ancora in piedi.



Figura 12. Veduta di una sezione di muro crollata a causa del terremoto che mostra il legno consumato dalle termiti.

Le termiti vivono nella terra e si alimentano di materiale organico - cioè, lo stesso tipo di cellulosa che è frequentemente adoperata per rinforzare gli adobe e lo stucco in terra usato nella costruzione di terra. Quindi, la concentrazione delle gallerie scavate dalle termiti nella superficie di contatto tra costruzione più nuova e più vecchia sembrava avere indebolito la costruzione ed averla separata in differenti strati.

Se un'ulteriore ricerca dimostrasse che le termiti erano concentrate nella superficie di separazione tra zone di differenti periodi di costruzione, si potrebbe spiegare perché l'organismo successivo tendeva a cadere fuori dai nuclei più vecchi delle murature. Inoltre, dopo aver perforato la matrice della parete di terra, i

⁵ Dato IIEES, Iran, (http://www.iiees.ac.ir/English/bank/eng_recent.html).

⁶ Iran Strong Motion Network (ISMN), <http://www.bhrc.gov.ir>; M. ASHTIANY et al., *Preliminary observations on the Bam, Iran, Earthquake of Dec. 26, 2003*, EERI, aprile 2004.

tunnel delle termiti possono aver contribuito ad un ulteriore essiccamento della stessa terra, con una perdita proporzionata di coesione che da esso deriva⁷.

CROLLO DELLE STRUTTURE DALL'INTERNO VERSO L'ESTERNO

Le termiti sono soltanto una parte del più ampio problema della degradazione interna delle pareti, ma vedendo quanto sono dominanti tra le rovine i tunnel scavati dagli insetti mi ha allertato a considerare la possibilità che molti dei crolli nell'arce possono essere iniziati dai guasti che si avevano all'interno delle spesse masse murarie.

Come ho esplorato i resti di un complesso ancora impressionante in terra cruda, naturalmente, era difficile formulare una singola teoria che potesse spiegare la natura e l'estensione dei danni. Mi aspettavo qualcosa di simile ai danni che aveva descritto il Getty Seismic Adobe Project con i classici segni di debolezza strutturale: crepe a "X", fratture che si propagavano dalle parti superiori di porte e finestre, angoli caduti, pareti ruotate ecc. Tuttavia, nella cittadella, le crepe diagonali o a croce di sant'Andrea, solitamente comuni, erano relativamente rare. Sembrava come se le strutture fossero esplose dall'interno e si fossero sbriciolate a terra in tante piccole parti. I calcinacci erano dappertutto. Formavano un tappeto di materiale rotto che in alcuni punti era alto quasi quanto le rovine delle pareti ancora in piedi. Per esempio, La Grande Moschea completamente restaurata in precedenza, era completamente irriconoscibile dopo il sisma. Tra i mucchi di macerie, non c'era nulla di lasciato intatto nel quale a mala pena si potesse scorgere il profilo di ciò che era stato il suo ampio cortile (figura 13).

Il modello di collasso iniziò a delinarsi solo dopo aver avuto l'opportunità di unire tutte le prove che potevano essere viste nelle quattro brevi visite al sito durante un periodo di sei giorni. In primo luogo è diventato chiaro che le pareti non si sono spezzate in una serie di ampie porzioni che potevano oscillare avanti e dietro come ipotizzato

⁷ Le forze tra le molecole che fanno sì che l'argilla abbia la coesione dell'argilla, che le permette di essere un materiale da costruzione tanto utile, sono dipendenti dalla presenza di umidità.

dal progetto Getty per le costruzioni in adobe che si erano studiate.

Gli edifici della cittadella, invece, sembravano aver risposto alle vibrazioni ad alta frequenza come strutture con materiale interno incoeso. Lo studio della situazione, così, sembrava richiedere un cambio di disciplina - dall'ingegneria strutturale alla dinamica dei suoli.



Figura 13. Rovine della Grande Moschea. Il corpo nord occidentale della corte maggiore stava a destra nella foto.

Più esaminavamo il luogo e più questa spiegazione si faceva stringente. In un certo numero di posti c'era prova di una divaricazione laterale del genere che si penserebbe di trovare in riva ad un lago - ma in questo caso Bam è situata su di un terreno asciutto dove storicamente la superficie era stata aumentata con la creazione di terrazzi sui quali vennero costruiti gli edifici nella parte più bassa della collina. Una sezione del terrazzo che sosteneva una costruzione sopra le scuderie è completamente collassata, portandosi via la metà anteriore delle stanze (figura 14). Le torri circolari sembra che siano andate in crisi nella loro parte inferiore, invece di rompersi in quella superiore come ci si sarebbe aspettato. Le loro pareti apparentemente forti, sono state semplicemente spinte verso l'esterno alla base, e le sezioni superiori sono scivolate giù trasformandosi in macerie e lasciando come unica parte riconoscibile l'ornamentazione superiore.

Mentre provavo a dare un senso a tutto questo caos, ho ripensato (senza ricordarmi il nome del luogo) ad un paio di diapositive, viste anni prima, di una piramide troncata di pietra in America Centrale che aveva un nucleo centrale di terra. La prima immagine era quella di una piramide in pietre tozze all'apparenza indistruttibile. Nella

seconda immagine, presa dopo un terremoto, le pietre esterne della struttura stavano sparse a terra, lasciando soltanto un monticello più basso di terra su cui la struttura era appoggiata. Il terremoto aveva semplicemente buttato via, con una forza esplosiva, il rivestimento in pesanti massi di pietra mentre il nucleo centrale era stato assestato più in basso in un nuovo livello⁸. A quel tempo sembrò un tipo di danno inammissibile ma, dopo aver visto la stessa cosa nella cittadella, il parallelo era inequivocabile. Se il nucleo di terra in una parete perde la propria coesione, può spegnere sulle superfici esterne che lo contengono. È come il castello di sabbia di un bambino quando il fratello più grande ci mette un piede sopra.



Figura 14. Edifici sopra al cortile della stalle crollate per la divaricazione laterale dei muri e dei riempimenti di sostegno che stavano al di sotto.

La scossa di assestamento delle 7:10 di mattina del 20 aprile ha fornito una spiegazione concreta di ciò che era successo durante la scossa principale. Come hanno mostrato le registrazioni, il terremoto del 26 dicembre è aveva avuto vibrazioni ad alta frequenza, specialmente nella direzione verticale. Ciò che si percepì, era come se fosse il genere di vibrazioni che potevano provocare il cedimento del terreno - molto vicino a ciò che si fa con un vibratore nel calcestruzzo

⁸ Un esempio simile a quello ricordato può essere trovato in M. GONZÁLES CANO, *Restauración Arquitectónica De Estructuras Arqueológicas En Áreas Sísmicas: El Caso De Mixco Vieja*, Guatemala, 1976, figg. 7 e 8.

fresco ed umido per farlo fluire. L'esperienza ha allora cominciato a spiegare ciascuno dei fenomeni apparentemente differenti ed a volte contraddittori descritti precedentemente.

