

TEMPIO DI LUXOR / 1



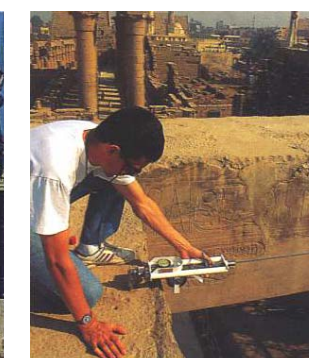
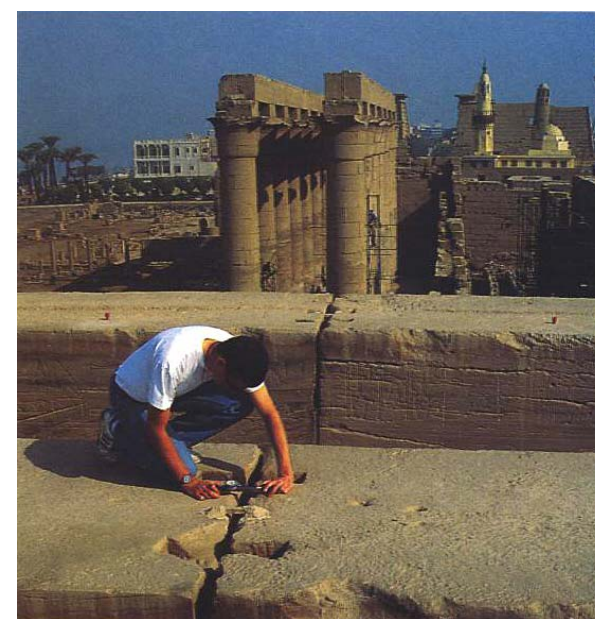
La costruzione del complesso monumentale di Luxor inizia per volere del faraone Amenofi III (1427 - 1392 a.C.) e viene completata da Ramses II (1301 - 1234 a.C.). Fanno parte del complesso monumentale: il cortile di Amenofi III; il cortile di Ramses II, all'interno del quale si trovano 11 statue colossali del faraone; una sala trasversale; la sala delle Offerte; la sala della Divina Epifania; 68 sfingi collocate lungo il viale che collega il complesso di Luxor con quello di Karnak. Davanti all'ingresso principale della sala di Amenofi III erano collocati due obelischi: ne resta uno, perché quello di destra è stato donato dal sultano Mohammed Ali a Filippo Egalité ed è posto oggi al centro di Place de la Concorde, a Parigi.

Il complesso ha conservato soltanto in parte l'aspetto originario: si notano infatti le vestigia di luoghi di culto romani, cristiani e islamici. Inoltre nell'area orientale sono visibili i resti di un accampamento militare romano permanente, costruito prelevando il materiale da costruzione dal tempio. Lo stesso nome di Luxor deriva - attraverso l'arabo *al qasr* - dal latino *castrum*.

L'assetto statico del complesso monumentale desta qualche preoccupazione. In particolare 22 colonne del cortile di Amenofi III mostrano evidenti segni di instabilità, dovuta ai cedimenti del terreno di fondazione. Numerose colonne infatti presentano sensibili scostamenti dalla verticale e la trabeazione sovrastante è soggetta a dislocazioni. Si ha ragione di ritenere che i cedimenti del terreno si siano manifestati già in antico, ma che il gradiente dei fenomeni di cedimento sia aumentato

