



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TORINO – S.U.S.C.O.R.
Corso di Studi in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali
Dipartimenti di Studi Storici – Chimica – Fisica – Scienze della
Terra – Scienze della Vita e Biologia di Sistema



Laurea Magistrale Abilitante - AA 2019-2020

Corso: Progettazione Interventi

Docente: Valentina White – Restauratrice (Dipl. I.s.C.R.)
Storica dell'Arte

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa



Il restauro della Torre di Pisa - Un cantiere di progetto per la conservazione delle superfici

A cura di G. Capponi e S. Vedovello

Comitato di Coordinamento per la Salvaguardia della Torre di Pisa

Opera della Primaziale Pisana

Istituto Centrale per il Restauro

Con il contributo finanziario della Commissione Europea – Direzione Generale X

Roma 2000



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

M. Jamiolkowski – Politecnico di To, Coordinatore del Comitato (1)

■ Attività di studio, progettazione e attuazione svolti dal Comitato Internazionale per la Salvaguardia ed il Consolidamento della Torre Pendente di Pisa, dal 1990 al 2000.

■ Il Comitato nasce in seguito alla chiusura della torre al pubblico, avvenuta il 6 gennaio 1990. l'anno precedente un'apposita Commissione istituita dal Ministero dei Lavori Pubblici e presieduta dal Prof. R. Jappelli e P. Pozzati, dichiarava quanto segue:

“...ai fini della salvaguardia della pubblica incolumità, sia da valutare con estrema attenzione, da parte degli organi preposti al controllo e conservazione della Torre, l'opportunità di escludere temporaneamente l'accesso al pubblico alla Torre stessa e alle sue zone limitrofe...” “...la sicurezza del monumento è molto limitata sia nei confronti della stabilità della Torre sia della resistenza al terreno” (6.12.1980, supplemento ordinario alla G.U., Serie generale n.285



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

M. Jamiolkowski – Politecnico di To, Coordinatore del Comitato (2)



Il clamore indusse il Presidente del Consiglio dei Ministri (Senatore G. Andreotti) su proposta congiunta dei Ministri dei BB.CC.AA. e del LL. PP. Ad istituire il Comitato in questione, predisponendo un apposito disegno di Legge che, approvato dal Parlamento (L. n.360 del 30.11.90) affidava al Comitato di esperti il compito di

“...provvedere, anche in deroga alla normativa vigente, sulla base della documentazione esistente in materia presso il Ministero dei LL.PP., all’individuazione e definizione del progetto di massima e di quello esecutivo, stabilendo i tempi, i costi e le modalità di esecuzione”.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

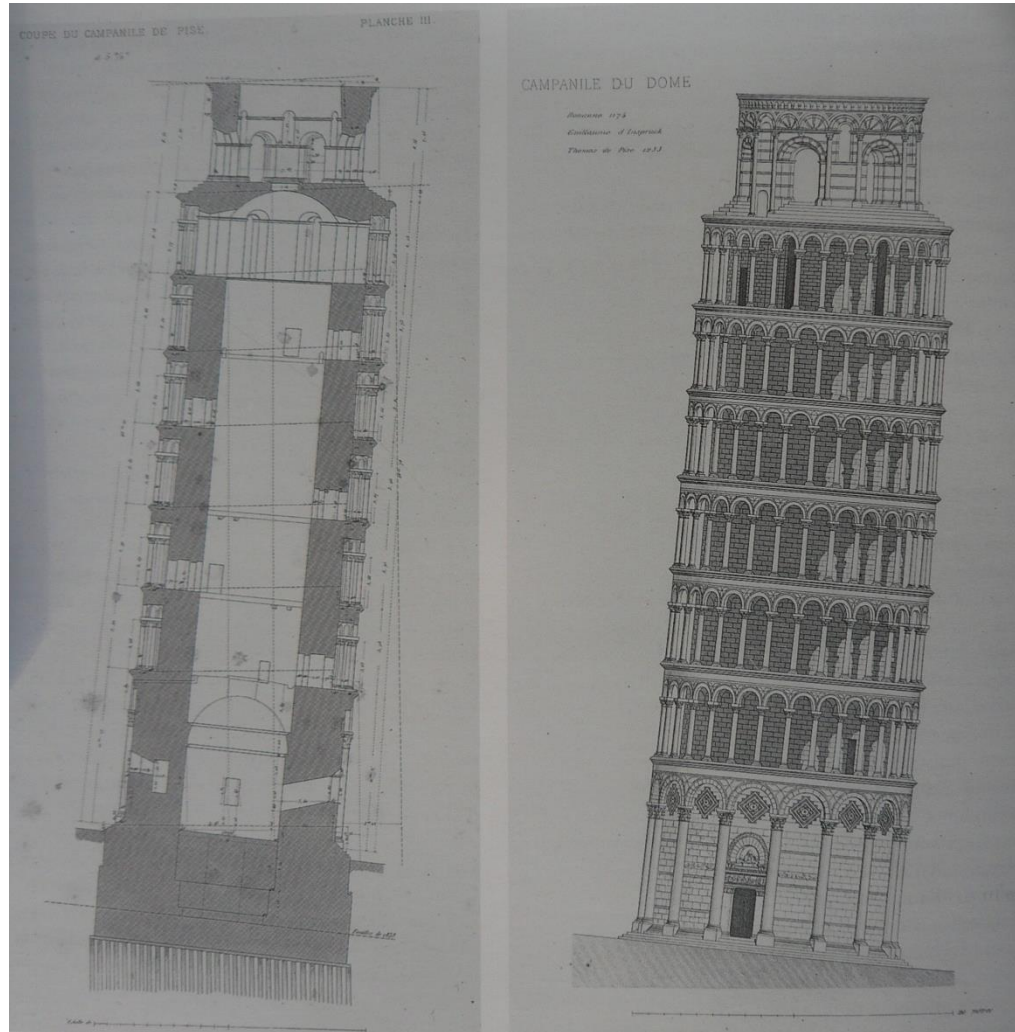
M. Jamiolkowski – Politecnico di To, Coordinatore del Comitato (3)

- Fase di studio e ricerca alla quale dal 1997 fece seguito quella operativa definitiva in vista dell'ultimazione stabilita per il 2001 con la restituzione della Torre alle autorità competenti in condizione di adeguati margini di sicurezza nei confronti sia del rischio di ribaltamento sia di collasso strutturale. Il 31.12.2001 il Comitato si scioglie dopo aver consegnato il progetto di “restauro materico” auspicando che i lavori possano avere inizio.
- Nel lasciare la Torre in condizioni di stabilità geotecnica e di sicurezza strutturale soddisfacenti, si raccomanda alle autorità preposte alla sua tutela di proseguire il monitoraggio per un periodo di 5-10 anni, allo scopo di verificare l'effetto benefico degli interventi effettuati sulla Torre e di accertare la sua risposta alle variazioni cicliche delle condizioni ambientali nel nuovo assetto conseguito.
- Dal 2001 sono iniziati i lavori la cui chiusura è prevista proprio per il 2009 con un costo complessivo di 5,5 milioni di euro.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Studi e rilievi storici



Sezione, da G. Rohault de Fleury, *Le Campanile de Pise*, Paris, 1859, tav. III

Prospetto, da G. Rohault de Fleury, *Les monuments de Pise au Moyen Age*, Paris, 1866, tav. XXIII



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

M.D'Elia – A.Mignosi Tantillo (1)

Gruppi di lavoro composti da:

- Geotecnici

- strutturalisti

- addetti alla conservazione: archeologi, storici dell'arte, architetti, restauratori, biologi, chimici, fisici, esperti di materiali lapidei, informatici

Studi volti ad approfondire le conoscenze dello stato del monumento e del relativo sottosuolo e finalizzati alla redazione di un progetto preliminare di stabilizzazione della Torre e di restauro delle superfici.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

M.D'Elia – A.Mignosi Tantillo (2)

Richiesta di effettuare:

- una campagna di indagini archeologiche sulla Piazza del Duomo
- una campagna di rilevamento fotografico e fotogrammetrico del Campanile e delle sue adiacenze
- una ricerca sulla storia del Campanile, con particolare riguardo alla documentazione degli interventi di riparazione, sostituzione e restauro;
- una ricerca relativa ai materiali costitutivi della fabbrica;
- una meticolosa documentazione sul quadro fessurativo dei paramenti, con redazione di relativa mappatura;
- una accurata indagine sullo stato di conservazione del monumento con individuazione delle cause di alterazione dei materiali costitutivi;
- la memorizzazione di tutti i dati secondo da inserire nella banca dati generale.

Dopo 2 anni il materiale raccolto viene presentato con un ulteriore piano di ricerca finalizzato alla redazione di un progetto esecutivo per il restauro delle superfici.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Analisi del microclima e delle interazioni ambiente-manufatto

- Esperti del CNR di Padova effettuano indagini sulla meteorologia locale studiando il profilo verticale della temperatura dell'aria a ridosso della Torre; misurando il gradiente verticale termico e idrometrico dell'aria e la temperatura della pietra alle varie esposizioni, durante le quattro stagioni.
- Furono eseguite campagne di rilevamento delle misure fisiche della distribuzione spettrale del particolato sospeso, nel contesto dello studio della deposizione dello stesso sulla pietra. Ricerche sui cicli di condensazione ed evaporazione, di sgelò e disgelo. Messo a punto il modello della radiazione solare sulla Torre per meglio comprendere il fenomeno della dilatazione termica delle colonne del loggiato.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Analisi chimiche e biologiche

- Esperti dell'ISMES con l'ausilio di un laboratorio mobile dotato di strumentazioni automatiche effettuarono diverse campagne di rilevamento per approfondire la conoscenza del grado di inquinamento della piazza del Duomo. Individuate e misurate le concentrazioni di anidride solforosa, ossido di azoto, ossido di carbonio, idrocarburi e polveri al fine di valutare l'incidenza di questi inquinanti sullo stato di conservazione dei diversi litotipi.
- I ricercatori del CNR di Roma dopo un'attenta ricognizione sulle superfici, provvidero alla individuazione delle aree esposte a degrado di tipo biologico, alla individuazione delle piante, dei licheni e altro. Furono eseguiti prelievi di materiale alterato per le analisi colturali; quindi, dopo sperimentazioni, vennero individuati i biocidi più idonei ad eliminare la microflora biodeteriogenica, i talli lichenici e le piante.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Sperimentazione dei prodotti da impiegare

- Lavori di pronto intervento eseguiti dalla C.B.C. tra 1994 e 1995 consentono l'avvio di indagini per valutare l'efficacia di prodotti consolidanti e protettivi da utilizzare per la conservazione dei litotipi particolarmente degradati della Torre. La sperimentazione fu limitata al marmo di San Giuliano e al marmo di Carrara, utilizzando un numero considerevole di provini, ricavati da marmi degradati depositati presso i capannoni della Opera della Primaziale Pisana sottoposti a cicli di invecchiamento artificiale in camere climatiche o direttamente sulla Torre, sul versante Sud.
- Verifica dei parametri di colore, lucentezza, idrorepellenza e contenuto di Sali solubili, fattori guida nell'intervento di urgenza sugli elementi architettonici particolarmente degradati.
- In una II fase della ricerca la sperimentazione fu estesa a tutti i litotipi presenti, inserendo in particolare una verifica del comportamento di prodotti adesivi sui danni tipici di scagliatura della pietra di Filettole. Tutti i campioni restano oggetto di studio anche in funzione dei cicli di manutenzione.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Percorsi di percolamento delle acque all'interno della Torre

- Esperti del CNR di Padova, installarono nei siti più esposti alle piogge dei contenitori di raccolta per un anno consentendo così di individuare le vie di penetrazione, percolamento e localizzare la presenza di serbatoi di acqua piovana all'interno delle murature del cilindro: ciò spiga la formazione di stalattiti. Necessità di arginare il flusso delle acque.
- Dal 1995 la figura del Direttore ICR entra nel Comitato consentendo stretti rapporti di collaborazione tra i laboratori e i lavori sulla Torre.
- Approfondimenti in questo senso hanno permesso la redazione del cantiere di progetto con la realizzazione di interventi di urgenza localizzati.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Il sistema informatico “Akira Gis Service” P.Lunari, S. Lodola, C. Magnati, U. Parrini, A. Vecchi (1)