Ad esempio, nel caso (1) della prima osservazione, la particolare vulnerabilità delle torri circolari può essere spiegata dal fatto che contenevano una grosse quantità di riempimento incoerente alle loro basi. Una delle poche che siano sopravvissute sta alla destra della seconda porta (figura 15), e ha un pavimento in legname con la travi che penetrano nelle pareti, posto al di sotto delle finestre superiori ed una stanza, piuttosto che il materiale solido di riempimento, al di sotto. L'assenza di riempimento, unita all'efficacia del diaframma del pavimento, può essere stato d'aiuto per tenere tutto assieme.



Figura 15. Una delle poche torri sopravvissute ha una camera alla base come mostrato dalla finestra a pianterreno. Il piano con travi in legno incassate nella muratura, ed ora messe in luce dalla caduta dell'intonaco. Le mura e lo stucco venuti giù sembra che siano modifiche moderne della forma della torre nella maniera di Viollet-le-Duc. La superficie originale della torre che vi sta dietro è intatta.

Nel caso (2) del crollo delle strutture nella parte superiore della collina (figura 1), questo sembra essere stato causato in parte dal guasto delle murature di sostegno e del riempimento, mura che erano state costruite dalla parte più bassa della collina per allargare la piattaforma in cima a ciò che era stato uno stretto crinale della roccia. Per quanto riguardava il danno del tipo (3), nelle

pareti di molte delle costruzioni e dei bastioni era sistematico il divaricamento laterale del materiale nei nuclei delle pareti, con gli adobe esterni che erano spinti fuori come mostrato dalla maggior frequenza di lesioni verticali in confronto a quelle diagonali (figure 16 e 17).

Nel caso (4) del crollo delle cupole nel complesso, molte possono aver semplicemente seguito a terra le pareti di sostegno che erano scoppiate. Le altre che sono crollate verso l'interno, come quella della ghiacciaia, hanno patito l'effetto delle intense vibrazioni verticali sulla soffice muratura in adobe. Il raddoppio momentaneo del peso delle strutture cupolate era probabilmente superiore a quanto potevano reggere. Nel caso della ghiacciaia, le fotografie aeree del 1974 dimostrano che la parte di cupola che è crollata era stata ricostruita successivamente, perché mancava in quelle immagini⁹.



Figura 16. Torre circolare crollata sui bastioni che mostra i segni dello scoppio per il collasso degli strati interni.

Al contrario delle pareti scoppiate (5), la struttura in muratura sopra la cisterna nel centro del cortile delle scuderie ha lavorato molto meglio nonostante non fosse rinforzata. Più probabilmente, in questo caso le pareti erano quelle di una costruzione in mattoni uniformemente solidi ed ammorsati, senza nucleo incoerente. Il fatto che era stata costruita con mattoni cotti avrebbe contribuito a renderla resistente, ma quello che può essere persino più importante era il fatto che le pareti erano di un

materiale completamente coeso, di densità uniforme e senza vuoti o stacchi verticali.



Figura 17. Pilastro massiccio composto da *khesht* e *chineh* di differenti tipi e periodi che sono stati separati l'uno dall'altro durante il sisma.



Figura 18. Bastioni settentrionali che erano significativamente meno danneggiati dal terremoto rispetto alle altre mura della città. Si noti che la merlatura è ancora intatta in questo unico braccio, il solo che venne osservato essere in decadenza.

Per quanto riguarda il comportamento migliore dei bastioni settentrionali in confronto con le altre parti delle mura della cittadella (6), le condizioni del terreno al di sotto della superficie, lungo la rive del fiume dove sono localizzati, può aver fatto la differenza perché i terreni alluvionali possono essere serviti ad attenuare le vibrazioni, più che ad accentuarle, come accade spesso nel caso di terremoti dove l'epicentro è abbastanza lontano. Un'ulteriore ricerca è necessaria per determinare se questa possa essere una spiegazione. Inoltre, come per il vicino Konari, le pareti non erano state alterate o restaurate lungo le loro parti sommatali come era accaduto alle altre mura attorno all'arce. I passaggi e le merlature di restauro più recente

⁹ Foto di James Blair per il National Geographic Magazine, 1974. Su cortesia della National Geographic Society.

sono stati quelli che hanno sofferto maggiormente, probabilmente a causa del peso aggiunto e della differenza di densità e di risposta alle vibrazioni tra il materiale più vecchio e più nuovo.

La penultima delle cose osservate (7) è il Caravanserraglio, dove sono crollate le stanze al secondo livello del lato occidentale retto da contrafforti, mentre il sisma ha lasciato ampiamente intatto il fianco opposto privo di speroni. Gli stessi contrafforti erano ugualmente danneggiati, con uno collassato per lo schiacciamento della sua base.



Figura 19. Le rovine del Caravanserraglio mostrano che le camere cupolate al secondo piano dietro ai contrafforti erano venute giù, non quelle sull'altro lato. Non ci sono speroni nella parte esterna del lato opposto. La base del quinto contrafforte si è schiacciata.

La storia di questo complesso è diventata persino più interessante quando ho appreso da vecchie fotografie che il lato crollato era stato quasi completamente ricostruito soltanto pochi anni prima, mentre la parte ancora in piedi era quella meglio sopravvissuta al tempo. Nelle fotografie aeree del caravanserraglio scattate nel 1974¹⁰, le cupole sul lato orientale erano quasi totalmente intatte, mentre erano collassate su quello ad ovest. A quel tempo, i contrafforti occidentali si elevavano appena al di sopra del livello del primo piano. Fino al 1996, lo stato di entrambi i lati era simile a quello del 1974, con l'eccezione che le piccole buche nelle cupole nella parte orientale erano state completamente riparate¹¹.

¹⁰ Ibidem.

¹¹ Le foto aeree, datate 1996, stanno in *The Bam Citadel, a Comprehensive Report*, ICHO, 2004, p. 26.

Le foto mostrano che, al tempo del terremoto, il ripristino del braccio ovest del Caravanserraglio era stato ultimato¹². Le cupole erano state ricostruite e sia le mura sia i contrafforti erano stati alzati fino al tetto. Ironia della sorte, durante il terremoto è stato questo lato costruito di recente e totalmente sostenuto da contrafforti a cadere. È stato semplicemente un esempio ulteriore dell'individuare che le zone con rinforzi maggiori, con ricostruzioni o manutenzioni continue erano quelle più pesantemente danneggiate.