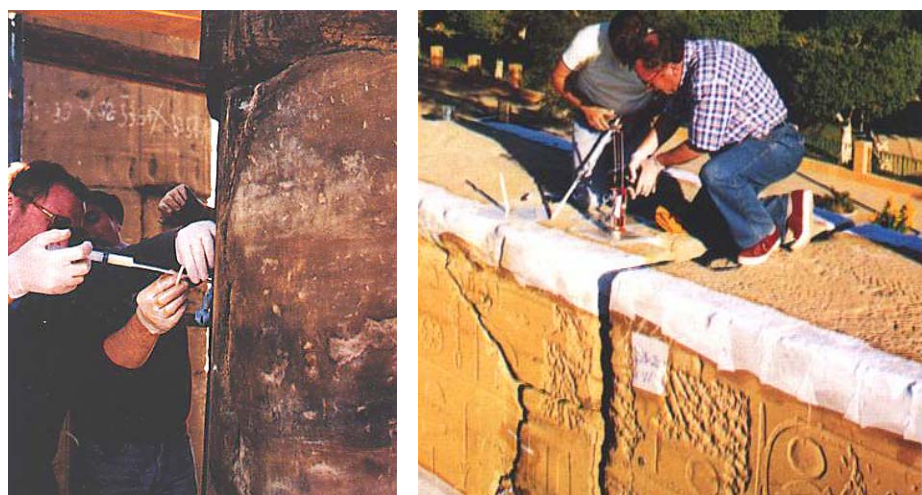


In alto, colonne del cortile di Amenofi III nella fase di smontaggio. Qui sopra, esempio di degrado della pietra del tempio di Luxor.



In alto, installazione di strumentazione per il controllo degli spostamenti relativi delle strutture durante il restauro. A sinistra, controllo dell'apertura dei giunti mediante estensimetro meccanico rimovibile. Qui sopra, misura degli spostamenti relativi con estensimetro rimovibile a lunga base.

TEMPIO DI LUXOR / 2



Qui sopra, preconsolidamento delle colonne prima dello smontaggio: iniezioni di incollaggio mediante resina epossidica.

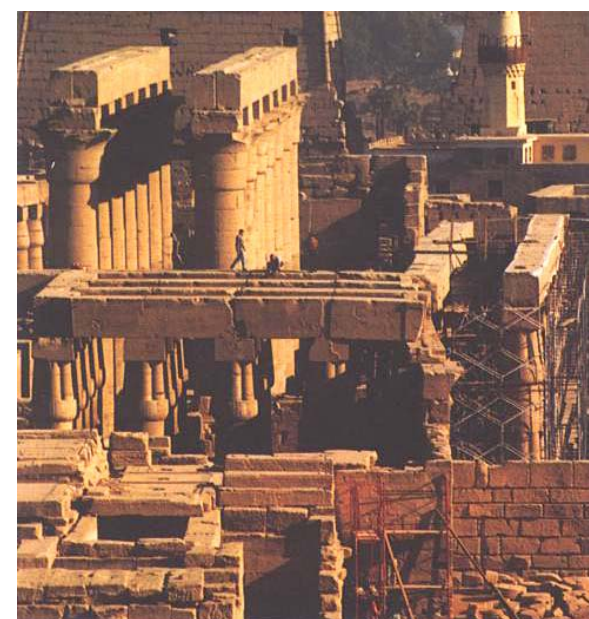
A destra, preconsolidamento degli architravi prima dello smontaggio: inserimento e cementazione di barre di ancoraggio in vetroresina.

in tempi recenti. Il che è con ogni evidenza dovuto al recente abbassamento del livello del Nilo, che ha comportato una diminuzione del livello di falda.

Il problema principale è oggi capire il meccanismo del degrado strutturale ed arrestarlo. L'Ismes è stata incaricata di eseguire, in collaborazione con la società egiziana Orascom, un insieme di interventi di restauro che riguardano, per il momento, le parti del colonnato più compromesse. Per facilitare il consolidamento delle fondazioni, intere sezioni del colonnato devono essere smontate e poi rimontate. Non solo le fondazioni, ma anche la pietra delle costruzioni in elevazione deve essere consolidata: così gli architravi, i capitelli e i rocchi delle colonne sono pre-consolidati in sito, prima dello smontaggio, quindi consolidati compiutamente e definitivamente a terra. Per determinare la tecnica di consolidamento più idonea si sono prelevati campioni dei litotipi, sottoposti quindi ad analisi chimiche e fisiche, prima e dopo il consolidamento.

Per il controllo dei movimenti strutturali del colonnato nelle sezioni non interessate direttamente dalle operazioni di restauro è stato installato un sistema di sorveglianza e controllo.

L'Ismes ha anche garantito l'assistenza tecnica e la supervisione in sito dei lavori di consolidamento e smontaggio.



