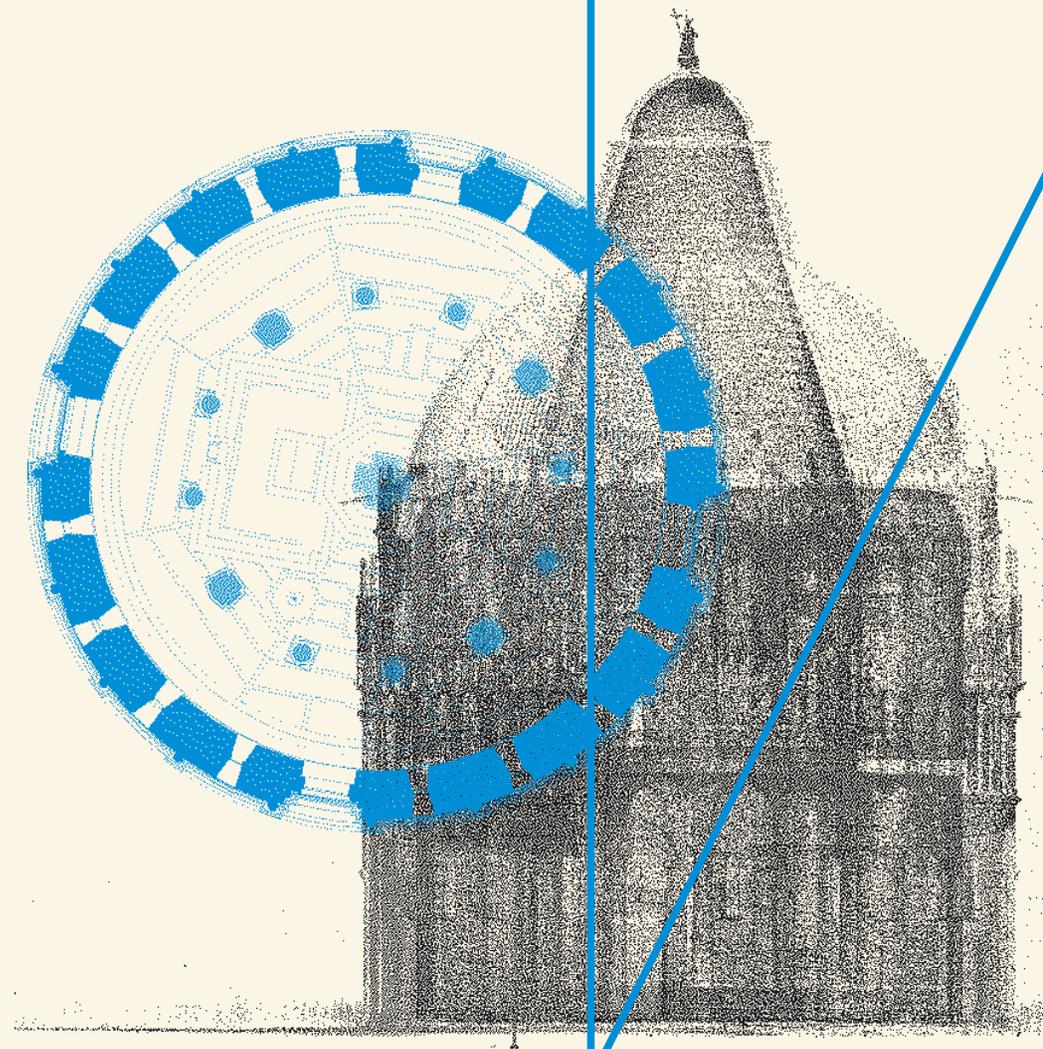


RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE
DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA D.P.R. 11/7/1980
XV CICLO



Dott. Giorgio Verdiani

IL BATTISTERO DI PISA,
rilievo e rappresentazione digitale tra ricerca e innovazione



SEZIONE ARCHITETTURA E DISEGNO

Firenze - Giugno 2003

RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE
DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA D.P.R. 11 Luglio 1980
XV CICLO

Dott. Giorgio Verdiani

IL BATTISTERO DI PISA,
rilievo e rappresentazione digitale
tra ricerca e innovazione

Dottorato di Ricerca in “Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente”, XV Ciclo

Dottorando:

Giorgio Verdiani

Coordinatore:

Prof. Emma Mandelli

Collegio dei Docenti:

Proff. Maria Teresa Bartoli, Marco Bini, Giancarlo Cataldi,
Roberto Corazzi, Roberto Maestro, Emma Mandelli

Tutor:

Prof. Marco Bini

Il rilievo qui presentato è stato eseguito nell'ambito della convenzione *"Il Battistero di Pisa: Progetto per un rilievo avanzato, finalizzato alla redazione di un modello 3D digitale"* tra il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze, Sezione di Disegno e l'Opera Primaziale di Pisa, responsabile scientifico prof. Marco Bini.

INDICE

Premessa	pag. 5	I Sistemi automatici di restituzione	pag. 128
Introduzione	pag. 7	I Sistemi manuali di restituzione	pag. 144
Il battistero di Pisa		Un confronto non cercato	pag. 161
Il battistero di Pisa, oggi	pag. 9	Applicazioni e possibili sviluppi	pag. 163
I battisteri, il rito e la forma	pag. 23	Conclusioni	pag. 169
Quadro storico	pag. 29	Glossario	pag. 171
Evoluzione dell'organismo architettonico	pag. 33	Bibliografia	pag. 185
Il modello geometrico del Battistero	pag. 41	Fonti	pag. 189
Lo stato del rilievo	pag. 45		
Il rilievo del battistero			
Il quadro operativo	pag. 49		
I sistemi digitali di acquisizione	pag. 51		
Sistemi a contatto	pag. 53		
Sistemi a distanza	pag. 56		
Triangolazione	pag. 58		
Tempo di volo	pag. 63		
Range camera	pag. 69		
Il sistema di rilievo adottato	pag. 73		
Rilievi strumentali con scanner laser	pag. 79		
Rilievo strumentale con stazione totale	pag. 89		
Rilievo diretto	pag. 95		
Le procedure di elaborazione dei dati	pag. 101		
Diario del rilievo	pag. 109		
La restituzione del rilievo			
La nuvola di punti	pag. 113		
I modelli tridimensionali digitali	pag. 119		
Elaborazione del modello, dalla nuvola di punti alle superfici	pag. 123		

PREMESSA

Il rilievo del battistero di San Giovanni in Piazza dei Miracoli a Pisa è stata occasione di verifica di un procedimento di rilievo contemporaneo, il rilievo e la restituzione attraverso strumentazioni digitali, un insieme di metodi ancora giovani e ancora da definire in tutti i loro aspetti, un processo mutevole, necessario di aggiornamenti continui, veloci quanto veloce è lo sviluppo tecnologico digitale di questi anni.

Non è certo il lavoro di una persona sola, ma un'operazione corale, con compiti, mansioni, tempi e coordinamento, con nozioni che passano da un componente del gruppo all'altro, con discussioni, ripensamenti, cambiamenti di assetto. È un lavoro dove in molti momenti, più dell'efficienza tecnologica delle macchine e dell'affidabilità non sempre ineccepibile dei software, è sembrata contare la caparbità e la testardaggine delle persone che con questi strumenti hanno lavorato, la loro capacità e la loro pazienza di trascorrere infinite ore del giorno e delle notte davanti ai monitor, a

provare nuove strade per risolvere lo stesso problema, o con le mani tra i cavi di un'apparecchiatura disastata, nel tentativo di rimetterla in sesto al più presto, per poter ricominciare il proprio lavoro.

La nostra impresa è stata quella di portare a compimento un insieme di modelli digitali che sono il punto di arrivo di un processo complesso, ma compreso, difficile, ma adesso ben conosciuto, che doveva essere esplorato e indagato al di là del clamore che troppo spesso viene dato al dispiego tecnologico.

La ricerca qui presentata illustra procedimenti, metodi, e soluzioni che hanno reso possibile che questo processo si verificasse, il mio compito è stato quello di essere presente, annotando, leggendo, scrivendo e disegnando, in qualità di *responsabile della gestione dati digitali*, una dizione che in un rilievo di questo tipo significa sia rimanere per giorni e notti consecutive a tracciare linee, piani, superfici, a fianco degli altri collaboratori, che ricercare nuove

strade per meglio risolvere le inevitabili difficoltà che un'opera di questo genere comporta, studiando tecnologie recenti, testando strumenti non ancora del tutto sviluppati, ma anche cercare metodi per permettere che nuove mani e nuove teste giunte a partecipare al progetto, possano portare il loro contributo apprendendo velocemente le informazioni che la ricerca ha acquisito in un tempo ben più ampio.

