

# Analisi della consistenza statica del Castillo de Los Tres Reyes del Morro de La Habana

Paradiso Michele, Useli Gianluca

## 1. Premessa

Il Castillo de Los Tres Reyes del Morro rappresenta ancora oggi uno dei simboli maggiormente riconosciuti dalla popolazione della città dell'Avana. Il Morro per il cubano è l'imponente fortezza che con il suo faro, visibile da ogni punto della città e in particolare dal frequentatissimo Malecón, presidia il canale d'accesso alla grande baia del porto. Realizzato tra la fine del XVI e la prima metà del XVII secolo per volontà della Corona Spagnola, fa parte del complesso sistema fortificato a difesa dell'allora importante colonia. Commissionato all'illustre ingegnere militare d'origini italiane (Gatteo, Emilia Romagna) Battista Antonelli, uno dei sei esponenti della famiglia di ingegneri che si dedicarono per quasi un secolo al servizio di Spagna e si resero protagonisti di un numero impressionante di opere a scopo bellico, tra fortezze, cinte murarie, navigazioni di fiumi, ponti, acquedotti, fino a veri e propri piani urbani cittadini. Il loro campo d'azione ha dell'incredibile se pensiamo all'epoca in cui si trovarono a operare: Spagna, Nord Africa, l'America Centrale da Veracruz a Panama, da Cuba a Cartagena delle Indie fino alle coste venezuelane e brasiliane. Non furono certo i soli, ma è significativo il fatto che Battista fu direttamente incaricato dal Re Filippo II, alla fine del XVI secolo, del progetto generale del sistema fortificato di tutta l'area dei Caraibi. Il castello del Morro dell'Avana, secondo la maggioranza degli storici e studiosi internazionali, costituisce l'opera di maggior rilievo di Battista Antonelli, rappresentativa del modello d'architettura militare cosiddetta "alla moderna", che trae le sue origini in Italia durante la prima metà del XVI secolo con i padri fondatori, il senese Francesco di Giorgio Martini ed i fiorentini Giuliano e Antonio da Sangallo.

## 2. La fortezza nella storia

### 2.1 Le fasi costruttive del castello

Il Castello del Morro fu iniziato a costruire sotto la direzione di Battista Antonelli e di Juan de Tejada il 20 settembre del 1589 come testimonia la preziosa iscrizione apposta sulla pietra nei pressi della batteria sul mare "Piattaforma della Estrella". La funzione della fortezza era quella di proteggere la città e le numerose flotte spagnole cariche di mercanzie che transitavano nella grande baia fin dalle origini usata come porto naturale, dalle ripetute e minacciose incursioni corsare finanziate dai governi inglese e francese.

L'imbocco del canale d'accesso al porto rappresentava il vero punto strategico di difesa, e Antonelli fu il primo a progettare nella città un sistema fortificato di una considerevole imponenza: il castello del Morro sul promontorio della riva nord ed il castello di San Salvador de La Punta sulla riva opposta. Le due fortezze erano funzionali l'una all'altra, collegate con una catena che regolava il traffico portuale e, in caso di necessità, assicuravano il fuoco incrociato contro le navi nemiche.

Battista Antonelli pensò per il Morro un edificio realizzato con la pietra caliza estraibile dalle vicine cave della Cabaña, e per via della natura scoscesa del terreno il complesso si adagia con quote decrescenti verso il mare con una pianta costituita da un poligono irregolare che si sviluppava per difendere tre linee di attacco: il fronte di terra, il fronte

sul mare ed il fronte sul canale del porto. La tecnica costruttiva adottata per la realizzazione dei fronti fu quella del terrapieno, sebbene in gran parte di essi si ricavò al loro interno dei locali voltati, utilizzati come alloggi, polveriere e casamatte. Il fronte di terra (est) risulta il più regolare, dove sono riconoscibili i dettami dell'architettura rinascimentale italiana, costituito dalla cortina di collegamento dei due bastioni laterali, il fossato, la controscarpa, il cammino coperto con rediente e lo spalto. I due bastioni sono provvisti di orecchioni, ovvero con i fianchi rientranti, dove si realizzarono, all'interno di ciascuno una casamatta con due troniere a protezione della cortina e del fossato. I baluardi portano il nome di Tejada (in realtà un mezzo bastione) e di Austria. Il fossato profondo fu pensato per rimanere secco. Il fronte sul mare (nord-ovest) è caratterizzato da una cortina muraria con profilo irregolare, che forma in pianta una spezzata con tre vertici protesi verso il mare. Il tratto murario univa la punta del Morrillo con la sua torre di vedetta alle batterie di San Nicolás e di Santo Tomás, che si stagliava dal mezzo baluardo di Tejada. Il fronte sul canale del porto (sud-ovest) è quello dirimpetto al castello della Punta e sul quale si apre l'ingresso principale alla fortezza. Questo fronte difensivo è costituito dalla faccia del baluardo d'Austria esposta a sud, proseguendo con una cortina che termina nel mezzo bastione di Santiago, di piccole dimensioni. Il fronte si conclude nella punta del Morrillo. Al di sotto di quest'ultima si trova la Piattaforma della Estrella. Il castello doveva essere dotato di ben tre cisterne di raccolta dell'acqua, presenza fondamentale per la sopravvivenza della truppa durante gli assedi. Tutti gli elementi della fortezza erano messi in comunicazione tra loro secondo una precisa distribuzione dei collegamenti, scale e rampe e sortite segrete verso l'esterno. L'interno della fortezza, la piazza d'armi, era uno spazio pensato per essere occupato da una sorta di cittadella, costituita da alcuni fabbricati dotati di struttura provvisoria e destinati ad alloggi della truppa e del comandante, una chiesa ed alcuni magazzini. La vera e propria piazza d'armi, luogo necessario al raduno della truppa, si trovava tra la cortina dell'entrata principale e la cittadella stessa. Tutt'intorno al complesso degli edifici si sviluppava il cammino di ronda e le due rampe che conducevano alla piattaforma alte del castello. La costruzione del Castello del Morro, protrattasi per lungo tempo, nel 1640 si ha la certezza che fu conclusa in ogni sua parte: per oltre un secolo rappresentò una delle fortezze più importanti d'oltreoceano assicurando l'inespugnabilità dell'Avana.

