LA TORRE DI CARLO V IN MARTINSICURO DIAGNOSI E PROGETTO DI CONSOLIDAMENTO

Lorenzo Jurina

Premessa

Negli interventi di consolidamento strutturale, la collaborazione tra l'architetto, l'ingegnere, lo storico, il tecnologo e l'impiantista risulta essere sempre più necessaria al fine di ottenere progetti rispettosi della realtà del costruito, efficaci e duraturi dal punto di vista statico e materico, economici nella esecuzione delle opere e nella successiva fruizione del bene.

L'intervento sulla Torre di Carlo V a Martinsicuro è stato un esempio di collaborazione gratificante iniziata con una sfida ed una provocazione lanciata dall'arch. Carolina Di Biase, incaricata del progetto di conservazione, cui era impossibile sottrarsi.

Poco il tempo ed i denari a disposizione per la diagnosi ed il progetto, molte le difficoltà di interpretazione, elevate le aspettative del committente e soprattutto del progettista : questa la situazione che si presentava, unita alla obiettiva difficoltà di un monumento distante dalle rotte comuni e apparentemente destinato ad imminente rovina.

La pre-diagnosi

L'osservazione di insieme della Torre di Carlo V a Martinsicuro ha evidenziato fin dal primo sopralluogo, avvenuto nel lontano 1986, una situazione statica preoccupante.

Fessure di dimensione notevole interessavano tre delle quattro facciate; le porzioni murarie separate dalle lesioni apparivano strapiombate verso l'esterno con un accenno di torsione; i beccatelli della fascia di coronamento erano sul punto di collassare in varie posizioni; le volte a crociera del primo e del terzo livello e soprattutto la volta a padiglione del livello intermedio presentavano una serie davvero inusuale di anomalie, tra cui fessure, cedimenti, distacco di mattoni.

La copertura era mancante per oltre la metà della superficie.

Una fessura continua era presente sul lato sud ed una simile sul lato nord, inspiegabile alla prima osservazione, divideva nettamente in due parti la parete, interessandola dal tetto alle fondazioni.

L'unico lato poco danneggiato, di maggiore spessore e più protetto dal terreno circostante, risultava quello rivolto verso il pendio.

Gli elementi strutturali, sia verticali che orizzontali, non collaboravano più tra loro ed in tale modo i carichi indotti dal peso proprio, dalla spinta delle volte e dai cedimenti di fondazione venivano affrontati senza poter sfruttare i benefici effetti della tridimensionalità.

Tra le cause coerenti con il quadro fessurativo osservato potevano ipotizzarsi sia un cedimento differenziale di fondazione, sia un fenomeno franoso del versante alle spalle della torre, sia una spinta orizzontale non contrastata delle volte. La risposta ai dubbi strutturali doveva venire da una minuziosa osservazione del degrado esistente accompagnata da analisi dei materiali e da analisi numeriche in grado di simulare l'evoluzione del fenomeno fessurativo.

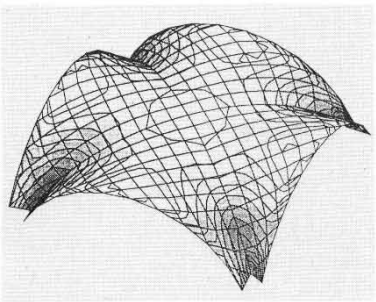
Le indagini ed il rilievo

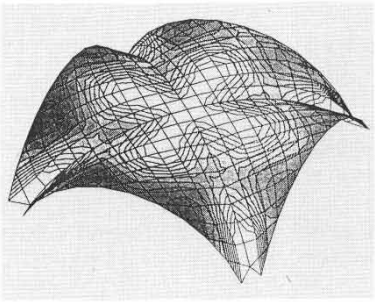
Le prime indagini eseguite hanno interessato le fondazioni. Esisteva infatti una ragionevole possibilità che la torre fosse fondata su terreno argilloso e quindi deformabile, causa del distacco della parete frontale dal retrostante corpo della torre. Contemporaneamente ci si voleva rendere conto della eventuale possibilità di scalzamento alla base indotto da una falda freatica in movimento, con conseguente lenta asportazione di materiale.

