
P.P. Rossi

467

*Analisi delle condizioni
statiche della basilica di
San Marco in Venezia*

Analisi delle condizioni statiche della Basilica di San Marco in Venezia

*Pier Paolo Rossi**

SUMMARY

The paper presents the results of the structural investigations carried out by ISMES to evaluate the static conditions of the supporting structures of the St. Mark's Basilica in Venice. The investigation program, which was commissioned by the Venice Water Board of the Ministry of Public Works includes: historical analysis, topographic and photogrammetric survey, detailed crack pattern survey, geotechnical investigation and foundation survey, analysis of the mechanical characteristics of the masonry structures by laboratory tests, sonic tomography, radar, coring, video camera survey and flat jack tests for the measurement of the state of stress and the determination of the deformability characteristics. The parameters determined by means of this investigation program were used in the mathematical modelling of the whole structure.

The automatic monitoring system installed on the major supporting structural elements of the Basilica is then presented.

SOMMARIO

Vengono illustrate le indagini diagnostiche eseguite sulla Basilica di S. Marco in Venezia per l'analisi delle condizioni statiche delle strutture portanti.

Il programma di indagini, eseguito dall'ISMES per incarico del Magistrato alle Acque di Venezia, comprende: l'indagine storica, il rilievo topografico e fotogrammetrico, il rilievo dettagliato del quadro fessurativo, l'indagine geotecnica sui terreni di fondazione e l'analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante prove di laboratorio, tomografie soniche, indagini radar, carotaggi meccanici, rilievi endoscopici e prove con la tecnica del martinetto piatto per la misura dello stato di sollecitazione e per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità.

I parametri determinati nel corso della campagna di indagine sono stati utilizzati per la messa a punto di un grande modello matematico ad elementi finiti dell'intera struttura.

Viene infine presentato il sistema automatico di monitoraggio strutturale installato sulle principali strutture portanti della Basilica.

* ISMES S.p.A. Bergamo

1. INTRODUZIONE

La Basilica di San Marco è un monumento caratterizzato da una complessa organizzazione strutturale, la cui costruzione avvenne in tre diverse fasi. La prima fabbrica marciana risale all' 828 D.C. quando, in seguito al trasporto da parte dei Veneziani del corpo dell'Evangelista San Marco da Alessandria d'Egitto, venne costruita la Cappella Ducale perché ivi fosse riposto il corpo del Santo.

La seconda fase iniziò nel 976, quando la Basilica e il Palazzo Ducale furono distrutti da un incendio nel corso di una congiura che portò all'uccisione del doge Candiano IV. La Basilica fu ricostruita in due anni dal doge Pietro Orseolo I, il quale vi fece aggiungere nuove decorazioni.

La terza fabbrica marciana iniziò nel 1063, periodo in cui Venezia aveva raggiunto un eccezionale sviluppo politico ed economico che si rifletteva in un particolare fervore costruttivo. Fu il doge Domenico Contarini che sollecitò l'ambizioso progetto del Governo e della popolazione di rifare dalle fondamenta l'attuale chiesa di San Marco. La costruzione di una struttura così solenne e imponente, a cui parteciparono i maggiori architetti bizantini dell'epoca, costituì un chiaro esempio del potere che la città di Venezia aveva raggiunto nel Mediterraneo al punto di poter trattare alla pari con una capitale come Costantinopoli. La chiesa fu consacrata e dedicata a San Marco nel 1094, proprio due anni prima del nono centenario della vita del Santo.

La Basilica, costruita in un arco di tempo che abbraccia molti secoli, utilizzando il più possibile strutture preesistenti, mostra ora chiari segni di deformazione e degrado delle pareti murarie, degli archi, delle volte, delle cupole e del pavimento.

Hanno contribuito a peggiorare le condizioni statiche della Basilica numerosi terremoti, in particolare quelli del XII° secolo, che scossero il complesso monumentale fin dalle fondamenta, e molti incendi devastanti che richiesero la ricostruzione di intere parti della struttura. Oltre a questi eventi vanno poi ricordate le modificazioni strutturali subite dalla Basilica, l'appesantimento delle cupole e tutti quegli interventi che, nel corso dei secoli, apportarono elementi aggiuntivi alle strutture portanti della Basilica.

La sezione longitudinale della Basilica di Fig. 1 mostra le cupole originarie in muratura e le sovra-

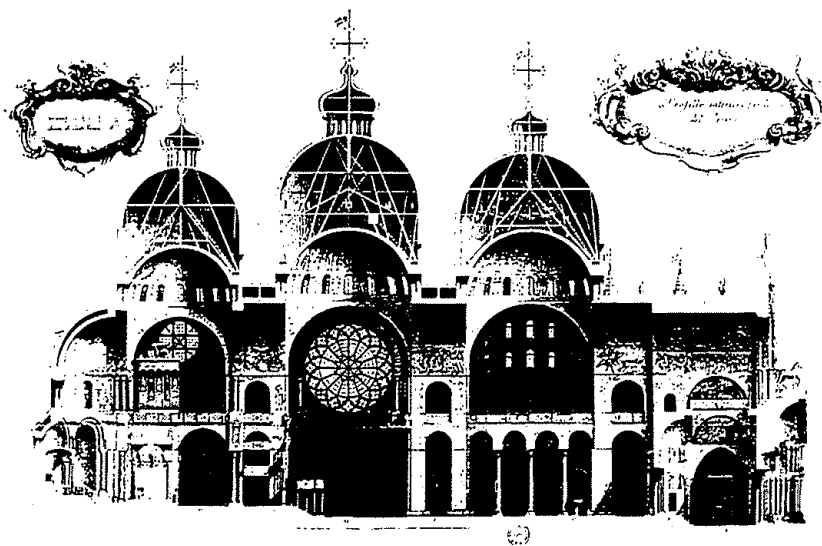


Fig. 1 - Sezione longitudinale della Basilica (A. Visentini, XVIII century)

stanti strutture in legno e piombo costruite nella metà del XIII° secolo.

Soltanto all'inizio del XIX° secolo, in seguito alla caduta della Repubblica di Venezia, il governo austriaco promosse una serie di interventi sistematici di restauro della Basilica su un progetto dell'ingegnere Fustinelli che fu approvato da una speciale commissione governativa. Soprattutto si cercò, attraverso restauri ai

muri, alle volte e agli archi, di consolidare l'esistente struttura Basilicale che, sotto la spinta dovuta al peso delle coperture in piombo delle cupole, si stava letteralmente dividendo in due parti.

Grazie al mirabile impegno della Procuratoria di San Marco, negli anni ottanta fu definito dal Dipartimento Tecnico della Basilica un ampio programma di restauro molto avanzato dal punto di vista scientifico.

Un primo programma di indagini strutturali, comprendente l'installazione di un sistema di monito-

raggio, venne finanziato dall'ISMES e dall'ENEL nel 1990. A seguito di questa prima fase di indagini, l'ISMES fu incaricata dal Magistrato alle Acque del Ministero dei Lavori Pubblici di avviare un completo programma di indagini diagnostiche per l'accertamento delle condizioni statiche della Basilica. Questo programma di ricerca è caratterizzato da un approccio di tipo numerico e sperimentale e si articola nelle seguenti fasi:

- Indagine storica;
- Rilievo topografico e fotogrammetrico con analisi dettagliata del quadro fessurativo;
- Indagini geotecniche e analisi delle strutture di fondazione;
- Analisi delle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie mediante:
 - *Tomografia sonora;*
 - *Indagini radar;*
 - *Carotaggi meccanici e rilievi endoscopici tramite sonda televisiva;*
 - *Prove con martinetti piatti;*
 - *Prove di laboratorio.*
- Installazione di un sistema di monitoraggio;
- Modello matematico dell'intera struttura.

2. INDAGINE STORICA

Gli interventi eseguiti sulla Basilica nel passato sono documentati, fino alla caduta della Repubblica di San Marco, nell'Archivio di Stato di Venezia e in seguito per la maggior parte negli Archivi Storici della Procuratoria; questi documenti comprendono testi, disegni e fotografie. Questo materiale è estremamente importante e fornisce le basi essenziali per un programma di restauri ben indirizzati; oltre a ciò il Dipartimento Tecnico della Procuratoria è ben informato su tutti gli interventi eseguiti nel corso degli ultimi 20-30 anni.

Il materiale è stato organizzato in modo tale che le conoscenze provenienti da documenti scritti siano integrate con disegni e fotografie e soprattutto è stato ordinato con un criterio cronologico e topografico così da consentire un accesso rapido, con l'aiuto del computer, alle informazioni concernenti i diversi settori di intervento. L'impiego delle tecniche informatiche consentirà in tempi brevissimi al ricercatore la selezione e l'elaborazione dei dati estratti da repertori predefiniti in base alla schedatura analitica. La fase di catalogazione ha comportato la creazione di una scheda (microscheda) associata ad ogni documento di archivio. Sono state poi realizzate particolari schede di insieme (macroschede) che raccolgono le microschede per argomenti specifici.

Anche l'esame dei mosaici presenti sulle superfici interne della Basilica ha fornito preziose informazioni sulla storia di costruzione dell'opera. A titolo di esempio si riporta in Fig. 2 il particolare di un mosaico che illustra le caratteristiche strutturali delle cupole prima dell'esecuzione delle sovrastrutture di copertura in legno e piombo costruite a metà del XIII secolo.



Fig. 2 - Particolare di un mosaico che illustra le caratteristiche originarie delle cupole prima della costruzione delle sovrastrutture di copertura in legno e piombo eseguite a metà del XIII secolo

3. RILIEVO GEOMETRICO

Ferdinando Forlati, il famoso Architetto della Sovrintendenza, nel suo libro sui Restauri della Basilica (1974), sottolineò l'importanza che qualcuno fosse in grado di eseguire con scrupolosità scientifica un rilievo geometrico.

Esistono vari tentativi di eseguire un rilievo della Basilica, alcuni di considerevole prestigio, come quelli condotti da Antonio Visentini nella metà del 1700 e più tardi dall'Architetto Scattolin.

La struttura della Basilica è caratterizzata da una tale complessità spaziale - dominata da superfici curve e ornata di bassorilievi e mosaici - da non poter essere riprodotta fedelmente se non con un rilievo volumetrico e dimensionale dotato di estrema esattezza.

Particolarmente significativa, nel caso della Basilica di San Marco, è risultata la tecnica fotogrammetrica, dal momento che è la sola in grado di assicurare una piena corrispondenza tra la riproduzione grafica e la reale disposizione spaziale delle strutture che compongono il monumento.

Si è proceduto al completamento del rilievo fotogrammetrico, già inviato nel 1983, e alla restituzione grafica e numerica di tutti i rilievi eseguiti.

Oltre ai prospetti della Basilica, sono state elaborate in totale 8 sezioni a doppia vista in scala 1:50.

L'accuratezza e la precisione dell'elaborazione grafica ha richiesto una attenta cura nella definizione delle mappe dei riferimenti topografici. La restituzione, eseguita con strumenti stereorestitutori analitici, ha consentito di ottenere disegni finali chiari e dettagliati che hanno reso possibile sia l'esecuzione del programma di indagini diagnostiche che la realizzazione del modello matematico della struttura.

In Fig. 3 è riportato, a titolo di esempio, un prospetto laterale della Basilica ottenuto con tecnica fotogrammetrica.