Con il coinvolgimento della Spagna nella Guerra dei Sette Anni, L'Avana nel giugno 1762 venne attaccata dagli inglesi e quindi conquistata pochi mesi più tardi, proprio a seguito della presa del Castello del Morro. Durante l'assedio, la fortezza, sebbene il corpo principale si mantenne integro, subì alcune distruzioni per effetto delle mine, principalmente sul fronte di terra: la cortina, il baluardo di Tejada e la batteria di San Nicolás. Quando la città fu restituita agli spagnoli, il nuovo governo dette inizio ad una serie di riforme che indussero tra le altre al rinnovamento e alla riedificazione delle opere del sistema difensivo cittadino, il cui incarico ricadde sull'ingegnere spagnolo Silvestre Abarca coadiuvato da Augustin Crame. Tra le varie opere proposte, significative furono da una parte la scelta di realizzare l'imponente complesso fortificato di San Carlos de la Cabaña (1763-1774) sulla collina omonima, nelle vicinanze del Morro, che gli sottrarrà la primaria importanza nella difesa della città, ma dall'altra la scelta di riorganizzare anche le fortezze esistenti, compreso il Morro, confermandone l'importanza strategica nonostante i limiti sopraggiunti con l'evoluzione delle tecniche militari. In un breve periodo di tempo (1764-1771) le parti distrutte del castello furono ricostruite dotandole di maggiore solidità e migliorando la funzionalità dell'edificio con l'inserimento di nuovi elementi come ad esempio l'edificio centrale, le nuove rampe, la batteria di Santo Tomás, il tunnel "aspillerado" con il cammino coperto che lo metteva

in collegamento con il nuovo forte della Cabaña, l'approfondimento del fossato, la ricostruzione dell'antica torre e così via.

## **2.2 La storia recente**

Durante i secoli successivi la fortezza si è mantenuta nella nuova conformazione settecentesca, non molto distante da quella originaria, almeno fin quando si mantenne a scopo di difesa militare. Con l'avvicinarsi dello scontro ispano-americano di fine XIX secolo venne realizzata la batteria di Velasco a rafforzare il fronte sul mare a nord oltre ad una serie di opere minori di adeguamento, come l'inserimento delle polveriere e dei nuovi cannoni moderni. Sempre nel XIX secolo si potenziò la sua funzione di stazione del traffico marittimo con la ricostruzione completa (1844-45) del faro e la messa in funzione della prima stazione semaforica (1888) poi ricostruita nel secolo successivo (1926). Concluso l'ultimo scontro militare, gli ambienti del castello ospitarono prima la Scuola dei Cadetti dell'Esercito (1911-45) e poi, con l'avvento del movimento rivoluzionario, il carattere detentivo (1967). Nel 1977 fu deciso di trasferire la prigione dai locali del Morro concentrandola tutta nella fortezza di San Carlos de la Cabaña e contemporaneamente Eusebio Leal Spengler, Historiador della città de La Habana, propose il Morro come luogo per ospitare l'XI Festival Mondiale della Gioventù dell'anno seguente permettendo così per la prima volta l'apertura dello spazio al pubblico sancendo la cessazione delle sue funzioni militari e para-militari.