Questa ricerca racconta il quadro operativo, il metodo, il contesto, le strumentazioni, i passaggi e i risultati di quest'opera, non in forma didascalica, ma con tutte le informazioni accessorie e i corollari necessari per trasmettere la conoscenza acquisita in questa esperienza a coloro che si avvicinano alle procedure del rilievo digitale, e per mostrare a chi queste tecniche già le controlla, come è stata affrontata un'impresa che per tempi, complessità e difficoltà ha poche similitudini con quanto visto ad oggi nel settore del rilievo tradizionale e digitale.

INTRODUZIONE

Il battistero di Pisa è un'architettura complessa, in realtà non esistono monumenti che non lo siano, ma in questo caso la particolare ricchezza e la conformazione particolare, con la quasi totalità degli elementi architettonici strutturati e rimodellati secondo le forme curve dell'edificio rendevano particolarmente impegnativo qualunque intervento di misurazione che non fosse limitato a delle porzioni di edificio. La scelta di operare con strumentazioni avanzate può essere perciò una maniera per poter intervenire con proprietà su un organismo così complesso e per eseguirne un rilievo di livello qualitativo elevato con un impiego di strumentazioni che, richiedendo ancora un completo inquadramento nei processi del rilievo, possono aprire numerose occasioni di ricerca e sperimentazione.

Quanto viene qui presentato è un'esperienza di ricerca, costruita intorno a questo rilievo, sviluppata nei tempi rapidi delle misurazioni e nelle ben più lunghe fasi successive della restituzione.

Scopo di questa ricerca è di affrontare, gestire, sperimentare e studiare procedure adeguate, rileggere il processo del rilievo digitale ed individuare i punti che lo rendono troppo macchinoso e che ne riducono l'efficacia per trovare soluzioni non solo immediatamente applicabili, ma anche ipotizzabili, congetture basate su spunti concreti che definiscano indirizzi da seguire, possibilità di sviluppo.

La struttura scelta per presentare i risultati di questa esperienza segue un percorso che parte dall'approccio al monumento, il processo che porta alla sua conoscenza, visitarlo e immaginarne i processi di misurazione, per poi inquadralo nel contesto storico in cui è stato realizzato, cercando di dare il giusto valore alle parti che lo compongono e valutando delle soluzioni immediate di restituzione, per trovare le occasioni di applicare alcune tecniche della rappresentazione digitale volte a creare materiale divulgativo di qualità.

A conclusione della prima parte, sostanzialmente di inquadramento

dell'opera rilevata, sarà presentato un quadro dello stato dei rilievi che sono stati eseguiti nell'arco del secolo scorso su questa architettura, seguiti da una panoramica delle strumentazioni del rilievo digitale attualmente disponibili. Lo "stato dell'arte" delle strumentazioni, inevitabilmente destinato a divenire obsoleto in tempi brevi, trovandosi a trattare di un settore in forte e rapida evoluzione, tuttavia si è cercato di rendere utile il quadro alla comprensione delle diverse tecnologie e delle diverse prerogative che ogni metodo può offrire, in maniera da presentare sia una base per comprendere le ragioni delle scelte operate nel rilievo qui eseguito, sia per fornire dei riferimenti a quanti, affrontando il settore del rilievo digitale, si trovano privi di un orientamento preciso e spesso trovano una bibliografia frammentaria che in buona parte dipende da labili documentazioni reperibili in *Internet*. In seguito si passerà a presentare la sequenza delle operazioni di rilevamento compiute al battistero, il loro ordine, la loro organizzazione, le fasi in cui questa

ricerca ha operato; a chiusura una cronologia delle operazioni, che si è voluta includere per sottolineare l'andamento alterato dei tempi, rispetto all'impostazione operativa tradizionale, che questo genere di rilievo comporta.

Nel redigere la parte dedicata alla restituzione del rilievo si è cercato di prestare attenzione nel presentare i risultati di quanto operato in una forma che mettesse in evidenza le fasi innovative e sperimentali del lavoro condotto senza trascurare la presentazione di quelle procedure che si possono dire, oramai, consuete.

Nella parte conclusiva, sono presentate le prospettive di sviluppo di questa ricerca, ciò che è in corso d'opera e ciò che verrà affrontato non appena sarà possibile accedere alle strumentazioni che oggi sono solo in fase di sviluppo e un sunto delle parti precedentemente presentate in ordine sparso a cui è dovuta la parola *innovazione* presente nel titolo.

Questa ricerca presenta tutta se

stessa: tutte le parti, tutte le metodologie adottate o solo sperimentate. Il glossario, l'indice delle fonti prevalentemente orientato alla consultazione in Internet, la bibliografia divisa tra i testi consultati per l'architettura e quelli per il rilievo e la restituzione con strumenti digitali sono stati redatti in maniera da rendere quanto qui presentato pienamente impiegabile per lo sviluppo di nuove ricerche che potranno usufruire delle nozioni acquisite e delle idee definite nell'ambito del rilievo del battistero di Pisa.

Una delle maggiori difficoltà nella conduzione di una ricerca basata sul rilievo digitale è infatti reperire fonti, trovare chiarezza, completezza di documentazione, avvisi sui risultati che determinate procedure comportano. Molto spesso la sommarietà che tende a presentare l'eccezionalità tecnologica rispetto alla qualità della struttura operativa e alla ricerca di innovazioni concrete, e il vuoto, a volte presente, tra chi opera il rilievo e chi lo conduce,

porta a produrre testi e analisi di lavori, anche condotti con qualità e perizia, privi della capacità trasmettere l'esperienza realizzata, risultando troppo generici per chi veramente deve poi eseguire la pianificazione del rilievo e le operazioni sul campo o nei laboratori, oppure, al contrario, questi testi possono risultare talmente tecnici e specialistici da rendere difficoltoso riportarne il valore nell'esperienza applicativa e se ne può solo cogliere il valore come esperienze scientifica.

La costruzione di questo testo, è stata condotta con l'idea che i libri sono "*L'aiuto degli altri*", con l'intenzione di organizzare l'esperienza condotta nella ricerca secondo il suo percorso, in una forma di presentazione trasmissibile, a documentare le fasi operative in se stesse, ma cercando sempre di indicare e mettere in evidenza quelle parti che possono essere trasferite in nuove situazioni operative.

IL BATTISTERO DI PISA

Il battistero di Pisa, oggi

La piazza dei Miracoli di Pisa è composta da un gruppo di ricchissimi monumenti: la torre campanaria, nota come "torre pendente", la cattedrale, il camposanto, e il battistero, un insieme di edifici di enorme pregio artistico e architettonico, composti secondo una struttura libera da preesistenze, isolati, posti sopra il piano di un grande prato verde che ne esalta la purezza formale, che permette di coglierne una visione che riconduce ogni singolo edificio ad una forma semplice, ad una primitiva geometrica.

Il complesso monumentale è percepibile nella sua totalità sia da punti di vista vicini, ovvero dalla piazza stessa e da tutta la zona immediatamente circostante le mura che cingono due lati della piazza, che da grandi distanze, come dalle strade che a Pisa conducono, da certi punti dell'autostrada, dall'aereo. La visibilità dell'intervento deve molto alla grande dimensione dell'area monumentale che permette di cogliere sempre l'individualità di ogni singolo elemento e, al tempo stesso, la totalità del complesso e alla morfologia del territorio circostante, una piana di depositi fluviali priva di edifici di grandi dimensioni o di elementi di particolare sviluppo altimetrico, che lascia sgombra la visione

verso le costruzioni del nucleo urbano pisano e la piazza dei Miracoli.

Oggetto dello studio qui presentato è il Battistero dedicato a San Giovanni Battista, un battistero di grandi dimensioni, uno dei più grandi in Italia, di impianto circolare, per questa tipologia di edificio si tratta però di una realizzazione tarda, iniziata nella seconda metà dell'XI secolo e completata nel XIV secolo, quando alle strutture autonome per officiare il battesimo si preferivano ormai sempre più frequentemente le realizzazioni di semplici fonti all'interno delle chiese.