Le indagini eseguite, ossia sondaggi, STP e successive prove edometriche, hanno consentito di constatare che la torre era fondata

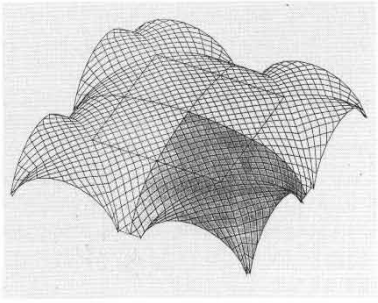
molto in profondità, su terreno effettivamente argilloso ma consolidato, e che la falda era profonda. Non potevano dunque essere le fondazioni l'origine dei dissesti della Torre.
L'attenzione diagnostica si è spostata allora sugli aspetti della geometria e dei materiali della struttura fuoriterra.
L'accurato rilievo in scala 1:20, a suo tempo eseguito su tutti i paramenti, ha posto in luce il cinematismo della struttura che evidenziava un *divaricarsi* delle murature andando dal basso all'alto, piuttosto che fenomeni di *scorrimento* mutuo delle fessure verticali. Questo fatto risultava coerente con la mancanza di cedimenti di fondazione. (Noto per inciso che tutte le principali fessure sulle pareti della torre attraversano le finestre esistenti, a riprova del fatto che una finestra è una fessura di grandi dimensioni e che, per converso, tutte le fessure sono finestre lunghe e strette).
Oltre alle pareti, apparivano molto preoccupanti anche le condizioni delle volte dovute alla perdita della geometria originaria, con avvallamenti e depressioni tali da far cadere alcuni mattoni sul pavimento sottostante, a causa della apertura dei giunti di malta. In alcune zone, fortunatamente limitate, la curvatura della volta era passata da concava a convessa con pericolo di crollo imminente.
L'aspetto più notevole era costituito tuttavia dalla presenza di un quadro fessurativo marcato, indice di una globale "depressione" delle volte indotta da carichi eccezionali su di esse gravanti oppure da cedimenti orizzontali delle imposte.
La copertura, oltre alle drammatiche lacune presenti nel manto, metteva anch'essa in evidenza il divaricamento delle pareti di appoggio come si rilevava dalla scompostezza delle capriate: il monaco si presentava infatti fuori piombo ed i puntoni avevano inclinazioni diverse.
In definitiva, l'accentuarsi delle fessure nella parte alta, la depressione delle volte causata dallo spostamento degli appoggi e le rotazioni delle capriate erano tutte circostanze concordi nel mettere in luce una forte apertura, quasi un divaricarsi, dell'edificio dovuta ad azioni che lo sollecitavano dall'interno verso l'esterno.
La conclusione ovvia portava ad ipotizzare una eccessiva e non contrastata spinta orizzontale esercitata sulle pareti dalle tre volte e dal tetto. Ma era difficile immaginare effetti tanto appariscenti in assenza di altre circostanze.
Le ulteriori indagini dovevano venire in soccorso oppure dovevano smentire questa ipotesi. L'indagine storica è stata di grande aiuto: si è potuto documentare che la torre, usata per scopi difensivi, aveva ospitato dei cannoni con relative pesanti munizioni.
La preziosa immagine inserita nella *Visita* dell'ing. Gambacorta del 1958 (a pag. 8 di questo fascicolo) illustra un piccolo ponte levatoio sul lato Nord. Questo ha dato certamente origine alla lunga fessura passante su tale lato che collega tra loro varie discontinuità strutturali: una profonda nicchia nel vano inferiore, una porta presente seppure tamponata al primo livello, la ulteriore nicchia usata per ospitare il braccio di leva del ponte levatoio al secondo livello e da ultimo la zona di appoggio spingente di una capriata nel sottotetto.
Aperture eseguite anche in tempi diversi hanno quindi indebolito la muratura che, seppure successivamente tamponata, non è stata in grado di ritornare alla continuità originale.
Ma neanche questo era sufficiente a giustificare un tale divaricamento della torre, tenen-

1.
Volta superiore a crociera: modello agli elementi finiti, non lineare. Linee di livello degli sforzi principali minimi e massimi all'intradosso.