Il Ministero delle Forze Armate di Cuba (MINFAR) affidò ad una delle tante imprese turistico-gastronomiche locali, la gestione degli esercizi commerciali che vi si svolgevano all'interno. Con i finanziamenti ottenuti dal Festival della Gioventù si intrapresero una serie di interventi per la riqualificazione del territorio che furono inizialmente incaricati ad una impresa esterna statale, l'Empresa Nacional de Obras Arquitectónicas (ENPOA), che fu impegnata nel 1982 nella rilevazione del complesso. Il 1982 rappresenta tra l'altro un anno fondamentale per la città ed i suoi monumenti - compreso il Castello del Morro - poiché venne inserita nell'elenco dell'Unesco dichiarato Patrimonio Mondiale dell'Umanità. Da questo momento l'organizzazione internazionale invia numerosi fondi per restaurare il centro storico dell'Avana e le opere militari di pregio. L'Oficina de L'Historiador de La Ciudad (OHC) diretta da Eusebio Leal, subentrò alla ENPOA, dalla quale ereditò la documentazione realizzata e sulla base di questa elaborò un programma di restauro del castello, avvenuto tra gli anni 1987 e 1993. Nel 1992 venne istituito l'ente territoriale del Parco del complesso storico militare del Morro e della Cabaña (PCHMC), nato dell'idea progettuale di recuperare i complessi fortificati e sistemare un'ampia area circostante. Dopo la conclusione dei lavori di restauro, nel 1993 fu riaperto al pubblico ospitando regolarmente le importanti manifestazioni della Biennale d'Arte a maggio e della Fiera del Libro a febbraio. In tale occasione il MINFAR si fece carico anche dell'intera gestione degli spazi mediante un organismo amministrativo interno a capo del Complesso dei Musei Storico Militari (CMHM), concludendo così l'apporto dell'OHC. Agli inizi del 2000 il CMHM decise di investire per realizzare un nuovo restauro delle due fortezze all'interno di un programma più ampio. Istituì al suo interno un ufficio tecnico e, dando priorità agli ambienti della Cabaña, i lavori iniziarono nel 2007 e l'anno successivo anche al Morro. Attualmente risultano ancora in corso i lavori di restauro, sebbene il complesso rimanga in parte aperto al pubblico per la visita.

Il Castillo de los Tres Reyes del Morro rappresenta ancora oggi uno dei simboli più conosciuti della città dell'Avana. La sua vista, soprattutto al tramonto, è molto suggestiva: la stazione semaforica con il suo faro, svolge il compito strategico di

controllare tutto il traffico marittimo dentro e fuori il porto dell'Avana. Dall'alto della sua mole, è possibile individuare tutte le zone in cui è divisa la città. Oltre a tale funzione di controllo marittimo, il Castello del Morro mette a disposizione alcuni dei suoi numerosi spazi per allestire mostre con temi artistici e culturali. L'accesso principale al complesso avviene dal "Tunel de la Baia", solo carrabile, che corre sotto il canale e che collega le due sponde della baia. Per i visitatori tale tratta è generalmente effettuata per mezzo di servizio taxi o con pullman turistico che compie al Morro la sua prima tappa prima di collegare le località balneari della costa est. La celebre "lanchita", l'imbarcazione che ancora oggi attraversa la baia e collega giornalmente l'Habana Vieja alle sponde opposte, permette di arrivare al villaggio di Casablanca, dal quale si può poi raggiungere il Castello del Morro con un percorso a piedi.

### **3. Stato di conservazione**

Il complesso si conserva globalmente integro sebbene lo stato di degrado ambientale, materico e strutturale presenta alcune emergenze di non poco conto. Gli interventi di restauro operati alla fine del secolo scorso, seppure partiti con propositi di ben altro respiro coinvolgendo tutta l'area del Parco Storico Militare, sostanzialmente hanno permesso di renderlo sufficientemente agibile, quasi in tutte le sue parti, per la visita al pubblico. Purtroppo i lavori di restauro non ebbero seguito ed unito alla mancanza di fondi per la manutenzione, la situazione non subì miglioramenti. Solo recentemente, dal 2008, il CMHM ha ripreso i lavori di restauro, sia alla Cabaña che al Morro, riuscendo ad intervenire però con operazioni puntuali mirate solo ad alcuni spazi, mancando di una pianificazione generale dei lavori da compiere.

Gli ambienti del castello soffrono fortemente della presenza di umidità ad alta concentrazione salina, la quale aggride le superfici ed i materiali provocando diffusi fenomeni di erosione della muratura in pietra, formazione di patine biologiche, disgregazione e distacco degli strati superficiali quali l'intonaco. In molti ambienti interni, quelli meno aerati, si verifica la formazione di concrezioni saline in forma di stalattiti e stalagmiti. I fenomeni erosivi sono poi accentuati dall'alta esposizione ai forti venti e alle mareggiate prodotte dai cicloni, i quali scagliano con violenza le onde sulla cortina esterna fino a penetrare all'interno del complesso. Basti pensare alle condizioni in cui versano le sue iscrizioni che attestano la posa della prima pietra, tra le più antiche dell'isola: si trovano in uno stato di assoluto pericolo per la loro conservazione nel tempo con l'acqua del mare che sta pian piano erodendo il rilievo, soprattutto nella parte destra, dove risulta già compromessa in molte sue parti. Negli ultimi anni le condizioni stanno velocemente peggiorando ed ancora non è stato posto alcun rimedio a tale problema. A questa situazione si aggiunge la mancanza di manutenzione e messa in sicurezza degli spazi, verificandosi frequentemente la presenza di impianti e fili scoperti e l'assenza di adeguate protezioni per i visitatori, nonché una scarsa valorizzazione del monumento e degli spazi a partire dalla carenza dei collegamenti con la città. Da un punto di vista statico le emergenze che meritano assoluta attenzione riguardano la base rocciosa della scogliera sulla quale poggia il castello che presenta una serie di fratture lungo quasi tutto il perimetro come dimostra uno studio geologico realizzato nel 1989, al quale tuttavia non è seguito un progetto di consolidamento né degli interventi specifici. Una di queste fessure, a lato della Batteria della Estrella ed al di sotto della punta del Morillo, presenta un'apertura di circa un metro che risale e si interrompe prima dell'inizio della parete della fortezza, la quale per ora non presenta visibili dissesti. Tuttavia la profondità della crepa unita all'azione disgregante del mare possono portare a gravi problemi di stabilità del complesso costruito. Un'altra preoccupazione è