Tutte queste prove messe insieme sembrano indicare che quelle pareti di terra composte da materiali con differenti densità e differenti caratteristiche edilizie, le quali derivano da fasi differenti di costruzione, di restauro e di ricostruzione, sono risultate essere più vulnerabili alle vibrazioni sismiche. Fino a quando si pensa che le costruzioni in terra cruda hanno una composizione uniforme, è difficile comprendere perché le pareti rinforzate e restaurate sono più difettose di quelle non restaurate e corrose naturalmente. Tuttavia, le fasi costruttive che si sono succedute nella cittadella durante i secoli hanno prodotto mura la cui composizione era molto differente da quelle di più recente realizzazione.

Queste murature non sono più costituite da strati orizzontali di terra o di mattoni seccati al sole e quelle che lo erano sembravano le meno danneggiate. Invece, attraverso periodi di erosione, di riparazione e di riconfigurazione, molte delle mura si erano trasformate in una serie di strati verticali, che stavano insieme dritti come i libri su una mensola senza reggilibri. Ognuno dei diversi stati aveva differente densità e coesione quale risultato di differenti periodi, diverse caratteristiche costruttive e degrado. Per esempio, il *khesht* moderno (mura in adobe) è frequentemente incassato nel più antico *chineh* (pisé o massone) (figura 17), ed il materiale organico utilizzato per rinforzo era decomposto o consumato dagli insetti, lasciando cavità e terra friabile (figura 12).

È necessaria un'ulteriore ricerca su questo tema, ma è stato soltanto dopo che ho iniziato ad interpretare quello che avevo visto a Bam, come il

La stessa immagine venne adoperata sul manifesto del workshop.

¹² Come mostrato in UNESCO-ICHO, *Joint Mission to Bam and Its Citadel*, ICHO 2004, p. 80.

comportamento fosse quello di strisce di terra staccate verticalmente e disgregate più che quello di strati di terra cruda allettati orizzontalmente del tipo analizzato dal progetto Getty, che è cominciata ad emergere una possibile spiegazione della natura e dell'estensione dei danni dovuti al sisma. Sulla base della ricerca del Getty, ci si potrebbe normalmente aspettare che le spesse murature dei bastioni e della cittadella principale nella cittadella, realizzate in *khesht* o *chineh*, siano le più resistenti piuttosto che le più vulnerabili come hanno mostrato di essere. Se le parti interne nascoste delle pareti sono composte da una serie di sezioni verticali e, in particolare, la parte centrale è piena di vuoti, fessure e riempimento secco e sciolto che manca di coesione con gli strati più esterni, le vibrazioni ad alta frequenza di questo terremoto potevano causare che il riempimento delle mura più vecchio e degradato si assestasse. Questo, quindi, poteva esercitare una forza orizzontale dall'interno verso l'esterno sugli strati più superficiali alla base delle strutture, causando il collasso dei paramenti non per rotazione, ma facendoli sbriciolare sul posto.



Figura 20. L'interno non restaurato della parete dello "Shahrbast" mostra l'altezza di tre piani che è sopravvissuta al sisma. Si noti la parte più antica con quelle più recenti costruite attorno. È un buon esempio dell'inizio del danno all'interfaccia di opere realizzate in tipi ed epoche differenti, ovvero come un piccolo crollo abbia scoperto la superficie di contatto tra le due. Si notino i detriti a terra.

Inoltre, le variazioni di densità e coesione negli strati di terra in una parete, derivante specialmente dai periodi differenti di erosione, di ricostruzione e dai cambio dalla tecnica *chineh* alla *khesht*, molto probabilmente può causare che le vibrazioni

di un sisma - specialmente quelle nella gamma di alta frequenza sperimentata a Bam - rimbalzano fuori dagli strati di densità differenti, causando l'inizio dei danni dall'intensificazione locale delle vibrazioni. La prova di un tale tipo di comportamento può essere vista in figura 20 dove la parete ha cominciato a rompersi all'interfaccia fra due campagne costruttive con la tecnica *khesht*, che sembrano essere entrambe precedenti al ventesimo secolo. È un argomento che necessita una ricerca ulteriore, specifica per le costruzioni in terra cruda, per stabilire se questo fenomeno può essere spiegato in questo modo, ma potrebbe avere una rilevanza significativa per la protezione di altri monumenti di terra che sono stati alterati durante i secoli. È meno probabile che le strutture in adobe in Nord e Sud America, oggetto principale della ricerca del Getty Conservation Institute, siano soggette a questo fenomeno perché sono solitamente composte di strati uniformi di mattoni in terra cruda.



Figura 21. La moschea dell'Imam a Isfahan, aprile 2004. Il nucleo interno di molte delle sue mura e quelli degli altri grandi monumenti della città sono composti da argilla cruda.

Ecco perché l'osservazione dell'ampia infestazione di termiti può tornare ad essere importante. Non solo sembra che l'antica costruzione nell'arco fosse perforata dagli insetti, ma che le termiti erano riuscite a dividere i diversi segmenti verticali l'uno dall'altro ed a ridurre la coesione del nucleo interno delle pareti. In un viaggio ad Isfahan dopo la missione a Bam, durante l'incontro con i restauratori dei vari dei monumenti storici in quella splendida città (figura 21), ho appreso che le termiti sono state trovate

anche lì durante i recenti restauri. Mi hanno spiegato che danni causati dalle termiti sono stati trattati consolidando i nuclei di terra di alcune delle pareti.

La contrario di quanto fatto a Isfahan, qualcuno dei lavori di restauro del ventesimo secolo visto a Bam può aver aggravato il problema. Lo stucco d'argilla dato prima del terremoto, era rinforzato con una notevole quantità di paglia - un materiale che è sembrato essere consumato dalle termiti in molte zone. Al contrario, i rinforzi più antichi fatti con la corteccia sfibrata dalla palma da dattero sono sembrati essere più resistenti. Forse la popolazione di termiti è aumentata involontariamente negli ultimi tempi, semplicemente a causa di questo "banchetto" di stucco rinforzato con paglia non resistente alla loro aggressione¹³.

IL RISCHIO PER I MONUMENTI DI TERRA

Quello che molta gente non capisce è che, in qualsiasi nazione, i nuovi edifici costruiti con materiali moderni non sono progettati per resistere senza danni ai terremoti più forti. Per le strutture di terra, le procedure di analisi elastica danno pochi suggerimenti su come tali costruzioni si comporteranno in fase post-elastica. Citando ancora il rapporto del Getty Seismic Adobe Project: *'il solo uso di un metodo elastico può essere giustificato soltanto quando c'è un rapporto conosciuto fra il livello in cui una struttura inizia a cedere e quello in cui crolla. Nel caso spesse mura in adobe non vi è un chiaro rapporto tra i due momenti. [...] Benché un'analisi basata sulla resistenza può prevedere esattamente quando le crepe si manifesteranno, non può fornire la comprensione delle prestazioni post-elastiche delle costruzioni in adobe'*.