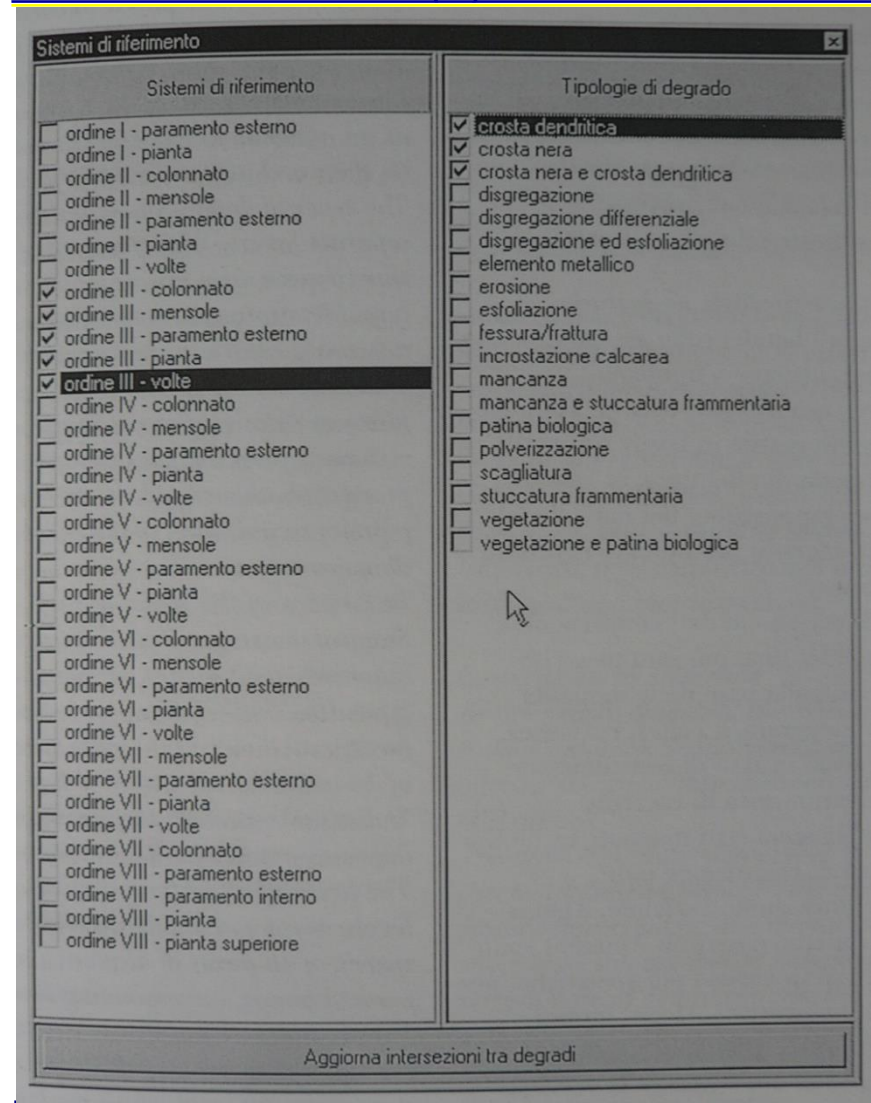


Immagine della struttura di archiviazione del programma “ Leaning Tower GIS”

Come strumento di sintesi per le diverse ricerche propedeutiche al progetto di restauro è stato messo a punto il software “Leaning Tower GIS”, basato su “Akira Gis Server” sistema informatico specializzato nella documentazione e nel monitoraggio di complessi architettonici. Grazie all’ausilio di un indice geografico, permette la documentazione puntuale dello stato di conservazione attraverso la georeferenziazione degli elementi costitutivi e delle loro condizioni attuali, associata e correlabile a una banca dati riguardante analisi storiche, vicende conservative, relazioni scientifiche.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Il sistema informatico “Akira Gis Service” P.Lunari, S. Lodola, C. Magnati, U. Parrini, A. Vecchi (2)

- Il sistema gestisce una rappresentazione geometrica misurabile, ottenuta in gran parte da una base fotogrammetrica, di tutte le superfici esposte del monumento.
- In ogni tavola sono state individuate poi informaticamente classi di tipologie architettoniche (conci, volte, archi, capitelli, ecc.) e sono state definite le sezioni di esposizione N-S-E-O.
- Ogni singolo oggetto del monumento risulta quindi definito mediante una serie di attributi specifici (numerazione, tipologia architettonica, elevazione, esposizione, ecc.)



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Mappatura dello stato di conservazione

Per la mappatura dei materiali lapidei della Torre è stata messa a punto una legenda che attribuisce ad ogni tipologia una specifica tessitura grafica, riportata sulla superficie di ognuno dei conci disegnati nelle tavole di rilievo e che può venire richiamata alla lettura con un apposito comando del programma. Il lavoro di registrazione dei dati, prima su base cartacea poi sul sistema informatico, è durato due anni: sono stati controllati e catalogati i conci di tutte le superfici esterne, escluse le zone a nord del 1°Ordine celate dai pesi in piombo, e della scala interna. L'elenco dei litotipi è il seguente:

Marmo di San Giuliano – varietà gialla/rosata - (GI)
Marmo di San Giuliano – varietà grigia/bianca - (GR)
Marmo di San Giuliano – indistinto - (SG)
Marmo Apuano bianco - (MB)
Marmo Apuano grigio “bardiglio” - (MG)
Breccia di Agnano - (BA)
Breccia di Caprona - (BC)
Breccia - indistinta - (B)
Calcere grigio di Filettole - (CG)
Quarzite di Crespignano (“Verrucano”) - (VE)
Granodiorite dell'Isola d'Elba - (GD)
Granito; provenienza sconosciuta - (GRA)
Serpentine; provenienza sconosciuta - (SERP)
Calcarene “Panchina” di Livorno - (PA)
Ardesia/Lavagna - (AL)
Impossibilità di attribuzione litologica per il degrado - (?)

■ Caratterizzazione dei materiali e verifica dello stato di conservazione utilizzando basi grafiche tratte dal rilievo fotogrammetrico, adeguato e informatizzato.

■ Con il I livello analitico si sono andate a verificare e documentare zone campione riferite a fasce verticali sui quattro orientamenti. L'esame critico dei dati raccolti ha permesso di definire raggruppamenti di casistiche omogenee, che sono state applicate a tutta la superficie del monumento attraverso una mappatura di sintesi. I dati rilevati sono stati riportati all'interno del sistema Akira GIS Server, per individuare con semplici procedure, il dimensionamento dell'entità dei danni e quindi dei futuri interventi.

■ Le tipologie di degrado vengono gestite in layers separati per operare confronti di frequenza e distribuzione.

■ Lavoro di 2 anni per la classificazione dei litotipi.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Il sistema informatico

MAPPATURA ANALITICA	MAPPATURA SINTETICA	INTERVENTO PREVISTO
Vegetazione	Vegetazione e patina biologica	Disinfestazione, preliminare alla pulitura
Patina biologica		
Croste nere	Croste nere e dendritiche	Pulitura chimico-fisica Pulitura meccanica
Croste dendritiche		
Incrostazioni calcaree	Incrostazioni calcaree	
Erosione	Disgregazione ed esfoliazione	Consolidamento
Disgregazione differenziale		
Disgregazione		
Polverizzazione		
Esfoliazione		
Scagliature	Scagliature	Riadesione, incollaggi
Mancanze	Mancanze	Integrazioni, stuccatura
Stuccature frammentarie		
Stuccature idonee		
Fessure e fratture	Fessure e fratture	Da progetto
Elementi metallici	Elementi metallici	Trattamenti specifici

Tabella I: rapporto tra le voci di mappatura analitica, mappatura sintetica e interventi di restauro previsti.

Litotipo	Numero	Area	% Num.	% Area
marmo di San Giuliano - indistinto (SG)	4856	717,03	16,5	12,66
marmo di San Giuliano - varietà gialla/rosata (GI)	7368	1403,96	25,04	24,79
marmo di San Giuliano - varietà grigia/bianca (GR)	5476	1246,76	18,61	22,02
marmo di San Giuliano totale	17700	3367,75	60,15	59,47
marmo Apuano bianco (MB)	5393	1758,46	18,33	31,05
marmo Apuano grigio "bardiglio" (MG)	546	135	1,86	2,38
marmo Apuano totale	5939	1893,46	20,19	33,43
calcare grigio di Filettole (CG)	4047	182,99	13,75	3,23
breccia - indistinta (B)	525	52,62	1,78	0,93
breccia di Agnano (BA)	651	71,34	2,21	1,26
breccia di Caprona (BC)	270	37,84	0,92	0,67
breccia totale	1446	161,8	4,91	2,86
quarzite di Crespignano ("Verrucano") (VE)	43	4,75	0,15	0,08
granodiorite dell'Isola d'Elba (GD)	10	38,17	0,03	0,67
granito - provenienza sconosciuta (GRA)	3	8,82	0,01	0,16
calcarenite "Panchina" di Livorno (PA)	31	0,75	0,11	0,01
serpentinite - provenienza sconosciuta (SERP)	3	0,03	0,01	0
ardesia/lavagna (AL)	1	0,02	0	0
impossibilità di attribuzione litologica a causa del degrado	191	4,12	0,65	0,07
litotipo non specificato	10	0,02	0,04	0
Totali	29424	5662,68		

Tabella II: distribuzione di tutti i litotipi rispetto a lla superficie totale della Torre.

■ Nel 1997 con fondi della Commissione Europea e in collaborazione con la Scuola Normale di Pisa è stata attivata l’elaborazione del sistema informatico su base fotogrammetrica finalizzato alla gestione degli aspetti conservativi delle superfici della Torre aggiornabile e di facile consultazione anche per le aree di più difficile accesso visivo.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Il sistema informatico

■ L'organizzazione del sistema consente di eseguire statistiche complesse a diversi livelli di dettaglio e con possibilità di sovrapposizione delle varie tipologie di dati

■ Oltre le mappature dei litotipi e le forme di degrado, il sistema fornisce la possibilità di gestire numerose altre informazioni: in relazione al sistema geometrico sono stati inseriti i punti di prelievo e i risultati delle analisi scientifiche, dati di origine storica ed archivistica, documenti che testimoniano operazioni di restauro o di manutenzione e contributi multimediali (fotografie, filmati, ecc.). Attraverso la georeferenziazione è possibile giungere agevolmente nel tempo a tali informazioni partendo dalle tavole grafiche: selezionando ad esempio una colonna, si può accedere alla foto, alle documentazioni e alle analisi ad essa associate.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

I materiali della Torre - S. Lodola e F. Veniale (1)

- Marmo di San Giuliano: a granulometria molto fine, si presenta in varietà differenti per colorazione e tessitura. Il colore varia dal grigio al bianco, dal giallo grigio fino al rosato. Dal punto di vista tessiturale è generalmente molto ornato con venature frequenti e irregolari, fino ad assumere aspetti sbrecciati. Molte le sostituzioni e le ri-lavorazioni.
- Marmi apuani: bianco e grigio bardiglio. Maggiore granulometria e omogeneità cromatica. Utilizzato per operare molte sostituzioni
- Calcare grigio di Filettole: utilizzato unicamente per le tipiche ornamentazioni scure della Torre. Calcare di colore grigio a grana fine e con tessitura omogenea.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

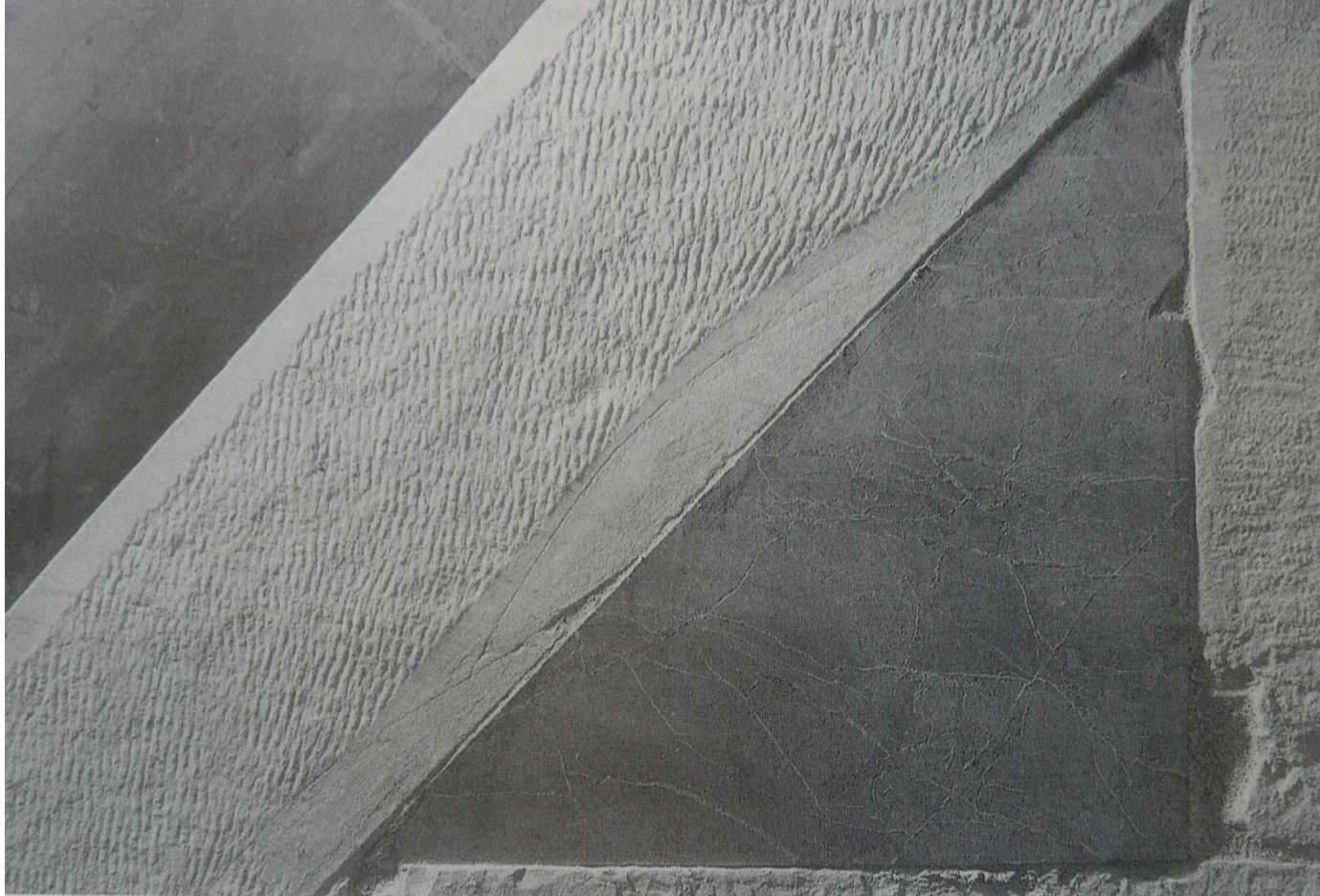
I materiali della Torre - S. Lodola e F. Veniale (2)

- Brecce di Agnano e Caprona: con aspetti macroscopici variabili. La tipologia più frequente è molto eterogenea in funzione della natura e colorazione dei clasti, prevalentemente calcarei. Maggiore porosità e quindi maggiore facilità di degrado. L'utilizzo è caratteristico della II fase costruttiva.
- Quarzite di Crespignano: meta arenaria di colore variabile dal verdastro al rosato, a grana media. Poco frequente.
- Calcarenite "Panchina" di Livorno: di colore giallastro, molto porosa e leggera.
- Granodiorite dell'Isola d'Elba e granito: Rocce ignee quarzoso-feldspatico di colore giallastro per alterazione superficiale, utilizzate unicamente per le semi colonne del I ordine.
- Serpentinite: sporadica nel paramento esterno del loggiato del VI e VII ordine.
- Ardesia/Lavagna: sporadica.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Le tecniche di lavorazione – P. Rockwell, S. Vedovello (1)



I Ordine. Differenze di lavorazione tra la superficie di marmo apuano, con tracce di gradina e scalpello e calcare di Filettole, perfettamente levigato.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Le tecniche di lavorazione – P. Rockwell, S. Vedovello (2)



Subbia: scalpello a punta costituito da un'asta che varia dai 20 ai 30 cm. e con diametro tra i 10 e i 25 mm. La punta è piramidale o conica.