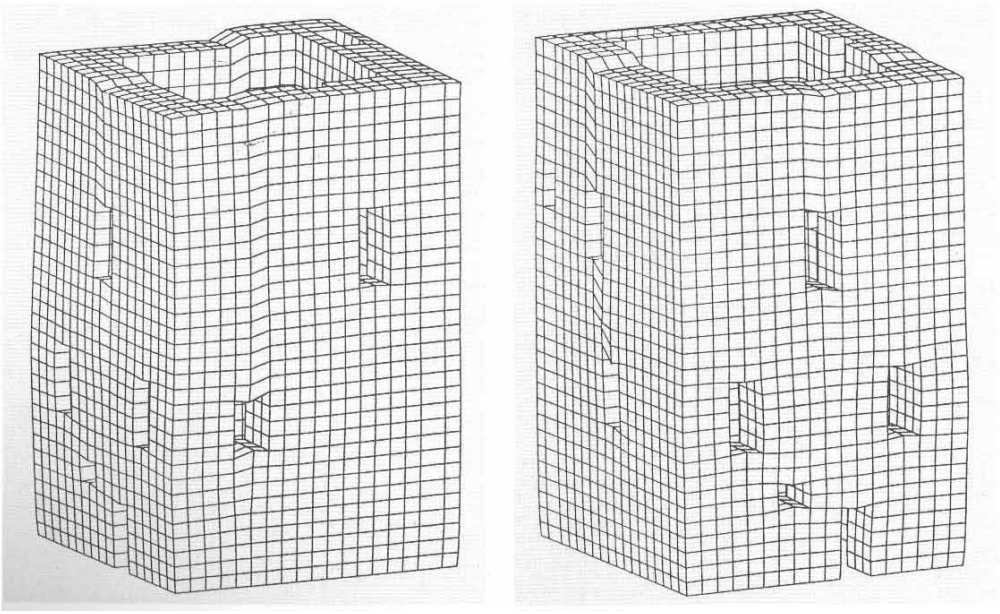


2.
Volta intermedia a padiglione: geometria del modello agli elementi finiti, bidimensionale.



do conto dello spessore notevole delle murature.
Le indagini si sono spinte allora ad analizzare le murature e soprattutto la loro tessitura interna.
Sono state eseguite dapprima numerose prove soniche, anche se con risultati poco significativi, con l'obiettivo di definire le zone di muratura tra loro omogenee. Sono state poi effettuate numerose carotature di piccolo diametro per controlli endoscopici e quattro prove con martinetti piatti nelle pareti, in punti significativi. Si voleva sapere se il paramento murario a vista era bene ammorsato alla parte interna, ed il risultato ottenuto è stato purtroppo negativo. Si voleva sapere se la parte interna fosse ben legata, e purtroppo ancora si è individuato un materiale composto di molta malta poco legata e di ciottoli tondi di grande diametro. Anche i martinetti piatti, realizzati con una certa fatica proprio a causa dei ciottoli interni, evidenziavano una muratura di caratteristiche non eccezionali.
Ovviamente una muratura di tal genere non è in grado di assorbire sforzi di trazione quali quelli generati dagli elementi voltati.
E' ben vero che in fase di costruzione erano state disposte a vari livelli alcune catene metalliche perimetrali, ma la loro funzione si era andata vanificando nel tempo per fenomeni corrosivi che avevano causato la caduta del capochiave.
In definitiva le quattro pareti della torre vengono sollecitate ad allontanarsi tra di loro dalla spinta delle volte, poco contrastate dalla scarsa resistenza a trazione delle murature a sacco e dalla mancanza di catene efficienti.
La situazione risulta aggravata da una ulteriore fortuita circostanza, vale a dire dal fatto che la volta intermedia è a padiglione, con due unghiature per lato e con pennacchi che agiscono esattamente nella mezzeria della parete. Questo fatto provoca una spinta localizzata della volta in direzione perpendicolare alla parete, applicata nel suo punto di mezzo.
Ciò induce un fenomeno di flessione, capace di provocare trazione in direzione orizzontale nelle fibre più esterne della muratura, a metà lato circa.
Una volta innescata la frattura a metà della parete, le due volte a crociera inferiore e superiore provvedono ad allargarla agendo con carichi di forte componente orizzontale, applicati prevalentemente sugli spigoli.
L'unico lato integro si presenta quello ad ovest, vale a dire lato pendio.
In effetti il maggiore spessore dovuto alla presenza di una scala interna, con la conseguente necessità di una più accurata tessitu-