rappresentata dalle condizioni della garitta posta nel vertice del piccolo bastione di Santiago, l'unica del complesso a conservarsi originale dalle ricostruzioni settecentesche resistendo finora, a differenza delle altre tre del complesso, a danneggiamenti o crolli. La struttura muraria dell'elemento presenta delle lesioni in corrispondenza delle connessioni con il parapetto: si nota come la fessura sia passante, dall'interno all'esterno nel lato dell'entrata ma risulta di importante entità anche nell'altro lato, mentre all'attacco alla base la garitta non presenta particolari dissesti. Tale situazione pone in serio pericolo la struttura in quanto la parte superiore, costituita dalla pareti perimetrali e la cupola, per quanto solidamente connessa alla base è privata - o quantomeno limitata - delle necessarie connessioni orizzontali, che le assicurerebbero un adeguato vincolo alla muratura. Questa situazione può portare alla formazione di una cerniera ideale alla base d'attacco che, sotto l'azione del peso proprio del volume a sbalzo nonché l'azione orizzontale del vento e pioggia prodotti da un ciclone, generano nell'elemento stesso l'effetto ribaltante che lo porterebbe al crollo. La situazione richiede un intervento tempestivo oltretutto per salvaguardare un prezioso elemento della fortezza, unico nella sua tipologia a conservarsi originale, anche per scongiurare seri infortuni alle persone.

Infine l'oggetto di questo studio, la presenza delle lesioni nelle volte a botte in mattoni delle gallerie dell'edificio centrale, che destano preoccupazione per la loro entità e per via del fatto che non era stato analizzato finora il problema con la dovuta attenzione.



Fig. 1 Alcune attuali casistiche di degrado (in alto da sinistra): erosione dell'intonaco e della pietra, umidità negli spazi all'interno, la fessura della base rocciosa, le lesioni nel parapetto di attacco alla struttura della garitta ed infine l'erosione che danneggia l'antica iscrizione in pietra.

#### **4. Le lesioni nelle volte dell'Edificio centrale**

##### **4.1 L'edificio centrale**

L'edificio centrale, che sorge con una struttura massiccia e monolitica della stessa pietra "caliza" all'interno del complesso, rappresenta una delle trasformazioni maggiormente percettibili tra le operazioni di ricostruzione della fortezza dopo la presa della città da

parte inglese. La costruzione è costituita da due corpi di fabbrica addossati tra loro e di dimensioni diverse. Il maggiore è di forma pressoché quadrata (circa 47 metri di lato) mentre il minore - ospitava le abitazioni del comandante e degli ufficiali - che si trova verso ovest possiede una forma a "L" inscrivibile in un rettangolo di 16x23 metri. Entrambi si sviluppano su due livelli oltre un piano seminterrato e la terrazza di copertura praticabile. L'edificio presenta una discreta regolarità nelle caratteristiche distributive e costruttive. Il corpo principale ospita all'interno dodici gallerie, sei per piano collegate da due scale poste alle due estremità opposte dell'edificio, lato sud. Gli accessi alle gallerie del piano terreno avvengono dal fronte principale sulla piazza d'armi. Le gallerie hanno forma lunga e stretta, con sviluppo da sud a nord. Gli ambienti sono collegati con tre aperture poste a intervalli regolari, agli estremi e al centro della parete di confine. I soffitti sono tutti realizzati con volte a botte ribassata in mattoni. Le pareti verticali sono costituite da blocchi di pietra "caliza" di dimensioni variabili. L'illuminazione e l'aerazione sono assicurate da gruppi di tre aperture per ciascun estremo di ogni galleria. Inoltre al piano superiore dei lucernai integrano il sistema di aero-illuminazione. I locali al seminterrato, con soffitto ligneo, sono accessibili dal lato opposto, a nord. La porzione di edificio che ospitava la residenza del comandante ha accesso sia per mezzo di una scala che collega tutti i piani, posta nell'angolo sud-ovest, sia dalle adiacenti gallerie del corpo di fabbrica maggiore. L'ampia terrazza di copertura possiede delle forti pendenze per assicurare lo scolo delle acque piovane ed è collegata all'interno dell'edificio da due scale a chiocciola, ubicate in corrispondenza degli altri collegamenti verticali, che partono dal piano primo e ricavate nell'ampio spessore delle murature a sacco delle pareti esterne est ed ovest.