A seconda dei segni leggibili sulla superficie della pietra è possibile risalire al tipo di lavorazione che può essere attribuito a determinate epoche.

I Ordine. Lavorazione a subbia sul piano superiore di una delle foglie. Sul fondo tracce di rifinitura a scalpello e, tra i piccioli delle foglie più piccole, fori di trapano ad intensificare la linea di separazione.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

■ Il cantiere di progetto

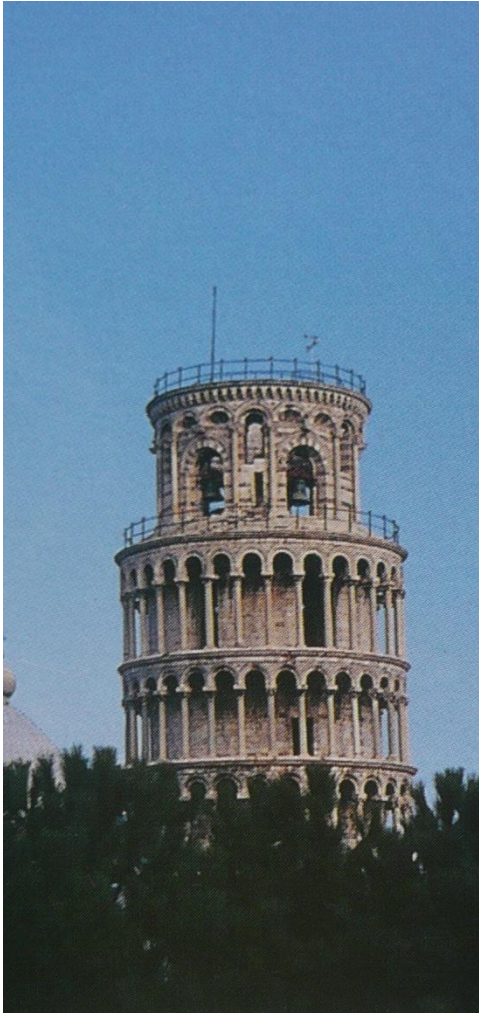
■ La redazione del progetto di restauro è possibile grazie alla confluenza di tutti gli apporti specialistici volti a trovare un momento operativo di sintesi in grado di garantire la salvaguardia dell'unicità dell'opera d'arte. L'intervento ha utilizzato i Fondi della Direzione Generale X della Commissione Europea. I tasselli realizzati sono visibili e costituiscono un concreto terreno di discussione.

■ Metodologia e redazione di schede utili anche alla fase di manutenzione programmata. Si lavora per la definizione di un progetto definitivo specialmente in merito al problema delle opere provvisorie.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Breve Storia del monumento (1)



■ 1173: data di fondazione riportata nell'iscrizione murata a destra dell'ingresso. Vasari sostiene che l'architetto responsabile dell'impresa e del progetto sia Bonanno Pisano.

Durante il primo anno si esegue il masso fondale e il primo ordine.

■ 1178: la costruzione dovrebbe aver raggiunto il IV ordine, con la realizzazione dei loggiati che procede velocemente con il montaggio di elementi già da tempo eseguiti a terra.

■ Stasi per necessità di assestamento ed esaurimento materiali. Infatti da questo livello si assiste a un cambiamento significativo del materiale di rivestimento della gola con l'introduzione della pietra panchina, cambiamento che fa ipotizzare una fase di costruzione successiva.

■ 1272-1278: ripresa dei lavori ad opera di Giovanni Simone.

■ 1360-1370: completamento ad opera (secondo Vasari) di Tommaso d'Andrea Pisano, fatta eccezione per la volta di coronamento del tamburo interno, realizzata tra 1438 e 1454 in sostituzione di un solaio ligneo.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Breve Storia del monumento (2)



■ Nei documenti non c'è alcun cenno a dissesti insorti durante la realizzazione del monumento

■ 1298: applicato alla costruzione un filo a piombo senza alcuna citazione di preoccupazioni relative ad una qualche instabilità del campanile stesso.

■ La prima citazione di problemi di pendenza viene registrata da Vasari e attribuita a cedimenti del suolo e non ad una precisa volontà costruttiva.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

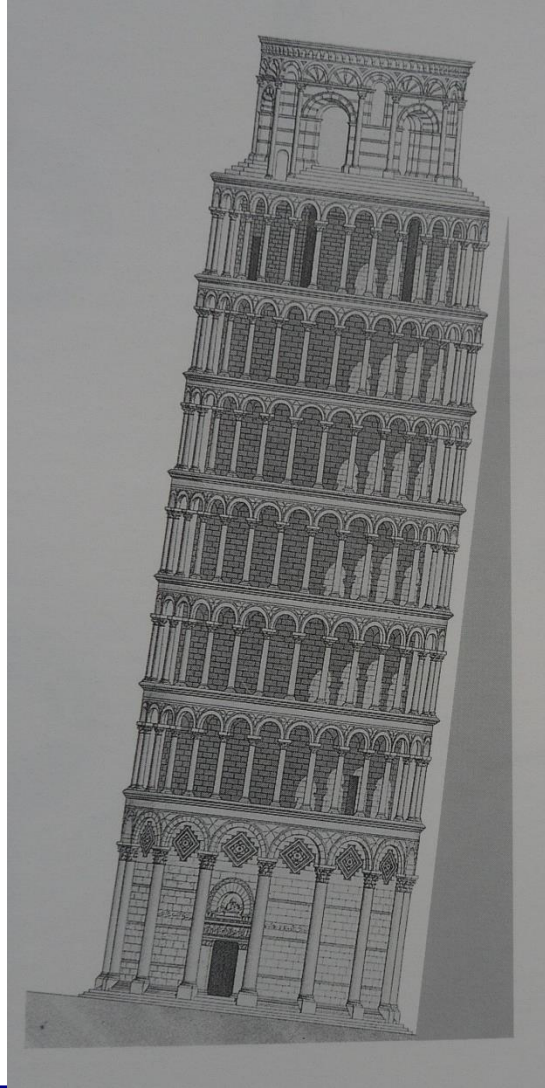
Dati costruttivi (1)

- la torre emerge da terra per un'altezza di m. 54,06.
- Il dm. esterno del I ordine misura m. 15,54.
- Il peso totale della Torre è calcolato in t. 14.453 di cui 2.396 di fondazione
- Fondazioni: il masso murario che costituisce la fondazione ha forma di anello (dm. Interno m.4,50, dm. Esterno m.19,58, h. 2,88) con gradoni sia verso l'interno che verso l'esterno ed è realizzato con pietrame e malta di calce di San Giuliano. Nel masso di fondazione durante i lavori di consolidamento del 1933-35 venne iniettata a pressione una miscela di acqua e cemento (q.1860), utilizzando 360 fori eseguiti attraverso la muratura eliminando il problema delle acque sorgive affrontato con interventi di ripetuto interrimento che portarono all'occultamento del basamento fino a coprire parte dei fusti delle colonne.
- Muratura: la struttura muraria della zona del I ordine e del sovrastante tamburo è costituita da una muratura a sacco rivestita da due fodere di blocchi, principalmente di marmo San Giuliano o di Carrara. La torre si articola in 8 ordini di struttura uniforme tranne nel I e nell'ultimo.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Dati costruttivi (2)



- **I Ordine:** costituito da un cilindro cavo (spessore del muro m. 4,09) e presenta all'esterno 15 colonne incassate sormontate da archi ciechi.
- **II-VII Ordine:** costituiti da due strutture. Un cilindro cavo e loggiati circolari con 30 colonne. I loggiati hanno una larghezza decrescente verso l'alto. Le colonne, con un sistema di archi e volte a vela, sorreggono il livello successivo.
- **VIII Ordine:** o cella campanaria costituita dal prolungamento del solo tamburo degli ordini sottostanti, su cui si aprono sei finestroni. All'esterno del tamburo sono visibili sei gruppi di colonne binate.
- **Scale:** nello spessore del muro del tamburo si trova una scala elicoidale articolata in 6 rampe con 294 gradini.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Interventi di particolare incidenza nella storia conservativa

Registri dell'Opera della Primaziale di Pisa, Archivio di Stato di Pisa, Genio Civile di Pisa, Ministero del LL.PP., Ministero della P.I.

riportano numerose e frequenti annotazioni relative a opere di riparazione. Più che restauri sono sostituzioni di parti, posa in opera di cerchiature, staffature...

- 1394: sostituzione di 4 colonne
- 1798-1807: restauro del monumento
- 1838: rifacimento di un largo tratto del paramento esterno del I ordine.
- 1860: dopo l'ennesimo fulmine viene affrontata la realizzazione di un parafulmine.
- 1872-1878: ingente opera di rifacimenti e restauri su tutta la Torre.
- 1904: restauro con incatenamento delle volte dei loggiati.
- 1933-1935: consolidamento delle fondazioni.
- 1954: sostituzioni per riparare i danni subiti durante la II guerra mondiale.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

G. Capponi – Direttore dei lavori – ideazione M. Cordaro (1)

Cantiere di progetto = fase di contatto diretto con l'opera per un approfondimento dello studio del suo stato di conservazione e come momento di individuazione e definizione delle metodologie più idonee per l'esecuzione degli interventi.

Operazioni conoscitive che la nuova legge quadro sui lavori pubblici (L. 109/94 e Regolamento attuativo DPR 554/99) prevede per i beni culturali all'interno della prima delle tre fasi progressive di definizione dell'intervento di restauro, identificate come:

- preliminare
- definitiva
- esecutiva.

■Nel campo della conservazione delle opere d'arte è evidente il particolare rilievo che riveste la fase di progettazione preliminare, laddove può anche rivelarsi particolarmente complesso e oneroso arrivare all'acquisizione di una preventiva e corretta analisi dello stato di conservazione del monumento. Percorso di conoscenza che vede la partecipazione di professionalità diverse chiamate ad interagire per formulare una diagnosi corretta ed individuare le metodologie più efficaci per il restauro e, quando possibile, per gli interventi preliminari sull'ambiente.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

G. Capponi – Direttore dei lavori – ideazione M. Cordaro (2)

- Il monumento ha una vicenda complessa e il primo tentativo è quello del confronto diretto tra i dati storico documentari (Analisi eseguita dall'Istituto dell'Enciclopedia Italiana Treccani con responsabile scientifico A.M. Romanini) e la materia.
- Spesso i documenti riferiscono con puntualità le quantità ma con minore cura la localizzazione delle sostituzioni.
- La lettura dei segni di lavorazione, possibile solo dopo la pulitura delle superfici, potrebbe costituire una ulteriore chiave di lettura degli interventi eseguiti nei diversi secoli, permettendo forse di stabilire le correlazioni mancanti tra i dati propri della filologia tradizionale e quelli emersi dall'analisi dei materiali.
- Conoscere la progressione e la localizzazione delle sostituzioni aiuterebbe a comprendere come le dinamiche del danno colpiscono le superfici e acquisire quindi un prezioso parametro per stabilire i livelli di intervento e le successive fasi di manutenzione.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e tecniche



Il Ordine, strombo della finestra del tamburo, segni di lavorazione a picchiarello.

Picchiarello: piccolo piccone con la testa dotata di punte su entrambe le estremità. Molto usato nel medioevo, in alternativa o a completamento della subbia e della gradina



Gradina: strumento a mano simile allo scalpello, ma con il bordo da taglio inciso a tacche regolari fino a costruire una serie di denti più o meno appuntiti. Sulla Torre costituisce la base finale della lavorazione.

Il Ordine, arco tra colonne, segni di lavorazione a gradina sulla gola della cornice



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e tecniche



I Ordine, cornicione superiore, lavorazione a gradina, probabilmente montata su uno strumento pneumatico. Gli spigoli sono rifiniti a scalpello.