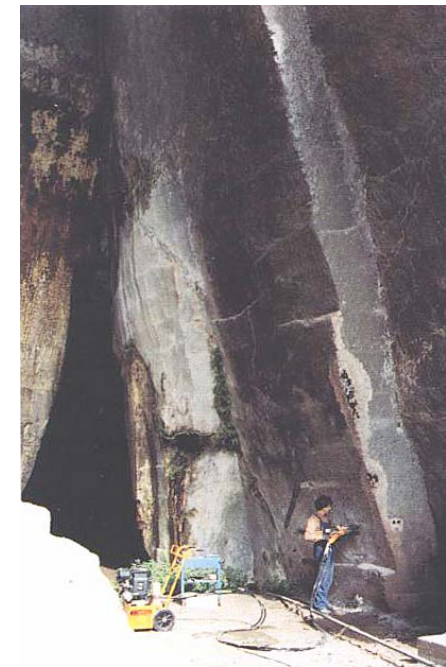
In senso orario a partire dalla foto in alto a sinistra: smontaggio degli architravi, telaio di contenimento per lo smontaggio dei rocchi delle colonne, le due file di colonne del cortile di Amenofi III interessate dall'intervento di restauro e vista d'insieme del cortile.



LATOMIE DI SIRACUSA



Misura dello stato tensionale in uno dei pilastri centrali della grotta dei Cordari.
Nella pagina a fronte: a sinistra, misura dello stato tensionale sulla struttura perimetrale della grotta dei Cordari.
A destra, planimetria della grotta dei Cordari. E' possibile leggere nella pianta l'ubicazione delle prove e i valori di sollecitazione misurati.



All'interno dell'area archeologica di Siracusa, a sud delle balze del colle Temenite, si trova la Latomia del Paradiso, una vastissima cava di calcare, profonda 20-30 m. Con le vicine latomie di Intagliatella e S. Venera, questa cava testimonia l'intensa attività edilizia della città greca, che occupava un'estensione molto maggiore della città attuale. Nella latomia del Paradiso si aprono l'Orecchio di Dionisio, una grotta artificiale lunga 65 m e alta 23 m, e la grotta dei Cordari, sorretta da esili pilastri.

Lo stato di sforzo e le caratteristiche di deformabilità della roccia della grotta dei Cordari sono state oggetto di uno studio sperimentale, eseguito dall'Ismes su incarico della Regione Siciliana - Ispettorato Regio-

nale Tecnico (Palermo). Le indagini, eseguite utilizzando la tecnica dei martinetti piatti, hanno evidenziato la distribuzione della sollecitazione nelle strutture verticali di sostegno della grotta: lo sforzo cui sono assoggettati i due grossi pilastri perimetrali raggiunge i 6 MPa - mentre quello dei pilastri centrali non supera il valore di 1,4 MPa. La volta della grotta è dunque sostenuta dai grossi pilastri che la delimitano, essendo pressoché nulla la collaborazione statica dei due pilastri centrali.

Nel corso delle prove si è anche determinato il modulo di deformabilità secante della roccia: circa 15000 MPa, in tutti i quattro pilastri. Questo valore è stato determinato nell'intervallo di sollecitazione 0-6 MPa.

GROTTE DI CATULLO, Sirmione



Qui sopra, misura dello stato tensionale e determinazione delle caratteristiche di deformabilità di una struttura muraria nel Campo delle Noci.

In alto a destra, pianta della villa romana.

Nella pagina a fronte, trasporto della vibrodina per le prove di vibrazione forzata del Grande Pilone e, nella foto piccola, sismometri.



Con la denominazione "Grotte di Catullo" si identificano i resti di una villa romana del I secolo d.C. compresa in un complesso archeologico esteso oltre due ettari sulla punta della penisola di Sirmione.

Le strutture murarie della villa sono state recentemente oggetto di analisi finalizzate alla valutazione del rischio sismico. Si sono perciò individuate due strutture, rappresentative della villa, da assoggettare a eccitazione dinamica forzata di bassa intensità. Le due strutture sono diverse per stato di conservazione e per qualità degli interventi di ripristino o consolidamento, cui sono state sottoposte nel passato. Perché le strutture non subissero alterazioni, sono state sollecitate alla base, ancorando le vibrodine utilizzate per imprimere la sollecitazione dinamica (si veda a pag. 40) alla roccia di fondazione, invece che alle strutture stesse.

La prima struttura, nota come il "Grande Pilone", è rappresentativa di elementi murari non collegati a strutture adiacenti. È costituita da una spalla in origine contigua a una muratura ortogonale di controvento, ma ora isolata. A causa della sua precaria stabilità (manifestata da un notevole fuori piombo), già al tempo dei primi scavi



torsionale, è dovuto allo sbandamento trasversale indotto da una porzione d'arco in sommità; il quarto e quinto modo di vibrare sono meno significativi ai fini della valutazione di rischio sismico.