L'edificio segue lo stesso orientamento del complesso monumentale della piazza, con l'ingresso originale posto ad Ovest e la porta Est, di uscita, nell'antica formula del rito del battesimo, affacciante verso la facciata della cattedrale. Attualmente l'ingresso all'edificio è situato nella porta prospiciente il duomo, mentre l'uscita è stata posta nella porta Nord, in maniera da meglio soddisfare il percorso dei turisti che a migliaia, ogni giorno, frequentano la piazza e i suoi monumenti.

Il battistero, costruito a più riprese, presenta all'esterno numerosi e ricchi ornati, elementi scultorei elaboratissimi, e numerosissimi elementi statuari, il complesso sistema di sculture e decori architettonici è tale, per densità e composizione, da rendere comunque chiara

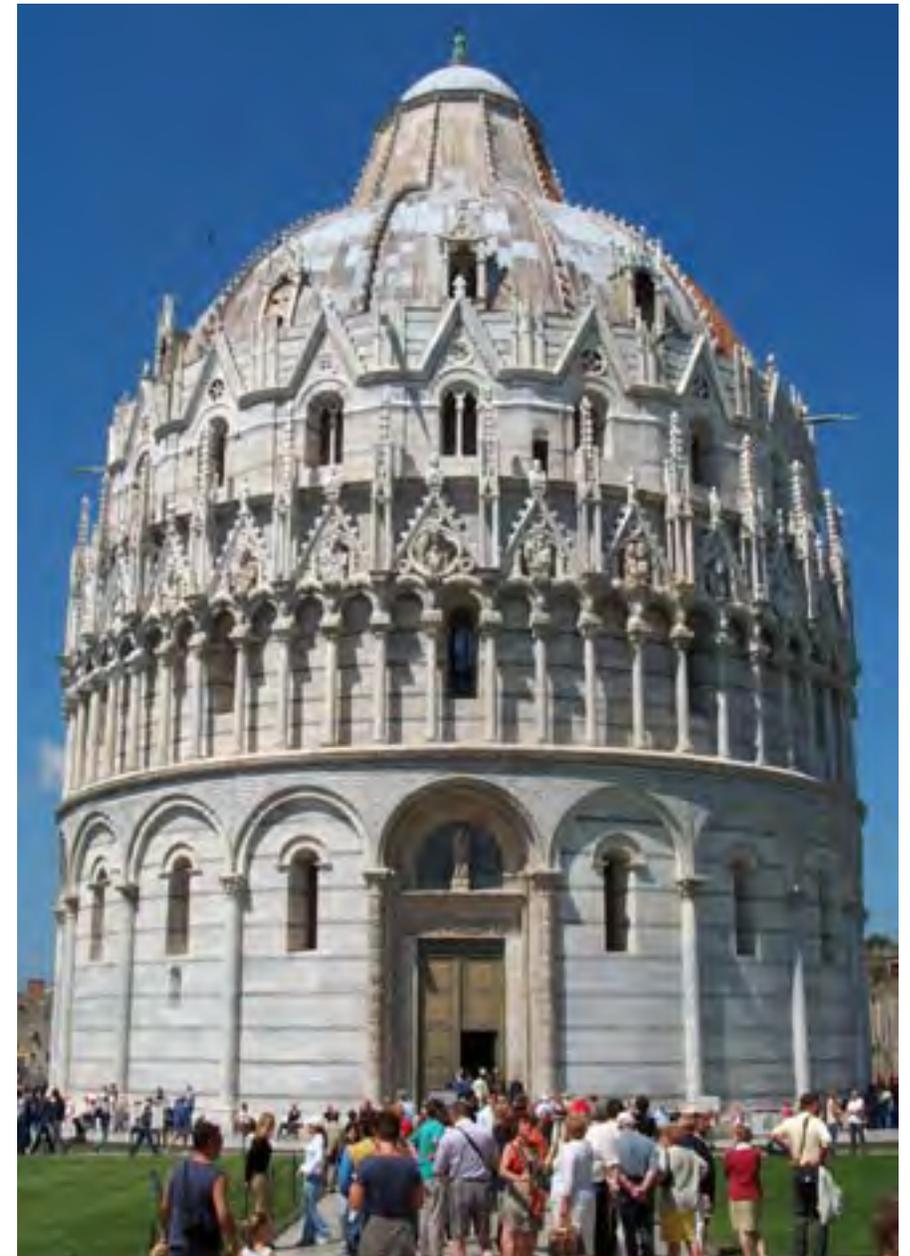


Fig. 1 -Il battistero di Pisa, estate 2002, veduta del prospetto Ovest.

ed unitaria la percezione complessiva dell'edificio. Tutta l'architettura è realizzata in pietra di San Giuliano, a meno di alcune colonne, per le quali è stato usato granito proveniente dall'Isola d'Elba e dalla Sardegna, degli elementi statuari e dei rivestimenti marmorei e della copertura, in parte realizzati in elementi in laterizio e in parte in lastre di piombo.

Il prospetto è suddivisibile in tre fasce orizzontali chiaramente distinguibili, al di sopra delle quali è impostato il sistema delle cupole che coprono l'edificio, ad ognuno di questi ordini

corrispondono altrettanti livelli interni del battistero, il piano terra, la galleria del primo piano e la galleria del secondo piano, quest'ultima risultante dal sistema delle volte di copertura.

La prima fascia è quella che presenta, all'esterno, la massima semplicità; è suddivisa in venti campate cieche, con portali posti ai quattro punti cardinali. In ogni campata è stata posta una finestra stretta ed alta, piuttosto profonda e chiusa da una vetrata a mosaico; le forme sono molto semplici e anche le ghiera degli archi a tutto

e piatte, sormontate da un elemento con motivo ornamentale a foglie. I capitelli delle colonne sono di ordine corinzio, mentre le finestre non presentano alcun decoro a meno di una semplice cornice all'imposta dell'arco. Il paramento murario è scandito da fasce di pietra bicrome; i conci utilizzati presentano tutti la stessa altezza e ogni tre fasce di pietra chiara se ne trova una più scura, dalle tinte verdi.

La fascia basamentale è composta da due gradoni che corrispondono ai dadi delle colonne, sormontati da una serie di cornici che riprendono le mo-

danature del basamento e le curvano lungo la superficie muraria. La parte terminale della prima fascia presenta invece un motivo a grandi triangoli che chiudono in una serie di elementi concentrici le superfici di risulta tra un arco e l'altro.

Le quattro campate che ospitano gli accessi hanno invece ricevuto un trattamento diverso, e presentano una maggior ricchezza di elementi, con architravi e piedritti scolpiti con figure umane ed animali, con cicli di elementi simbolici e rappresentazioni di vicende o personaggi biblici. A presentare la



Fig. 2 - Veduta del complesso monumentale della piazza dei Miracoli di Pisa da Nord, lungo uno dei tornanti della strada comunale per San Giuliano Terme.

3



maggior ricchezza di finiture e ornati è la porta Est, rivolta verso la facciata della cattedrale, dove anche i fusti delle colonne, in tutte le altre situazioni sempre lasciati semplicemente lisci, sono scolpiti in un intricato disegno di forme vegetali.

La seconda fascia si stacca da quella inferiore con una cornice scolpita secondo un particolare motivo a foglie, al di sopra del quale, dopo uno spesso listello, si trovano i basamenti di un fitto ordine di colonne dal fusto cilindrico e privo di entasi, con capitelli tra loro diversi per foggia o decoro; in tutto l'ordine ne sono presenti ottanta.

Al di sopra di questa fascia di colonne si sviluppa la parte del coronamento della galleria, che presenta la maggior ricchezza di elementi scultorei e ornati di tutto l'edificio; infatti ogni capitello è sormontato da una protome e l'archetto di raccordo tra le colonne oltre ad un ricco motivo ornato presenta anche una protome, raffigurante volti umani o teste animali, posta in chiave d'arco.

In maniera alternata, al di sopra delle colonne, è posta una serie di tabernacoli, in parte aggettanti su mensole, tutti terminanti in un alto pinnacolo ornato con motivo floreale.