¹³ Lo statunitense Ed Crocker raccomanda che *"i materiali fibrosi vanno impregnati in borati. Questo, infatti, deve essere stato storicamente fatto perché sono comuni nei depositi nel deserto. I borati distruggono gli enzimi della digestione delle termiti e di altre creature infestanti. Sono anche poco costosi e meravigliosamente efficienti sia per gli insetti, sia per le muffe radicali"*.

Questo rapporto fa una distinzione molto importante fra ciò che è descritto come metodo basato sulla "resistenza" e quello impostato sulla "stabilità" al miglioramento sismico. Il rapporto riconosce che l'abituale *"metodo ingegneristico convenzionale all'efficienza sismica"* è quello basato sulla resistenza ovvero sull'aumento della resistenza elastica del sistema strutturale dell'edificio. Il rapporto continua con lo spiegare che per le costruzioni in adobe è più adatto un metodo basato sulla *"stabilità"*. L'obiettivo nel progetto basato sulla stabilità è quello di assicurare che l'edificio rimanga in piedi a lungo dopo che è stato superato il limite elastico del suo sistema strutturale. Poiché la capacità elastica dei mattoni in terra cruda è bassa, l'attenuazione del rischio sismico delle strutture in adobe dipende dal mantenere la sua stabilità a lungo dopo che ha cominciato a fendersi.

Il Getty Report quindi va avanti nel descrivere le potenzialità che hanno le costruzioni in mattoni crudi per la *"duttilità strutturale"* persino se difettano in *"duttilità materiale"*. La duttilità strutturale può venire dalla stabilità relativa che persino le pareti crepate in adobe possono avere a condizione che le sezioni della parete spaccata rimangano l'una sull'altra. Questa è un'importante scoperta che può essere usata come base efficace per la progettazione di molte strutture in mattoni di terra cruda che diversamente sarebbero condannate. Tuttavia, nel riesame dei fatti, quello che il terremoto di Bam ha dimostrato è che, a dispetto dello spessore delle antiche pareti di terra nella cittadella, la stabilità è stata persa rapidamente dopo che il limite elastico venne oltrepassato. Il terremoto del 26 dicembre 2003 è durato soltanto 12 secondi, così, il crollo della cittadella è stato quasi repentino. Non dovette esserci duttilità strutturale nelle fabbriche della cittadella.

Chi poteva mai sapere che ci fosse un tal rischio? Gli interni delle pareti con i loro vuoti ed i loro materiali degradati erano nascosti. Un ingegnere, facendo un'analisi strutturale, l'avrebbe normalmente basata sulle misure dello spessore delle pareti senza prevedere l'effetto dei loro nuclei interni fratturati ed indeboliti. È ora necessario fare delle ricerche per trovare la maniera di esaminare queste pareti nel modo meno invasivo possibile e, quindi, trattare i problemi che possono essere scoperti e che condurrebbero alla

loro veloce perdita di coesione strutturale una volta sottoposto alle vibrazioni sismiche.

PERCHÉ LA CITTADILLA DI BAM È RISULTATA ESSERE COSÌ VULNERABILE?

Se per i cambiamenti occorsi alle mura della cittadilla durante i secoli e durante i recenti ripristini può essere provato che hanno avuto un ruolo importante della causa dei crolli così diffusi, ci sono un paio domande ancora che devono essere poste. La prima è: *“Poiché la cittadilla è situata in una regione notoriamente sismica, perché la sua costruzione non è stata capace di reagire alla minaccia?”*. Prima di rispondere, ci si deve chiedere anche se la costruzione originale, prima delle alterazioni ed i danni avvenuti col tempo, fosse o meno progettata per essere più resistente. Sono entrambe domande particolarmente difficili perché l’oggetto d’indagine è una costruzione arcaica che ha adoperato un numero limitato di materiali - vale a dire terra cruda e qualche ceppo scortecciato di legno - niente che dia una maggiore opportunità di modifica per resistere a grandi forze sismiche.

La resistenza al terremoto non è un elemento assoluto. Si devono modificare le proprie attese per riflettere su cosa potrebbe essere realizzato in una cultura in cui erano disponibili solo la terra cruda ed una quantità limitata di legna. Al giorno d’oggi, le aspettative di sicurezza sismica sono state formate dall’esistenza dell’acciaio, sia come solo materiale da costruzione, sia incluso nel calcestruzzo, o anche quando usato per rinforzare le connessioni fra elementi in legno. I frequenti danni catastrofici delle costruzioni moderne in acciaio e calcestruzzo, come abbiamo visto a Bam nel caso dell’acciaio, ed in altri recenti terremoti nel caso del calcestruzzo armato, la presenza di acciaio come materiale da costruzione ha alimentato delle aspettative, rendendo ora più difficile riconoscere le soluzioni pre-moderne di diminuzione del pericolo sismico.

La costruzione tradizionale - specialmente in un ambiente desertico - non ha avuto il lusso dell’abbondanza di legname, ed ancor meno accesso all’acciaio. Ciò che poteva essere fatto era il prodotto di prove ed errori che conducono allo sviluppo delle conoscenze edilizie durante i secoli. Quindi, fuori da tutte le influenze sull’evoluzione delle pratiche costruttive, non è

facile individuare quelle che sono specificamente risposte ai sismi. Gli stessi terremoti non sempre sono gli stessi. Quello di Bam del 26 dicembre era soltanto di magnitudo 6,5 ma era poco profondo e con l’epicentro situato quasi direttamente al di sotto della cittadilla murata. La probabilità di essere immediatamente sopra l’epicentro è decisamente inferiore a quella di esservi vicino. Quindi, è assolutamente possibile che la cittadilla non era stata mai sottoposta a vibrazione verticali di frequenza così alta durante i 2000 anni precedenti¹⁴.

Il rischio sismico più spesso analizzato è fatto computando le forze statiche equivalenti sulle strutture ma, in questo caso, la frequenza delle vibrazioni può essere stata particolarmente significativa. Anche una piccola differenza nella posizione dell’epicentro avrebbe portato la terra che tremava al di sotto della cittadilla dalle vibrazioni verticali ad alta frequenza a vibrazioni di frequenza più bassa con una minore componente verticale. Come questo possa aver riguardato la sequenza di danni nella cittadilla è difficile da determinare ma è importante da conoscere perché può gettare luce circa il grado di vulnerabilità di altri monumenti. Se le alte frequenze sono in gran parte responsabili dei danni, le probabilità che si verificano al di sotto di altri monumenti è minore rispetto a quella che si abbia un sisma tale da avere un’ampia gamma di frequenze capaci di causare danni simili.