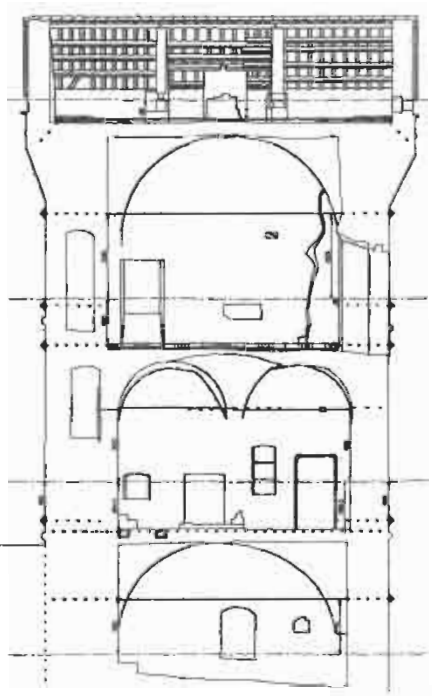
3.
Pareti perimetrali della Torre; modello spaziale agli elementi finiti. Andamento della deformata con presenza di fessure sui lati sud, est e nord.



ra, ed il fatto di trovarsi immersa nel terreno per quasi un terzo dell'altezza, a differenza degli altri lati, hanno certamente contribuito a preservarla da fessure.
Mi sono chiesto perché i lati nord e sud si presentassero più danneggiati del lato rivolto ad est, quello di rappresentanza. La risposta, oltre che alla minore percentuale di aperture presenti sul lato est ed alla sua migliore finitura, si può ricondurre alla costruzione del timpano superiore in muratura, realizzato in un periodo successivo alla costruzione, che ha agito quasi da tirante di contenimento. Una seconda ragione, anch'essa evidenziata nella fig. 8 che riproduce la situazione dopo i recenti interventi di consolidamento, è che la torre è stata addossata alla vicina casa colonica tramite un corpo di collegamento e tale fatto ha costituito un contrafforte che ha aiutato il lato est.

La modellazione numerica
Nel mondo della statica e della diagnosi del degrado strutturale è necessario avere un modello ideale di comportamento dell'edificio al quale riferirsi per valutare l'effetto di eventi anomali.
Nel caso della Torre di Martinsicuro abbiamo adottato un modello tridimensionale agli elementi finiti (con il programma ABAQUS), formulato in collaborazione con gli ingegneri G. Mirabella e A. Castiglioni. Tale metodo, molto generale, consente di simulare strutture anche complesse caratterizzate da variazioni di geometria, materiali e carichi, sulle quali effettuare "esperimenti" numerici, introducendo discontinuità (ovvero fessure), degrado del materiale (modifica delle rigidezze), distorsioni impresse (ovvero cedimenti dei vincoli).
Il modello qui utilizzato ha cercato di ripercorrere le fasi storiche della vita dell'edificio, dalla data della sua costruzione ad oggi passando attraverso la fase del degrado fino alla fase finale del consolidamento.
In definitiva l'esperimento numerico consiste nell'imporre alcune cause di perturbazione della situazione statica (cedimenti di fondazione, sovraccarichi nelle volte, degrado localizzato della muratura o degli elementi di copertura) e nel confrontarne gli *effetti numerici* con quelli che sono gli *effetti rilevati*, vale a dire visibili sulla struttura. Se esiste una buona concordanza tra di loro allora è ragionevole pensare che le cause da noi introdotte nel modello siano quelle effettivamente occorse.
Una volta individuate le cause, il medesimo modello può aiutare anche a cercare le soluzioni, con la medesima logica.
Si propone infatti un rimedio e se ne studiano gli effetti in termini di diminuzione degli spostamenti e di riduzione dello stato tensionale. Se questi fatti di verificano allora il rimedio esaminato, tra i vari proponibili, è considerato efficace. Si tratta poi di individuare il migliore, vuoi per efficacia, vuoi per costo, vuoi per invasività.
Nel caso in oggetto si sono analizzate dapprima separatamente le volte e si sono valutate le azioni trasmesse alla muratura periferica. Il modello è stato sviluppato in regime di non linearità nel tentativo di cogliere la presenza e gli effetti delle grandi fessure presenti sulle volte (figg. 1 e 2).
Sono stati inoltre modificati in vari modi i vincoli tra volta e imposta perché da questi dipendono in modo sensibile gli andamenti delle reazioni vincolari, vale a dire le azioni trasmesse dalla volta alle murature perimetrali.
Successivamente si sono analizzate le pareti esterne, sia in fase non fessurata che fessurata. La prima è servita a verificare che ap-