A chiudere l'apparato della facciata, prima dell'imposta della cupola si trova una terza fascia di finestrate,

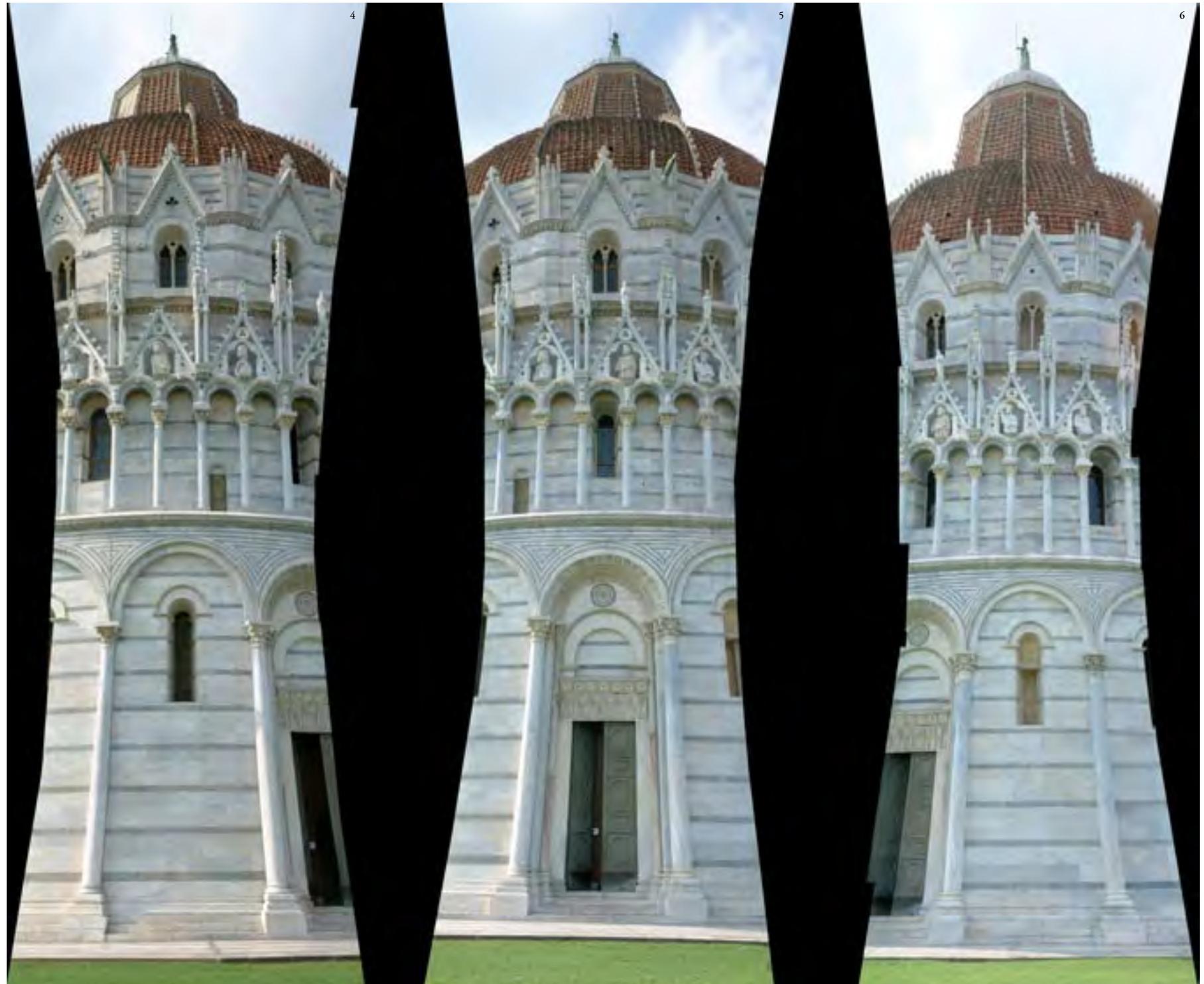
che affacciano nella galleria superiore, disposte fuori simmetria rispetto allo schema inferiore; si tratta di aperture piuttosto profonde, a tutto sesto, con finestratura bifora, dove la colonna presenta un capitello di minor accuratezza scultorea e maggior uniformità formale, a motivi floreali.

Ogni settore della terza fascia della facciata è chiuso da una cuspide ornata con foglie rampanti e coronata con un giglio, nella cuspide, in asse con la sottostante finestratura si trova un oculo, che però è stato ormai tamponato, sempre differente per motivo ornamentale e foggia della finestratura. I settori sono intervallati da una parasta angolare che presenta gli stessi ordini di cornici e ornamenti dei fronti ed è conclusa con un particolare ornamento a tre guglie da cui emerge, in maniera alternata i doccioni della cupola.

La copertura dell'edificio è una struttura complessa, di cui dall'esterno si coglie la grande cupola a dodici settori e parte della volta piramidale che segue le stesse forme percepibili dall'interno.

Ogni settore della cupola presenta una finestra con edicola cuspidata; tutte queste finestre, fatta eccezione per quella che guarda la cattedrale sono state murate. Elemento di maggiore evidenza nella copertura è la sua divisione in due grandi porzioni, di

Fig. 3 - Il Battistero, veduta complessiva da Nord-Est, ripresa eseguita dal camminamento sulle mura che chiudono il lato Nord della piazza.



Figg. 4, 5 e 6 - Mosaicature delle vedute dal sottoinsieme di alcuni settori del prospetto del battistero, fronti nord, nord-ovest e nord-est.