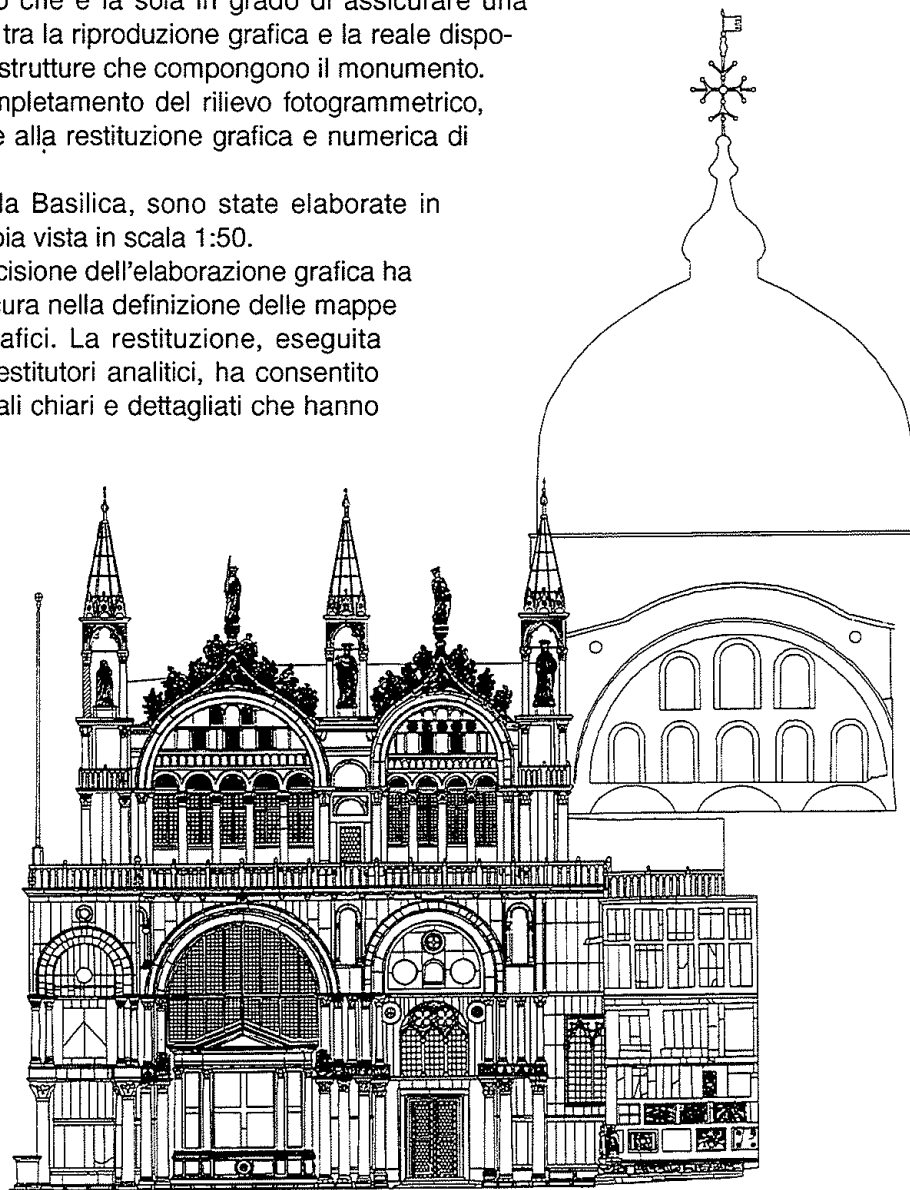


Fig. 3 - Prospetto del lato sud della Basilica rilevato con tecnica fotogrammetrica

4. INDAGINI SUI TERRENI E SULLE STRUTTURE DI FONDAZIONE

E' stata eseguita una dettagliata indagine geotecnica col fine di definire il profilo stratigrafico del terreno sottostante la Cattedrale a valutare le caratteristiche meccaniche dei diversi strati di terreno interessati dalle fondazioni.

Sono stati eseguiti 8 sondaggi meccanici (fino a una profondità di 30 m) ubicati lungo il perimetro della Basilica e sono stati estratti numerosi campioni di materiale indisturbato per le analisi di laboratorio.

L'esecuzione di prove penetrometriche statiche in tre fori di sondaggio ha poi permesso di determinare le caratteristiche meccaniche dei vari strati di terreno.

Sulle basi delle prove in sito e in laboratorio è stata così identificata la stratigrafia del sottosuolo. Un esempio è mostrato dal profilo stratigrafico di Fig. 4, ottenuto correlando i risultati di tre fori di sondaggio situati sul lato nord della Basilica.

Si può notare come al di sotto di uno strato superficiale di materiale di riporto, sia presente uno strato, di circa 5 m di spessore, costituito da argille-limose e quindi uno strato di spessore variabile dai 5 ai 10 m di sabbie-limose con caratteristiche meccaniche più elevate; sotto le sabbie è presente ancora materiale limo-argilloso. Questa configurazione, caratterizzata da lenti di sabbia poste in materiale limo-argilloso, è tipica delle zone lagunari.

Sulla base dei risultati forniti dalle indagini geotecniche è stata definita la schematizzazione da adottare per la realizzazione del modello matematico del terreno di fondazione.

Sono stati riprodotti nel modello tre strati aventi le seguenti caratteristiche:

- strato corticale di spessore 3 m (caratterizzato dalla presenza delle murature di fondazione) con modulo elastico pari a 1500 MPa;
- strato sottostante di spessore 15 m con modulo elastico pari a 500 MPa;
- strato terminale di spessore 20 m con modulo elastico pari a 250 MPa.

Tre fori di sondaggio sono stati equipaggiati con piezometri elettrici e tre con estensimetri a lunga base connessi ad un'unità di lettura automatica. Questo sistema di monitoraggio permette di controllare gli assestamenti del terreno in funzione del tempo e le variazioni del livello di falda.

Con l'aiuto di carotaggi meccanici è stato possibile eseguire un dettagliato rilievo geometrico e

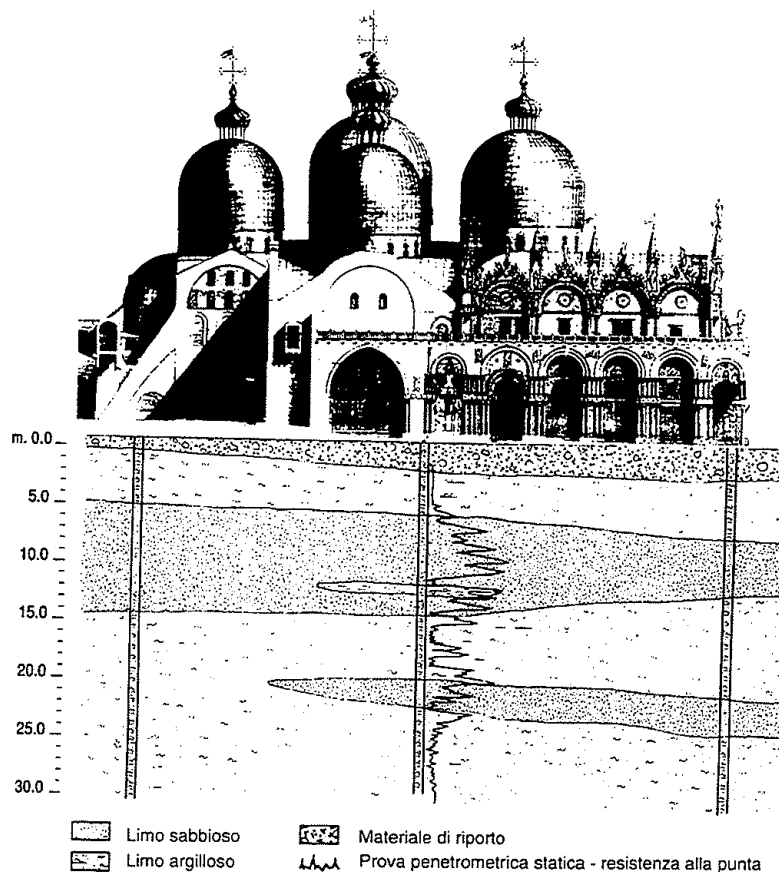


Fig. 4 - Profilo stratigrafico lungo il lato nord della Basilica. In corrispondenza del foro centrale è riportato il diagramma ottenuto mediante penetrometro statico

strutturale delle murature di fondazione in corrispondenza dei muri perimetrali e dei pilastri (Fig. 5). Sono stati eseguiti in totale più di 70 carotaggi utilizzando corone diamantate a parete sottile di diametro 56 mm e all'interno dei fori è stato eseguito un rilievo endoscopico della superficie laterale mediante sonda televisiva a colori.

Al fine di acquisire maggiori informazioni sulle caratteristiche meccaniche delle strutture murarie, sono stati eseguiti carotaggi sonici all'interno di ciascun foro e misure di cross-hole fra coppie di fori paralleli.

Come risultato dei carotaggi meccanici e dell'indagine endoscopica con sonda televisiva è stato determinato lo schema strutturale tipico delle murature di fondazione (Fig. 6). Alla profondità di 70-90 cm dal livello del pavimento è presente un basamento di muratura in pietra, di spessore circa 2 m, composto da grossi blocchi di arenaria e trachite. Sotto il basamento in pietra, è presente una platea in legno di spessore 10 cm ancora in buone condizioni di conservazione. La platea in legno poggia su pali in legno, di lunghezza circa $1 \div 1.50$ m, i quali appaiono molto degradati.



Fig. 5 - Carotaggio meccanico sulle strutture di fondazione di un pilastro

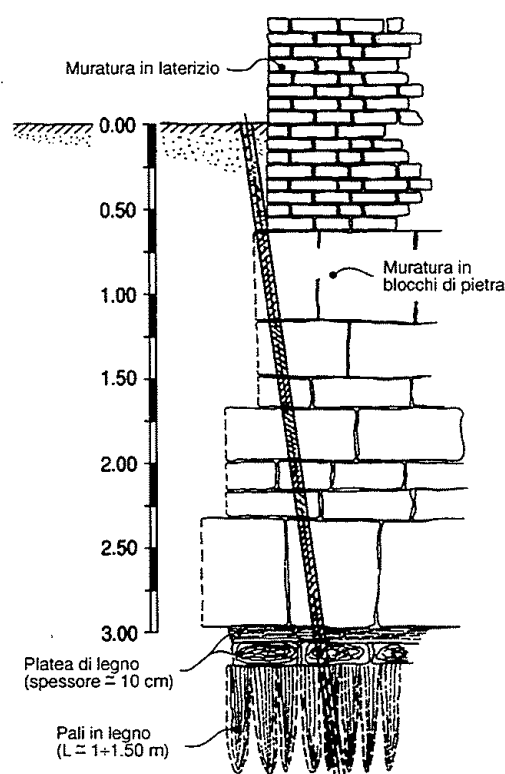


Fig. 6 - Schema strutturale delle murature di fondazione dei muri perimetrali e dei pilastri della Basilica

5. ANALISI DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE STRUTTURE MURARIE

I pilastri e i muri perimetrali della Basilica sono stati accuratamente investigati utilizzando sia prove non distruttive sia prove di tipo leggermente distruttivo. E' stata dedicata particolare attenzione ai pilastri che è stato possibile investigare soltanto in corrispondenza di una fascia di altezza circa 100 cm al livello dei matronei. Sotto tale quota infatti i pilastri sono coperti da un rivestimento in marmo mentre al di sopra sono coperti da mosaici.

5.1 Tomografia sonica e indagini radar

Sono state eseguite in primo luogo indagini non distruttive mediante tomografia sonica e tecnica radar al fine di individuare la presenza di eventuali anomalie all'interno del corpo murario.