UN METODO DI CONOSCENZA BASATO SUI PRECEDENTI STORICI

Per riconoscere i miglioramenti sismici pre-moderni, si deve accettare che la gente abbia risposto ai terremoti nel passato, proprio come fa oggi, pensando a cosa poteva fare per ridurre i rischi. Che si avesse o meno successo, non cambia il fatto che nei secoli passati le persone non sempre hanno accettato semplicemente il pericolo. In Italia, in Turchia ed in altre zone a rischio sismico, dove i terremoti sono stati relativamente frequenti, questo fatto è vivo nella memoria di generazione in generazione, e si è sviluppata

¹⁴ Per un ulteriore discorso della variabilità storica dei terremoti in un sito dato si veda P. PIEROTTI, *Manuale di sismografia storica*, Edizioni Plus, Pisa 2003.

quella che alcuni studiosi hanno definito come la “cultura dei terremoti”¹⁵.

Ad esempio, nel mondo ci sono molti tipi di costruzioni in pietra, ma certe forme, come quelle fatte con bozze di pietra, sono risultate essere meno resistenti rispetto a se fossero blocchi ben apparecchiati e posti in ricorsi orizzontali. Tuttavia in molti paesi le bozze sono tutto ciò che è disponibile o acquistabile. Nelle zone della Turchia e nel Kashmir, sia le costruzioni in mattoni sia quelle fatte con pezzame di pietra, sono state spesso modificate ponendo dei radicamenti nella parete, un po' come se fosse stata messa una scaletta di legno posta orizzontalmente nella parete parzialmente completata, al di sopra ed al di sotto delle finestre ed in corrispondenza dei pavimenti, mentre procedeva la costruzione della muratura. I radicamenti sono stati posti nella parete non per lavorare come travi ma per resistere alla propagazione delle crepe ed al divaricamento laterale delle mura¹⁶. Nel Kashmir, la muratura con travi intarsiate era spesso fatta con bozze di piccole pietre o con mattoni posti in uno spesso letto di malta d'argilla con il legno che teneva unite le pareti. A Srinagar, dopo il sisma del 1885, un viaggiatore inglese osservava:

*“Parte del Palazzo ed altre imponenti costruzioni crollarono [... ma] è stato notevole come sono cadute alcune case [...]. La costruzione generale della città di Srinagar è adatta ad una regione sismica; il legno è usato liberamente e giunto bene; l'argilla è impiegata al posto della malta e dà ai mattoni un'unione piuttosto elastica [...] l'intera casa alta anche tre o quattro piani ondeggiava lì dove costruzioni molto più rigide si sarebbero rotte e sarebbero cadute.”*¹⁷

¹⁵ F. FERRIGNI, “Local Seismic Culture”, in *Ancient Buildings and Earthquakes*, European University Centre and Council of Europe, 1997. Vedi anche P. PIEROTTI, *Op. cit.*

¹⁶ Per ulteriori informazioni, si veda R. LANGENBACH, *Bricks, Mortar and Earthquakes*, “APT Bulletin”, 31:3 - 4, 1989, disponibile anche all'indirizzo internet www.conservationtech.com.

¹⁷ A. NEVE, *Thirty Years in Kashmir*, Londra 1913, p. 38. È interessante notare che questa costruzione storica Kashmiri ha successivamente fornito un modello influente per lo sviluppo moderno di un analogo sistema di rinforzo per le costruzioni rurali in terra nel

Sarebbero in pochi coloro che oggi penserebbero a “l'argilla impiegata al posto della malta [di calce]”. Per anni, la saggezza popolare voleva che neanche la malta di calce fosse abbastanza forte. Deve essere ora cemento. Ciò è riflesso in molte normative edilizie nazionali. Significativamente, l'affermazione del diciannovesimo secolo evidenzia le virtù della flessibilità contro la resistenza.

Assicurare la stabilità durante i terremoti delle strutture di terra cruda come quelle di Bam è chiaramente più difficile senza il legname disponibile in Turchia, nel Kashmir ed in altre regioni. Le generose sezioni dell'Iran settentrionale condividono la tradizione delle costruzioni in legno trovata in Turchia, ma nei deserti asciutti dell'Iran meridionale, la gente non ha il lusso di usare grandi quantità di legno ma, a volta, i rami delle palme da datteri sono stati bene alloggiati nelle pareti, così come per sostenere i pavimenti (figura 22).



Figura 22. La sezione crollata della porta principale mostra l'alloggio di legname di rinforzo in pareti realizzate con la tecnica *khesht*.

Cominciare a capire che cosa può essere stato fatto nel passato con le costruzioni in terra come risposta ai terremoti aiuta a guardare non soltanto che cosa è caduto, ma ciò che è rimasto in piedi. Per questo ci rivolgiamo ai muri in *chineh* realizzati attorno ai dattereti in tutta la città. Le

resto dell'India e successivamente in Nepal, che ora è incorporato nell'Indian and Nepali National Building Codes. Vedi anche R. LANGENBACH, *Op. cit.* per un'intervista a Anand Arya dell'università indiana di Roorkee ed a Richard Sharpe della Nuova Zelanda.

pareti in massoni dei giardini sono generalmente alti due metri e mezzo, spessi alla base dai 50 ai 100 centimetri e con una sezione ridotta a soli pochi centimetri in cima. La maggior parte dei dattereti a Bam ed a Barakat sono circondati da muri di questo tipo. Il *chineh* delle costruzioni iraniane trovato a Bam è caratterizzato da una serie di fasce di argilla alte circa 50 centimetri, ognuna delle quali rappresenta lo “strato” nel processo edificatorio. Questi strati sono stati costruiti lungo le pareti da un’estremità all’altra e, quindi, regolarizzati e livellati nella parte superiore prima di procedere allo strato successivo (figure 3, 5, 23 e 24).



Figura 23. I muri dei giardini in *chineh*, probabilmente di realizzazione recente, a Baravat (vicino Bam). Mostrano le crepe che comunemente esistono su questo tipo di muratura e come la costruzione a strati aiuti ad assicurare stabilità permettendo alle sezioni fesse d’argilla di comportarsi come grossi blocchi di muratura.