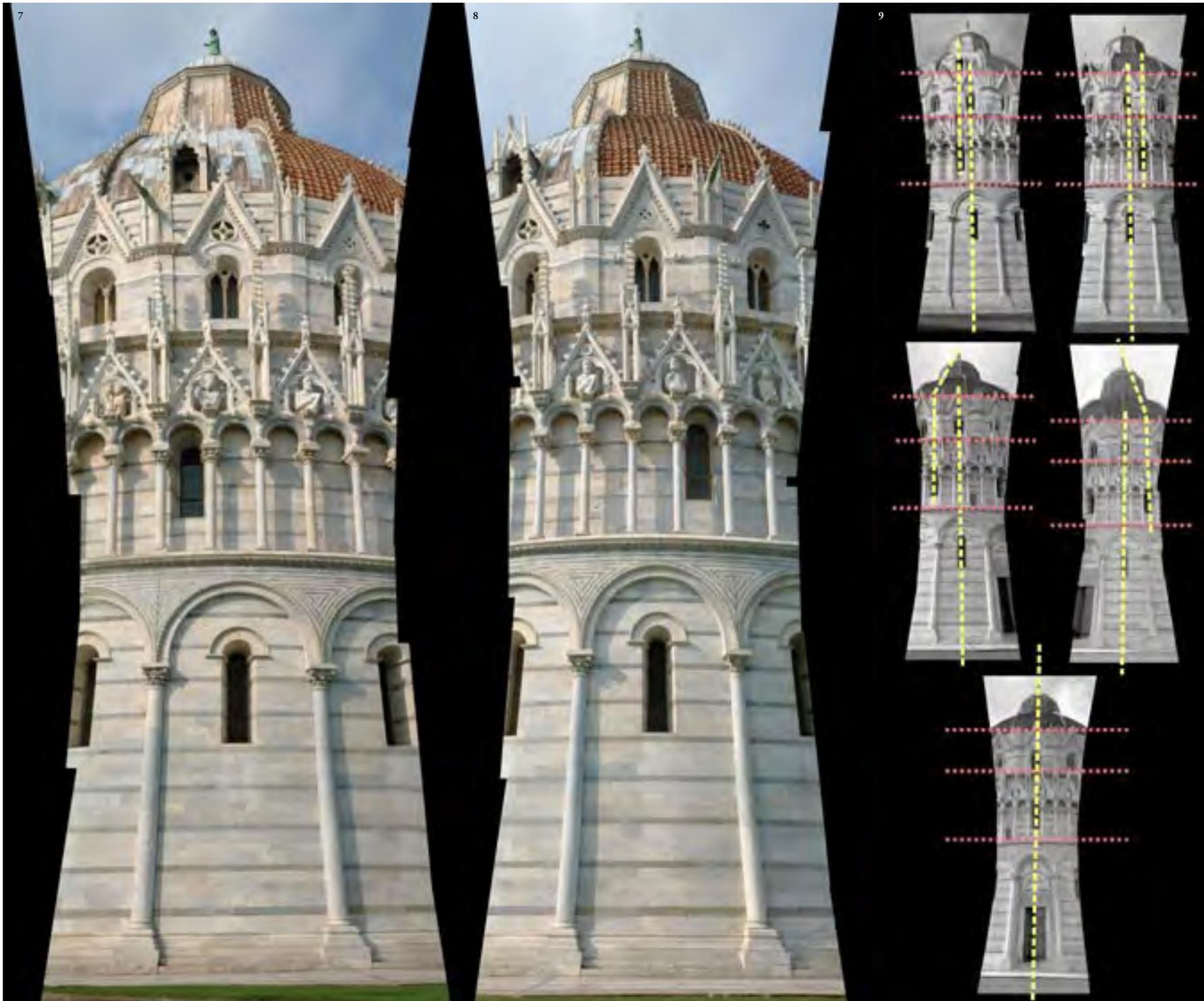
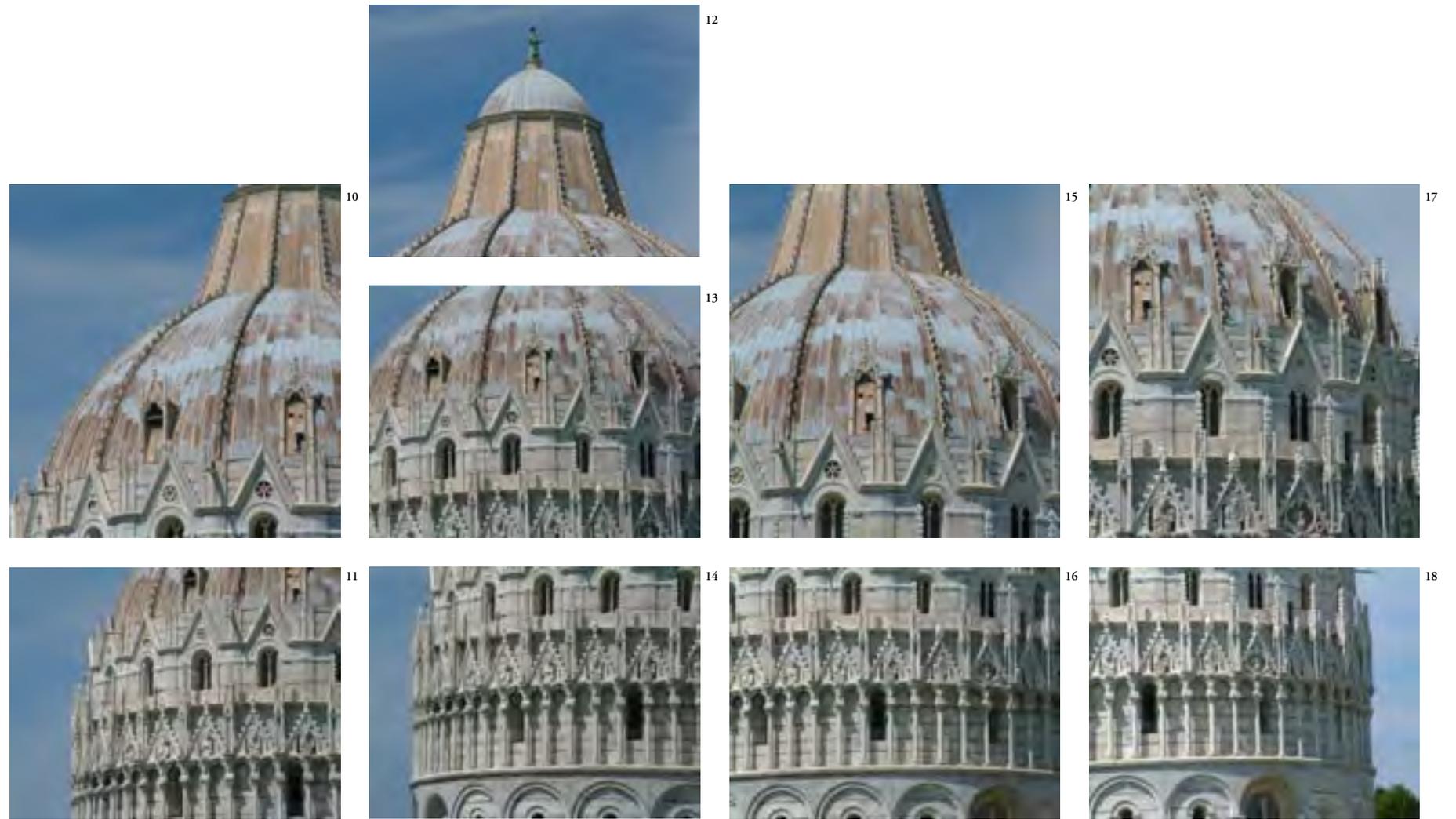


Fig. 7 e 8 - Mosaicature delle vedute dal sottosuò di alcuni settori del prospetto del battistero, fronti nord, nord-ovest e nord-est.

Fig. 9 - Le simmetrie variabili del battistero, le linee direttrici appartengono a progetti diversi, stratificati.



sei settori ognuna, differenti nel tipo di manto, in piombo per la parte affacciante verso Ovest e verso Sud e in cotto per il lati a Est e Nord; la ragione di questa differenziazione non è certa, ma pare sia dovuta alle diverse condizioni di esposizione solare e climatica, soprattutto rispetto ai venti, dell'edificio. La parte coperta in piombo presenta grandi lastre rettangolari, disposte verticalmente, mentre

la parte coperta in cotto è risolta con l'impiego di speciali coppie e tegole, di dimensioni fortemente maggiorate rispetto a quelle convenzionali, murati e ammorsati alla struttura muraria sottostante per ovviare alla fortissima pendenza delle superfici. Ogni settore della cupola è diviso dal successivo da un costolone in pietra a foglie rampanti che risalgono l'intera copertura per andare a fermarsi sulla cornice che fa

da imposta alla cupoletta terminale, al di sopra della quale è posta una statua in bronzo raffigurante San Giovanni Battista.

Negli ultimi due secoli la piazza dei Miracoli di Pisa, in virtù dell'altissima concentrazione di opere d'arte, per la bellezza architettonica, per la particolarità dell'ambientazione e dell'enorme popolarità assunta dalla "torre pendente" è stata meta di visita turi-



Figg. 10/19 - Porzioni di vedute esterne del battistero, lato sud-ovest.

20



stica da parte di schiere sempre più nutrite di visitatori, fino a divenire una sorta di parco di intrattenimento culturale, dove si può salire e scendere dai monumenti, ammirare le opere d'arte esposte, assistere a performance che mettono in evidenza particolari aspetti acustici o visivi di quanto li presente, intrattenersi sul prato e osservare i comportamenti più o meno disordinati delle centinaia di persone

che da tutto il mondo si ritrovano per avere la loro particolare esperienza della piazza pisana.

In questo lungo periodo di visitazione turistica, molti e illustri sono stati i visitatori che sono giunti sulla piazza e ne hanno tratto esperienze che poi hanno voluto narrare per la loro particolarità o importanza.

Tra questi, Charles-Édouard Jeanneret, *Le Corbusier*, racconta della propria vi-

sita nel 1911¹, poco più che ventenne, come scritto nel suo diario del *Viaggio in Oriente*, dove, impressionato dalla purezza e dalla forza delle forme architettoniche, sentì il bisogno di intrattenersi nella piazza dei Miracoli per l'intera giornata per poter ammirare il mutare dell'aspetto delle architetture al variare delle condizioni di illuminazione col trascorrere delle ore del giorno².

21



22



Fig. 20 - Particolare della galleria esterna del secondo ordine della facciata, lato nord.

Figg. 21/22 - Vedute di scorcio della galleria del secondo ordine della facciata, lato nord-est.



23



24



25



26



27



28

Il mutare della piazza è effettivamente una sensazione molto percepibile, i fronti del battistero, della cattedrale, della torre, presentando uno o più ordini di gallerie su quasi tutti i fronti, amplificano gli effetti di chiaro e scuro al modificarsi delle condizioni di illuminazione, inoltre, ancora una volta, l'assoluta libertà dalla presenza di edifici ravvicinati, rende l'effetto cromatico dell'illuminazione sul complesso monumentale sempre visibile. Le grandi superfici bianche di queste architetture appaiono quindi virare dalle tinte più fredde a quelle più calde nell'arco della giornata, presentandosi sempre rinnovate col trascorrere delle ore.

Il battistero rientra a pieno in questo effetto dinamico di apparente mutazione, in più, la duplicità dell'apparato della copertura ne rende possibili due vedute significativamente diverse tra loro, amplificando la variazione dell'aspetto dell'edificio al variare della posizione dell'osservatore.

Entrando nel battistero, passando dall'attuale ingresso principale, ci si lascia alle spalle la piazza e la facciata della cattedrale per accedere in un ampio ambiente che permette immediatamente la completa percezione della totalità dello spazio architettonico dell'edificio, così come dall'esterno è

possibile percepire l'intero edificio con un solo colpo d'occhio, ugualmente la veduta dell'interno è assolutamente unitaria e lo sguardo può spaziare dalla pavimentazione, al primo ordine di colonne, alla galleria, fino all'intradosso della volta che copre il vano centrale e alla cupoletta della sommità.