I risultati più significativi sono stati ottenuti mediante l'impiego della tomografia sonica che forni-

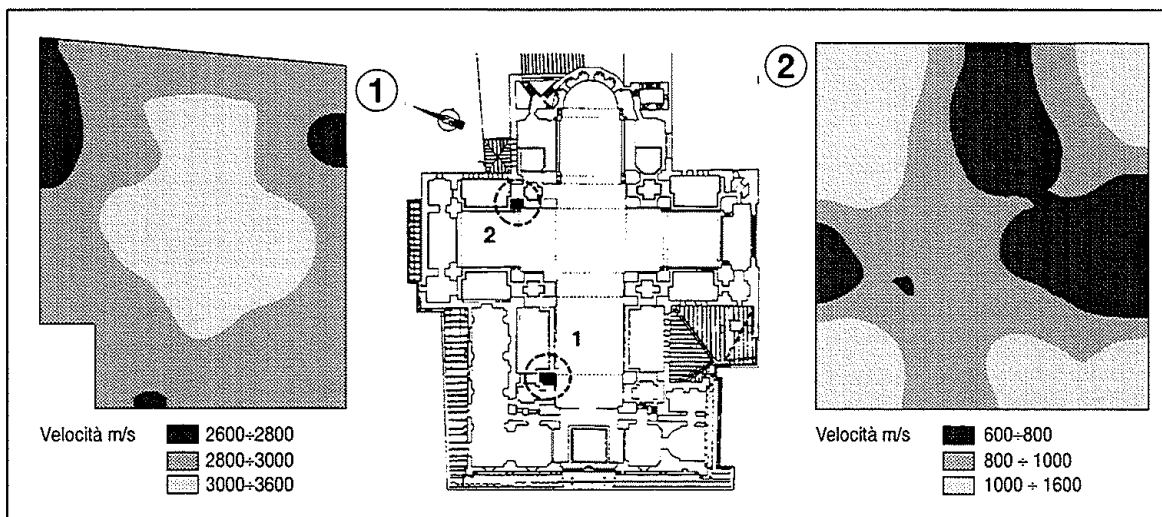


Fig. 7 - Risultati ottenuti mediante indagini di tomografia sonica su due pilastri

sce un rilievo dettagliato della distribuzione della velocità sonica in una sezione piana della struttura oggetto di indagine. La Fig. 7 mostra i risultati ottenuti su due pilastri contrassegnati con i numeri 1 e 2 nella planimetria allegata. Si può notare come il pilastro 1, che fu consolidato mediante iniezioni circa 30 anni fa, presenti un campo di velocità elevato nella zona più interna che fu quella interessata dalle iniezioni di consolidamento. Al contrario i valori di velocità che si ottengono per il pilastro 2 mostrano che la struttura in oggetto presenta caratteristiche meccaniche molto scadenti (nessuna operazione di consolidamento è stata infatti eseguita su tale pilastro in passato).

5.2 Carotaggi meccanici e indagini endoscopiche con sonda televisiva

In ogni pilastro sono stati eseguiti carotaggi meccanici orizzontali e subverticali utilizzando un'attrezzatura di perforazione leggera e maneggevole.

La Fig. 8 mostra l'attrezzatura utilizzata per il rilievo endoscopico e il risultato del rilievo eseguiti nel foro orizzontale del pilastro 2 indicato in Fig. 7. All'interno della muratura si possono notare numerosi vuoti, come confermato anche dai bassi valori di velocità rilevati con la tomografia sonica.

Mediante l'esecuzione di perforazioni in direzione subverticale a partire dal livello dei matronei, è stato possibile investigare la porzione inferiore dei pilastri coperta dal rivestimento in marmo. Anche lungo i muri perimetrali della Basilica sono stati eseguiti numerosi carotaggi meccanici.

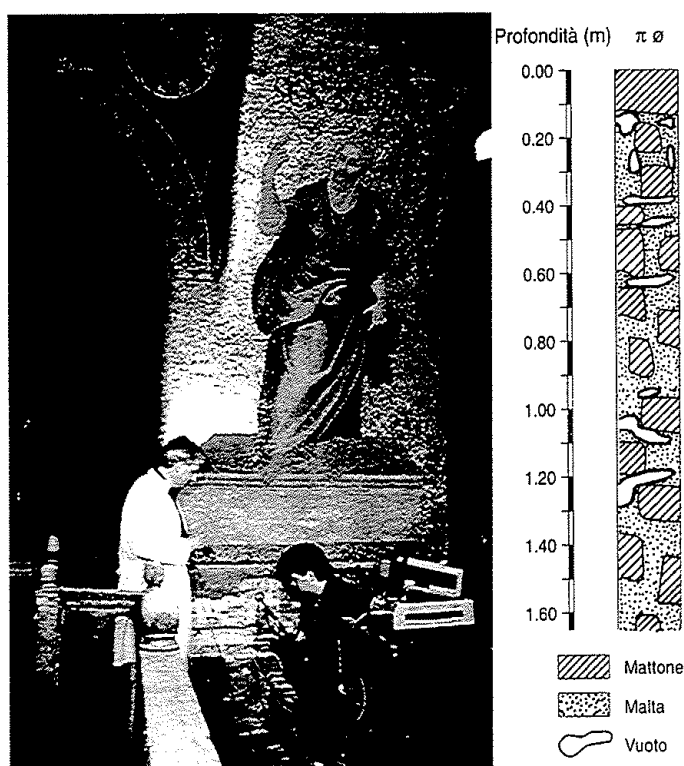


Fig. 8 - Rilievo endoscopico con sonda televisiva e risultato del rilievo eseguito sul pilastro n. 2

5.3 Misura dello stato tensionale e analisi delle caratteristiche di deformabilità

Per valutare le condizioni statiche della Basilica si è ritenuto indispensabile misurare lo stato di sollecitazione attuale delle strutture portanti prestando particolare attenzione alle condizioni di carico dei pilastri. A questo scopo è stata utilizzata la tecnica di prova del martinetto piatto. Questa prova non distruttiva è basata sul rilascio tensionale causato da un taglio piano, normale alla superficie della muratura, e sul ripristino delle condizioni iniziali mediante prova di carico eseguita con un sottile martinetto piatto inserito nel taglio.

Questo tipo di prova, messo a punto dall'ISMES nel 1979, è molto semplice ed affidabile, come è dimostrato dai risultati di numerose prove di calibrazione eseguite in laboratorio su campioni di grandi dimensioni. Nella Basilica di San Marco sono state eseguite più di 110 prove con martinetti piatti, di cui circa 60 sui pilastri, 20 sui muri perimetrali, 5 nella cripta e 25 sulle strutture di copertura (archi e cupole).

La Fig. 9 mostra una prova con martinetto piatto eseguita su un pilastro, mentre i valori di sollecitazione misurati sui pilastri sono rappresentati in Fig. 10. In Fig. 11 sono riportati i valori di sollecitazione misurati sull'estradosso delle strutture di copertura (cupole, arconi e pennacchi).

Si può osservare come sussista una certa disomogeneità nello stato di sollecitazione a cui sono sottoposti i pilastri; tale situazione è dovuta sia alla posizione e alle dimensioni del pilastro sia alla tipologia ed estensione degli interventi di consolidamento subiti da alcuni pilastri in passato. In alcuni pilastri sono stati rilevati valori molto alti di sollecitazione (superiori a 1.1 MPa). È opportuno rilevare che, nel già menzionato pilastro 2 (situato nella parte sud-est della cupola di San Giovanni) è stato



Fig. 9 - Misura dello stato di sollecitazione su un pilastro mediante la tecnica del martinetto piatto

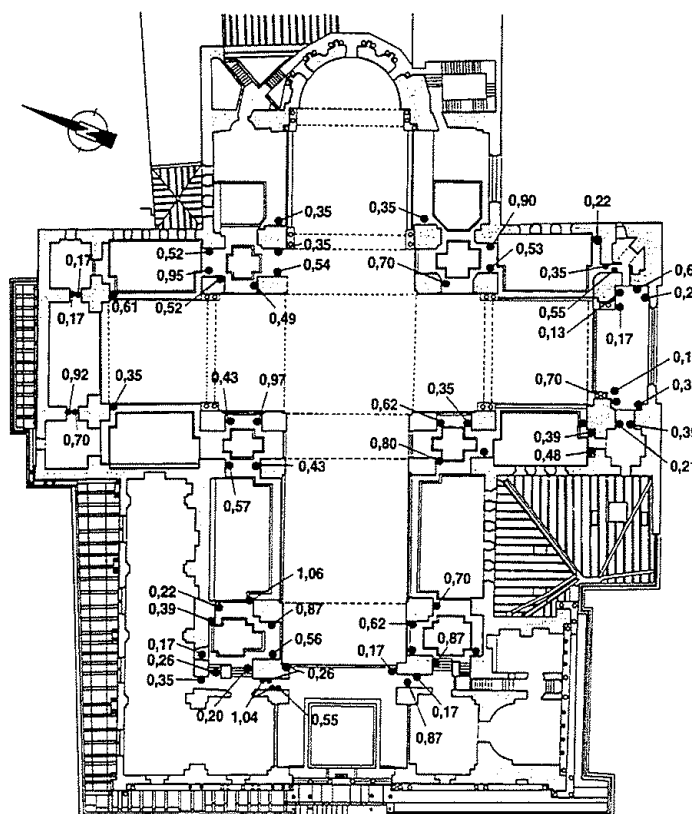


Fig. 10 - Ubicazione dei punti di prova alla quota dei matronei e indicazione dei valori di sollecitazione misurati

rilevato un valore di sollecitazione di 0.95 MPa. Questo valore è considerevolmente alto in relazione ai risultati forniti dalla tomografia sonica, dai carotaggi meccanici e dai rilievi endoscopici.

Utilizzando la tecnica di prova con due martinetti piatti paralleli sono state determinate anche le caratteristiche di deformabilità delle murature. Due martinetti piatti vengono inseriti nella muratura, ad una distanza di circa 50 cm, in modo tale da delimitare un campione di muratura di apprezzabili dimensioni (40 x 50 cm) su cui i martinetti stessi applicano uno stato di compressione monoassiale. Durante la fase di carico vengono rilevate le deformazioni assiali e trasversali del campione in funzione del carico applicato.

Questa semplice prova ha consentito di determinare i moduli di deformabilità dei diversi tipi di muratura fornendo quindi i valori dei parametri da introdurre nel modello matematico.

Le caratteristiche di deformabilità rilevate nei diversi pilastri sono funzione del tipo di interventi di consolidamento subito dalla muratura. Le prove condotte sulle murature originarie non consolidate hanno fornito valori del modulo di Young variabile da 800 a 2000 MPa (per un intervallo di sollecitazione da 0.4 a 0.8 MPa). I valori ottenuti sulle murature consolidate con iniezioni sono più elevati (da 1600 a 4000 MPa, sempre per lo stesso intervallo di sollecitazione).

In alcuni pilastri, la cui muratura fu completamente ricostruita circa 30 anni fa, il modulo di Young presenta valori superiori a 5000 MPa.