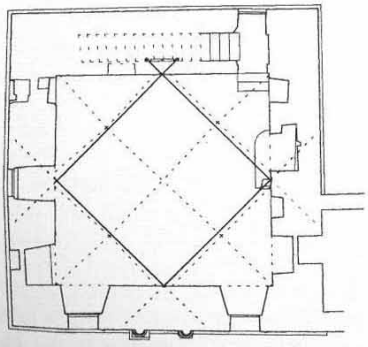
4.
Sezione est-ovest della Torre con indicazione dei tiranti di cerchiatura perimetrale.



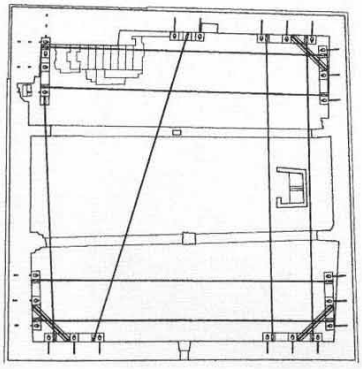
plicando le spinte delle volte, le murature entrassero in forte trazione proprio nei punti in cui poi si sono fessurate.
La seconda fase è servita a valutare che, applicando ancora la spinta delle volte, l'ampiezza e l'andamento delle aperture rispecchiassero fedelmente quelle presenti nella realtà (fig. 3).
I risultati di tali analisi, condotte per tentativi ripetuti e caparbi, sono stati positivi ed hanno consentito di attribuire al modello un sufficiente grado di attendibilità. E' stato così possibile adottare il medesimo modello per la successiva valutazione delle proposte terapeutiche. Il sufficiente riscontro con la misura sperimentale dello stato tensionale ottenuto in punti significativi mediante prove con i martinetti piatti è stato un ulteriore elemento a favore della affidabilità del modello.

Le proposte progettuali
Nel lontano 1986 la torre era stata messa in sicurezza mediante una puntellazione interna che interessava le tre volte danneggiate, con puntelli verticali "forzati" e con centine di supporto dell'intradosso. Esternamente si era provveduto ad una provvisoria protezione della copertura con lamiera ondulata e ad una cerchiatura perimetrale della torre realizzata con profili a C, debolmente forzati, posti a due diversi livelli.
Negli anni tra il 1993 ed il 1996 si è realizzato l'intervento di consolidamento vero e proprio. Si è iniziato realizzando una cerchiatura perimetrale a più livelli costituita da barre di acciaio inox disposte in parte sul paramento esterno della muratura, in parte all'interno, in aderenza alle pareti, al livello di alcuni marcapiani o a livello dei pavimenti (fig. 4).
Tali catene avevano il prevalente scopo di contenere la spinta esercitata dalle volte a crociera, ossia quella superiore e quella inferiore, sostituendo o integrando le catene poste all'origine.
Per contrastare la spinta della volta intermedia, quella con i pennacchi spingenti a metà parete, si è fatto ricorso a tiranti, sempre in acciaio inox, disposti a 45° rispetto alle pareti, vale a dire ammorsati nelle murature a livello dei peducci (fig. 5). Tiranti inox variamente direzionati, in funzione degli ingombri presenti, sono stati disposti nel sottotetto con lo scopo di rendere più rigido nel suo piano il diaframma orizzontale presente a quel livello (fig.6).
L'operazione di posa in opera e successiva tesatura dei vari tiranti è stata realizzata dopo aver riempito le fessure con malta dalle caratteristiche simili a quella esistente, impedendo a queste di restringersi.
Il criterio adottato, in definitiva, è quello di "congelare" la situazione geometrica esistente, accettando alcune anomalie, che sono divenute normalità per la struttura.
La volta inferiore risultava sufficientemente resistente ai carichi accidentali legati al nuovo utilizzo pubblico della struttura. Altrettan-

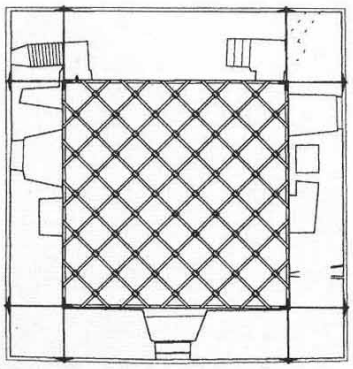
5.
Sezione orizzontale all'intradosso della volta a padiglione con posizione dei tiranti di contrasto, a 45°, a contenimento delle spinte orizzontali applicate sui lati.