L'ambiente interno al piano terra è costituito da un ampio vano centrale concluso da una serie di alte colonne e pilastri, in un numero complessivo di dodici, con la disposizione di un pilastro ogni due colonne, i pilastri sono realizzati ancora una volta in blocchi di pietra di San Giuliano ed

hanno un particolare impianto cruciforme con i lati longitudinali inclinati secondo i raggi dell'impianto. Le colonne sono invece in granito di varia provenienza, come precedentemente detto, prevalentemente dalle cave dell'Isola d'Elba e della Sardegna³. Tutte e quattro le porte di accesso



29

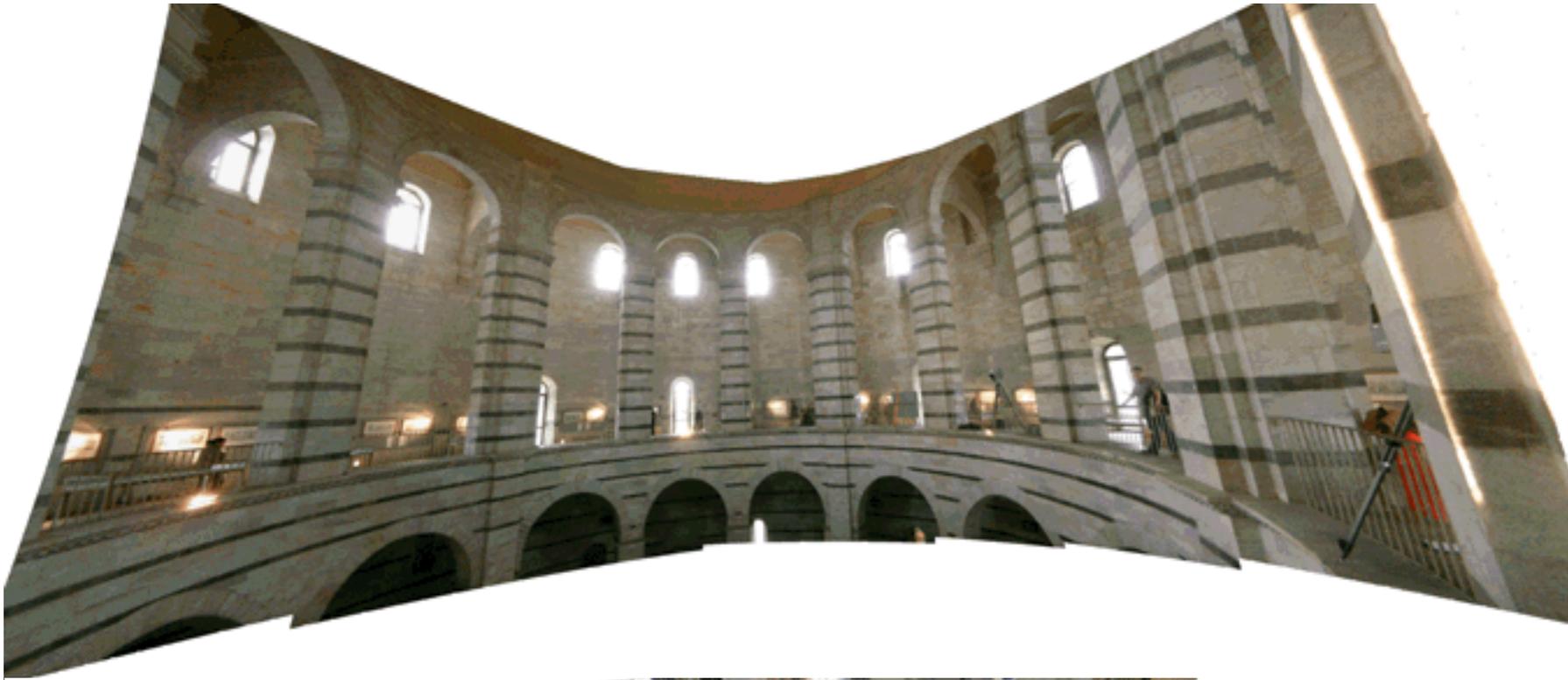


30

Figg. 23/28 - Vedute del complesso monumentale della Piazza dei Miracoli al trascorrere delle ore del giorno. Riprese eseguite tra le ore 9.00 e le 19.00 nel mese di Aprile.

Figg. 29/30 - Due schizzi eseguiti da Le Corbusier relativamente al Battistero di Pisa, il primo eseguito nel 1911, fa parte degli elaborati del diario del "Viaggio in Oriente", mentre il secondo più tardo, fa parte dei "Carnet".

31



32



Fig. 31 - Veduta panoramica della seconda galleria interna del battistero, veduta verso ovest, punto di ripresa dalla galleria stessa.

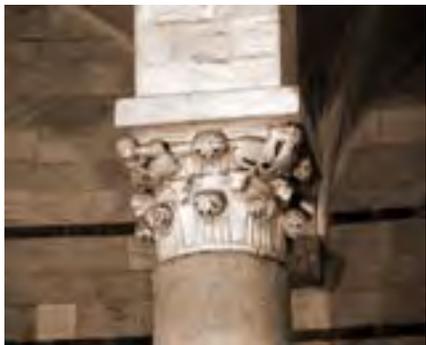
Fig. 32 - Veduta panoramica del piano terra del battistero, veduta verso ovest, punto di ripresa dalla seconda galleria.