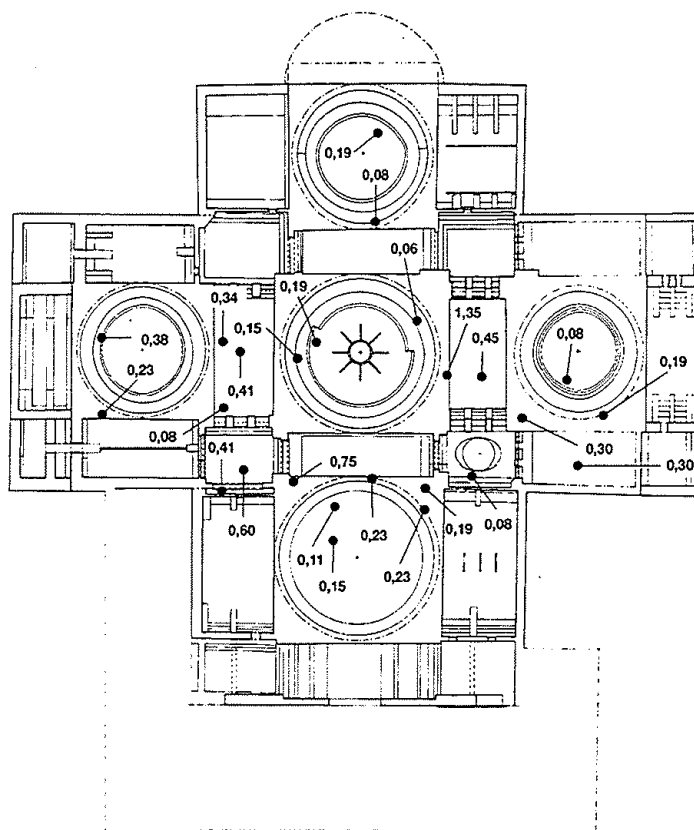


Fig. 11 - Misura dello stato di sollecitazione sulle superfici di estradosso delle cupole, pennacchi e arconi

5.4 Indagini supplementari sul pilastro sud-est della cupola di San Giovanni

I risultati forniti dalle prove con martinetti piatti, dalle indagini tomografiche, dai carotaggi meccanici e dai rilievi endoscopici, mostrano chiaramente che il pilastro n° 2 (pilastro sud-est della cupola di San Giovanni) è sottoposto a condizioni di carico molto gravose in relazione alle scadenti caratteristiche meccaniche della muratura.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno eseguire indagini più dettagliate nella parte inferiore del pilastro, dopo aver rimosso il rivestimento in marmo. E' stato dapprima eseguito un accurato rilievo del quadro fessurativo che ha evidenziato la presenza di numerose piccole fratture verticali specialmente in corrispondenza degli spigoli. La tomografia sonica, eseguita su tre sezioni del pilastro, a differenti altezze, ha confermato i bassi valori di velocità già presentati in Fig. 7. Le prove con martinetti piatti, eseguite in molti punti del pilastro, hanno rilevato uno stato di sollecitazione medio pari a 0.85 MPa.

In corrispondenza di due punti si è inoltre proceduto alla determinazione delle caratteristiche di deformabilità mediante l'impiego delle prove con due martinetti piatti paralleli. La curva sforzi-

deformazioni ottenute con queste prove è illustrata in Fig. 12; l'esame delle deformazioni assiali e trasversali in funzione della sollecitazione assiale permettono di osservare come la muratura presenti un comportamento lineare fino ad un livello di sollecitazione di 0.8 MPa con un valore del modulo di Young di 2000 MPa. Per livelli di sollecitazione superiori, fino a 1.2 MPa, il modulo di Young decresce fino ad un valore di 900 MPa, mentre, per stati di sollecitazione compresi tra 1.2 e 1.5 MPa, è inferiore ai 300 MPa.

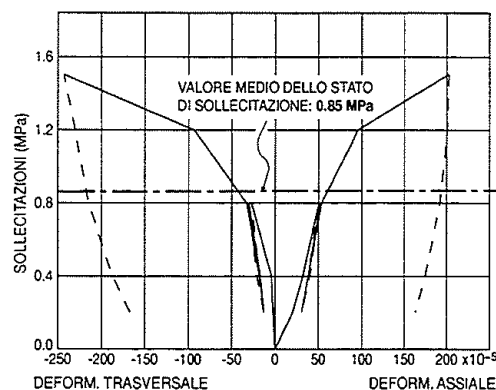
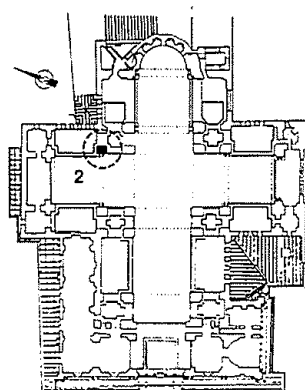


Fig. 12 - Diagramma carichi - deformazioni ottenute mediante prove con martinetti piatti paralleli sul pilastro n. 2. Nel diagramma è indicato il valore medio dello stato di sollecitazione misurato sul pilastro.

Si può osservare che lo stato di sollecitazione medio misurato sul pilastro in oggetto è pari a 0.85 MPa e risulta quindi superiore al limite tra il comportamento elastico e quello plastico.

Queste analisi suppletive hanno dunque confermato che le condizioni statiche del pilastro non sono soddisfacenti e proprio per questa ragione si è deciso di eseguire una serie di interventi di consolidamento strutturale che attualmente sono in fase di completamento.

6. SISTEMA DI MONITORAGGIO

Al fine di controllare in modo continuo il comportamento statico della Basilica, nel 1991 è stato installato dall'ISMES, in collaborazione con l'ENEL, un sistema di monitoraggio strutturale in grado di tenere sotto controllo le seguenti grandezze:

- Apertura delle principali lesioni nei pilastri (8 estensimetri).
- Spostamenti relativi dei pilastri in direzione orizzontale (11 estensimetri a filo a lunga base).
- Variazioni di inclinazione delle pareti verticali (4 inclinometri biassiali).
- Variazioni della temperatura interna ed esterna (5 termosonde).
- Assestamenti verticali del terreno di fondazione (3 assestimetri a lunga base).
- Variazioni del livello di falda (3 piezometri).

Tutti gli strumenti sono collegati ad una unità di acquisizione e registrazione automatica dei dati la quale è in grado di indicare in tempo reale eventuali anomalie nel comportamento strutturale della Basilica.

In Fig. 13 sono illustrati: un estensimetro per il controllo delle variazioni di apertura di una lesione presente su un pilastro e un estensimetro a filo a lunga base per il controllo degli spostamenti relativi fra i pilastri.

L'analisi delle deformazioni in funzione del tempo e della temperatura rende possibile la distinzione delle deformazioni dovute ad effetti termici da quelle dovute ad altre cause strutturali.

La Fig. 14 mostra il diagramma dei movimenti orizzontali relativi tra alcuni pilastri misurati durante il primo periodo di osservazione 1992 - 1994.

Si può osservare come i diagrammi dei movimenti relativi fra le tre coppie di pilastri segnano fedelmente l'andamento della temperatura. Poiché il periodo di osservazione è solo di tre anni non è possibile al momento trarre alcuna conclusione in merito alla eventuale presenza di una componente di deformazione dovuta a cause diverse dalla sollecitazione termica.

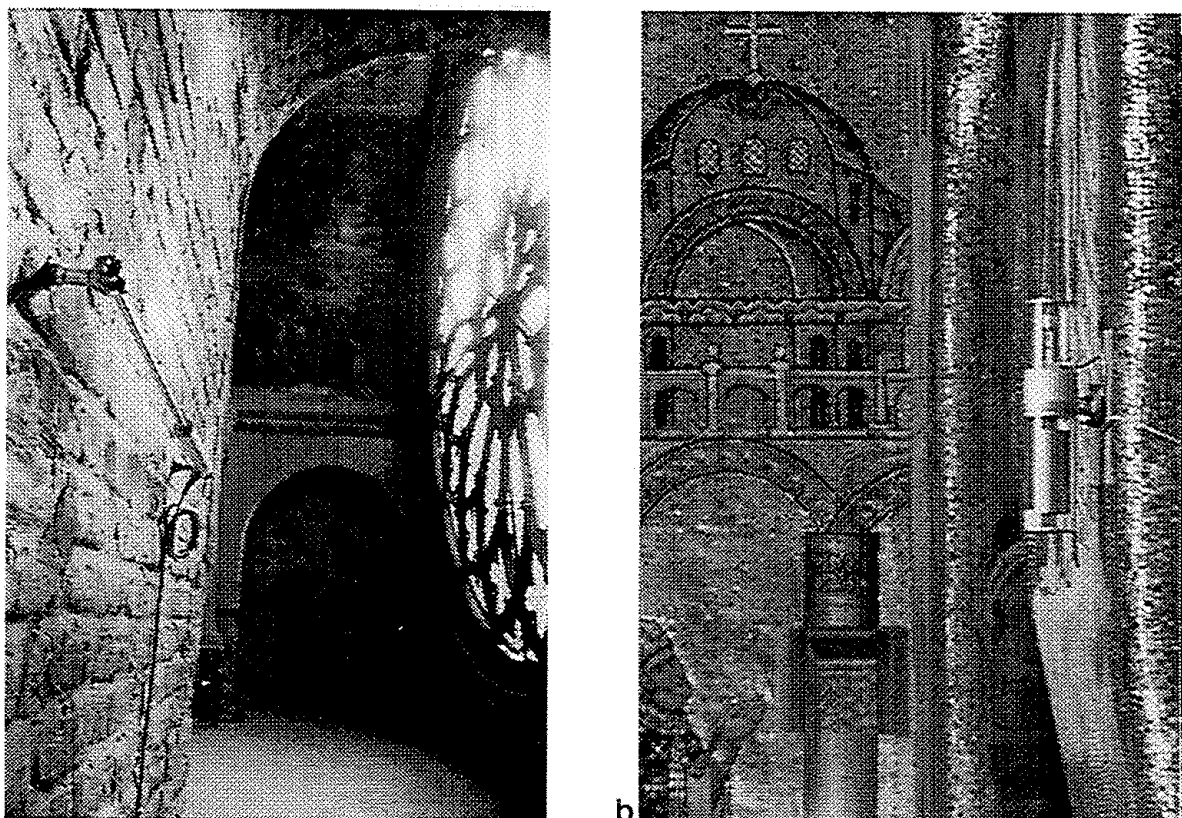


Fig. 13 - a) Estensimetro elettrico per il controllo dell'apertura di una lesione sulla struttura muraria
b) Estensimetro a filo a lunga base per la misura dello spostamento relativo in direzione orizzontale fra i pilastri

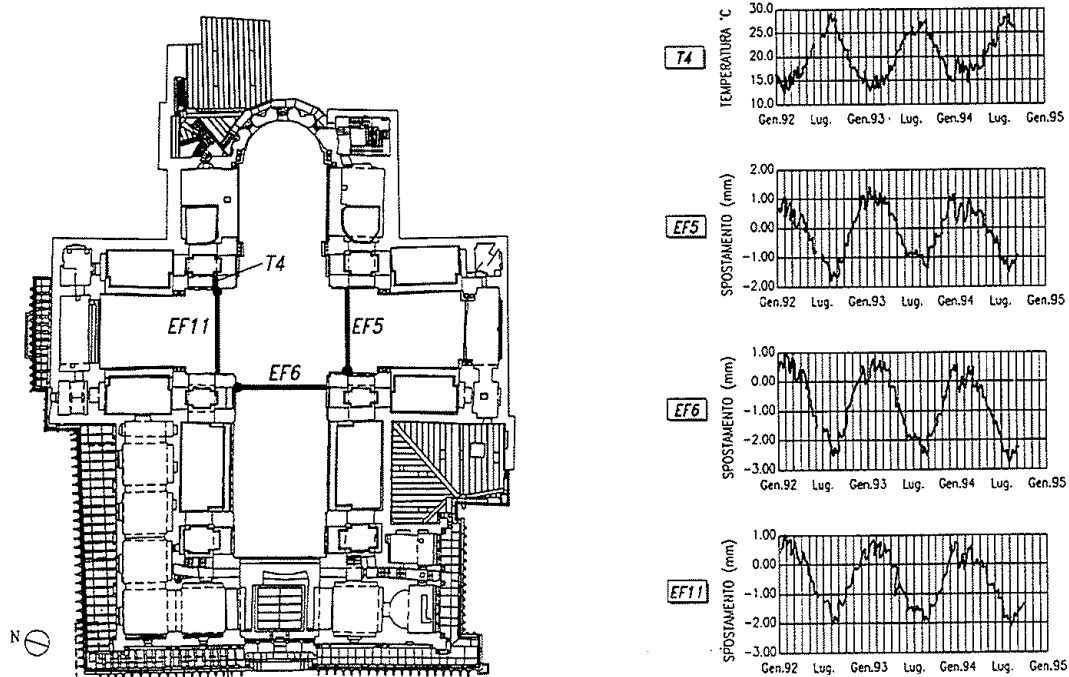


Fig. 14 - Diagrammi degli spostamenti relativi in direzione orizzontale fra alcuni pilastri rilevati mediante 3 estensimetri a lunga base in funzione del tempo. Nella figura è pure riportato (in alto) il diagramma della temperatura interna in funzione del tempo

7. MODELLAZIONE MATEMATICA

Al termine dell'esecuzione delle indagini sperimentali si è proceduto alla messa a punto di un modello matematico ad elementi finiti dell'intera struttura avvalendosi dei dati forniti dal rilievo geometrico e dalle indagini eseguite sulle strutture murarie.