#### 4.2 Analisi delle lesioni

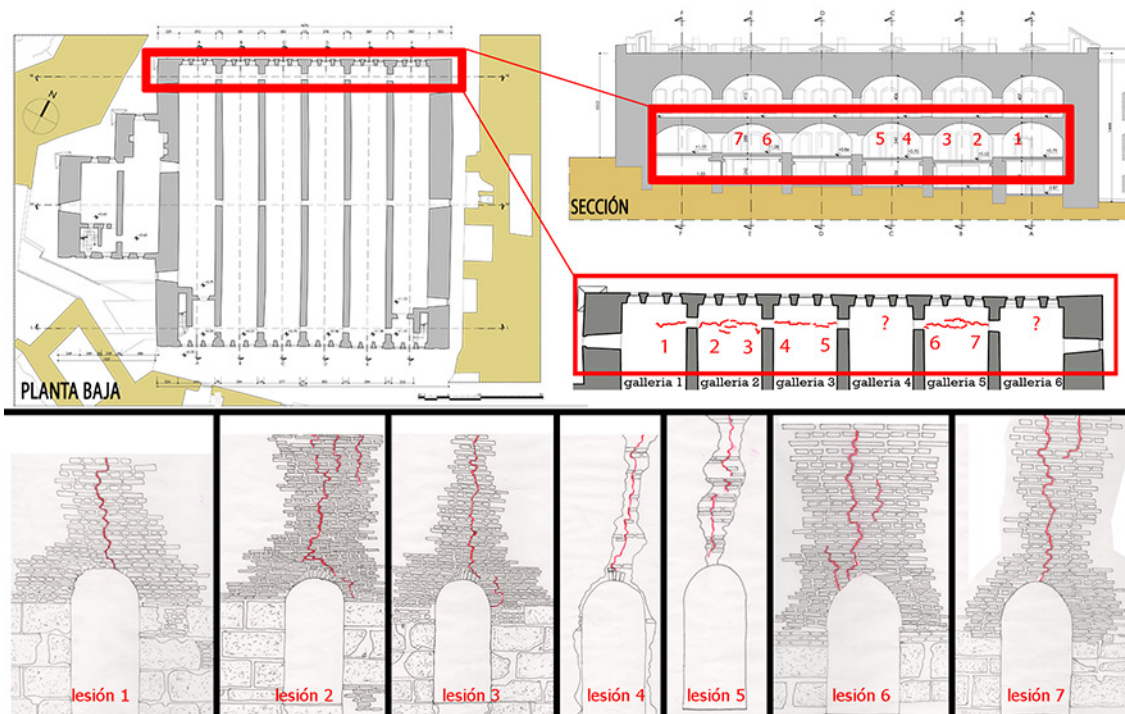


Figura 2. Localizzazione, in sezione ed in pianta, delle lesioni nelle volte e relativo quadro fessurativo.

Le gallerie, di cui si è rilevato l'esistenza delle lesioni all'intradosso della volta, si trovano al piano terra del corpo principale e precisamente, da ovest verso est: la prima

per metà, la seconda, la terza e la quinta; anche la quarta molto probabilmente è percorsa da un'analogia lesione ma, essendo rivestita da uno spesso strato di intonaco e lo spazio attualmente utilizzato come sala di esposizione, non è stato possibile verificarne l'effettiva presenza eseguendo la necessaria ispezione scoprendo la muratura in mattoni; tuttavia si notano dei segni in rilievo sulla superficie intonacata che ne lasciano supporre la presenza, data la loro posizione e l'andamento simili a quelli presentati dalle lesioni nelle gallerie adiacenti. La sesta e ultima galleria del piano terreno è anch'essa intonacata però, a differenza della quarta, sulla relativa superficie non si osservano neppure i segni di un suo eventuale passaggio. Tutte le fratture tagliano trasversalmente le gallerie, parallelamente all'arco della volta, localizzato in corrispondenza delle aperture ricavate sulle pareti a comune nella zona prossima al fronte nord. Nelle gallerie dove il restauro conservativo in corso è già stato completato, le fratture sono state stuccate con la malta, dunque se ne può valutare solo l'andamento e misurare l'ampiezza ma non la profondità. Viceversa è stato possibile misurare la profondità delle lesioni nelle volte della seconda e terza galleria, riportando rispettivamente profondità massime dai 6 ai 25 cm e dai 14 ai 25 cm. La larghezza della lesione è variabile, raggiungendo in alcuni punti il valore massimo di 5 cm. Il resto della struttura dell'edificio si trova in apparente buono stato e non mostra altri segnali che lascino pensare ad un dissesto statico ulteriore, o comunque collegato a quello evidenziato nelle volte.

In generale l'analisi del quadro fessurativo dell'edificio dipende da azioni esterne (carichi, cedimenti, sisma) incompatibili con le prestazioni del materiale, che hanno indotto sollecitazioni sulla struttura muraria. Nel caso della muratura una linea di frattura è una linea isostatica di compressione, dove ortogonalmente ad essa si trova la direzione di trazione che ha prodotto la frattura. Il procedimento seguito nel caso in oggetto è esattamente inverso: l'obiettivo è quello di capire quali sono state le cause che hanno prodotto le lesioni attraverso la "lettura" delle lesioni stesse sulla struttura.



Figura 3. Le lesioni (la n.3 nella volta n.2) che sono oggetto di studio e la conformazione del falso arco.