33



34



35



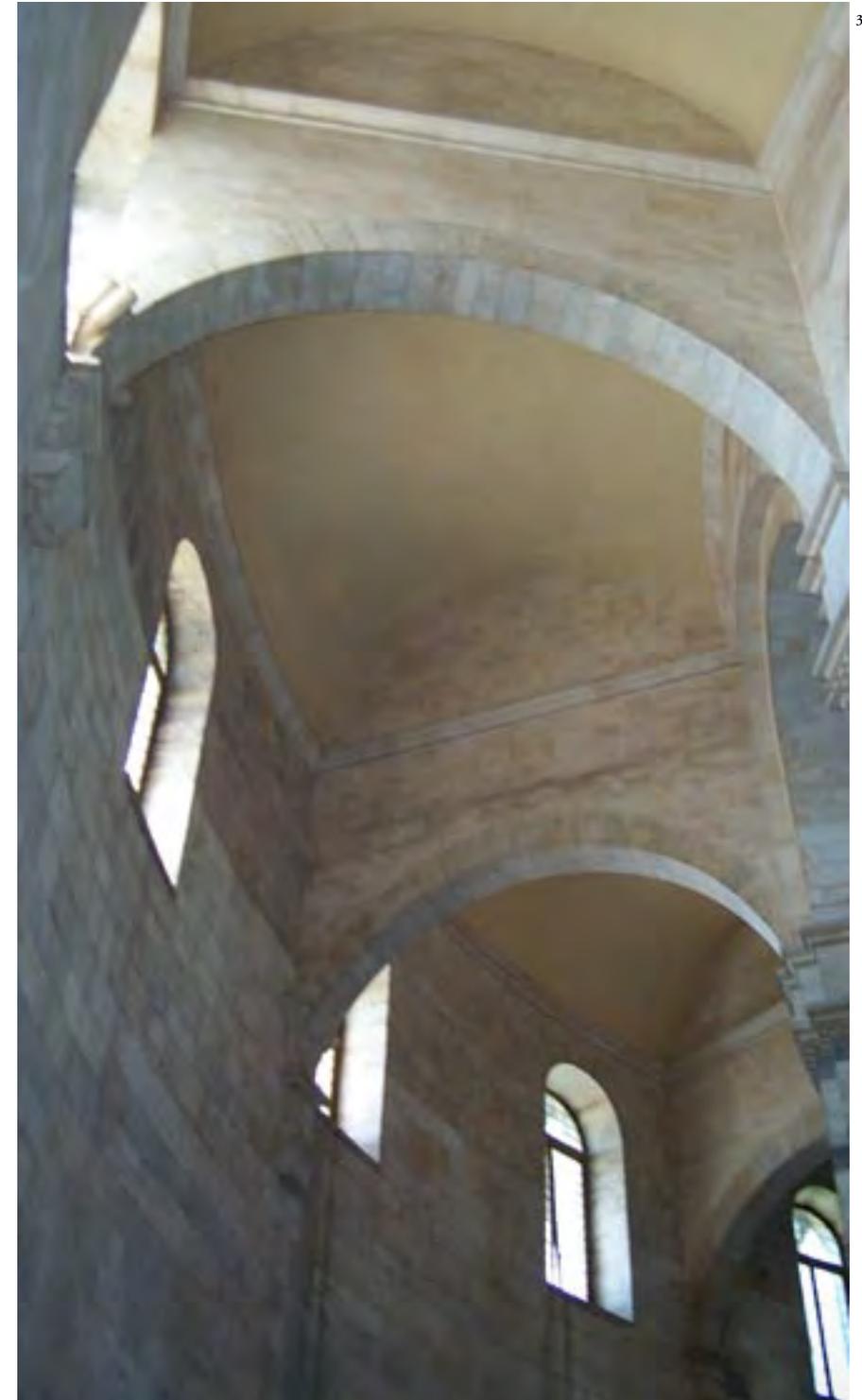
36

dall'esterno conducono alla galleria del piano terra, alta, coperta con volte a crociera di impianto trapezoidale con le basi curve. Le pareti perimetrali della galleria presentano le sole aperture delle finestre ed un'alta serie di gradoni che vanno a costituire un sistema di sedute perimetrali. I paramenti sono bicromi secondo lo stesso motivo presente all'esterno, con rari inserimenti di lapidi e scritte commemorative, che si trovano invece, in maggior numero sulle superfici dei pilastri. Colonne e pilastri sono connessi tra loro da arcate a tutto sesto, incurvate secondo l'andamento dell'impianto, con una leggera cornice a semplificare il raccordo tra il paramento dell'aula centrale e le volte a crociera della galleria. I capitelli dei pilastri sono ornati con motivi floreali,

e sono tra loro uguali, mentre, nelle colonne, il capitello, pur rispettando un modello sostanzialmente simile, presenta motivi molto differenziati, con elementi zoomorfi ed antropomorfi, con animali simbolici e la rappresentazione di creature mitologiche e della tradizione popolare⁴.

La pavimentazione e gli elementi scultorei presenti al piano terreno sono pochi e molto ricchi; in particolare il fonte battesimale ottagonale⁵, molto grande e rialzato di 3 gradini al di sopra piano di calpestio, con una vasca ottagonale con quattro bacini minori, riccamente lavorata, specialmente per quanto riguarda la parte dei plutei e la pavimentazione della vasca. I primi sono disposti a due coppie per ogni lato del poligono, e presentano un motivo scultoreo basato su un ricco rosone centrale su cui si innestano in ogni quadrante, delle teste di uomini, animali e creature fantastiche, per quel che riguarda la pavimentazione, questa è composta da un mosaico di tessere di marmi bianchi, rossi e blu, a formare un motivo ad onde, con chiaro richiamo alla simbologia dell'acqua corrente richiesta nelle prime forme del rito battesimale⁶.

Al centro della fonte, al di sopra di un basamento a colonna, si trova una scultura in bronzo raffigurante San Giovanni Battista, ma questa è



37

Figg. 33/34 - Due dei capitelli dei pilastri del battistero, vedute da terra e dalla seconda galleria.

Figg. 35/36 - Due dei capitelli delle colonne del battistero, vedute da terra.

Fig. 37 - Veduta dal sottoinsù delle volte a botte della copertura della seconda galleria.

38



un'opera recente, posizionata lì al posto dell'originale, comunque successivo alla reale configurazione della fonte, che è stata riposizionata nel sopralluce della porta di accesso del lato nord. L'altare con un'ampiezza di poco inferiore a quella della fonte, si trova alle spalle della fonte battesimale stessa.

Questo di per sé non presenta particolari elementi di pregio, ma la pedana retrostante, posta allo stesso livello del secondo gradino del fonte presenta una pavimentazione a mosaico ricchissima e di notevole bellezza. Il rivestimento è suddiviso in tre specchiature rettangolari, a formare una "C" attorno

all'altare, due di queste, le più grandi, disposte lateralmente all'altare, presentano un motivo a forme geometriche rette intrecciate, a formare numerosissimi angoli acuti e forme triangolari, in marmi e graniti di vario colore, bianche, nere, rosse, verdi, indaco, ocra. La terza parte della pavimentazione presenta le stesse soluzioni cromatiche e la stessa varietà di elementi lapidei, ma questa volta il motivo geometrico ottenuto è basato su linee curve e circolari, disposte secondo involucri di scaglie di varia foggia e colore.

Ad Est della fonte battesimale si trova il pulpito opera di Nicola Pisano, eseguito circa un secolo dopo la costruzione del fonte battesimale. Il pulpito, costruito e scolpito in marmi diversi, prevalentemente bianchi e rossi, presenta una forma esagonale con sei colonne perimetrali di sostegno, tre delle quali poggianti su statue di leoni, e una colonna centrale con alla base figure umane e zoomorfe. Al di sopra di ognuna delle colonne perimetrali è stata posta una statua, queste rappresentano la Carità, la Fortezza, l'Umiltà, la Fedeltà, l'Innocenza e la Fede. I Cinque pannelli che formano la parte superiore del pulpito sono separati da coppie di colonnine di marmo rosso. Il primo pannello presenta la Natività di Cristo; nel secondo e nel terzo pannello è raffigurata l'Adorazione dei Magi, nel quinto si trova la

39



Presentazione al Tempio, sul quarto e quinto pannello si trovano rispettivamente le scene della Crocifissione e del Giudizio Universale.

Per il resto la pavimentazione del piano di ingresso presenta una struttura organizzata in grosse linee di marmo nero intervallato da specchiature di marmo bianco, a formare una maglia a raggiera basata sull'ottagono del fonte battesimale, con la presenza di alcune lapidi di sepolture e alcune rare incisioni raffiguranti simboli o lettere.

Lungo la parete perimetrale della galleria del piano terra si trovano due porte spoglie e di modeste dimensioni che danno accesso ciascuna ad una stretta scala che si sviluppa internamente allo spesso setto murario delle scale di accesso ai piani superiori, queste due rampe si sviluppano internamente il

Fig. 38 - Il pulpito, opera di Nicola Pisano, posto a fianco del fonte battesimale.

Fig. 39 - Veduta complessiva del fonte battesimale, con la statua di San Giovanni Battista e, sullo sfondo, il pulpito di Nicola Pisano.



40



41

pieno murario del battistero, passando davanti a varie aperture che si affacciano sia sull'esterno che sull'interno. Le due scale proseguono ininterrotte fino alla galleria del primo piano, delle stesse dimensioni di quella inferiore, ma molto più essenziali e prive di particolari ornamenti. Le colonne e pilastri assumono qui il medesimo aspetto, riducendo gli ornati dei capitelli a semplici cornici, presentando volte a botte, anche questa volta impostate su impianto trapezoidale con basi curve. La galleria è pavimentata in cotto in



42



43

Figg. 40/44 - Particolari della pavimentazione a mosaico di marmi e graniti dell'altare restrostante il fonte battesimale.

44



semplici mattonelle rettangolari e presenta un doppio e ampio gradino che da accesso all'affaccio verso il vano centrale coperto dalla grande volta piramidale a dodici lati. La parte alta del paramento interno della galleria presenta molti elementi interrotti, forse testimonianza della situazione di incertezza del cantiere del battistero nelle fasi di chiusura di questo secondo ordine⁷. La cosa maggiormente evidente nella copertura della galleria del primo piano è la disposizione delle finestrate che in virtù delle ripetute variazioni di simmetria risultano qui alquanto assortite nel loro comporsi con le arcate trasversali che collegano l'anello dei pilastri con la parte perimetrale.

Dal secondo livello, per poter salire alla galleria del sistema delle volte, si può usare una sola scala; in origine le due rampe erano uguali e da tutte e due si poteva arrivare al terzo livello, ma per problemi di degrado della struttura della scala una delle due rampe è stata murata nell'ottocento e si possono percorrere solo una dozzina di gradini prima di incontrare la parete di tamponamento che la interrompe.

La scala superstite si fa sempre più angusta durante la salita, e al punto di sbocco al piano di calpestio della galleria permette di cogliere, attraverso una stretta finestrina, uno scorcio del-

45



l'imposta esterna della cupola, in un punto altrimenti impossibile a vedersi da terra o da qualunque altra parte accessibile dell'edificio.