In particolare, i rilievi fotogrammetrici hanno consentito la ricostruzione delle geometrie della struttura con un elevato grado di dettaglio. Poichè tali rilievi erano disponibili, oltre che su carta, anche in forma digitale su supporto magnetico, è stato possibile eseguire tutte le elaborazioni per la definizione delle geometrie della Basilica impiegando i sistemi CAD.

Le indagini meccaniche eseguite sulle strutture hanno permesso, mediante la elaborazione statistica dei dati, di identificare i vari materiali e definire i rispettivi valori del modulo elastico da inserire nella analisi numerica nelle diverse parti della struttura.

Per le murature e i pilastri si sono individuate tre classi di valori del modulo elastico (E) rappresentanti materiale di caratteristiche mediocri, medi e buone.

I valori medi assegnati alle tre classi sono:

Classe 1: $E = 850 \text{ MPa}$

Classe 2: $E = 2000 \text{ MPa}$

Classe 3: $E = 6000 \text{ MPa}$.

Per le coperture si è considerato un valore di 5000 MPa per archi, pennacchi e cupole nei casi in cui la muratura è stata prevalentemente consolidata e di 3000 MPa per i tamburi in modo da tener conto dello stato fessurativo in essi presente.

Relativamente al terreno di fondazione sono stati individuati 3 strati le cui caratteristiche meccaniche sono riportate nel paragrafo 4.

In considerazione della notevole complessità, la struttura è stata suddivisa in nove sottostrutture (copertura, 6 pilastri tetrapodi, muro perimetrale e blocco di fondazione).

Questa suddivisione è risultata peraltro particolarmente conveniente in quanto le diverse parti di cui interessa studiare lo stato tensionale coincidono con le sottostrutture individuate.

Nelle Figg. 15 e 16 sono riportate: una visione d'insieme del modello comprendente la fondazione e il modello della struttura in elevazione.

Si sono adottate quattro condizioni elementari di carico:

- peso proprio
- variazione termica su tutte le superfici interne ed esterne di muri e copertura;
- cedimenti fondali, ricavati dai dati rilevati dal sistema di monitoraggio dal 1983 ad oggi.

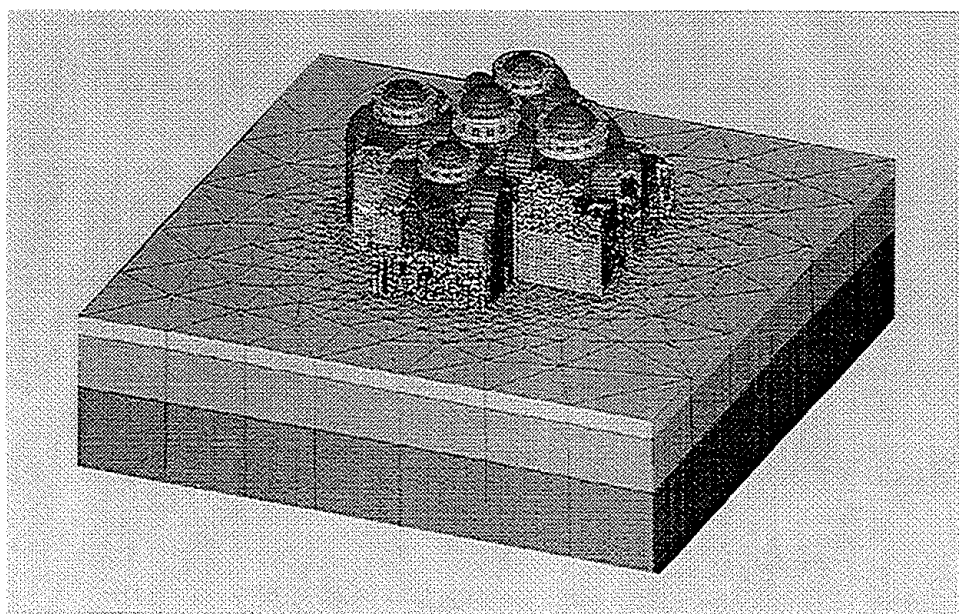


Fig. 15 - Veduta generale del modello matematico della Basilica e del terreno di fondazione

Per valutare l'affidabilità del modello numerico si è effettuato un confronto tra i valori delle tensioni ottenuti dall'analisi numerica e quelli misurati sperimentalmente con la tecnica del martinetto piatto. Questo confronto è stato eseguito alla quota dei matronei in corrispondenza di 18 punti di prova.

Sui 18 punti confrontati, 9 hanno dato valori sperimentali appartenenti al campo individuato dall'analisi numerica. I rimanenti valori superano invece la tensione numerica massima con un errore medio pari a 1.39.

Procedendo quindi al calcolo dell'errore su tutte le 18 misurazioni, sempre trascurando i valori di scarto massimo e minimo, si ottiene il valore di 1.17.

Questo risultato deve ritenersi pienamente soddisfacente soprattutto in considerazione della complessità del modello e si può quindi concludere che il modello numerico è certamente rappresentativo della struttura reale e può essere pertanto usato come strumento di progettazione per la verifica di eventuali interventi di consolidamento strutturale che nel futuro dovessero interessare la Basilica.

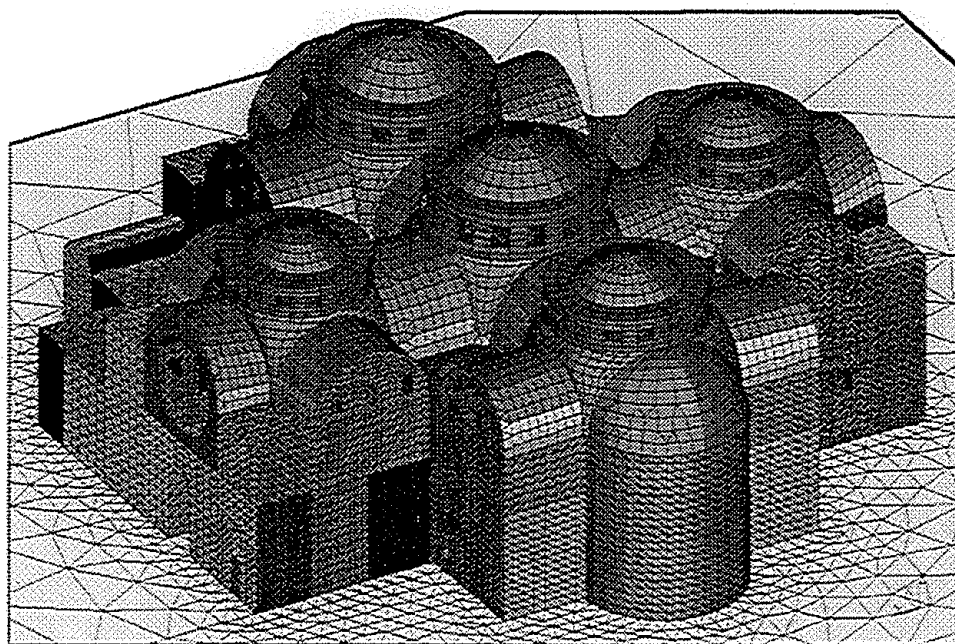


Fig. 16 - Modello matematico della struttura in elevazione

8. BIBLIOGRAFIA

1. SACCHI LANDRIANI G., RICCIONI R., *"Comportamento statico e sismico delle strutture murarie"*, Clup, Milano (1982).
2. ROSSI P.P., *"Determination experimental des caracteristique mecanique des maçonnerie"*, Restauration des Ouvrages et des Structures - Pont et Chaussees - Paris 1983.
3. ROSSI P.P., *"Flat jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures"*, 7th Int. Brick Masonry Conference - Melbourne 1985.
4. HERZNER V., *"Die Baugeschichte von San Marco und der Aufstieg Venedigs zur Grossmacht"*, in *"Wiener Jahrbuch für Kunstgeschichte"*, Band XXXVIII, Wien, Köln, Graz, 1985
5. ROSSI P.P., *"Recent development of the flat-jack test on masonry structures"*, U.S.A. - Italy Workshop on evaluation and retrofit of masonry structures, U.S.A., August 1987
6. GIANI G.P., DEL GRECO O., ASTORI B., ROSSI P.P., *"Analysis and control of the static behaviour of the Consolazione Church in Todi, Italy"*, Int. Symposium *"The Engineering Geology of Ancient Works, Monumental and Historical Sites"*, Athens, September 1988.
7. ASTORI B., GIANI G.P., ROSSI P.P., *"Control measurements and stability analysis of the Cathedral of Orvieto, Italy"*, Proceedings of the International Symposium of IAEG, Athens, September 1988
8. VIO E., GALEAZZO G., VITALIANI R., *"Rilievi, controlli dimensionali e analisi strutturali della Basilica di S. Marco in Venezia"*, Bull. of the Italian Society of Topography n. 3/04, Rome 1988
9. RICCIONI R., ROSSI P.P., *"Restauro edilizio e monumentale. Diagnosi e consolidamento"*, Editrice il Cigno, Galileo Galilei, Roma 1989.
10. ROSSI P.P., *"Non destructive evaluation of the mechanical characteristics of masonry structures"*, Proceedings of the Conference on Non Destructive Evaluation of Civil Structures and material, University of Colorado, Boulder, October 1989
11. BLASI C., CONFORTO M.L., ROSSI P.P., *"Analysis of the statical behaviour of the Costantino's arch in Rome"*, Int. Techn. Conference Structural *"Conservation of Stone Masonry"* Athens 1989.
12. VIO E., *"La conservazione storia e tecniche"*, I mosaici di S. Marco: la storia, l'illuminazione, Fratelli Fabbri, Milano 1990
13. VIO E., *"Cripta o prima cappella ducale?"*, La Cripta di S. Marco, la storia, la conservazione, Vallardi, Milano 1992
14. MODENA C., ROSSI P.P., *"In situ investigations, structural analysis and strengthening of a stone masonry bell tower"*, I Int. Congress on Restoration of the Architectural Heritage and Building, Canarias, July 1992.
15. ROSSI P.P., VENTRUCCI F., VIO E., *"Structural Assessment of St. Mark's Basilica, Venice"*, Proceed. IABSE SYMPOSIUM - Rome 1993
16. MOLA F., ROSSI P.P., VITALIANI R., *"Methodological approach for structural analysis and inspection in the St. Mark's Basilica, Venice"*, Proceed. STREMA 95 - Structural Studies Repairs and Maintenance of Historical Buildings - Chania, Crete, Greece May 1995.