Questo differisce dalle costruzioni in massone dell’Europa del Nord che mancavano delle interfacce orizzontali chiaramente definite fra gli strati. Può esserci un certo numero di ragioni per questo particolare della costruzione in *chineh*, come la dispersione delle acque, ma c’è anche un motivo strutturale, ovvero può essere che sia servito ad arrestare la propagazione delle crepe verticali in una muratura, problema particolarmente serio in un clima asciutto. Poiché sono costruiti soltanto con fango secco non pressato, i muri cominciano la loro vita con molte crepe verticali e molte fessure dovute all’inizio del processo di essiccamento. Infatti il Getty

Seismic Adobe Project afferma: “*esiste quasi sempre un numero notevole di crepe nelle costruzioni storiche realizzate in mattoni crudi come risultato di un’attività sismica passata, del declino delle pareti o dell’assettamento delle fondazioni. Le pareti incrinare sono una caratteristica tipica di questi edifici*”¹⁸.

Nel corso della storia, i costruttori iraniani si sarebbero sforzati di evitare il più possibile gli effetti strutturali negativi di questo inevitabile fendere delle pareti. Ciò sarebbe stato fatto in generale per la stabilità, non solo a causa dei rischi sismici, ma gli ultimi possono aver contribuito allo sviluppo del sistema adottato, mentre la scarsità locale delle risorse avrebbe limitato i costruttori all’uso di terra cruda. I giunti orizzontali nelle pareti in *chineh*, quindi, possono essere il risultato di questi sforzi nel controllo degli effetti della propagazione delle fessure interrompendone la propagazione attraverso quello che altrimenti sarebbe stato un materiale uniforme.



Figura 24. La veduta esterna delle mura meridionali del cortile delle stalle mostra come la stratificazione dei massoni ha interrotto la propagazione delle fessure e del collasso di settori di muratura, aiutando a mantenere la stabilità della parte poco definita della parete in alto.

Molte pareti realizzate con la tecnica *chineh*, tanto antiche quanto moderne, sono risultate essere notevolmente resistenti al terremoto del 2003. Come ci si avvicinava all’arce, passando tra le zone di danni che aumentano gradualmente, si vedevano queste pareti rimaste in piedi persino quando le case vicine e le costruzioni a più piani

¹⁸ L. TOLLES, E. KIMBRO, W. GINEL, *Op. cit.*, p. 80.

con struttura in acciaio erano crollate. Vicino alla cittadella murata, il danneggiamento delle mura dei giardini era chiaramente maggiore ma, ciò nonostante, ampie sezioni sono rimaste in piedi sia se parallele sia se perpendicolari al senso delle onde sismiche. Inoltre, molte delle mura non mantenute e non restaurate sopra citate che sono uscite ampiamente intatte dal terremoto erano costruite in *chineh* (figure 3, 5, 11, 18, 20, 24 e 27). Sia quelle sia le antiche mura in *khesht* sono sopravvissute integre, con alcune eccezioni minori mentre, come detto precedentemente, è stato in quelle pareti della cittadella in massoni rinforzati successivamente con adobe che il danno osservato era maggiore (figure 7, 16 e 17).



Figura 25. La lunga parete del Pecile a Villa Adriana vicino Roma mostra le fasce di laterizi che erano stese in una muratura realizzata in cemento. Le fessure sono il risultato di un'asportazione successiva per il riuso dei laterizi.

Quando si esamina lo sviluppo storico della tecnica *chineh* con i suoi collegamenti controllati, può essere notevole rivolgersi anche alle pratiche costruttive evolute nell'antica Roma. A Roma, i resti archeologici sopravvissuti sono pieni di mura in cemento pozzolanico. Questi grandi frammenti di materiale hanno provato una durezza notevole, ma c'è una caratteristica che emerge da tutte queste murature. Ogni metro e mezzo circa c'era una fascia orizzontale in laterizi estesa per tutto lo spessore delle pareti. I primi mattoni romani erano essenzialmente manufatti piani e sottili. Lo scopo iniziale di queste fasce non è conosciuto da nessuna fonte letteraria e gli archeologi danno spesso differenti interpretazioni, ma è chiaro che funzionavano come "dispositivi per l'arresto delle fratture". Interrompendo la matrice uniforme del cemento con l'inserimento

di uno strato dei mattoni e malta le crepe, che inevitabilmente si formavano nello strato cementizio, venivano arrestate e si dava una maggiore stabilità alle pareti (Figura 25).

Nella cittadella di Bam, alcune pareti in *chineh* hanno fasce dei mattoni crudi fra gli strati alla base delle murature. In una delle pareti orientali dei bastioni, sembra esserci una fila di adobe fra ciascuno dei molti strati. Questi possono aver avuto una funzione simile a quella dei mattoni romani anche se non erano laterizi. Al workshop dell'UNESCO-ICOMOS-ICHO, un delegato britannico, Archibald Walls, ha segnalato che ci sono diversi siti in Iran che hanno fasce orizzontali di mattoni posti nelle pareti di *chineh*. Questi, ed altri esempi iraniani, meritano di essere esplorati per acquisire informazioni ulteriori sull'efficacia delle bande orizzontali in mattoni poste nelle pareti di terra, ma la lezione da imparare è che ciò che a volte pensiamo essere soltanto particolari architettonici, in origine, possono essere nati per rispondere a necessità strutturali più pratiche. Questa asserzione è rafforzata dal seguente esempio a Costantinopoli: durante il terremoto di Koçaeli nel 1999, l'unica parte delle antiche mura della città che è crollata è stata una torre completamente ricostruita con muri nuovi soltanto pochi anni prima (figura 27).

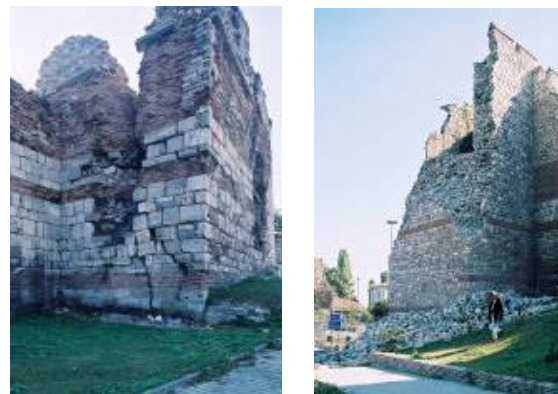


Figura 26. A sinistra: porzione sopravvissuta delle mura originarie di Istanbul. Le crepe e la sezione spezzata sono precedenti al terremoto del 1999. Figura 27. A destra: torre ricostruita che è crollata durante il terremoto del 1999. Le fasce in mattoni rossi sulla parete erano un rivestimento piuttosto che fasce piene.