Le lesioni che sono oggetto di studio sono quelle presenti nella volta della galleria 2 sopra l'arco del passaggio di destra (lesione 3), che si innesta come una lunetta nella volta a botte di copertura. Per la sua conformazione si tratta di un arco a mensola o falso arco, poiché dotato di una struttura non completamente autoportante. Nel falso arco, infatti, i giunti di malta sono orizzontali e non radiali come nell'arco "vero" e questo crea problemi di stabilità, legata al fenomeno del taglio-scorrimento. In generale nell'arco classico il poligono funicolare che garantisce l'equilibrio è quello interno al profilo dell'arco stesso, conseguentemente in ogni sezione lo sforzo normale è elevato mentre quello di taglio, responsabile dello scorrimento, è minimo; inoltre la forza di attrito, proporzionale allo sforzo normale, è sufficientemente alta impedendo lo scivolamento. Nel falso arco, viceversa, la forza di taglio è più o meno analoga a quella dello sforzo normale, pertanto sufficientemente alta per verificarsi il pericolo di scorrimento. In questo caso non tutta la struttura dell'arco lavora a compressione. Le mensole richiedono un notevole ispessimento delle pareti e della spalla per contrastare gli effetti della gravità, che tende a comprimere ciascun lato dell'arco verso l'interno, producendo lo scorrimento orizzontale degli elementi.

Ai fini di un calcolo numerico per lo studio delle strutture in muratura, la relativa modellazione può essere affrontata in maniera diversa: modello di struttura continua, modello discreto o con procedimento di omogeneizzazione. Nel caso in oggetto si è ritenuto più corretto e veritiero, realizzare un modello discreto distinguendo i componenti (mattoni, pietre, giunti di malta) della struttura in muratura. Tale modello prevede un gruppo di elementi rigidi (mattoni, pietre), collegati fra di loro mediante vincoli elasticamente deformabili (malta) quando compressi, questo perché esiste una significativa differenza tra i moduli elastici della malta (molto più deformabile e quindi comprimibile) e quello degli elementi. Anche i giunti di malta vengono modellati in forma discreta, mediante una serie di bielle ortogonali all'interfaccia per trasmettere lo sforzo normale di compressione, oltre ad una biella tangenziale per trasmettere lo sforzo di taglio. La caratteristica peculiare di tale modello è quella di considerare il solido murario come un sistema rigido ad elasticità concentrata; in questo modo il comportamento del materiale viene descritto attraverso una definizione opportuna del tipo di contatto tra gli elementi, con l'indubbio vantaggio di poter ricondurre l'analisi del problema nell'ambito del calcolo algebrico. Per tale ragione riflette in modo reale il comportamento della lesione in una muratura che segue il percorso di minor resistenza; se una lesione deve aprirsi in una parete, prima separerà i mattoni lungo i giunti di malta, più deboli dei blocchi, poi, secondariamente, può accadere la rottura di un blocco. Proprio tale effetto secondario costituisce il limite del modello: non prevede la rottura del blocco. Considerando le proprietà della muratura, si assume che le bielle normali siano unilaterali ovvero capaci di trasmettere solo forze di compressione, per cui in caso di forze di trazione, si rompono ed una volta che ciò avviene ovvero si è aperta una lesione ("in una muratura, dove c'è trazione c'è lesione" Heyman), la stessa trazione si annullerà poiché non può più verificarsi alcuna sollecitazione. La stabilità dell'arco classico è garantita dall'esistenza di una qualsiasi linea delle pressioni interna al profilo della struttura, con riferimento alle tre ipotesi di Jacques Heyman: resistenza a compressione infinita, resistenza a taglio infinita, resistenza nulla alla trazione. In termini cinematici, queste ipotesi portano alla considerazione che l'unico meccanismo

di collasso possibile in un arco è quello flessionale (4 cerniere in 4 sezioni distinte, con l'alternanza intradosso-estradosso), mentre risulta impossibile il collasso per taglio-scorrimento e quello per schiacciamento. Nel caso del falso arco le ipotesi di Heyman sono solo in parte valide ed in particolare, deve essere rimossa l'ipotesi di assenza di scorrimento.