Structural Assessment of St. Mark's Basilica, Venice

Pier Paolo ROSSI

Engineer

ISMES S.p.A.

Bergamo, Italy

Franco VENTRUCCI

Engineer

Ministry of Public Works

Water Board - Venice, Italy

Ettore VIO

Architect

Surveyor of St. Mark's Basilica

Venice, Italy

1. INTRODUCTION

The Basilica of St. Mark is a structurally complex monument in which three major construction phases can be identified. The first dates from 828 A.D. when the Ducal Chapel was founded to house the body of St. Mark Evangelist which the Venetians had recovered from Alexandria in Egypt. The second phase began in 976 A.D. when the Ducal Palace and the Church were burnt by the populace to kill Doge Candiano IV; the structure was rebuilt with new decorations by Doge Pietro Orsola the Saint. The third phase began in 1063, when Venice gave the world a fine example of its power with the construction of the grandiose building designed by the most important Byzantine architects. The Church was consecrated and dedicated to St. Mark in 1094, just two years before the ninth centenary of the life of the Saint. Built over many centuries utilising pre-existing structures as far as possible, the Basilica is showing clear signs of deformation and damage to its walls, arches, vaults and domes, as well as the flooring. Numerous earthquakes exacerbated this situation, especially those in the XII century, which shook Venice and the Basilica to their foundations, as well as several devastating fires, requiring the rebuilding of entire sections of the monument; one can also mention in this context the stylistic modifications and the increased structural weight of the domes, joined, in turn, by all the other additions made over the centuries. The longitudinal section of the Basilica in fig. 1 shows the original masonry domes and the overhanging lead domes built in the

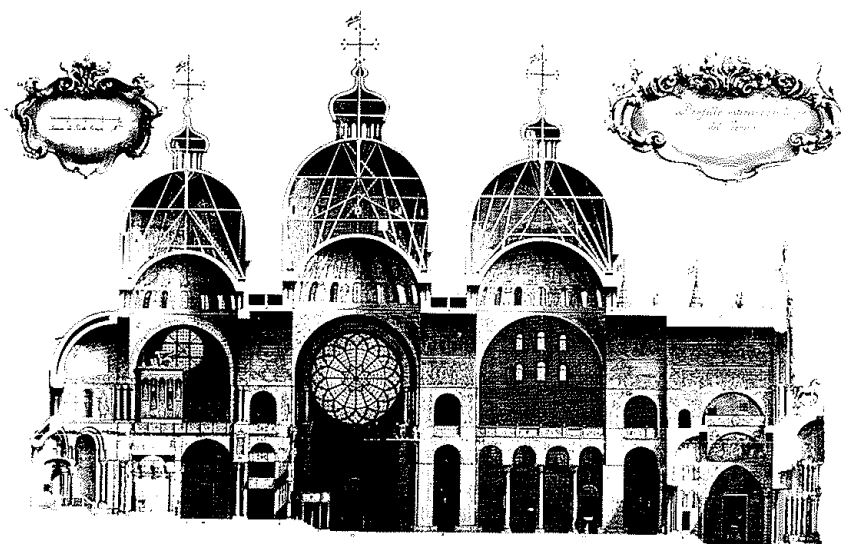


Fig. 1 - Longitudinal section (A. Visentini, XVIII century)

middle of the XIII century. It was only in the early XIX century, following the fall of the Venetian Republic, that the Austrian government enacted systematic restoration works based on the project developed by engineer Fustinelli, which was examined by a specially-appointed government commission. Above all, attempts were made to restore the walls, vaults and arches, and to consolidate the centuries-old structure which, under the thrust of the weight of the lead domes, was literally splitting the Basilica in two lengthways.

Thanks to the admirable attention of the "Procuratoria" (ancient name of the Surveyor Board of the Basilica) in the eighties a scientifically advanced restoration programme was planned by the Technical Department of the Basilica. A first programme of structural investigations, including the monitoring system, was financed by ISMES and ENEL in 1990. Then ISMES was commissioned by the Venice Water Board of the Ministry of Public Works to carry out a wide-ranging programme of surveys for the evaluation of the static conditions of the Basilica. This research programme, which is now in progress, is based on a combined experimental numerical procedure consisting of the following major steps:

- topographic and photogrammetric survey; – historical analysis; – detailed crack pattern survey; – geo-technical investigation and foundation survey; – analysis of the mechanical characteristics of the masonry structures by sonic tomography, radar, coring and video camera survey and flat-jack tests; – monitoring system; – numerical modelling

2. HISTORICAL SURVEY

The works performed on the Basilica in the past are documented up to the fall of the Venetian Republic in the Venice State Archives and subsequently through documents filed for the most part in the Historical Archives of the "Procuratoria" of St. Mark. These documents comprise texts, drawings and photographs. This material is extremely important and provides the essential basis for properly targeted restoration work; moreover, the Technical Department of the Basilica is well-informed of the works performed over the last 20-30 years. This material has to be organised in a manner which integrates knowledge of written documents with graphics and photographs and, especially, coordinated in a chro-

nological and topographical fashion in order to provide rapid access, with the aid of computers, to the information concerning the various fields of intervention. Work therefore involves cataloguing these documents, in order to prepare report cards detailing the major restoration tasks implemented in the past.

3. TOPOGRAPHICAL AND PHOTOGRAMMETRICAL SURVEY

Unfortunately, no full-scale geometric survey of St. Mark's Basilica presently exists. Ferdinando Forlati, the famous Surveyor - Architect, indeed hoped that one would be able to conduct a scientific geometrical survey of the Basilica in his book on the Restoration of the Basilica (1974). Various attempts to survey the Basilica are extant, some of considerable prestige, such as those carried out by Antonio Visentini in the mid-1700s and later by the Surveyor - Architect Scattolin. The structure of the Basilica, however, is of such spatial complexity - dominated by curved surfaces embellished by figurative and decorative low reliefs and mosaics - that it cannot be reproduced faithfully without a careful survey of forms, dimensions, measurements and alignments which alone will make it possible to evaluate static conditions and verify historical hypotheses in order to target restoration work and conservation methods appropriately. In the case of St. Mark's Basilica, architectural photogrammetry is especially meaningful and pertinent, since it is the only means of ensuring absolute correspondence between graphic reproduction and actual architectural-spatial placement. The photogrammetric study, already begun in 1983, now requires the elaboration of all the photographs taken, in close relationship with the reference topographic map in order to ensure the dimensional accuracy of the drawings and provide structural analysis with definitive information concerning the deformation of the monument. The project envisages numerical data acquisition for the survey, so that this information can then be used for restoration work. By converting historical drawings into computer graphics, it will also be possible to compare manual surveys of past work with the current status of the building. By overlapping these visual elements, further information will be gained in order to complete the graphic reproduction of the Basilica.

4. SUBSOIL AND FOUNDATION SURVEY

A detailed survey of the subsoil of the Cathedral was carried out in order to define the stratigraphy of the soil as well as the mechanical characteristics of the different soil layers. Seven boreholes (30 m deep) were drilled around the perimeter of the Basilica and many undisturbed samples were taken for carrying out physical and mechanical laboratory tests. Static cone penetration tests were also carried out in three testing points, using a digital cone, in order to identify the mechanical characteristics of the different layers of soil. On the basis of in situ and laboratory tests, the stratigraphy of the soil was identified. As an example, fig. 2 shows the stratigraphic profile obtained by correlating the results of three boreholes drilled on the North side of the Cathedral. Under a surface layer of filling material, a silty-clay layer (about 5 m thick) has been observed. A

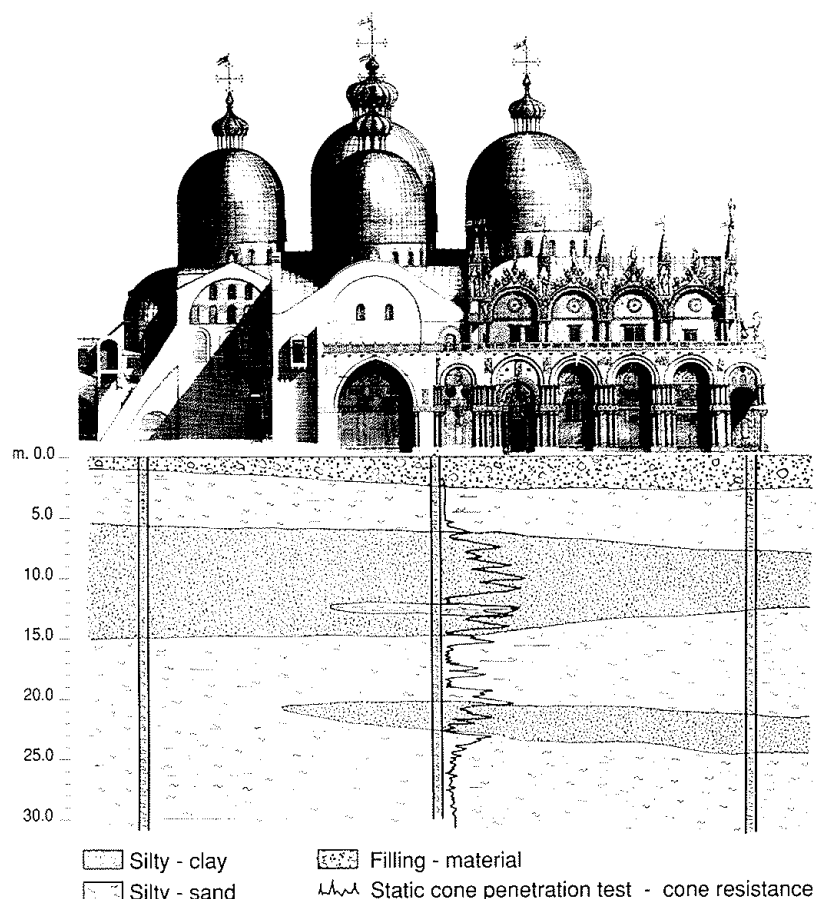


Fig. 2 - Stratigraphic profile along the North side of the Basilica. The results of static cone penetration tests are presented

silty-sand layer with higher mechanical characteristics is also present with a thickness varying between 5 and 10 m. Under the sand layer, silty-clay material was found. The presence of local lenses of sand inside the silty-clay material was observed as usual in lagoon-side environments. Three boreholes were equipped with electric piezometers and three with long base settlement-gauges connected to an automatic reading unit. This monitoring system will allow the settlement of the perimeter of the Cathedral to be controlled as a function of time and water-table variations.