Il torrione successivo (figura 26) - malgrado il suo pesante stato di rovina e decadimento - era rimasto in piedi. La torre antica sopravvissuta

aveva fasce orizzontali in mattoni estese per tutto il nucleo in scaglie di pietra della parete. I restauratori di quella nuova avevano disposto soltanto fasce di mattoni sulla superficie della parete a mo' di impiallacciatura, costruendo la torre con mura spesse in bozze e pietra da taglio. La lezione che può essere appresa da questo evento è che negli edifici antichi il progetto strutturale e le pratiche costruttive fanno parte di un sistema integrato, non separati od irrelazionati. Le parti nascoste delle mura antiche sono tanto importanti quanto quelle visibili in superficie. Illustrativo di questo fatto, i costruttori pre-moderni capivano l'importanza del semplice concetto dei "dispositivi per l'arresto delle fratture", perché era uno dei pochi mezzi che avevano a loro disposizione per migliorare la stabilità nella costruzioni antiche in ambienti desertici.

CONCLUSIONE

Ricapitolando, sembra che il crollo dell'arce di Bam sia in gran parte il risultato del collasso interno delle pareti, derivato dalla rovinosa perdita di coesione della terra del loro nucleo. L'impressione iniziale è stata che i lavori di restauro del ventesimo secolo si siano comportati peggio rispetto a quelli antichi, ma non sempre i primi hanno fallito di per se stessi ma per la combinazione di antico e nuovo. Infatti, pare che i lavori più recenti siano spesso venuti meno per il collasso interno delle opere più vecchie sulle quali furono fondati.

Nonostante non spieghino tutto quello che è accaduto, i danni dovuti alle termiti sono emblematici di un fenomeno più grande circa il ruolo del tempo e dei cambiamenti nella scienza e nell'arte di conservare gli edifici. Soltanto dopo avere notato questa infestazione che ho cominciato a mettere a fuoco gli altri aspetti del degrado interno della muratura - la siccità e la mancanza di coesione dei nuclei di terra, il deperimento ed il consumo dei legni e delle fibre di rinforzo, l'esistenza di vuoti grandi e piccoli fra gli strati verticali nelle pareti, e la prova che le spesse pareti di terra erano scoppiate prima di venire giù. Quando tutti questi elementi sono uniti alle caratteristiche particolari del terremoto, con le sue vibrazioni verticali ad alta frequenza, i crolli delle pareti per collasso dall'interno verso l'esterno sembra essere una spiegazione plausibile per la maggior parte delle cose che sono successe a Bam.

Qualora, dopo ulteriori ricerche, le spiegazioni sulle cause dei crolli nella cittadella qui descritte verranno convalidate, è importante allora chiedersi: *quali sono le implicazioni di questi risultati, non soltanto per i futuri lavori di restauro nella cittadella ma anche per gli altri siti culturali dell'Iran, del Medio Oriente e dell'Africa del Nord?* Se, dopo un programma di restauri di 50 anni, un monumento di terra apparentemente robusto può essere buttato giù in 12 secondi, dobbiamo capire perché il tipo di stabilità post-elastica descritta dalla ricerca del Getty Conservation Institute non si è verificata. Molti dei più splendidi monumenti iraniani sono costruzioni in terra dietro alle loro superfici esterne di pietra intagliata o di ceramica ornata. In un terremoto, se gli strati interni si spostano e si assestano come risposta alle vibrazioni sismiche, la pressione esercitata verso l'esterno potrebbe portare allo scoppio delle murature alle loro basi, causandone il crollo. Né le analisi degli standard strutturali né le tecniche possono pienamente rappresentare questo rischio, né attenuarlo.

Per fare l'uso migliore della conoscenza che può venire da un'indagine su danni occorsi alla cittadella di Bam, è importante in primo luogo da capire, come hanno fatto i ricercatori del progetto Getty, che la distruzione di questa monumentale architettura di terra per scosse di questo magnitudo non dovrebbe essere presa come una conclusione rinunciataria o come una condanna dell'uso della terra cruda come materiale da costruzione. Ciò che suggerisce la distruzione dell'arce di Bam è, quindi, di avere cautela: *Non sempre gli edifici sono come appaiono dal di fuori.* Questo messaggio è particolarmente profondo quando si tratta di architetture in terra cruda. La trasformazione delle murature dell'arce da una composizione di strati orizzontali a settori verticali separati tra loro è derivata da secoli di erosione e rinnovamento, ma l'aspetto esterno è mutato davvero poco nel tempo. È stato necessario un terremoto per fendere le pareti e rivelare che la composizione interna non era più quella realizzata in origine.

Più di qualunque altro materiale da costruzione, l'argilla cruda può cambiare col tempo gli effetti globali nel breve ciclo continuo di erosione e rinnovamento ed anche da un deterioramento graduale del nucleo nascosto nelle pareti, non soltanto a causa delle termiti, ma anche per l'umidità di risalita, dall'intrusione di acqua

dalla parte superiore e dai lati, dall'assestamento differenziale, dal graduale compattamento e dai progressivi cambiamenti mineralogici o chimici della matrice del materiale. Queste cause di deterioramento possono interessare molti altri materiali da costruzione anche se di particolare importanza quando si tratta di terra cruda.

Il simbolo visivo che questo terremoto ha dato al mondo è divenuto la drammatica giustapposizione dell'immagine "precedente" e "successiva" dell' cittadella di Bam (figura 1). Tuttavia, per il futuro sia delle costruzioni in adobe sia della conservazione delle architetture di terra, questa simbolo dovrebbe anche essere quello delle antiche strutture in terra cruda attorno alla cittadella che non sono crollate (figure 3, 11, 20 e 28). Senza avere avuto manutenzioni o ripristini moderni, al tempo del terremoto questi organismi erano più vicini alla forma strutturale originale, datata a secoli prima. Sopravvivendo intatte al sisma, stanno oggi come esempi di costruzione in terra che hanno provato di essere capaci di resistere meglio ai maggiori movimenti tellurici rispetto ad alcuni recenti edifici a struttura metallica che sono collassati. L'età di una struttura storica, così, può essere un fattore meno negativo rispetto ai cambiamenti moderni fatti apportati ad essa compreso, ironicamente, i tentativi moderni tesi a rinforzare e restaurare la fabbriche antiche.



Figura 28. Il Khale Dokhtar non restaurato, una piccola cittadella sulla riva opposta del fiume che è sopravvissuta al sisma con il crollo di alcuni archi. Le alte mura dell'imponente struttura sono rimaste intatte. (Dove si sono verificati i crolli erano presenti le termiti e gli altri insetti).