6.
Sezione orizzontale a livello del sottotetto con posizione dei tiranti e delle unghiature di ancoraggio.



7.
Sezione orizzontale all'estradosso della volta a padiglione, con grigliato in acciaio di sostegno dei carichi accidentali e funzione di collegamento tra le pareti.

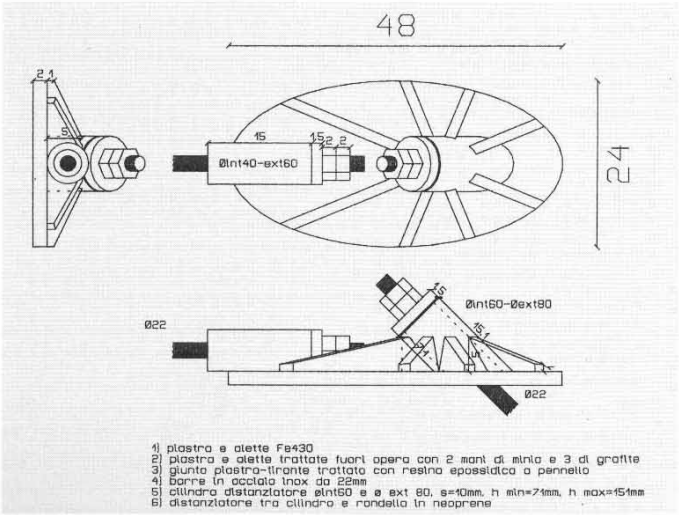


to la volta superiore, danneggiata ma non aperta al pubblico.
La volta intermedia, molto danneggiata e destinata peraltro ad accogliere numerosi visitatori, meritava un trattamento particolare. Tra le tante ipotesi progettuali esaminate si è optato per la realizzazione di un graticcio a travi incrociate a 45° rispetto alle pareti d'ambito. Tale graticcio è indipendente e staccato dalla sottostante volta e permette di trasferire direttamente i carichi alle pareti. L'orditura a 45° è risultata la più conveniente dal punto di vista dei momenti flettenti sulle travi e quindi del loro dimensionamento ottimale. Tale orditura riflette inoltre l'andamento dei sottostanti cavi inox che contrastano la volta a padiglione.
Il graticcio appoggia su un profilo ad L che interessa tutto il perimetro del locale e che è dimensionato per funzionare da catena perimetrale (fig. 7).
A livello di particolari costruttivi il graticcio è in grado di contenere piastre in legno di finitura e pavimentazione, facilmente rimovibili. La volta intermedia in muratura è stata così sgravata dal compito di sopportare i carichi accidentali e un intervento minimo di risigillatura dei giunti ha permesso di ripristinarne una sufficiente sicurezza nei confronti del peso proprio.
Per quanto riguarda le estremità delle catene, esse terminano esternamente con particolari capochiave di forma ellittica su cui sono presenti nervature radiali (fig. 9).
Tali capochiave, poco deformabili, sono chiamati in taluni casi ad accogliere due diversi tiranti.
Riguardo alle murature sono stati eseguiti interventi di rinforzo locale, con risarcimento dei voltini soprafinestra che in vari casi erano crollati, con tamponamento di nicchie e chiusura di fessure. In un caso si è dovuto porre riparo agli effetti di un piccolo crollo avvenuto durante i lavori e relativo al sopraporta di una apertura stamponata. In tutti questi casi si è approfittato del nuovo apporto di muratura per aggiungere limitati elementi metallici, costituiti da barre in acciaio zincato a caldo, a rinforzo delle pareti murarie ed a collegamento tra le parti aggiunte e quelle esistenti.
Esternamente è stato realizzato un drenaggio in zona fondazione, per evitare i rischi di un futuro sollevamento locale della falda.
La copertura, oltre ad una accurata ricorsa del tetto, è stata consolidata introducendo due nuove capriate lignee a fianco di quelle esistenti, con lo scopo di diminuirne le sollecitazioni di esercizio.