Più complesso il comportamento modale delle strutture murarie del Campo delle Noci. La frequenza propria della parete in direzione nord è inferiore a quella ortogonale, coerentemente con le connessioni in quota di quest'ultima con il terrapieno del Prato degli Ulivi.

L'indagine ha posto in evidenza il fatto che nelle strutture non connesse in quota si manifestano sollecitazioni superiori a quelle suggerite come ammissibili dalle normative in mancanza di dati specifici sulla resistenza dei materiali. Una valutazione più precisa della vulnerabilità sismica sarà possibile dopo la caratterizzazione meccanica della muratura (prove con martinetti piatti).

e restauri a cura della Soprintendenza della Lombardia (1939-40), si ritenne opportuno installare una fascia metallica di incravattamento collegata a un tirante ancorato al suolo. Per lo studio sono stati utilizzati 20 sismometri disposti a diversa quota in modo da valutare sia le forme modali sia le forze di inerzia connesse con il moto dell'opera.

La seconda struttura è il complesso del "Campo delle Noci", che presenta una configurazione di elementi ben conservati e ben connessi, non lontana dalle condizioni originarie. Per lo studio di questa seconda struttura è stata installata una rete di 39 sismometri, disposti parte in sommità, in modo da coprire l'intero sviluppo planimetrico, parte a diverse quote di un setto murario.

L'esame delle funzioni di trasferimento registrate durante le prove ha permesso di determinare i parametri modali dei modi di vibrare nel campo di frequenze utilizzato. In particolare l'analisi dei risultati ha evidenziato cinque modi di vibrare del Grande Pilone: i primi due corrispondono a flessioni nei due piani parallelo e normale a quello di giacitura, prive di inversioni di segno e quindi tipiche del primo modo di vibrare di strutture snelle, vincolate a mensola;

un terzo modo, di natura



TEMPIO DI ROMOLO, Roma

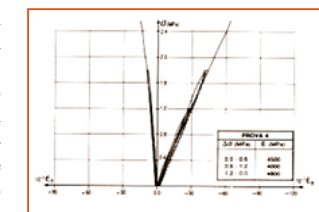
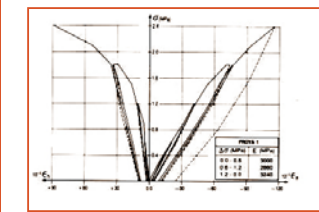
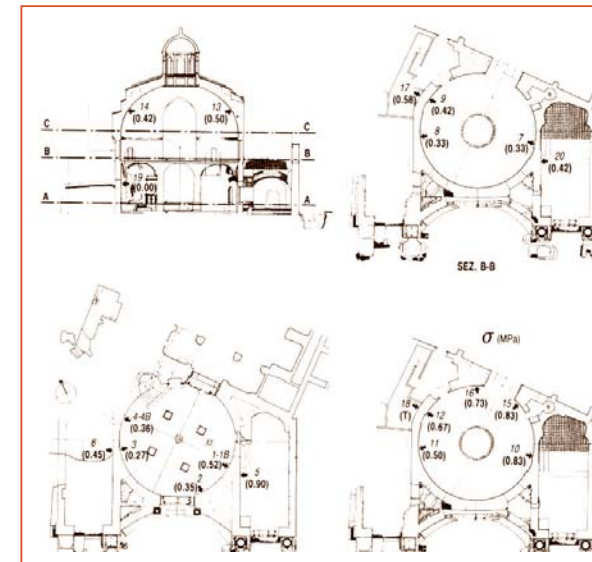


Tempio di Romolo fotografato dal lato prospiciente la via Sacra: si noti la lanterna sovrastante la cupola, aggiunta in epoca barocca.

Il tempio di Romolo, edificato nel 309 d.C., fa parte del complesso di edifici monumentali realizzati sotto Massenzio lungo la via Sacra. Dell'edificio originario, costituito da un tamburo cilindrico sormontato da una cupola emisferica e affiancato da due ali laterali, avanzano oggi il tamburo, la cupola e alcuni resti della facciata.

In epoca barocca il tempio fu modificato con l'aggiunta di un piano intermedio interno e di una lanterna in sommità della cupola. L'edificio ha subito nei secoli numerosi interventi, tanto che la cupola si trova ormai senza più contrasti laterali, in seguito agli scavi eseguiti per riportare il piano del foro al livello della pavimentazione in epoca repubblicana. Attualmente l'edificio è interessato da un insieme di lesioni prevalentemente verticali, dalla sommità della cupola fino a terra.