La verifica di stabilità del falso arco è stata effettuata con il software brickWORK, un programma di calcolo creato appositamente per l'analisi di strutture in muratura antica, basato appunto sul modello discreto. Il modello discreto piano del falso arco è realizzato sulla base geometrica del rilievo diretto eseguito sul campo e sullo studio, con il supporto dei fotopiani, dell'apparecchiatura muraria reale della volta costituita dai mattoni, posti per la maggior parte in corsi orizzontali separati dai giunti di malta. Difatti il modello finalizzato al calcolo del software deve riprodurre esattamente la dimensione reale di ciascun mattone secondo l'effettiva posizione, distanziati tra di loro dallo spessore del giunto di malta. La modellazione deve tenere conto della natura del falso arco o arco a mensola che, oltre a non possedere i conci che ne determinano lo spessore come per l'arco vero, nel presente caso è il risultato di un vuoto realizzato nella struttura della volta di copertura, che si sviluppa con andamento ortogonale continuo. Pertanto sono considerate le porzioni di muratura racchiuse nello spessore di 18 cm, calcolate dall'intradosso dell'arco in corrispondenza della chiave e delle imposte. Prima di procedere con il calcolo automatico del software occorre assegnare i vincoli del modello (tra cui i vincoli a biella per simulare i giunti di malta), le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali (ottenute da prove di laboratorio) e infine i carichi gravanti sul falso arco (rappresentati dal peso proprio, dalle due porzioni di volta che coprono le gallerie comunicanti con soprastante rinfiacco e pavimentazione ed il prisma di muratura in pietra soprastante l'arco). Il software Brickwork esegue il calcolo numerico reiterato degli sforzi di compressione, di trazione e di taglio dove presenti, che si verificano in ciascuna biella semplice. La reiterazione è prodotta da un fissato numero di steps, nei quali il software calcola la stabilità della struttura, data dalla costruzione di almeno uno tra i poligoni funicolari delle sollecitazioni posizionati all'interno della sagoma dell'arco. Il passaggio tra due iterazioni consecutive avviene quando la ricerca del poligono funicolare produce la rottura di una biella per trazione. Il calcolo successivo ripercorre la stessa operazione, però eliminando la presenza della biella rotta in precedenza, e così via fino all'ultimo step, che può essere rappresentato dal limite massimo delle iterazioni impostate nel caso di arco stabile o da uno step intermedio, quando la ricerca del poligono funicolare interno alla sagoma non è più possibile, ovvero l'arco è instabile. Secondo i risultati del calcolo operato dal software sul modello discreto, l'arco è risultato stabile. La valutazione del quadro fessurativo si effettua interpretando i risultati del calcolo, con i quali si individuano le bielle semplici che sono giunte a rottura durante il processo iterativo, osservandone la sollecitazione che l'ha causata. Nello schema rappresentato dall'interfaccia grafica del modello si è riportata la localizzazione dei vincoli nei quali si è verificata la rottura delle bielle, con l'evidenziazione di quest'ultime, nelle quali si registrano i valori di sollecitazione superiori a  $1 \text{ kg/cm}^2$ .

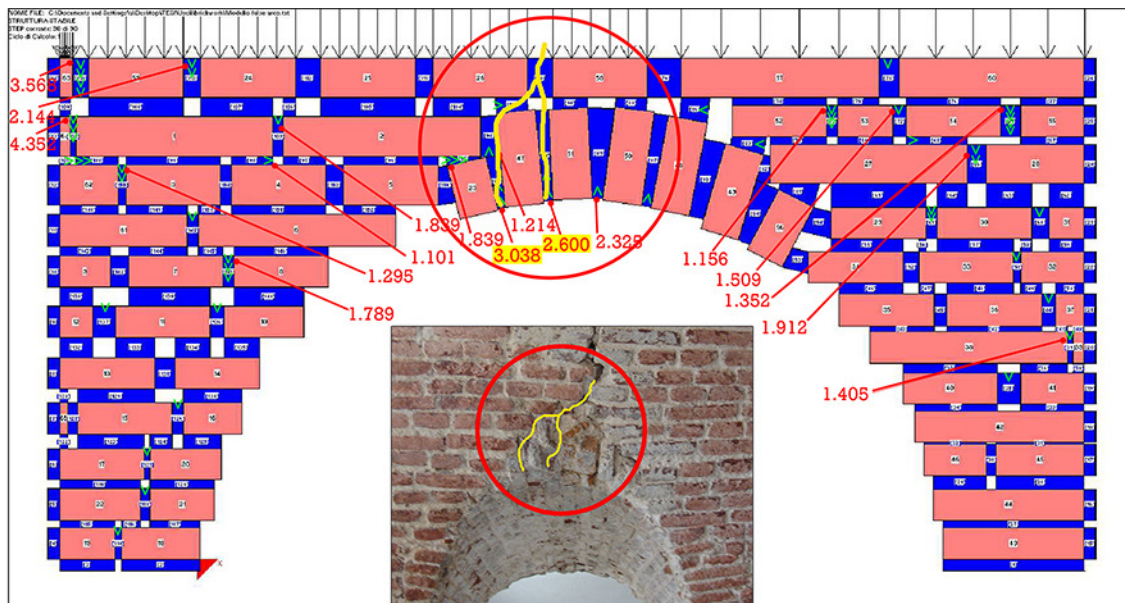


Figura 4. Valutazione dei risultati del calcolo numerico di Brickwork per l'analisi di stabilità dell'arco. L'identificazione delle sollecitazioni che hanno prodotto la rottura dei vincoli a biella indica la localizzazione di una possibile formazione di una lesione. Il confronto con la realtà conferma la corrispondenza della lesione.

Dalla lettura di questi dati sovrapposti si può valutare la localizzazione dei giunti di malta nei quali è ipotizzabile la manifestazione di microfrazture. Considerata una resistenza media a trazione di  $1,2 \text{ kg/cm}^2$  della malta della muratura dell'arco reale, si può affermare, escludendo la diffusa presenza di microlesioni di lieve entità nelle zone in corrispondenza delle spalle laterali, che le microfrazture di maggiore entità - sollecitazioni di comprese tra  $3$  e  $2,6 \text{ kg/cm}^2$  - sono riscontrabili in posizione leggermente decentrata verso sinistra dell'intradosso dell'arco, nei giunti di malta interposti tra i primi tre elementi posti per coltello. Se tale quadro fessurativo ipotetico lo si confronta con la lesione esistente sulla volta, notiamo la corrispondenza nella zona in cui questa interseca l'arco con analogo andamento decentrato verso sinistra.