Se questo è vero, possiamo avere bisogno di cercare nient'altro che non sia qualcuna di queste pratiche costruttive e conservative moderne per iniziare a trovare una soluzione al problema. È a questo livello che il destino della cittadella è unito a quello della città moderna che le sorgeva vicino. Le case nelle quali la gente è morta erano case moderne. Le loro mura potevano essere state fatte con la tecnica *khesht* ma, ugualmente, molte hanno avuto tetti a travi di ferro e pavimenti e tetti in laterizi. Posto che sia i restauri alla cittadella del ventesimo secolo sia le nuove case hanno patito di più rispetto alle antiche rovine in terra rimaste abbandonate non toccate nel vicino deserto, allora il problema ha meno a che fare con gli edifici in terra cruda in sé ma piuttosto con particolari forme di costruzioni in terra fatte nella Bam moderna. Di conseguenza, sia le modalità restaurative che le nuove pratiche costruttive devono cambiare, ed alcuni consigli su come farlo possono essere dati dallo stesso patrimonio edilizio nazionale piuttosto che soltanto dalle copertine dei manuali di ingegneria.

Così tanti morti in edifici con murature di terra ed il crollo di un monumento tanto simbolicamente importante, si sono uniti assieme negli occhi di molte persone nel mondo. Il concetto di sicurezza nelle costruzioni in mattoni crudi è ora tragicamente sottolineato e ciò crea un problema per la conservazione di altri siti in terra collocati in zone sismiche, i quali corrono tutti un rischio maggiore rispetto a prima del terremoto di Bam. Iniziando a comprendere i meccanismi di collasso della cittadella, si può andare aldilà dell'inculpare una costruzione *materiale* per le scarse prestazioni del *sistema* di costruzione. Se ci si ferma al materiale per la determinazione delle cause del fallimento, tutte le discussioni si fermano e non verrà raggiunta la necessità fondamentale di determinare tutte le componenti che costituiscono la sicurezza sismica.

Anche se sembrerebbe essere più facile progettare e costruire edifici sicuri in acciaio e calcestruzzo, in pratica questo sisma, come pure i recenti terremoti in Messico, Turchia, India, Marocco ed in molti altri paesi, ha dimostrato tragicamente che il concetto di sicurezza è aleatorio anche usando materiali moderni. In molte parti del mondo, la terra cruda è il materiale da costruzione maggiormente disponibile e più economico. È anche profondamente insito nella storia e nella cultura dell'Iran e della regione.

Benché sia meno sicuro costruire strutture in terra cruda ciò non significa che non si possa o non si debba continuare farlo.

La ricerca per questo contributo è stata sostenuta da un sussidio del World Monuments Fund a dall'ICOMOS americano.

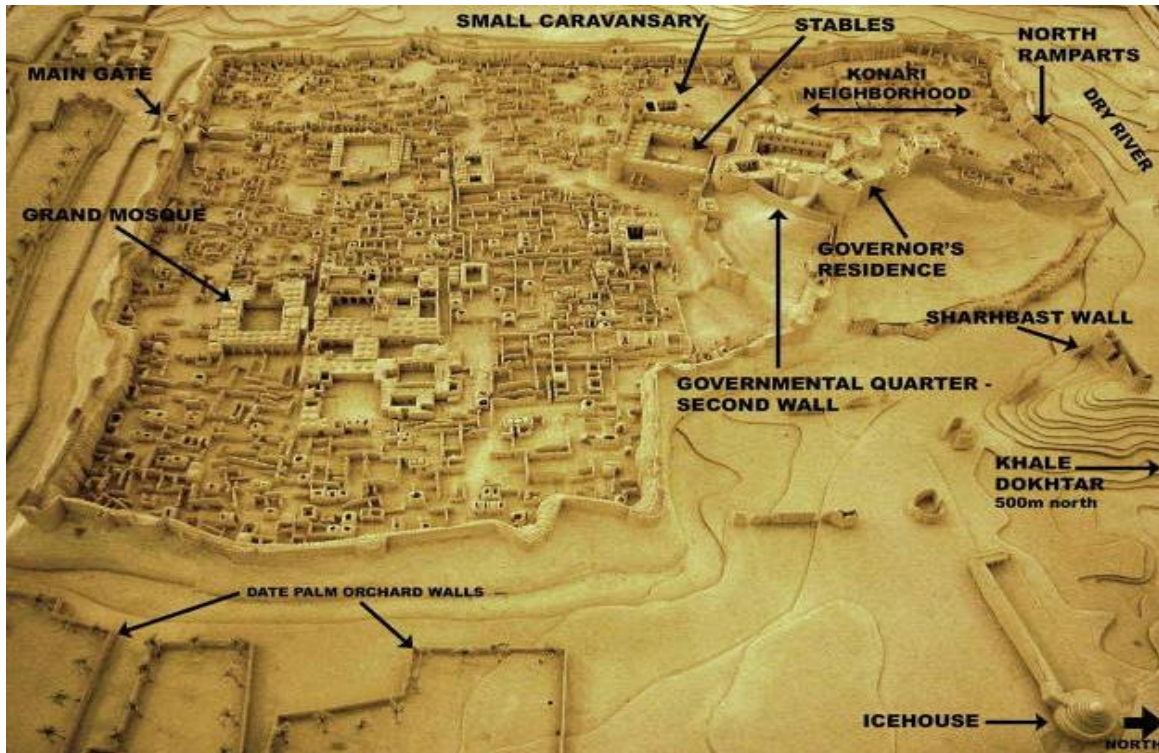


Figura 29. Modello della cittadella murata di Bam dell'ICHO dopo i restauri moderni e prima del terremoto.

BIBLIOGRAFIA

- M. ASHTIANY et altri, "Preliminary Observations on the Bam, Iran, Earthquake of Dec. 26, 2003", EERI, April 2004.
- F. FERRIGNI, "Local Seismic Culture", in *Ancient Buildings and Earthquakes*, European University Centre and Council of Europe, 1997.
- H. GUILLAUD, "Technical Mission to Bam and its Citadel", in *UNESCO-ICHO Joint Mission to Bam and Its Citadel*, ICHO, 2004.
- ICHO, *The Bam Citadel, a Comprehensive Report*, 2004.
- ICHO, UNESCO-ICHO, *Joint Mission to Bam and Its Citadel*, ICHO 2004.
- IIEES, Iran, www.iiees.ac.ir/English/bank/eng_recent.html
- Iran Strong Motion Network (ISMN), <http://www.bhrc.gov.ir>,
- R. LANGENBACH, "Bricks, Mortar and Earthquakes", *APT Bulletin*, 31:3-4, 1989.
- P. PIEROTTI, *Manuale di sismografia storica*, Edizioni Plus, Pisa 2003.
- L. TOLLES, E. KIMBRO, W. GINELL, *Planning and Engineering Guidelines for the Seismic Retrofitting of Historic Adobe Structures*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2002.
- L. TOLLES, E. KIMBRO, F. WEBSTER, W. GINELL, *Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures, The Final Report of the Getty Seismic Adobe Project*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2000.
- A. WALLS, *The 3000-year-Old History of an Arabian Mud Brick Technology*, Terra Conference Proceedings, Yazd, 2003.