Per lo studio approfondito della stabilità di questo monumento, la Soprintendenza Archeologica di Roma ha promosso una campagna di indagini comprendenti la caratterizzazione della muratura mediante la tecnica dei martinetti piatti e la caratterizzazione dinamica mediante



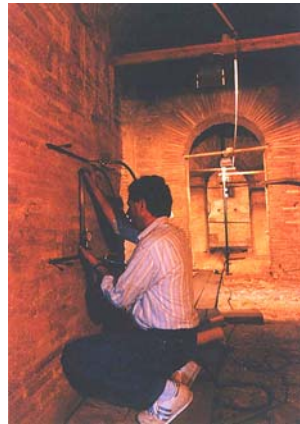
vibrazione forzata. I risultati delle indagini, eseguite dall'Ismes in collaborazione con l'Università di Firenze, sono stati quindi utilizzati per mettere a punto un modello agli elementi finiti.

Le indagini con martinetti piatti hanno consentito di determinare lo stato di sollecitazione della muratura e le sue caratteristiche di deformabilità, alla base del monumento, al di sopra del piano intermedio, e all'imposta della cupola. Risulta dalle prove che la muratura è caricata eccentricamente, in misura sempre maggiore dal basso verso l'alto, tanto che nell'estradosso della cupola sono presenti stati locali di trazione, in prossimità dell'imposta.

La modellazione numerica si è svolta in due fasi. Nella prima si è ipotizzato un comportamento lineare della struttura, tenendo conto delle lesioni esistenti. In una seconda fase il modello è stato completato introducendo i parametri acquisiti mediante le indagini sperimentali. I valori di sollecitazione calcolati con il modello matematico sono risultati in buon accordo con quelli misurati in sito con la tecnica dei martinetti piatti.

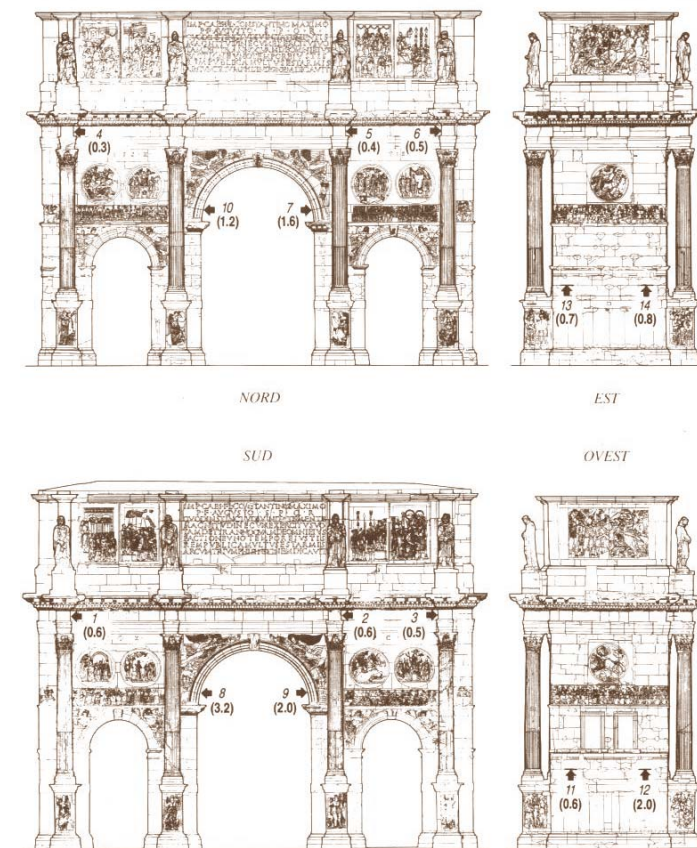
Determinazione dello stato di sollecitazione della muratura del tempio di Romolo. Nel riquadro in alto a sinistra sono indicati i punti di prova e, fra parentesi, i valori di sollecitazione. Qui sopra, esecuzione della prova e risultati della determinazione delle caratteristiche di deformabilità nei punti 1B e 4B della sezione A-A.