An in-depth investigation was also carried out to analyze the geometric and structural characteristics of the foundation masonry of the perimeter walls and of the pillars. Several small boreholes (diameter 62 mm) were cored by using a light diamond saw and the lateral surface of the boreholes was surveyed by means of a colour video camera. Fig. 3 shows the drilling equipment installed at the base of a pillar for coring the foundation masonry. More than 50 subvertical boreholes were drilled to investigate the structural characteristics of the foundation masonries. In order to obtain qualitative information concerning the mechanical characteristics of the masonry structures, a sonic-log survey was carried out as well as cross-hole measurements by using two parallel boreholes. As a result of the coring and video camera survey, the typical structural scheme of the foundation masonry was determined (Fig. 4). At a depth of about 70-90 cm from floor level, a stone basement made with large blocks of sandstone is present with a thickness of about 2 m. Underneath this stone basement there is a wood plate (10 cm thick) which is about 3.0 m below the floor. This wood plate rests on short wooden piles which are very poorly preserved.



Fig. 3 - Drilling equipment for coring the foundation masonry

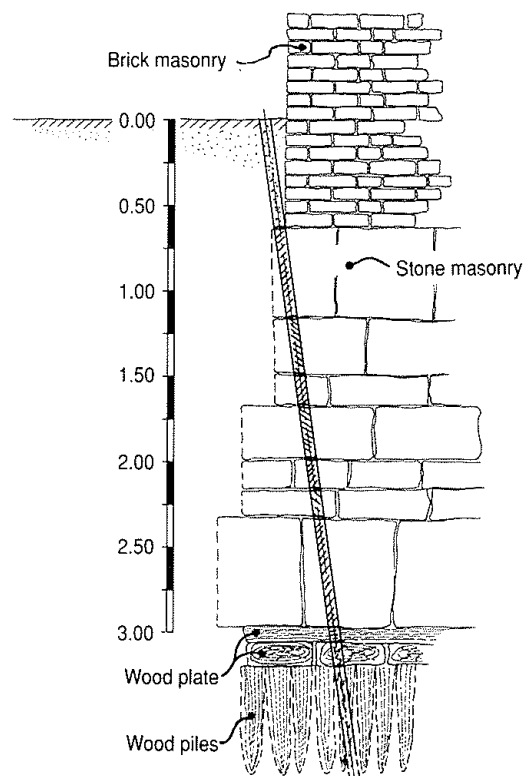


Fig. 4 - Structural scheme of the foundation masonry

5. ANALYSIS OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MASONRY STRUCTURES

The pillars and the perimeter walls of the Basilica were intensively investigated by using both non-destructive and slightly-destructive tests. Special attention was devoted to the pillars which were investigated in the only unlined portion (about 1 m high) along the women's gallery. Under this layer, the pillars are lined with marble and over this layer the surfaces are covered by mosaics.

5.1 Sonic tomography and radar survey

At first a non-destructive investigation was carried by using sonic tomography and radar survey in order to check the presence of possible anomalies. The most significant results were obtained from the sonic tomography survey which provided a clear mapping of the different velocity zones. As an example, fig. 5

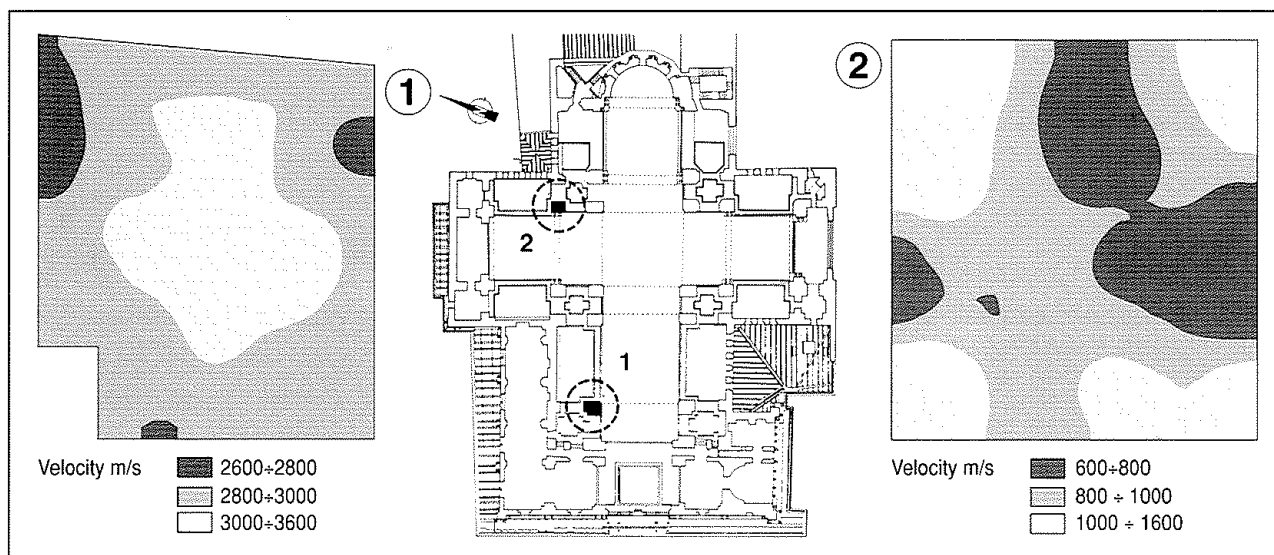


Fig. 5 - Results of tomographic survey in two pillars with different mechanical characteristics

shows the results for pillars 1 and 2. It can be clearly observed that pillar 1, which was consolidated by grouting about 30 years ago, clearly shows high velocity values, especially in the internal zone which was involved in the grouting operation. On the contrary, the velocity values obtained for pillar 2 show that the mechanical characteristics of this pillar are very poor (in fact no consolidation work was performed on this pillar in the past).

5.2 Coring and borehole video camera survey

In every pillar, horizontal and vertical boreholes (more than 60) were drilled by using light drilling equipment. Then a video camera survey was performed with a detailed description of the surface of the boreholes. Fig. 6 shows the equipment used for the video camera survey and the results of the inspection into the horizontal borehole of the pillar 2 indicated in fig. 5. A large number of voids can be observed inside the masonry, which confirms the results obtained by sonic tomography. By drilling subvertical boreholes (about 4 m long) starting from the level of the women's gallery, it was possible to investigate the lower part of the pillars lined with marble plates. Several boreholes were also carried out along the perimeter walls of the Basilica.

5.3 Measurement of the state of stress and analysis of the deformability characteristics

For the evaluation of the static conditions of the Basilica it seemed advisable to measure the actual state of stress on the main supporting structures with special attention to the pillars. For this purpose the well-known flat-jack test was used. This non-destructive test, developed by ISMES about 15 years ago, is based on the release of the state of stress by making a small slot in a mortar layer and then reloading by means of a thin flat-jack inserted into the slot. This test is very simple and reliable, as proven by calibration tests carried out in the laboratory. More than 80 flat-jack tests were carried out (about 65 on the pillars and 20 on the perimeter walls). Fig. 7 shows the view of a flat-jack test on a pillar.

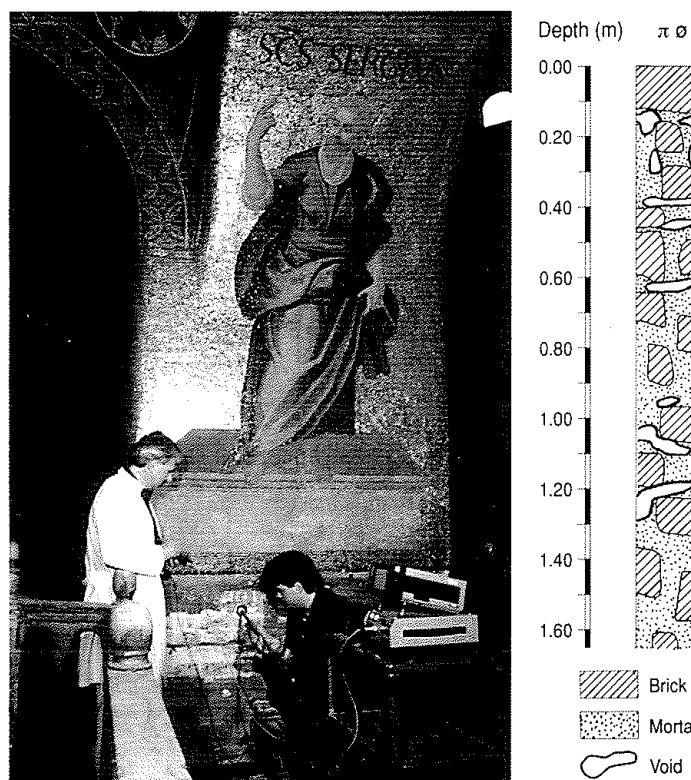


Fig. 6 - Video-camera survey equipment and result of the inspection into the horizontal borehole drilled in the pillar n. 2

The stress values measured on the pillars are shown in fig. 8. A certain heterogeneity of the state of stress in the pillars can be observed, which is related not only to the position and size of the pillars but also to the type and extent of the consolidation works which some pillars have undergone in the past. High stress values (up to 1.1 MPa) were measured in some pillars. Furthermore, in the above-mentioned pillar 2 (the south-east pillar of the St. John's Dome), a state of stress of 0.95 MPa was measured. This value was considered very high in relation to the results obtained by sonic tomography, coring and video camera survey.

By using two parallel flat-jacks the deformability characteristics of the masonry were determined for the pillars and along the perimeter walls. Two flat-jacks were inserted in the masonry in order to delimit a specimen of appreciable size (40 x 50 cm) on which a uniaxial state of stress was applied. During the loading phase, the axial and transversal deformation of the specimen was plotted as a function of the applied load. This simple testing technique allowed the deformability moduli of the different types of masonries analyzed to be determined. These values have been used as input data for the finite element model.

The deformability characteristics of the pillars are a function of the type of consolidation works performed on the masonry. The tests carried out on the original unconsolidated masonry show values for Young's modulus varying between 800 and 2000 MPa (for a stress range of $0.4 \div 0.8$ MPa). The values determined on the masonry consolidated by grouting are higher (between 1600 and 4000 MPa) in the same stress range. In some pillars, where the masonry was completely rebuilt about 30 years ago, Young's modulus has an average value of about 5000 MPa.