II Ordine, mensola della colonna 8, tracce di lavorazione a martellina.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e tecniche



Interno della Torre, parete del tamburo, tracce di rilavorazione a bocciarda su un blocco in marmo di S. Giuliano. La lavorazione originale è a martellina

Il ordine, strombo della finestra del tamburo. I diversi stadi di finitura dei blocchi permettono di ricostruire il processo di lavorazione. Nella parte più interna sgrossatura a subbia, vicino all'angolo esterno dello strombo lavorazione più fine a martellina. I margini dei blocchi sono rifiniti a scalpello, probabilmente già prima della posa in opera.

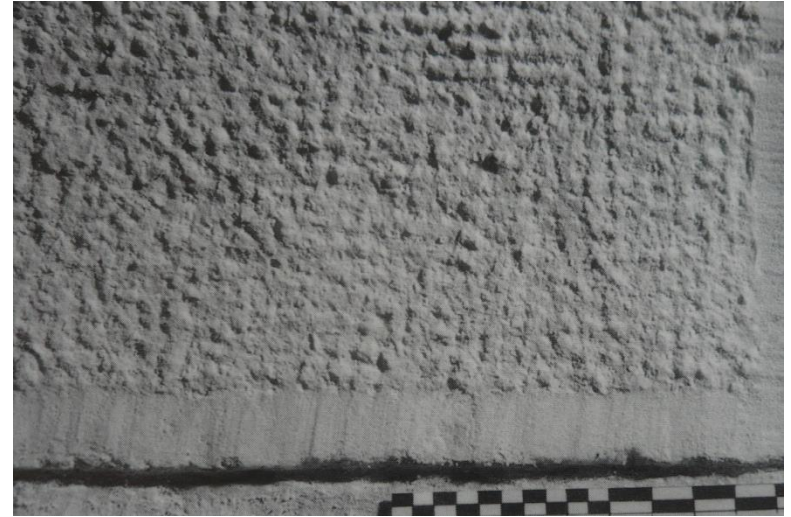
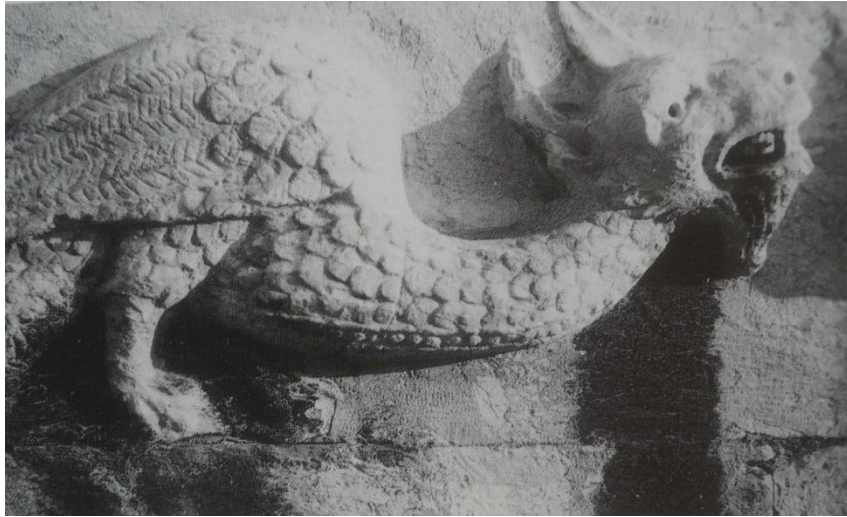


Martellina: ascia a taglio dentato che lascia sulla pietra tracce simili a quella della gradina: i solchi sono però più corti e si apprezza di più l'andamento dei colpi in successione frequente.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche



I Ordine, a destra della porta di ingresso alla Torre, rilievo con mostri marini in marmo di San Giuliano, lavorazione a martellina del fondo, evidente soprattutto sotto il collo del drago.

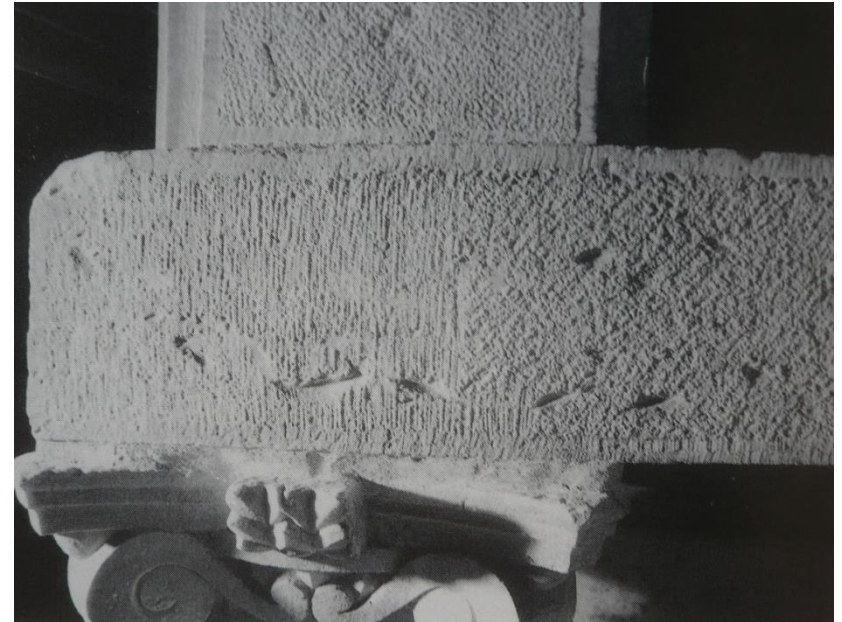
Il Ordine, sottarco tra le colonne 9 e 8, blocco in marmo di Carrara con lavorazione a bocciarda sul fondo e rifinitura a scalpello dei margini.

Bocciarda: martello con una testa quadrata, modellata con punte piramidali. Sulla pietra si evidenziano serie regolari di piccoli fori. Spesso trattate a bocciarda le superfici piane dei conci.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche

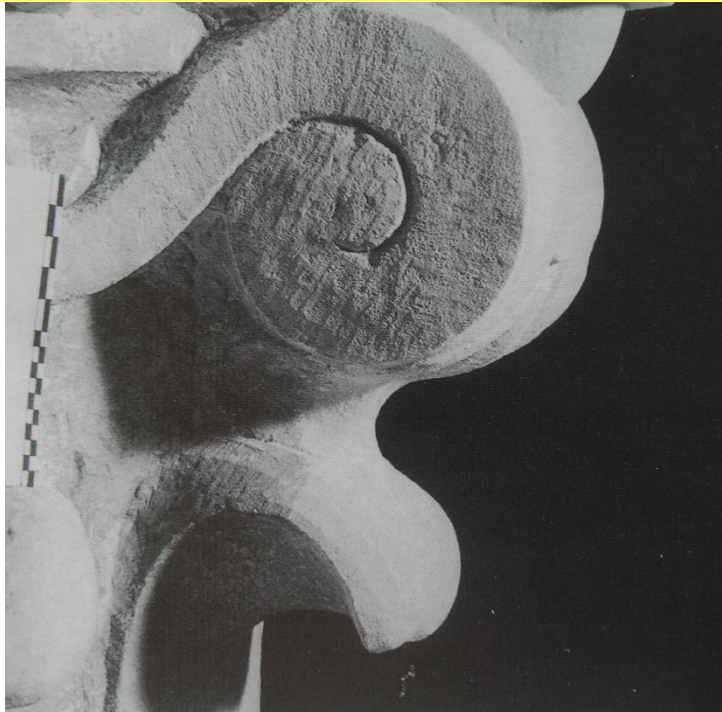


I Ordine, paramento tra le colonne 9 e 8, lavorazione ascrivibile alla II sequenza individuata, con il fondo del blocco lavorato a picchiarello e i margini rifiniti a scalpello e gradina.

II Ordine, mensola della colonna 9, lato dx, sequenza di lavorazione attribuita ad un intervento probabilmente settecentesco. Il blocco in marmo bardiglio, è lavorato a martellina, utilizzata secondo direzioni e con intensità di colpo diverse, sopra ad una sgrossatura a subbia di cui si individuano ancora i colpi più profondi. Gli spigoli sono rifiniti con un doppio passaggio a scalpello.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche



Il Ordine, fronte dx del capitello 9, lavorazione a scalpello e/o a ferro tondo.

Il Ordine, fronte esterno del capitello 8, lavorazione a scalpello e a trapano. Nel fondo tra i lobi delle foglie, si legge qualche traccia della iniziale sgrossatura a subbia.

Scalpello e/o ferro tondo: strumenti più noti e maggiormente utilizzati in fase di rifinitura. Usati per la decorazione dei capitelli, per la definizione dei margini dei blocchi e per alcune correzioni in fase di montaggio.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche



I Ordine, capitello 8, particolare del lato sx.

I Ordine, dettaglio. Evidenti i segni di scalpello e raspa, quest'ultima riferibile sia alla lavorazione originale che alla sistemazione degli inserti di restauro sulla punta delle foglie. I sottosquadri sono ottenuti con profondi fori di trapano poi parzialmente regolarizzati a scalpello.

Trapano: strumento usato nella fase di abbozzo iniziale e nelle rifiniture decorative finali.

Raspa: pochi i segni di raspa, sottili, irregolari spesso incrociati.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche



I Ordine, capitello 9. decorazione angolare dove il trapano, a punta piuttosto sottile, è stato utilizzato sia per la definizione dei piani di fondo sia con chiaro intentodecorativo.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Strumenti e Tecniche

- Sequenze di lavorazione sul marmo di San Giuliano: subbia o picchiarello per la definizione dei piani dei blocchi alla quale segue gradina e martellina. Rifinitura a scalpello
- Sul marmo apuano uso della bocciarda ben riconoscibile, ed essendo questo strumento in uso dal '600 individua evidentemente aree di sostituzione di materiale originale degradato.
- Indagine utile a fini conoscitivi: i sistemi di lavorazione e le sequenze aiutano a circoscrivere le epoche di realizzazione.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

G. Capponi – Direttore dei lavori – ideazione M. Cordaro (3)

- Restituzione grafica che ha consentito di “aprire” i volumi per visualizzare in piano tutte le superfici. Prima fase analitica di studio della presenza e diffusione dei danni, limitata a settori esposti sui diversi orientamenti poi una espressione in forma sintetica estesa a tutta la Torre. Trasferimento nella mappatura delle 184 tavole sintetiche e 499 analitiche dal cartaceo all’informatico.
- La mappatura rappresenta un efficace strumento per capire le dinamiche dei processi di degrado in atto sulla Torre (basti pensare al fenomeno della formazione delle croste nere in associazione ai tematismi legati all’acqua).
- I dati registrati sulle mappature hanno permesso di individuare delle zone da utilizzare come test di intervento: ad esempio la zona del paramento esposta ad Est
- La zona campione deve essere rappresentativa di:
 - diversi materiali costitutivi (marmi, intonaci, parti metalliche);
 - elementi e tipologie architettoniche (colonne, capitelli, paramenti lisci, gradini, ecc.);
 - superfici lapidee con diverso stato di conservazione (presenza di croste nere, forme di disgregazione, di corrosione, di polverizzazione, patine biologiche, fessurazione, ecc.).