ARCO DI COSTANTINO, Roma

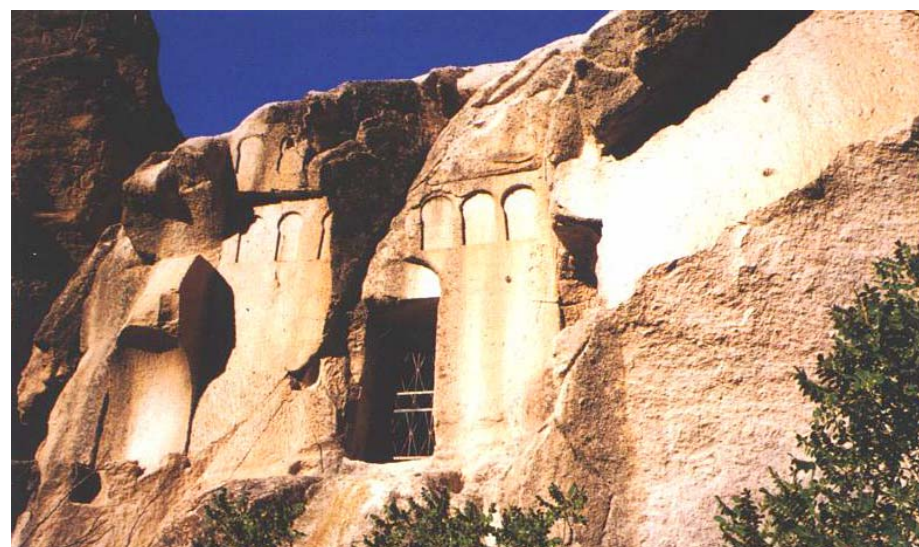


Qui sopra, determinazione delle caratteristiche di deformabilità della muratura interna dell'Arco di Costantino. Nella pagina a fronte, rilievo geometrico (per cortesia della Soprintendenza Archeologica di Roma): sono riportati, fra parentesi, i valori di sollecitazione determinati mediante prove con martinetto singolo (unità di misura: MPa).

L'arco di Costantino è stato edificato nel 315, nell'area del Colosseo, in prossimità dell'inizio della via Sacra, dove sorgeva la *meta sudans*, a memoria della vittoria del primo imperatore cristiano sul rivale Massenzio. Alto 25 m, l'arco è realizzato prevalentemente in blocchi di marmo, oltre che in materiale conglomerato e laterizio, con paramento in marmo. L'arco è ornato da numerose sculture prelevate da monumenti di epoche precedenti (dell'età di Traiano, di Adriano e di Marco Aurelio), nonché da bassorilievi illustranti le imprese di Costantino. Nel Medioevo fu annesso dai monaci di S. Gregorio al castello di Frangipane; successivamente, in epoca rinascimentale, fu più volte restaurato. Un intervento di restauro degno di menzione è quello del 1773. Lo stato di conservazione dell'arco non desta particolari preoccupazioni, salvo due sistemi di fessure: il primo interessa il vano interno e i piedritti del fornice centrale, il secondo la trabeazione sovrastante le colonne e le colonne stesse. Per risalire alle cause di questo quadro fessurativo e per verificare lo stato tensio-deformativo delle strutture dell'arco l'Ismae, in collaborazione con la Soprintendenza Archeologica di Roma e l'università di Firenze, ha eseguito un insieme di prove con la tecnica dei martinetti piatti. Tutte le indagini sono state facilitate da un rilievo geometrico riprodotto tutti i particolari geometrici e architettonici. Sono state eseguite 20 prove con la tecnica del martinetto singolo, nel perimetro interno ed esterno della muratura, e due prove con la tecnica dei martinetti paralleli, all'interno della muratura. I risultati delle indagini hanno confermato e affinato lo stato delle conoscenze precedenti, basate su calcoli sviluppati da ragionevoli ipotesi di lavoro. Per l'analisi tensio-deformativa della struttura si è fatto riferimento a un modello numerico agli elementi finiti, nel quale si sono introdotti i valori del modulo di Young caratteristici dei materiali costituenti l'arco, determinati mediante le prove con doppio martinetto. In particolare l'indagine sperimentale ha dimostrato che gli sforzi medi nella struttura non sono tali da destare preoccupazione e che le fessure sono determinate da una concentrazione locale di sforzo. Altre concentrazioni di sforzo sono state rilevate nell'angolo sud-ovest, alla base dell'arco. Per caratterizzare la struttura sotto il profilo dinamico, si sono rilevate le sollecitazioni di vibrazione, dovute al traffico urbano e al passaggio dei convogli ferroviari metropolitani.