Le difficoltà e le modifiche
Al primo approccio la struttura presentava una situazione statica talmente compromessa, soprattutto per quanto riguardava la volta intermedia e le pareti sud e nord, da fare nascere dubbi sulla effettiva possibilità di un recupero. Il monumento, occorre sottolinearlo, si trova in una zona soggetta a fenomeni sismici, circostanza che rende non solo opportuna ma necessaria la mutua collaborazione tra tutti gli elementi.
Respinta la tentazione di un rifacimento delle murature e quella dell'impiego diffuso di iniezioni leganti, sotto la benevola ma pressante sollecitazione della direzione lavori si è optato

8.
La Torre, smontati i ponteggi, mostra i nuovi capichiave e le cerchiature in acciaio.

per interventi locali e mirati, realizzati con materiali e tecniche distinte ma prossime a quelle originarie.
Unica concessione l'uso di acciaio inox e di acciaio zincato per realizzare i tiranti e le cerchiature.
Qualche difficoltà è derivata dalla particolare composizione del conglomerato a ciottoli, compreso tra i paramenti in mattoni: difficoltà ad ottenere un buon ammorsamento tra la muratura originaria e quella aggiunta e soprattutto difficoltà nel realizzare quelle pur contenute perforazioni, perpendicolari alle pareti, necessarie al passaggio dei tiranti perimetrali. La presenza di una malta di debole resistenza consentiva infatti ai ciottoli di ruotare assieme alla asta di perforazione, quasi creando una gigantesca fresa abrasiva.
Qualche ulteriore difficoltà è sorta nel tentativo di raccordare il grigliato metallico di fig. 7 al livello determinato dall'ultimo gradino della scala ed al livello della porta finestra presente sulla facciata principale. L'orditura diagonale adottata nel grigliato ha consentito tuttavia di creare un gradino di raccordo, arretrato, senza perdere resistenza strutturale.
Il cantiere di Martinsicuro si è sviluppato in tempi molto lunghi per obiettive difficoltà tecniche e di gestione del cantiere. Questo fatto, negativo in linea di principio, ha peraltro consentito ripensamenti in corso d'opera, confronti tra professionisti e verifiche della bontà delle soluzioni parziali proposte, ciò che a consuntivo si è rivelato positivo.

Conclusioni
Fin dalle prime fasi del lavoro si è instaurata una stretta collaborazione con il progettista architettonico, che è proseguita con fatica ma con buoni risultati (almeno così ci è parso) durante tutto lo svolgersi del cantiere. L'obiettivo era di non dare nulla per scontato nella ricerca di soluzioni *puntuali* ai fenomeni di degrado strutturale evidenziati. Come sempre in questi casi la procedura è risultata di tipo iterativo, con frequenti proposte e controproposte per approssimarsi alla soluzione più semplice, più efficace, più riconoscibile e, perché no, più piacevole a vedersi.
Il molto tempo trascorso tra le varie fasi esecutive, seppure stressante per chi è permeato di mentalità efficientista, ha giocato un ruolo indubitabilmente positivo consentendo pause di riflessione che non sono usuali nel cantiere moderno.
Gli interventi effettuati hanno riportato la struttura ad una situazione di sicurezza del tutto accettabile, coniugando tecnologie tradizionali a metodi e materiali di oggi.
Notevole è risultato il ruolo della modellazione numerica che ha fornito suggerimenti e verifiche a supporto della intuizione progettuale, soprattutto nella analisi delle volte e dei loro effetti spingenti, tema che purtroppo in questi ultimi decenni è stato trascurato.
Da ultimo sottolineo la soddisfazione dello strutturista nel constatare come, coerentemente con la limitatezza dei finanziamenti, siano state rispettate le priorità di intervento in base alla gerarchia del rischio, il che ha comportato dapprima l'intervento provvisorio di salvaguardia, poi gli interventi globali sul complesso, poi gli interventi locali sugli elementi ed i materiali, e da ultimo (non ancora completate, anche se il desiderio di anticipare tale fase era grande) le finiture.

9.
Dettaglio della piastra di ancoraggio dei tiranti perimetrali, nervata, in acciaio zincato.