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

I Grafici

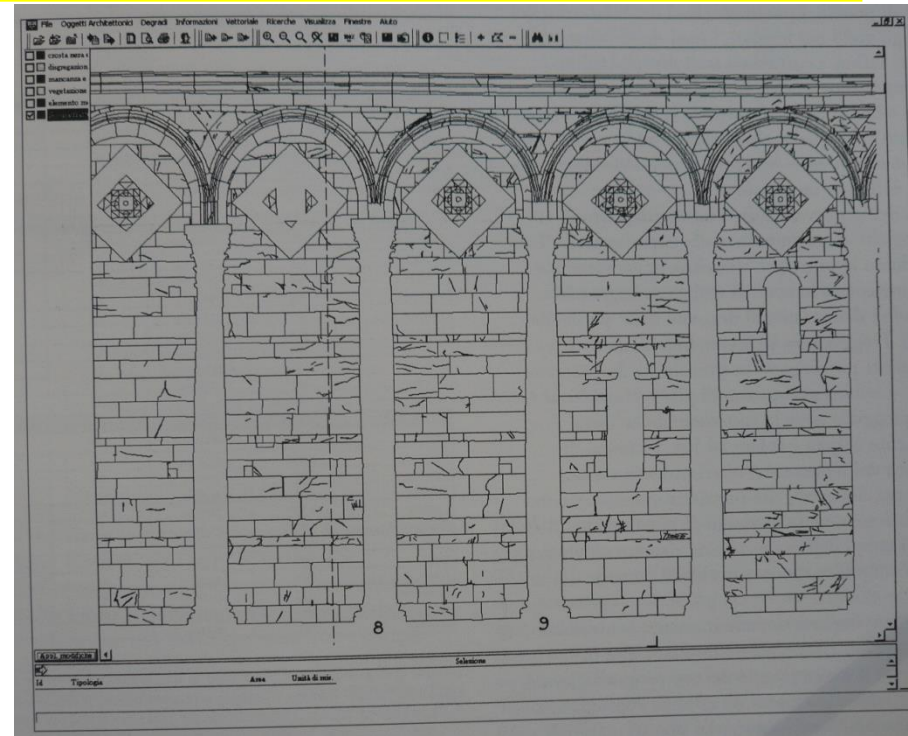
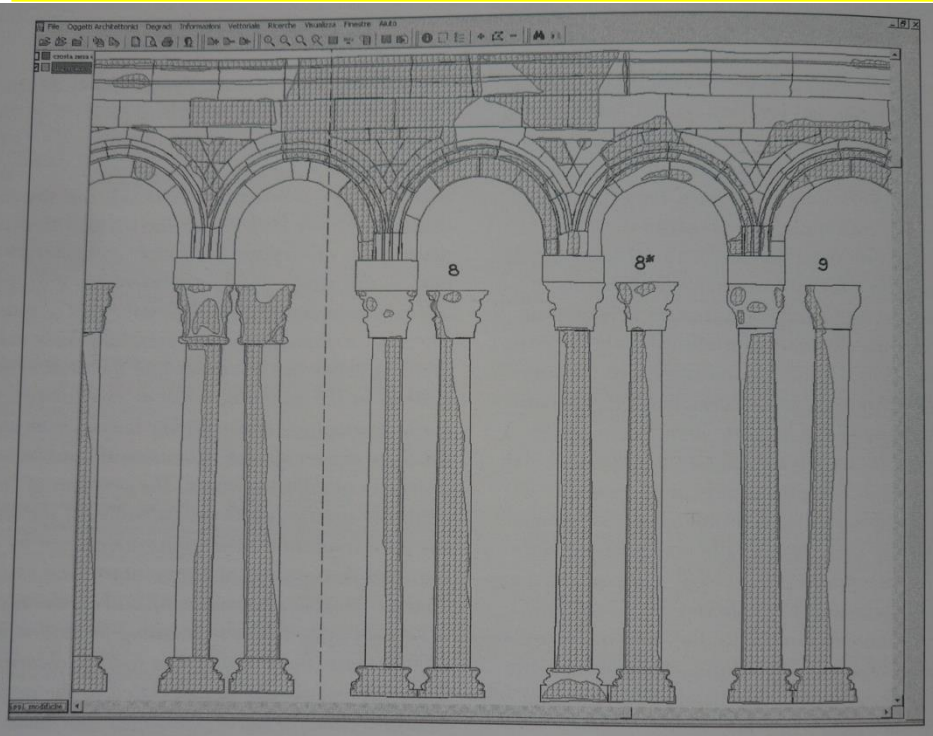


Grafico A – Il Ordine, lato Est, mappatura delle zone disgregate.

Grafico B – I Ordine, lato Est, mappatura delle fessure e delle fratture.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

G. Capponi – Direttore dei lavori – ideazione M. Cordaro (4)

■ I tasselli, sufficientemente ampi e visibili hanno interessato:

- le superfici della sala del piano terra (interno del tamburo);
- il vano scala;
- la cella campanaria;
- il loggiato esterno per un tratto di ampiezza pari ad un intercolumnio del I Ordine.

■ Nel programmare il lavoro sono state preventivate diverse operazioni prevedendo l'esecuzione di metodologie alternative per un mq. Valutazione dei costi stimando prezzi medi comparando gli oneri delle diverse lavorazioni e aggiungendo il tempo necessario alla fase di registrazione dei dati.

■ La stabilizzazione geotecnica punta a riportare la pendenza ai valori dei primi anni dell'Ottocento riducendo la misura del fuoripiombo di circa 40 cm.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

<i>Settore</i>	<i>Numero</i>	<i>Area</i>	<i>% su 5.660 mq.</i>	<i>% su 929,5 mq.</i>
Tutti	4.309	929,5 mq.	16,4	
Sud	1.112	310,9 mq.	5,5	33,4
Est	1.030	238,3 mq.	4,2	25,6
Nord	1.215	200,4 mq.	3,5	21,5
Ovest	952	179,9 mq.	3,2	19,5

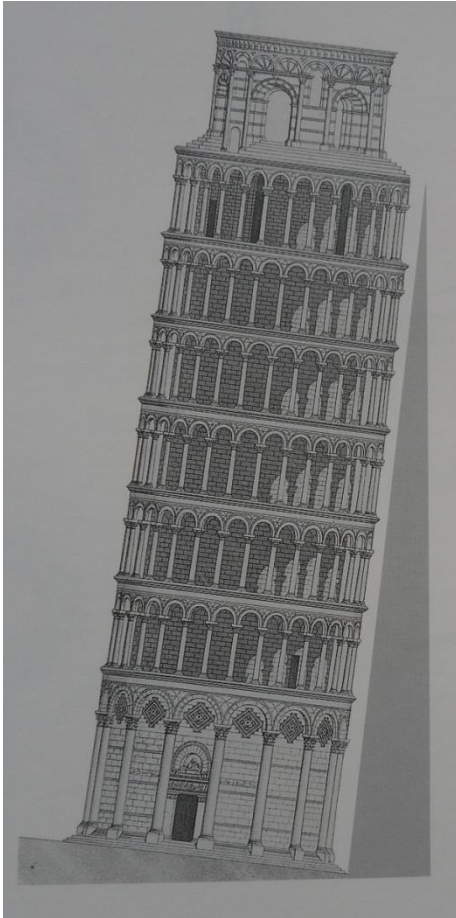
<i>Ordine</i>	<i>Numero</i>	<i>Area</i>	<i>% su 5.660 mq.</i>	<i>% su 929,5 mq.</i>
Tutti	4.309	929,5 mq.	16,4	
2°Ordine	506	194,2 mq.	3,4	20,9
3°Ordine	578	171,1 mq.	3	18,4
4°Ordine	543	151,5 mq.	2,7	16,3
1°Ordine	454	129,7 mq.	2,3	13,9
5°Ordine	436	104,9 mq.	1,9	11,3
6°Ordine	545	103,5 mq.	1,8	11,2
7°Ordine	764	61,9 mq.	1,1	6,6
8°Ordine	483	12,7 mq.	0,2	1,4

<i>Tipologia</i>	<i>Numero</i>	<i>Area</i>	<i>% su 5.660 mq.</i>	<i>% su 929,5 mq.</i>
Tutti	4.309	929,5 mq.	16,4	
Paramenti	1.142	449,7 mq.	7,9	48,4
Mensola	469	144,7 mq.	2,6	15,6
Arco	432	96,5 mq.	1,7	10,4
Capitello	1.385	88,7 mq.	1,6	9,5
Fusto	467	46,5 mq.	0,8	5
Modanatura	326	39 mq.	0,7	4,2
Cornicione	754	34,9 mq.	0,6	3,8
Geometria	76	27,4 mq.	0,5	2,9
Base	106	1 mq.		
Gradino	23	0,8 mq.		
Peduccio	28	0,4 mq.		

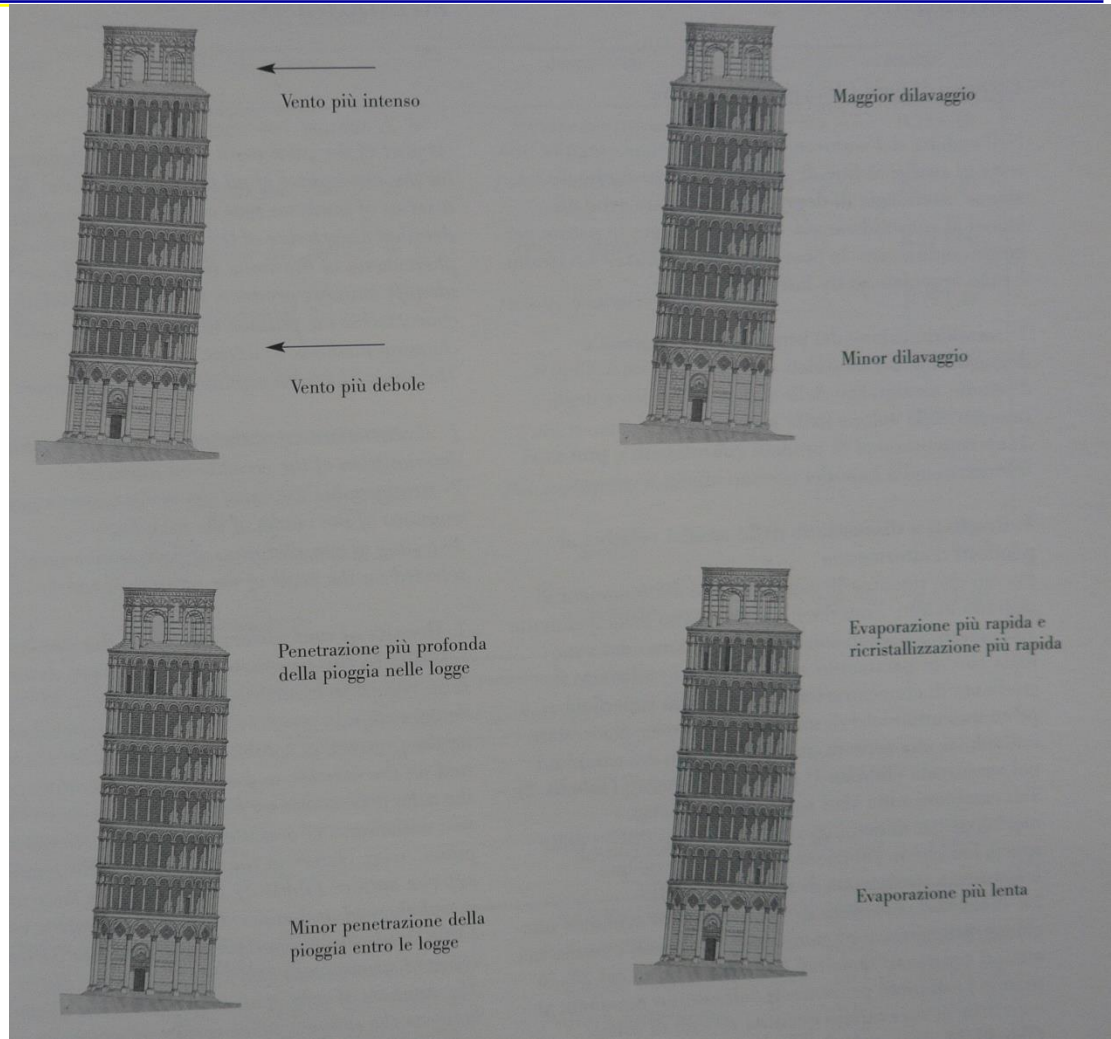
Tabella I: distribuzione delle forme di disgregazione rispetto ai settori, agli ordini e alle diverse tipologie architettoniche, indipendentemente dal litotipo.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa



Zona protetta dalle precipitazioni
per l'effetto di autoschermo della
Torre



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

RIMOZIONE DEGLI STRATI SOVRAMMESSI	
Saggio/i n°: _____	
Operazione di: _____	
Localizzazione: _____	
Misura della zona trattata: _____	
Data di esecuzione: _____	
Documentazione fotografica di progetto n°: _____	
Documentazione grafica di progetto n°: _____	
Riferimento schede diagnostica n°: _____	
Tipologia del materiale da rimuovere: Morfologia e aspetto _____	

Estensione _____	

Metodologia di intervento: _____	
Fase di intervento:	
Preliminare a: _____	Fase finale _____
Successiva a: _____	Fase unica _____
Operazioni preliminari di protezione si no	
Dati ambientali	
Temperatura _____	Umidità _____
Condizioni generali _____	
Operatore:	
Restauratore: _____	
Assistente restauratore: _____	
Operaio: _____	

Chimica e chimica-fisica (soluzioni attive, tensioattivi, solventi)			
Prova N°			
Dimensione prova			
Ispessente			
Composizione/ concentrazione liquido			
Preparazione superficie			
Interposizione strato filtrante			
Spessore impacco			
Tempo impacco			
Tempo verifica			
N° applicazione			
Metodo di rimozione			
Risultato			
Note*			

NOTE: copertura/sigillatura impacco, intervallo minimo fra applicazioni, estrazione residui/conducibilità dell'estratto

Scheda di registrazione riassuntiva per prove di pulitura

Scheda di lavoro per la trascrizione dei dati durante le prove di pulitura



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Chimica e chimico-fisica (soluzioni attive, tensioattivi, solventi)		Saggio/i
Modalità di esecuzione: _____		
(impacco, lavaggio, tampone, ecc.)		
- Fase solida, ispessente _____		
- Componente liquida, componenti e concentrazioni: _____		
Modalità di applicazione: _____		
preparazione della superficie: _____		
(bagnatura, spolveratura, ecc.)		
interposizione di strati filtranti: _____		
(veline, garze)		
spessore dell'impacco (mm): _____		
copertura dell'impacco con: _____		
sigillatura dell'impacco con: _____		
- Numero di applicazioni: _____		
- Tempi di applicazione: _____		
- Tempi di verifica ogni: _____		
- Intervallo minimo tra le applicazioni: _____		
- Metodo di rimozione: _____		
- Estrazione di eventuali residui con acqua deionizzata: _____		
conducibilità dell'estratto: _____		
(tra 10 e 100 uS)		
Note, commenti		
avvertenze: _____		
Tempi di esecuzione:		
allestimento: _____		
esecuzione: _____		
documentazione: _____		
chiusura: _____		
media al metro quadro _____		