CHIESE RUPESTRI, Cappadocia



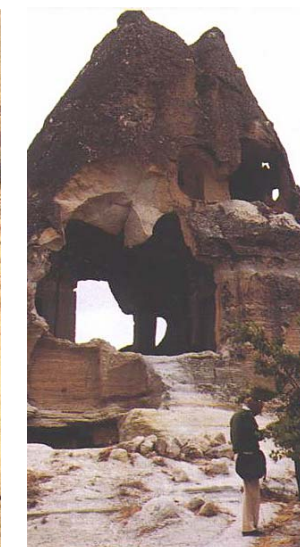
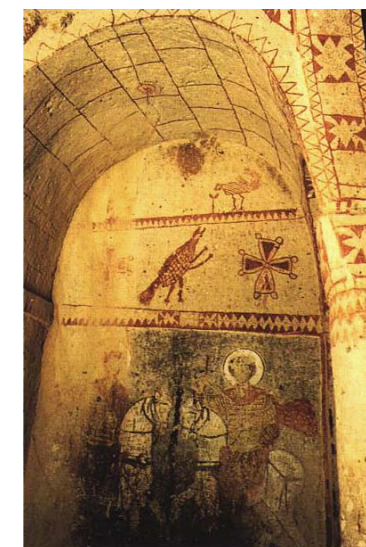
Le Chiese e i Monasteri rupestri della Cappadocia, costruiti tra il VII e il XIII secolo, sono state oggetto nel 1986 di una missione organizzata dall'ICCROM. In particolare sono state valutate le condizioni statiche di quattro Chiese della valle di Göreme: Elmali, S. Barbara, El Nazar, Meryemana.

Il problema di queste architetture nasce dall'instabilità di cunei, guglie, lastre e blocchi di pietra che l'azione erosiva ambientale ha isolato progressivamente all'interno dell'ammasso roccioso. Le chiese presentano infatti un insieme di massi separati da fessure e discontinuità (Meryemana Kilise). Il danneggiamento degli strati di roccia più tenera è chiaramente visibile nel livello intermedio di El Nazar, come pure nelle volte di Elmali e S. Barbara.

L'azione erosiva delle escursioni cicliche termoigrometriche si somma all'azione meccanica più localizzata dell'acqua piovana che, colando lungo le discontinuità della roccia, diminuisce l'aderenza tra blocchi contrapposti. L'acqua piovana inoltre danneggia in modo irreparabile i preziosi cicli pittorici che rivestono le pareti delle Chiese.

Per lo studio delle condizioni statiche delle masse rocciose delimitanti gli spazi di culto sono state programmate le seguenti attività:

- rilievo geologico e descrizione litologica della pietra



- rilievo strutturale e individuazione della discontinuità che possono dar luogo a fenomeni di instabilità
- analisi di stabilità e progetto degli interventi di consolidamento
- installazione di un sistema di monitoraggio per lo studio del comportamento statico delle strutture.

Per il rilievo dei movimenti di apertura-chiusura delle fessure e di abbassamento si sono utilizzati comparatori rimovibili. Tutte le indagini sono state finalizzate alla progettazione del restauro e alla definizione della priorità di intervento.

L'analisi delle condizioni statiche ha messo in luce la necessità di un consolidamento immediato delle chiese della valle di Göreme e l'opportunità di attivare una serie di progetti su piccola scala, ciascuno inerente una particolare situazione. Infatti, nonostante la coincidenza delle cause di dissesto, non è possibile applicare un unico schema generale di consolidamento. Le difficili condizioni di accesso alle Chiese pongono problemi nell'utilizzo dell'attrezzatura di prova e di intervento, che richiedono di essere risolti caso per caso.

Nella pagina a fronte, in alto, Chiesa di Elmali, vista dal lato che presenta maggiori problemi di instabilità: parte delle strutture di accesso sono crollate.

Ancora nella pagina a fronte, in basso, interno della Chiesa di Meryemana. La Chiesa è ubicata sul ciglio di una parete rocciosa instabile.

Qui sopra, a sinistra, pittura nella Chiesa di S. Barbara danneggiata dalle infiltrazioni d'acqua.

A destra, Chiesa di El Nazar: le superficie di rottura in colore chiaro testimoniano i crolli avvenuti recentemente.