In conclusione si può dire che la lesione presente nella volta dipende dalla conformazione stessa del falso arco. La microfrazione in corrispondenza del giunto di malta rappresenta l'iniziale soluzione di continuità che, perdendo il materiale le sue proprietà meccaniche, già di partenza molto limitate, con il tempo e l'invecchiamento, produce lo sviluppo della lesione con la sua prosecuzione lungo la direzione parallela all'arco della volta.

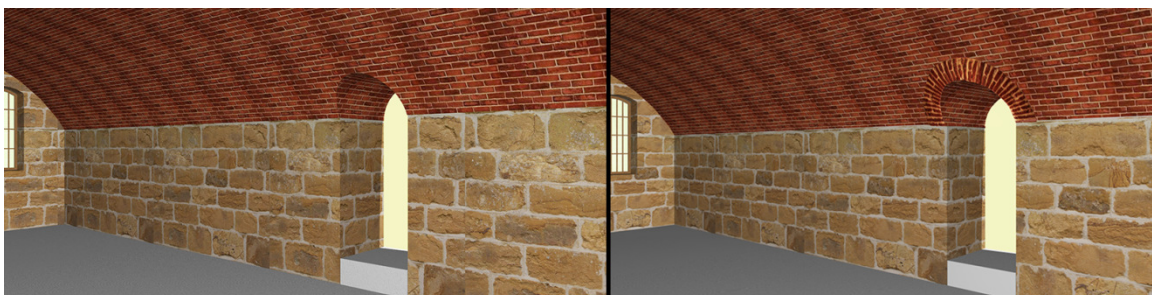


Figura 5. Il problema statico è dovuto alla stessa tecnica costruttiva adottata nell'arco di passaggio. La rappresentazione virtuale della volta presenta due casi: a sinistra vi è l'arco come fu realizzato, a destra come sarebbe dovuto essere costruito.

## 5. Conclusioni

La fortezza rappresenta uno dei maggiori esempi di architettura militare rinascimentale in America, forse nel mondo, riconosciuta Patrimonio dell'Umanità dall'Unesco. Il monumento dall'immenso valore storico-culturale manca ancora di un'adeguata valorizzazione e la netta impressione per chi, dalla città (troppo pochi a dire la verità), compie il suo "piccolo viaggio" per visitarlo, è quella di un poderoso edificio in stato di semi-abbandono. Il destino del Morro nei secoli è stato simile a quello di altri manufatti architettonici di pari utilizzo. Le funzioni militari ne hanno garantito l'originalità, conservando nel tempo la valenza della sostanza del disegno architettonico pensato da Antonelli. Il momento attuale segna un'importante criticità che dovrà fare i conti con una rinnovata interpretazione della fruizione del monumento da parte della comunità. Ferma sensibilità dovrà esser posta nelle strategie di riuso e nella vocazione di questo complesso di architetture di terra, di roccia e di pietre così fortemente in simbiosi con la caratteristica naturale del territorio sul quale sorge e del mare che ne segna le "rughe" e ne mina l'appoggio. L'anima razionale e pragmatica insita nelle architetture militari dovrà fare i conti con le "tentazioni" estetiche di un nuovo utilizzo sociale, tenendo sempre alta l'attenzione sui temi della stabilità, statica e sicurezza di questi possenti giganti di pietra, che ci paiono indistruttibili ed eterni e che invece, spesso, ad una analisi più profonda delle tecniche costruttive, rivelano un'anima fragile di terra.

### Fonti bibliografiche:

BLANES MARTÍN, T., 1998: *Castillo de los Tres Reyes del Morro de la Habana: historia y arquitectura*, La Habana, Editorial Letras Cubanas.

BRUNI, A., 2009: *Il Castillo de los Tres Reyes del Morro de La Habana. Rilievo e documentazione di un'opera antonelliana nei caraibi*, Tesis de graduación, Facultad de Arquitectura de la Universidad de Florencia, A.A. 2009-2010.

USELI, G., 2013: *Il Castello de Los Tres Reyes del Morro dell'Avana. Analisi del degrado e della consistenza statica del complesso*, Tesis de graduación, Facultad de Arquitectura de la Universidad de Florencia, A.A. 2012-2013.

GALASSI, S., PARADISO, M., PIERONI, E., TEMPESTA, G., 2011: *Analisi di strutture in muratura soggette a vincoli cedevoli: un algoritmo di calcolo non lineare*, en *Atti del XX Congresso Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata AIMETA 2011*, 12-15 Settembre 2011, Bologna, Publi&Stampa Edizioni.

GALASSI, S., PARADISO, M., PUGI, F., TEMPESTA, G., 2007: *Sistemi voltati in muratura. Teoria e applicazioni*, Roma, Edizioni DEI.

GASPARINI, G., 2007: *Los Antonelli. Arquitectos militares italianos al servicio de la Corona española en España. 1559-1649*, Africa y America, Caracas, Ed. Arte.

<http://www.provincia.fc.it/cultura/antonelli/index.html> (consultado el 23/07/2013)

<http://pares.mcu.es/> (consultado el 04/11/2013)