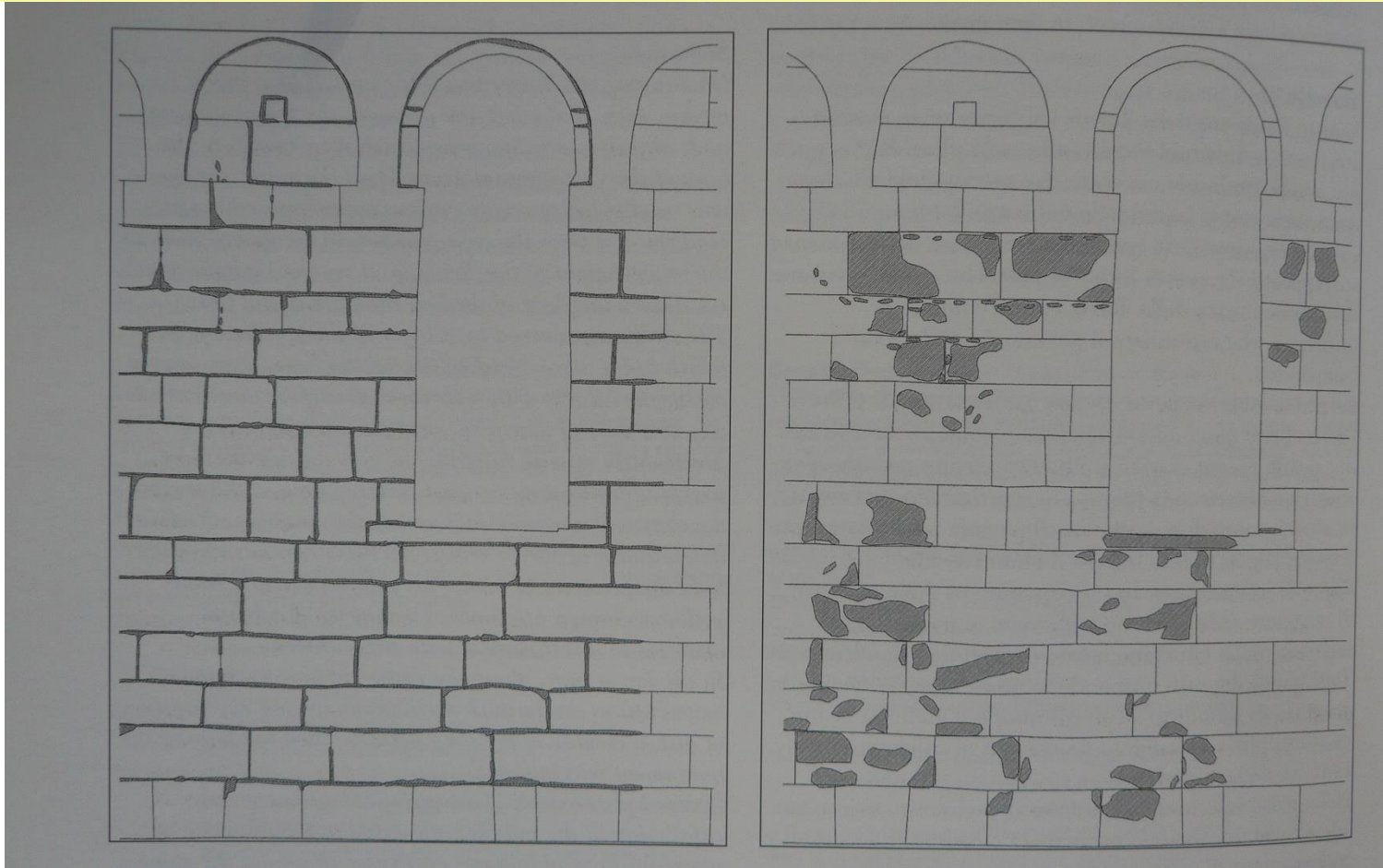
Tabella 3: scheda di dettaglio per le specifiche modalità di operazioni di pulitura con sostanze solventi.

Scheda di dettaglio per le specifiche modalità di operazioni di pulitura con sostanze solventi.

Tentativo di standardizzare i dati: squadra fissa di 5 restauratori della durata di otto mesi dal maggio 1988 all'agosto del 1999 producendo 910 tavole grafiche utilizzate poi per il trasferimento dei dati nel programma "Akira Gis server" riferendosi ai criteri stabiliti dal documento Normal 1/88 – *Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico con minime variazioni.*

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

I Grafici

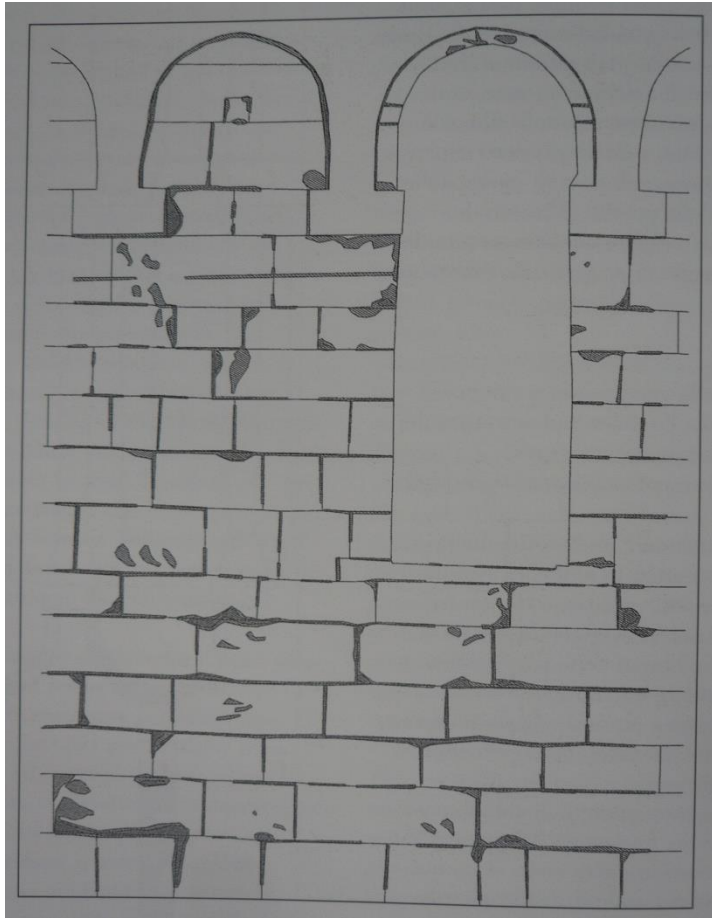


Il Ordine, paramento del tamburo – rimozione delle vecchie stuccature

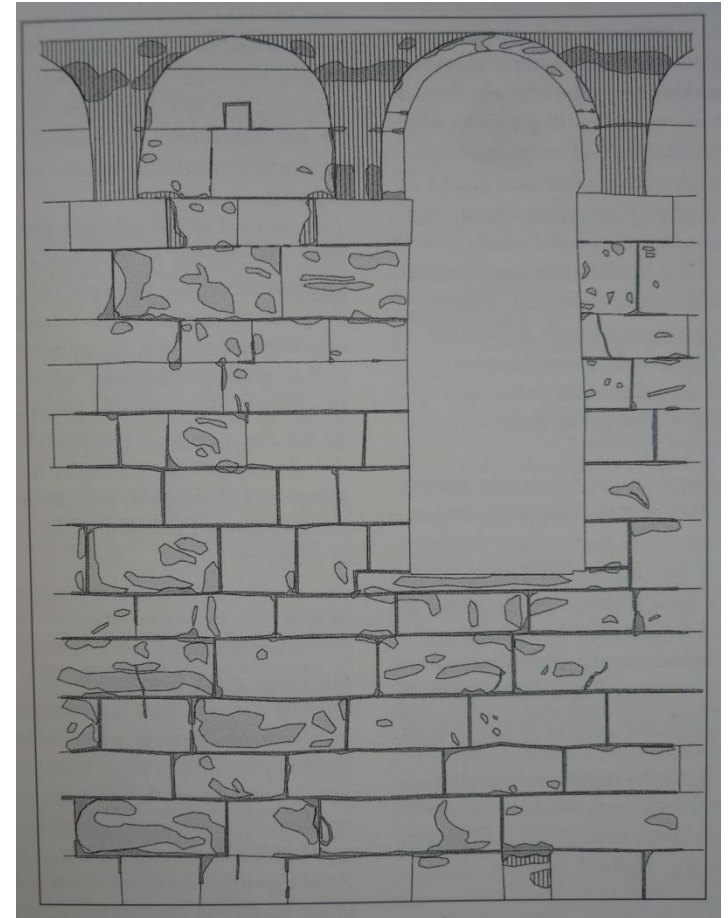
Il Ordine, paramento del tamburo – consolidamento dopo la pulitura

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

I Grafici



Il Ordine, paramento del tamburo, pulitura meccanica.



Il Ordine, paramento del tamburo, stuccatura, microstuccatura, scialbatura e velatura



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

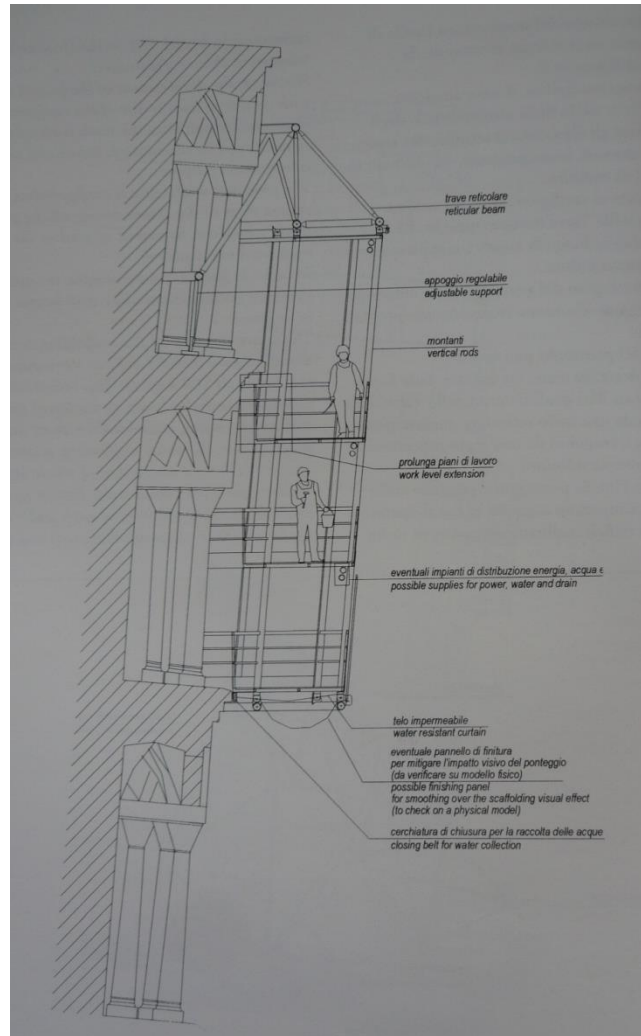
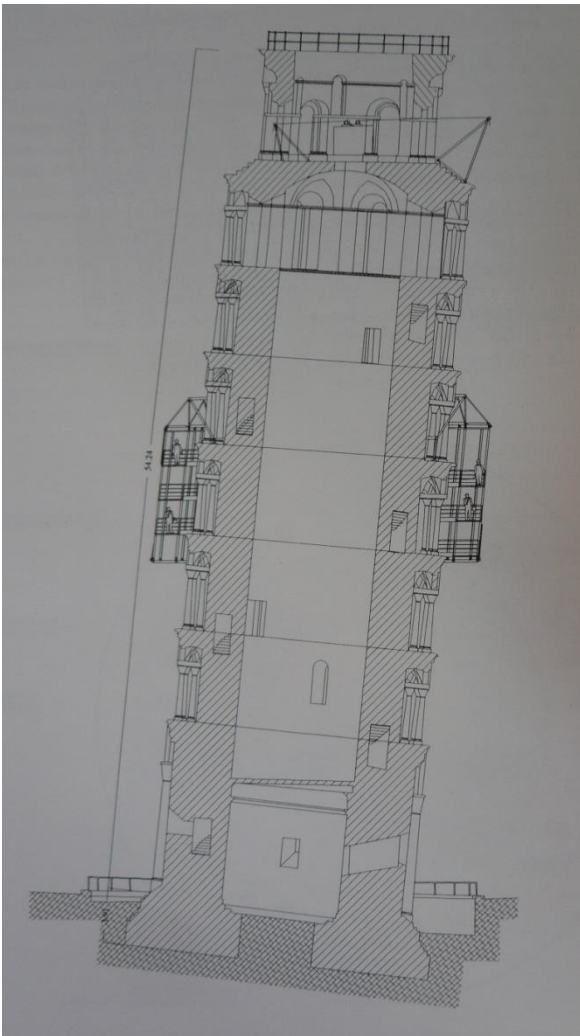
L'analisi del degrado e le indagini – C. Milani, U. Santamaria

- Campionatura eseguita secondo le raccomandazioni Normal 3/80 per uno studio articolato in tre fasi:
- caratterizzazione dei prodotti di alterazione e degradazione dei materiali costitutivi;
- studio stratigrafico delle superfici lapidee e degli intonaci delle voltine delle logge;
- sperimentazione di prodotti consolidanti e protettivi selezionati sulla base dei risultati analitici ottenuti.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Le opere provvisionali – G. Carluccio