COMPLESSO MONUMENTALE DI S. FRUTTUOSO, *Camogli*

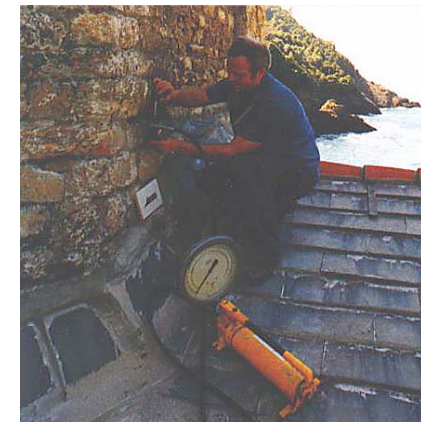


Il complesso monumentale di S. Fruttuoso nella Baia di Capodi-monte, Camogli.

Il complesso abbaziale di S. Fruttuoso si sviluppa intorno alla chiesa e al chiostro, costruiti tra la fine del X secolo e l'inizio dell'XI, su un precedente impianto monumentale. Successivamente furono edificati l'abbazia e il sepolcreto dei Doria (fine del XII secolo). La torre Doria fu innalzata in epoca posteriore (1562).

Nel periodo dal XVI al XIX secolo il complesso abbaziale fu più volte restaurato e adattato a nuove destinazioni d'uso. Notevoli sono state le opere di restauro eseguite dopo l'alluvione del 1915, quando la facciata e la prima campata della chiesa furono completamente distrutte. Nel periodo dal 1933 al 1958 si è proceduto a una complessa opera di ripristino, consistente nel metter in luce le strutture murarie originali. Alla fine degli anni '80 l'Isma è stata incaricata dal FAI (Fondo per l'Ambiente Italiano) di fornire una valutazione dello stato tensio-deformativo di alcune strutture del complesso, e di caratterizzare le malte sia della muratura sia dell'intonaco.

Per la caratterizzazione dello stato tensio-deformativo delle strutture sono state eseguite prove con la tecnica dei martinetti piatti, alle quali ha fatto seguito l'installazione di strumentazione di controllo.

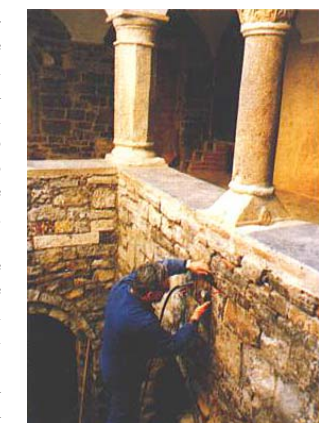


Le prove con martinetto piatto sono state: 18 nella muratura perimetrale e negli archi che sostengono la cupola della chiesa, 8 nella torre nolare (campanaria), 21 negli archi in muratura del chiostro, 8 nella torre Doria, 7 nell'abbazia. Le prove sono state eseguite con martinetti di varie dimensioni e spessore, in funzione dello spessore sia della muratura, sia dei giunti di malta, entro i quali i martinetti dovevano essere inseriti. Per le prove nelle imposte delle arcate che sostengono l'abbazia, dove lo spessore dei corsi di malta è minore che nelle altre murature, si sono utilizzati martinetti a forma di segmento circolare, dello spessore di appena 4 mm.

Le prove hanno fornito il quadro dello stato di sollecitazione delle murature, mettendo in evidenza - quando siano state effettuate sui due lati della muratura in posizioni contrapposte - l'eventuale eccentricità di distribuzione del carico. In particolare sull'arco interno della muratura perimetrale del chiostro è stato individuato uno stato di trazione.

I risultati di queste prove hanno inoltre suggerito l'opportunità di installare una catena di basi estensimetriche per la misura di eventuali spostamenti fra pareti contrapposte dell'abbazia, del chiostro e della chiesa. Un'ulteriore base estensimetrica è stata installata nel chiostro, in direzione perpendicolare all'allineamento principale.

Le basi di misura installate nel chiostro sono servite inoltre per il controllo degli spostamenti relativi delle strutture perimetrali durante una prova di collaudo statico, eseguita per verificare l'efficacia degli interventi di consolidamento strutturale.



In alto a sinistra, prova con martinetto piatto nella muratura della torre nolare.

Qui sopra, prove all'imposta di un arco e nella muratura del loggiato del Chiostro.