5.4 Supplementary investigation on the south-east pillar of St. John's Dome

The combined analysis of the results obtained by flat-jack test, sonic tomography, coring and video camera survey clearly shows that the pillar n. 2 (south-east pillar of St. John's Dome) has to withstand very severe loading conditions in comparison with the poor mechanical characteristics of the masonry. For this reason, it was decided to carry out a more detailed investigation in the lower part of the pillar after removing the marble lining. At first a detailed

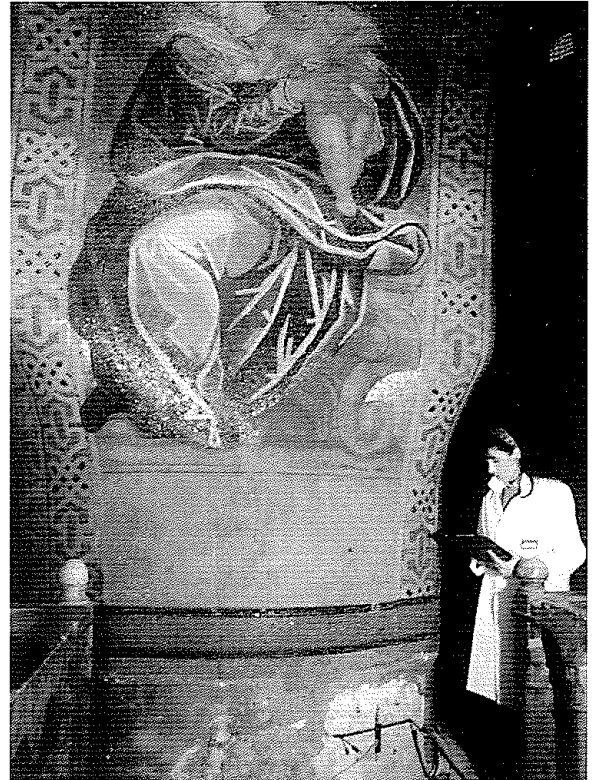


Fig. 7 - Measurement of the state of stress in a pillar by means of the flat-jack technique

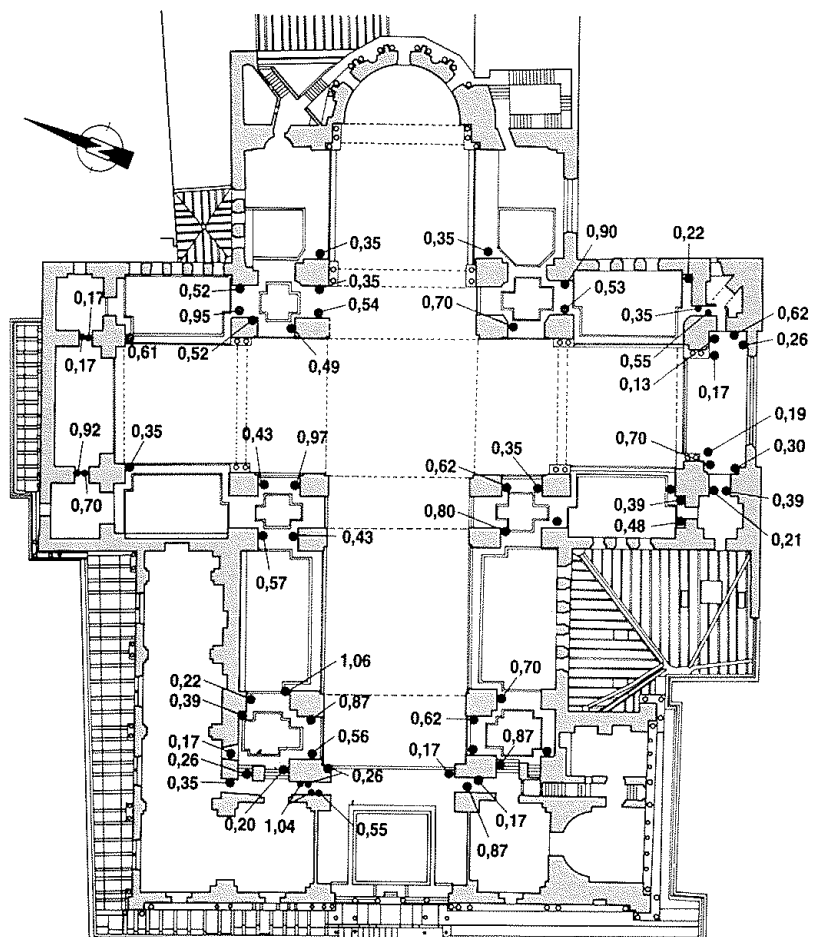


Fig. 8 - General lay-out of the flat-jack testing point with the indication of the measured states of stress

crack pattern survey was carried out which showed the presence of several vertical small cracks, especially near the corners. Sonic tomography was performed at three sections of the pillar at different heights from the floor and the results obtained confirmed the low velocity values presented in fig. 5. In several points of the pillar, the state of stress was measured by flat-jack test and an average value of 0.85 MPa was found. Then, in two points, the deformability characteristics were determined by two parallel flat-jacks. The typical stress-strain curve of the masonry is shown in fig. 9, where axial and transversal strain values are presented as functions of axial stress. The average value of the measured state of stress is also indicated. It can be observed that the masonry presents a linear behaviour up to a stress level of about 0.8 MPa with a value of Young's modulus of about 2.000 MPa. For higher stress levels, up to 1.2 MPa, Young's modulus decreases to a value of about 900 MPa and for the stress range between 1.2 and 1.5 MPa the modulus is lower than 300 MPa. It can be observed that the average state of stress measured in the pillar exceeds the limit between elastic and plastic behaviour. This supplementary investigation clearly confirmed that the static conditions of the pillar are not satisfactory and for this reason it was decided to carry out urgent consolidation works which are now in the design phase.

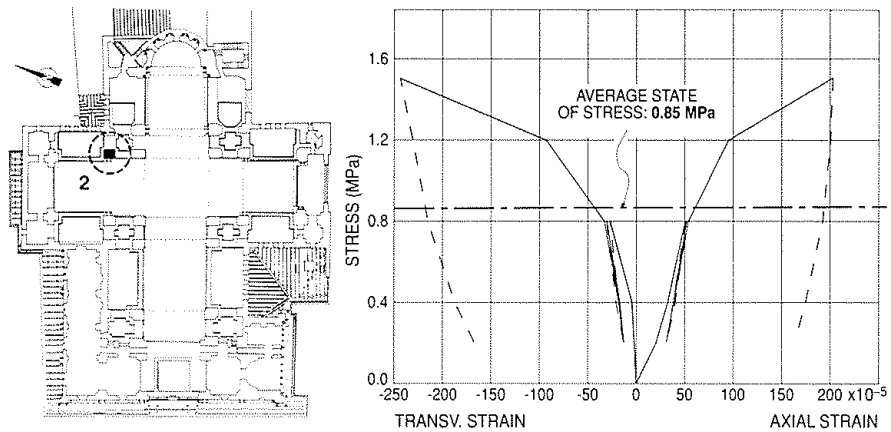


Fig. 9 - Stress-strain diagrams obtained by flat-jack tests on the pillar n. 2 with the indication of the measured state of stress

6. MONITORING SYSTEM

In order to obtain a continuous control of the static behaviour of the Basilica, in 1991 a monitoring system was installed by ISMES. The principal features which are monitored are as follows:

- opening of the main cracks in the pillars (8 extensometers)
- relative horizontal movements of the pillars (11 long base extensometers)
- tilting of the vertical structure (4 inclinometers)
- internal and external temperature (5 temperature-gauges)
- vertical settlement of the soil foundation (3 long base settlement gauges)
- water-table variations (3 piezometers).

All the instruments are connected to an automatic data acquisition and recording unit which can quickly indicate possible anomalies in the structural behaviour. The analysis of the deformations as a function of time and temperature makes it possible to separate thermal effect from the deformations arising from other structural causes. As an example, fig. 10 shows the diagrams of the relative horizontal movements between some pillars measured by three long base extensometers during the first period of observation. It can be clearly

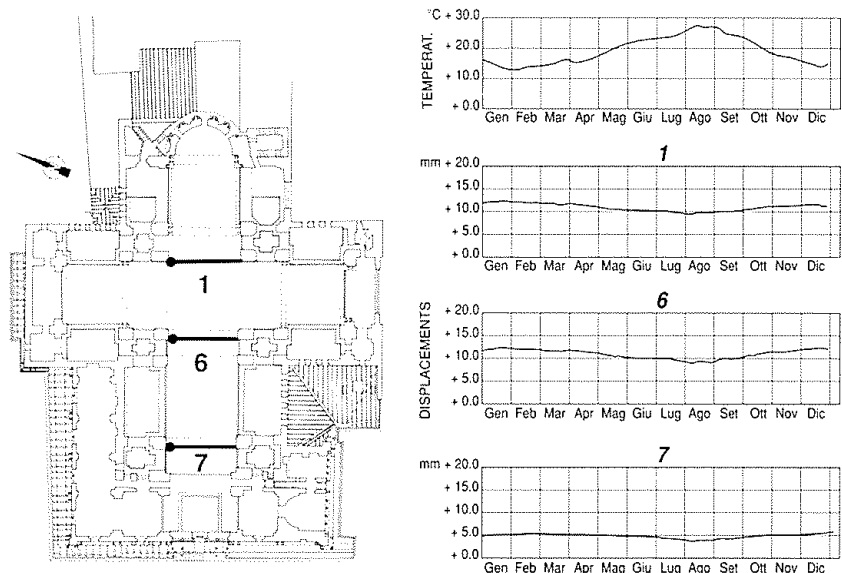


Fig. 10 - Diagrams of the relative horizontal displacements of some pillars during the first year of observation

seen that the deformation diagrams follow temperature changes and no permanent deformation is noticed at the end of the first yearly cycle.

7. NUMERICAL MODELLING

A significant contribution to the knowledge of the static conditions of the Basilica will be provided by the mathematical model which will utilise all the data and information obtained through in-situ investigations. This mathematical analysis, which is now in progress, has the following aims:

- to set up a mathematical model capable of providing a reasonable picture of the present stress distribution due to dead loads; the validity of the model in achieving this aim will be tested by comparing experimental stress measurements with analytical results in certain points of the structure;
- to estimate the effect that a reduction of stiffness in some structural elements could produce in terms of displacement and stress redistribution;
- to forecast the displacement trend under cyclic loads, such as thermal loads, in order to obtain a better understanding and a more meaningful interpretation of data provided by the monitoring system.

The high degree of complexity of the structure suggested the opportunity of considering the whole building as the sum of suitable substructures. Several analyses on simplified models have been performed in order to identify the most significant substructures. It now appears evident that a good representation of the global behaviour of the Basilica can be achieved by isolating five parts, each containing one dome; the boundary conditions of each single substructure will reproduce correctly the stiffness of the adjacent substructures.

8. CONCLUSIONS

The diagnostic analyses illustrated here represent an exhaustive example of the methodological approach which should be followed when studying the static behaviour of an important monument. This combined experimental and numerical procedure is effectively the only research tool for the study and design of restoration and consolidation work. The results of the experimental investigations (flat-jack tests, coring and video camera survey, sonic tomography, radar, etc.) have been used to evaluate the strength, the deformability and the composition of the masonry, as required for the construction of the numerical model, and to determine the present state of stress, which can then be used for safety checks and for calibrating the numerical models. This study is not yet completed, but a first important result has been obtained; the existence of a weak point in the structure has been established (the south-east pillar of St. John's Dome) where consolidation work is now in progress.

It may also be mentioned that once cataloguing is completed of the enormous quantity of written and graphic material detailing the Basilica, together with the data obtained from the present analysis and research work, an invaluable tool will be at our disposal to ensure historical and technical continuity in restoration procedures.

REFERENCES

1. V. HERZNER, "Die Baugeschichte von San Marco und der Aufstieg Venedigs zur Grossmacht", in "Wiener Jahrbuch für Kunstgeschichte", Band XXXVIII, Wien, Köln, Graz, 1985
2. P.P. ROSSI, "Recent development of the flat-jack test on masonry structures", U.S.A. - Italy Workshop on evaluation and retrofit of masonry structure, August 1987
3. B. ASTORI, G.P. GIANI, P.P. ROSSI, "Control measurements and stability analysis of the Cathedral of Orvieto, Italy", Proceedings of the International Symposium of IAEG, Athens, September 1988
4. E. VIO, G. GALEAZZO, R. VITALIANI, "Rilievi, controlli dimensionali e analisi strutturali della Basilica di S. Marco in Venezia", Bull. of the Italian Society of Topography n. 3/04, Rome 1988
5. P.P. ROSSI, "Non destructive evaluation of the mechanical characteristics of masonry structures", Proceedings of the Conference on Non Destructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, Boulder, October 1989.
6. E. VIO, "La conservazione storia e tecniche", I mosaici di S. Marco: la storia, l'illuminazione" Fratelli Fabbri, Milano 1990
7. E. VIO, "Cripta o prima cappella ducale?", "La cripta di S. Marco, la storia, la conservazione", Vallardi, Milano 1992