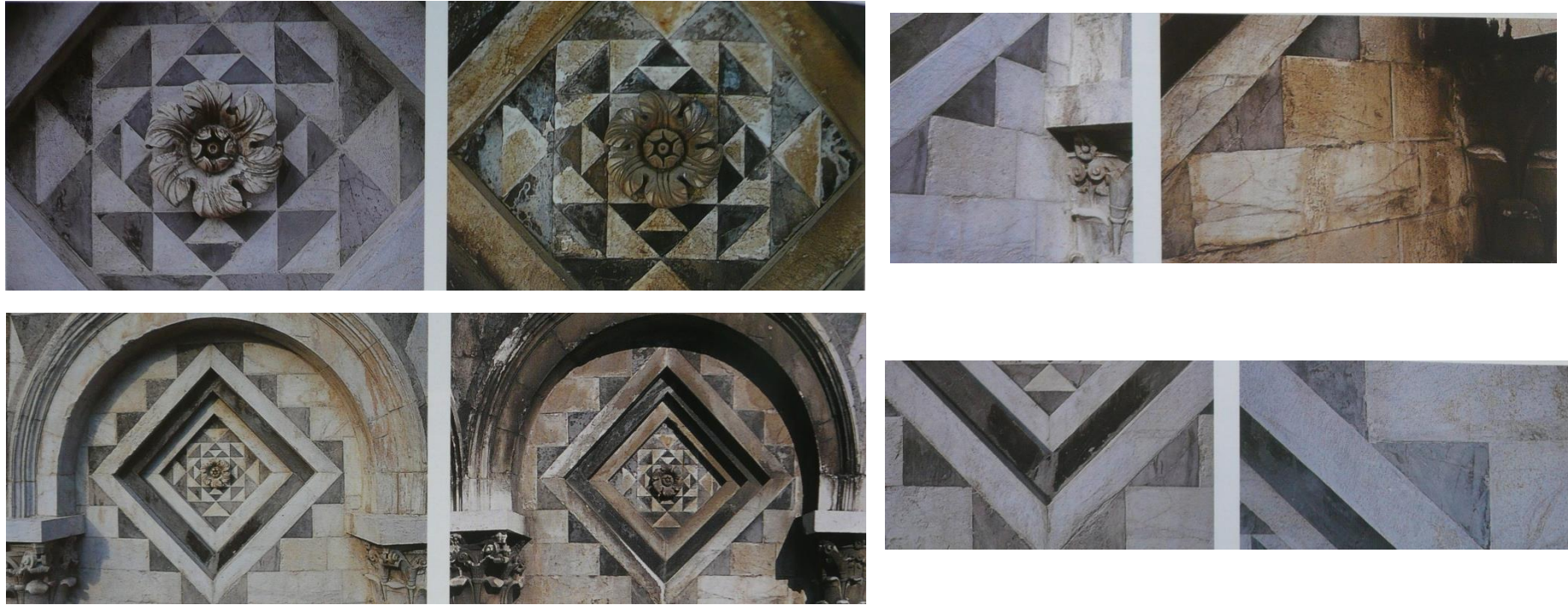


Sezione trasversale con ponteggio in posizione intermedia.

Sezione trasversale del ponteggio. Dettaglio.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Le geometrie, alterate da croste nere, disgregazioni e stuccature, riconquistano gli originali valori cromatici del bianco del marmo di San Giuliano e del grigio del calcare di Filettole.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

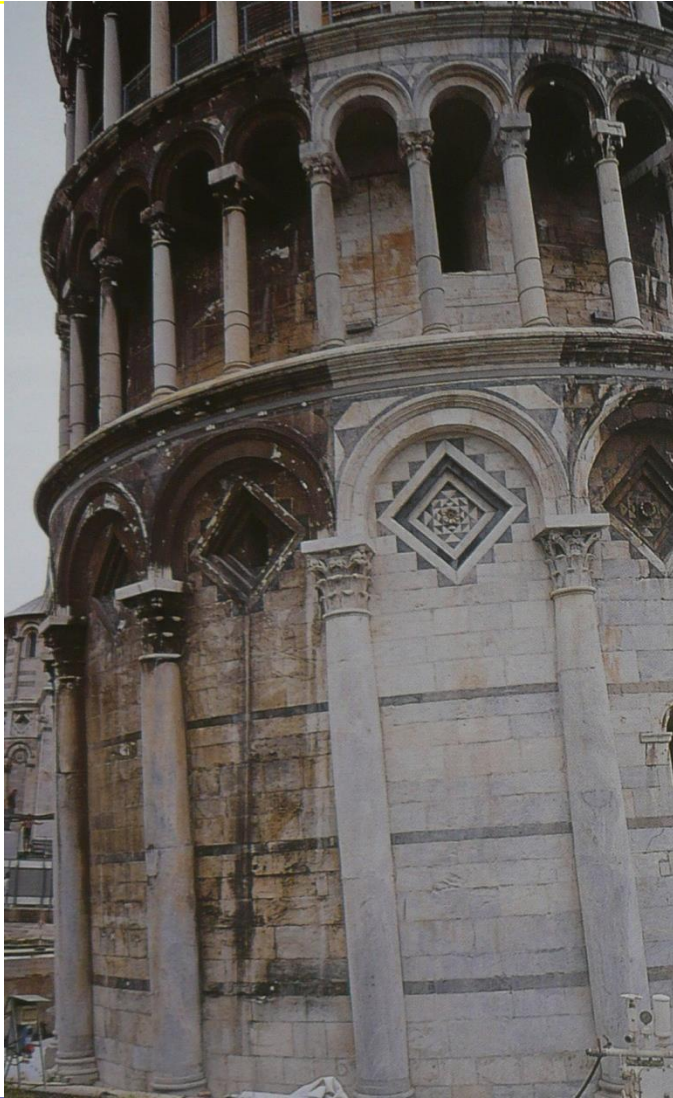


La rinnovata
finitura delle
voltine recupera
la continuità
tonale con le
superfici lapidee



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

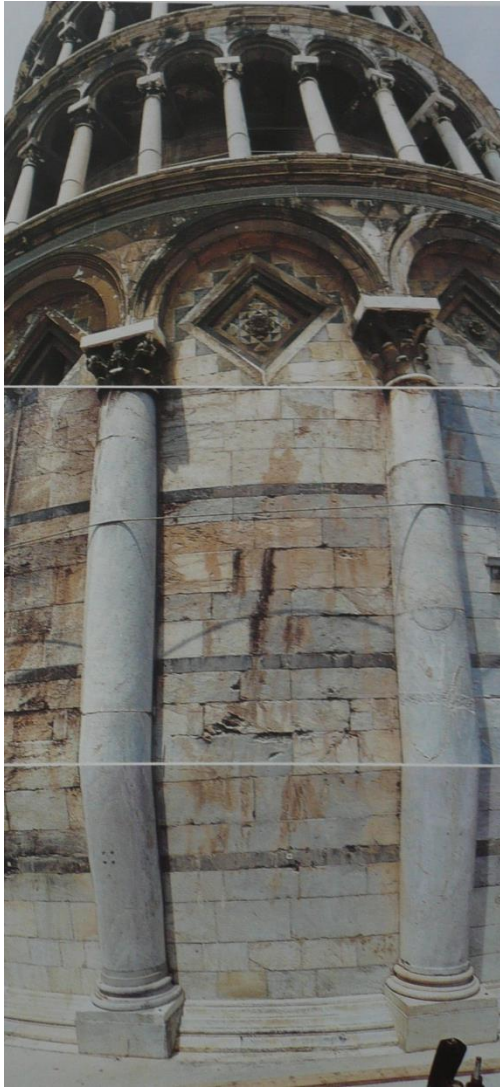


Il testo architettonico conserva, dopo il restauro, le tracce dei vecchi interventi, e la leggibilità dell'insieme si misura con l'usura del tempo



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Dopo gli interventi necessari al consolidamento della pietra e alla pulitura, si è operata una semplice riduzione dell'interferenza visiva degli strati non dannosi, quali ossalati e incrostazioni calcaree

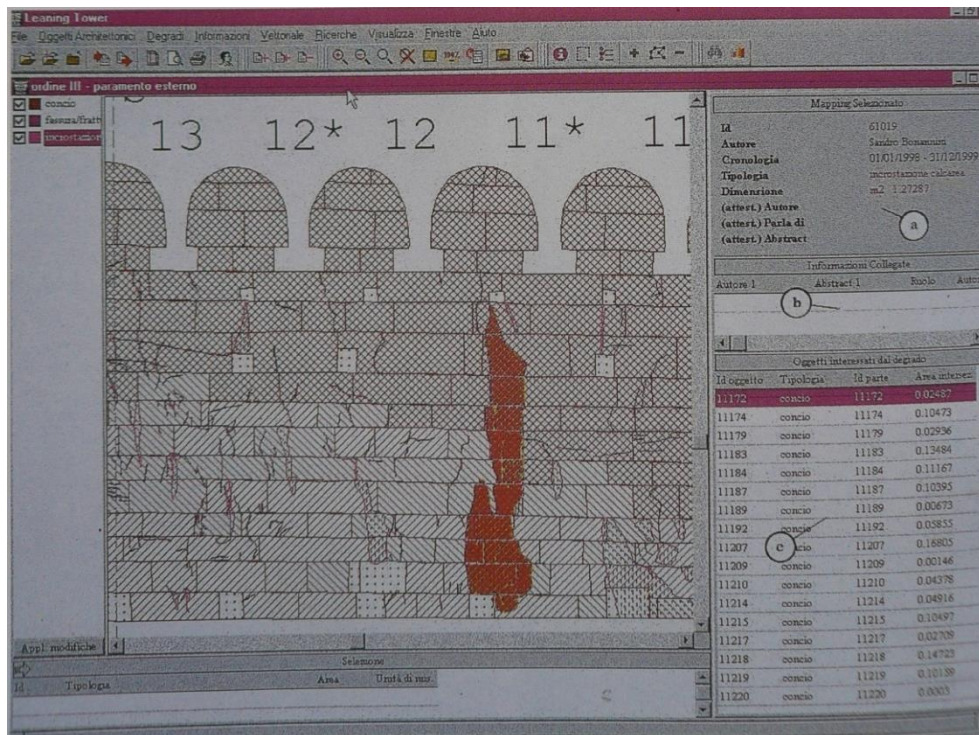


Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Litotipi e mappature



1. Marmo di San Giuliano grigio
2. Marmo di San Giuliano rosato
3. Marmo di San Giuliano giallo-rosato a tessitura incrociata
4. Calcare grigio di Filettole



Esempio di mappatura

Le immagini video del computer visualizzano tratti del paramento con i suoi litotipi e i danni che li interessano



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Gravi danni segnano gli elementi più esposti: depositi e croste nere, interrotti dal percolamento dell'acqua e dalla esfoliazione, scagliatura e disgregazione profonda della pietra



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

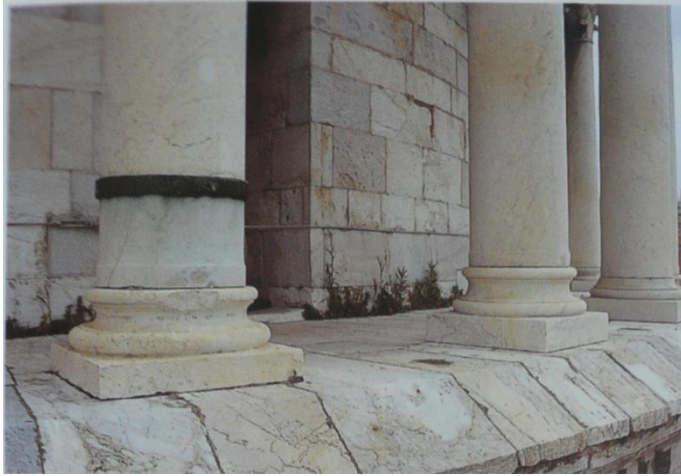


L'acqua piovana si infiltra nella muratura e fuoriesce depositando vistosi accumuli di calcare, sia all'interno che all'esterno. La presenza di umidità favorisce la crescita di piante e microrganismi, che apportano colorazioni insolite alla pietra



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Elementi metallici come cerchiature, catene, staffe e piccoli cunei costituiscono utili presidi strutturali, ma diventano fattori di danno in assenza di manutenzione



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

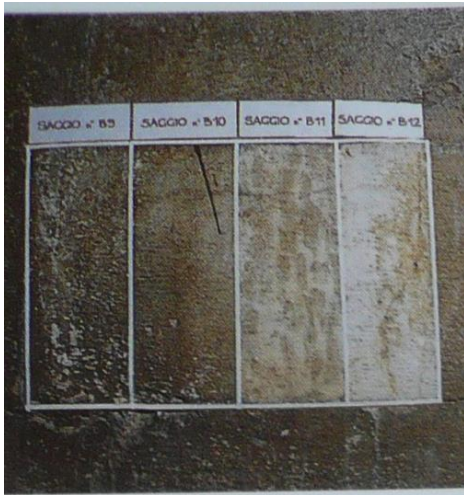


Al diffuso quadro fessurativo si accompagnano distacchi e cadute di frammenti, risarciti nel tempo con malte di materiali non idonei, applicate in modo grossolano e ormai prive di efficacia



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

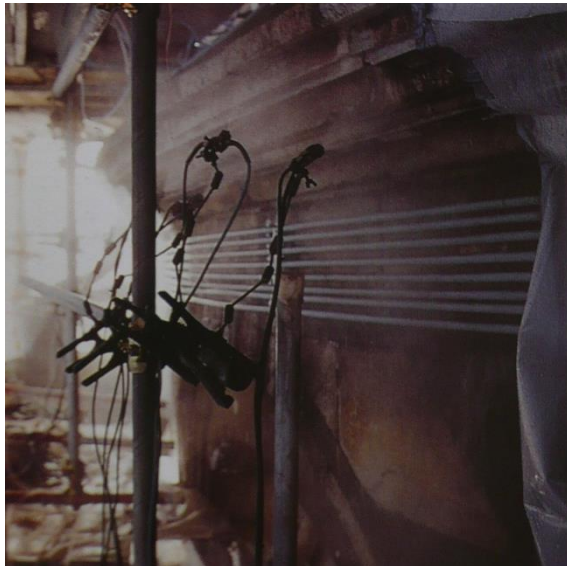
Intervento pilota



Al termine dei tests di prova e della verifica di prodotti e metodi, l'intervento ha inizio con puntuali operazioni di consolidamento e con l'allestimento di strutture di cantiere, per consentire una pulitura diffusa con acqua nebulizzata

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

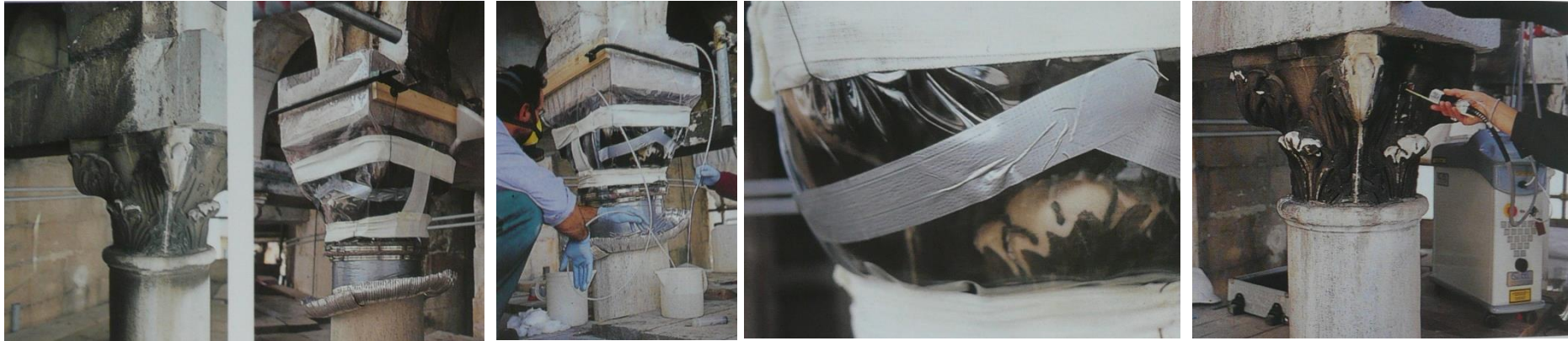


Sistemi graduali e selettivi si adottano per rimuovere diversi tipi di incrostazioni spesse e tenaci, alternando mezzi meccanici di piccolo passo ad impacchi di soluzioni solventi



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota

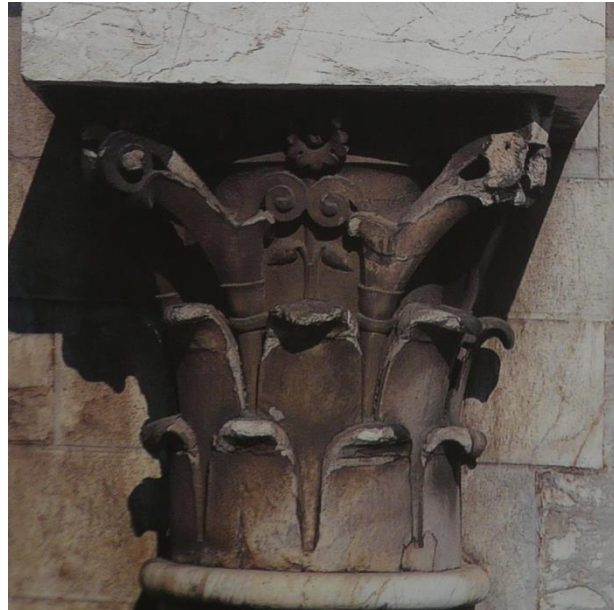


Per situazioni di grave degrado si è verificata l'applicabilità di un consolidamento per immersione e una successiva pulitura con mezzo laser



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



I paramenti verticali della scala sono stati puliti con soluzioni solventi a bassa concentrazione, mentre solo l'azione meccanica ha permesso di ridurre il calcare su soffitto e gradini.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Le immagini ravvicinate delle stesse zone prima e dopo l'intervento consentono di apprezzare il soddisfacente esito del lavoro



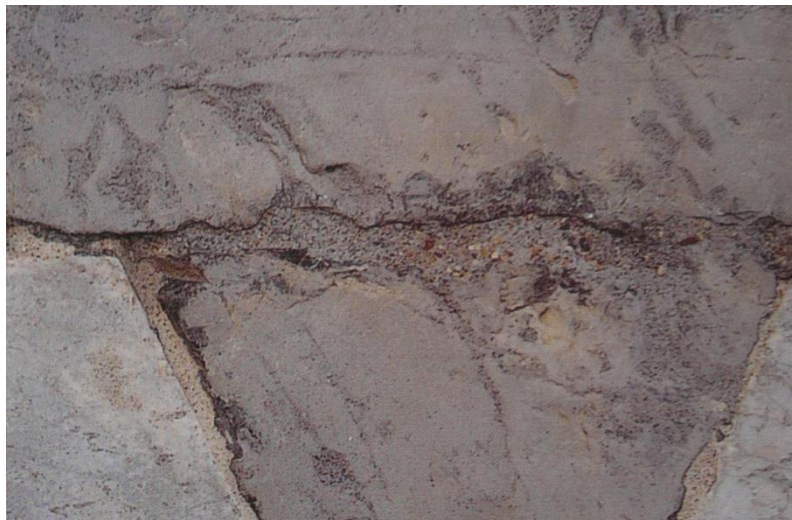
Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Giunti, fessure e mancanze sono stati risarciti utilizzando fino a 18 tipi di malte tradizionali, classificate per colorazione e granulometria. L'applicazione delle malte, pur ristabilendo la necessaria continuità delle superfici ha rispettato i profili delle lacune ei segni dei precedenti interventi.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Giunti, fessure e mancanze sono stati risarciti utilizzando fino a 18 tipi di malte tradizionali, classificate per colorazione e granulometria. L'applicazione delle malte, pur ristabilendo la necessaria continuità delle superfici ha rispettato i profili delle lacune e i segni dei precedenti interventi.



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

Intervento pilota



Sul fronte Est della Torre, è visibile l'esito del restauro eseguito dalla Ditta CBC come cantiere di progetto.

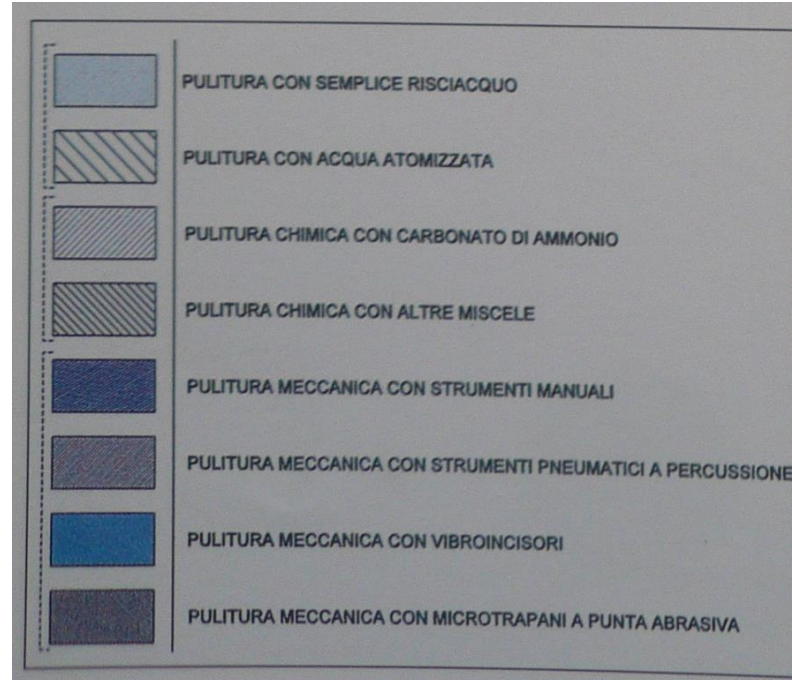
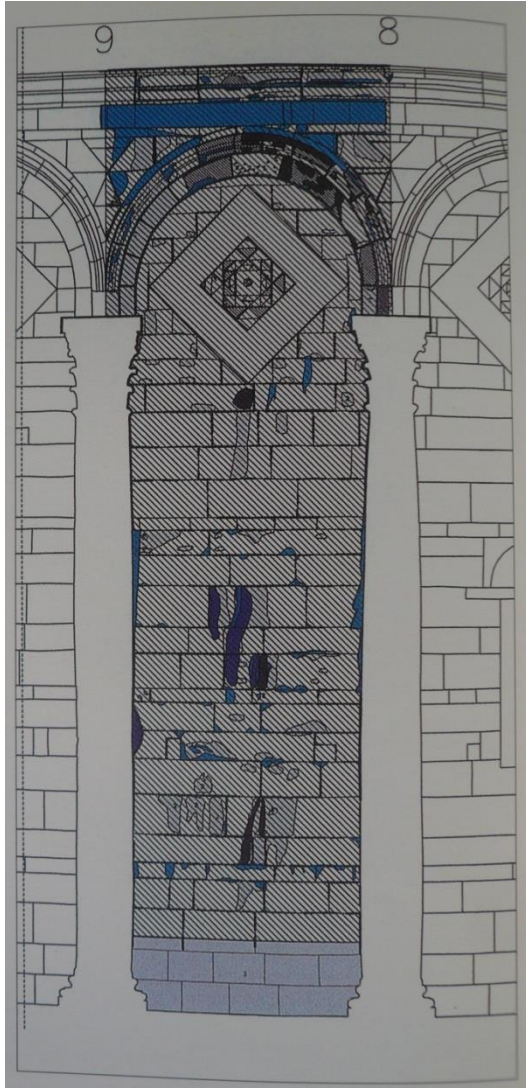
■ Per la definizione dei metodi e delle tecnologie operative è stato organizzato un cantiere su un'area campione, che ha visti impegnati dieci restauratori tra luglio e dicembre del 2000. Individuate sei zone diverse per un totale di circa 130 mq.

■ Diverse tipologie ma stesso procedimento con un sistema univoco di registrazione dei dati. Ogni intervento è stato preceduto da test documentati



Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

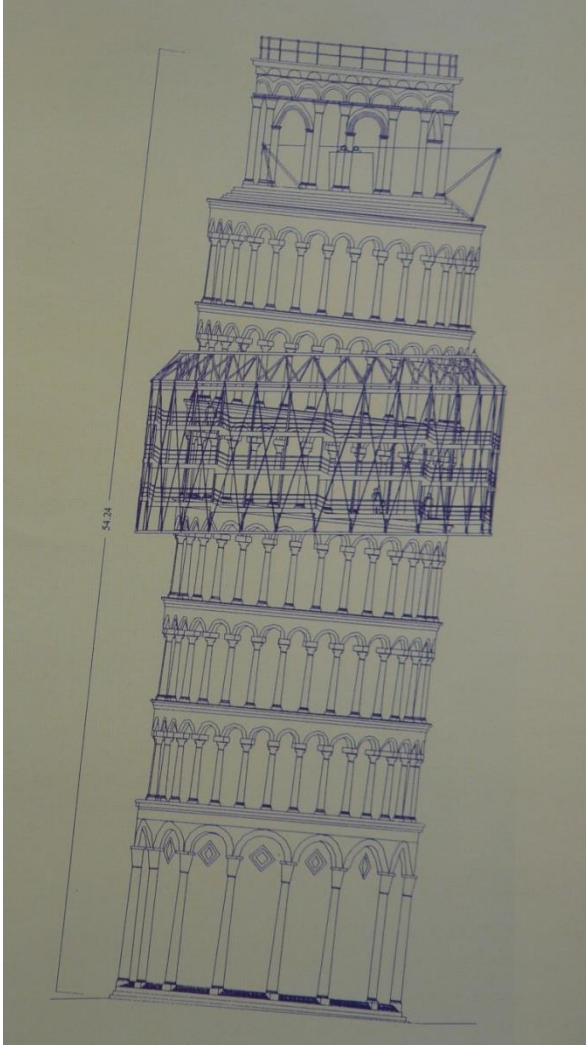
La mappatura come sistema di sintesi



La mappatura degli interventi di pulitura consente una visione di sintesi della varietà dei metodi utilizzati e della loro localizzazione. Un prezioso consuntivo del lavoro e una prima base per il progetto di restauro dell'intera Torre.

Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa

La realizzazione del ponteggio circolare – G. Carluccio



Lo studio di un particolare ponteggio – laboratorio, propone la possibilità di attuare le necessarie operazioni di ricerca e restauro senza sottrarre la visibilità della Torre, offrendo una struttura utilizzabile anche in future manutenzioni.

2.01.1968: Cesare Brandi sul Corriere della sera: *“...non è detto che intensificando gli studi, non si arrivi, entro pochi anni, ad una soluzione che, salvando la statica, non alteri e annulli il monumento in quel che ha di più vetusto in quel che ha di più singolare”.*