L'ambiente a cui si accede è una galleria anulare, spazio di risulta tra l'intradosso della cupola esterna, e l'estradosso della volta a copertura del vano centrale; il piano di calpestio non corrisponde invece all'estradosso delle volte della seconda galleria, ma a quella che con tutta probabilità è la parte inferiore della copertura secondo il progetto originale di Deotisalvi⁸.

L'intradosso della cupola esterna presenta, per ogni settore, una finestrate bifora con un'apertura ampia circa un terzo della larghezza totale della vela, e che in altezza rimane entro la fascia dei primi quattro metri; queste aperture,

Fig. 44 - Veduta di uno dei setti che suddividono la galleria tra la cupola esterna e la volta del vano centrale.

Fig. 45 - Veduta di una delle aperture tamponate nel sottovolto della copertura.

tuttavia sono state anticamente tutte tamponate per dare maggiore stabilità alla copertura.

La tamponatura risulta un'operazione molto aggressiva verso le forme architettoniche originali delle finestrate; di queste sono rimasti poco più che degli ingombri e poche cornici nella parte alta. Unica apertura superstite

nel suo aspetto originale è la finestra che guarda la facciata del Duomo, preservata nel suo assetto originale, e dalla quale è possibile ammirare un bello scorcio della piazza.

Per il resto il paramento murario appare privo di ornamenti o di particolari articolazioni formali, fatta eccezione per alcune buche pontai e per una

risega presente in ogni setto divisorio, probabilmente utilizzata durante le fasi di costruzione della cupola esterna per sorreggere la centinatura⁹.

Da uno dei settori è possibile accedere, attraverso una scala a gradini di tubolare di ferro all'esterno della volta piramidale, ma l'accesso a questa scala ha solo lo scopo di permettere opera-

zioni di manutenzione ed ispezione al personale addetto.

Note

¹ F. Tentori e R. de Simone, *Le Corbusier*.

² AA.VV. a cura di B. Gravagnuolo, *Le Corbusier e l'antico. viaggi nel Mediterraneo*.

³ A. Caleca e A. Amendola, *La dottoressa mano – Il Battistero di Pisa*.

⁴ A tal proposito si veda: M. Chiellini Nari, *Le sculture nel battistero di Pisa*.

⁵ Una completa descrizione e un'ampia documentazione degli aspetti scultorei del fonte può essere trovata in A. Garzelli, *Il fonte del battistero di Pisa – cavalli, arieti e grifi alle soglie di Nicola Pisano*.

⁶ R. Iorio, *Battesimo e battisteri*.

⁷ A. Caleca e A. Amendola, *Op. Cit.*

⁸ Per le alcune delle ipotesi di ricostruzione del progetto originario si veda G. Rohault De Fleury, *Edifices de Pise, relevés, dessinés et décrits*, e *Les Monuments De Pise Au Moyen Age*, per una panoramica sulle ipotesi si veda anche, a cura di Enzo Carli, *Il Duomo di Pisa. Il Battistero. Il Campanile*.

⁹ A. Caleca e A. Amendola, *Op. Cit.*



Fig. 46 - Veduta dal sottoinsù della volta piramidale a dodici lati che copre il vano centrale del battistero.

Il battistero, il rito e la forma

Il battistero, come forma architettonica, nasce, si sviluppa e tramonta con un percorso chiarissimo e al tempo stesso da i più ignorato, legato strettamente all'evoluzione del rito cristiano e alle trasformazioni di una società che nell'arco di un millennio varia il proprio modo di porsi rispetto alla religione e muta la posizione del rito di iniziazione al cristianesimo nella sequenza di atti sociali previsti.

I battisteri dovevano avere avuto una significativa diffusione nel periodo immediatamente successivo all'Editto di Costantino e dopo l'inizio dell'ascesa del Cristianesimo, in virtù della loro funzione di iniziazione; tuttavia in Italia i battisteri che ancora preservano una propria identità architettonica sono circa cinquanta, molti fortemente compromessi o parzialmente inglobati in complessi più ampi, mentre alcuni sono monumenti di grande bellezza e ricchezza, come il battistero di Firenze, quello di Pisa, di Parma, di Pistoia. Benché gli esempi di maggiore dimensione e complessità si trovino nel centro-nord del paese, la massima concentrazione di queste architetture si trova nel nord, prevalentemente in Lombardia.

L'edificio battistero nasce con un compito ben preciso, quello di accogliere la

cerimonia con cui una persona viene accolta nella comunità cristiana, mediante un rito che chiede al novizio di rinunciare alla propria vita precedente per "morire" al mondo e "rinascere" come uomo nuovo, emulo della figura di Cristo.

Il rito che per secoli era stato praticato segretamente, per la durissime persecuzioni, proveniva dal Medio Oriente e da lì arrivava con una vasta simbologia sviluppata a partire dalla pratica che per primo San Giovanni aveva propagato fino alla morte, incontrata, forse, nella fortezza di Macheronte, in Giordania, per soddisfare il capriccio di Messalina.

All'inizio del IV secolo, la religione cristiana viene riconosciuta e vengono cessate tutte le norme persecutorie a carico dei cristiani, che possono quindi iniziare ad erigere pubblicamente i propri templi e ad innalzare edifici per il culto anche con caratteristiche rappresentative.

L'evento che cambia la loro condizione è l'Editto di Milano, noto anche come Editto di Costantino, proclamato, per l'appunto, a Milano nel 313 d.C.

Se si guarda agli eventi storici del periodo, risulta evidente che l'Editto non è un atto repentino né immediato; infatti la situazione politica del periodo è alquanto tormentata; nel 308 d.C. l'Impero Romano, a seguito

Fig. 1 - Mappa dei principali battisteri italiani.

1 Agliate, 2 Agrate C., 3 Albenga, 4 Arcissate, 5 Arsago S., 6 Ascoli Piceno, 7 Asti, 8 Bergamo, 9 Biella, 10 Bressanone, 11 Castelprio, 12 Castiglione O., 13 Castrocaro, 14 Chieri, 15 Cividale E., 16 Concordia S., 17 Cremona, 18 Cureggio, 19 Firenze, 20 Galliano C., 21 Grado-Aquileia, 22 Lenno, 23 Lomello, 24 Lucca, 25 Mariano C., 26 Milano S. Stefano, 26b Milano San Giovanni alle Fonti, 27 Milano S. Aquilino, 28 Milano San Satiro, 29 Napoli, 30 Nocera Superiore, 31 Novara, 32 Oggiono, 33 Padova, 35 Pisa, 35b Pisa battistero originale, 36 Pistoia, 37 Ravenna Ar., 38 Ravenna N., 39 Riva San Vitale, 40 Roma Laterano, 41 Roma Santa Costanza, 42 San Ponso C., 43 Santa Severina, 44 Serravalle, 45 Settimo V., 46 Siena, 47 Varese, 48 Vezzo L. 49 Ventimiglia, 50 Vigolo M., 51 Vigo L., 52 Volterra.

Elaborazione da A. Bonelli



dei rivolgimenti succeduti alle riforme di Diocleziano aveva ben cinque Imperatori, detti *Augusti*: Galerio, Massenzio, Costantino, Licinio e Massimino.

Il 30 aprile del 311 d.C., a Nicomedia anche a nome di Costantino e di Licinio, Galerio pubblica un editto con il quale si concede ai cristiani libertà di culto e gli si permette l'edificazione delle chiese.

La politica anticristiana, fino a quel momento praticata, si rivelava fallimentare, avendo portato le condizioni ad un punto tale che si poteva solo scegliere tra lo sterminio dei cristiani o la riconciliazione. Quanto praticato fino ad allora non solo non aveva dato alcun risultato favorevole ai persecutori, ma aveva indebolito la loro posizione specie dopo il fallimento della Costituzione di Diocleziano, l'avvento di tanti imperatori e il continuo pericolo di una guerra civile.

Con il Cristianesimo, al posto della lotta a oltranza che avrebbe richiesto il massacro della popolazione delle Province d'Oriente, si preferì la conciliazione. Rimasero tuttavia contrari a questo nuovo indirizzo gli imperatori Massimino e Massenzio che proseguirono nell'applicazione di leggi repressive verso il Cristianesimo.

Nello stesso anno dell'Editto di Nicodemia, per la precisione, solo cin-



que giorni dopo, il 5 maggio del 311 d.C., Galerio, promotore dell'Editto, moriva.

Alla sua scomparsa, nel giro di pochi mesi seguì l'inizio delle ostilità tra Massenzio e Costantino che da Nord calò con un esercito di truppe scelte, sbaragliando le forze avversarie e giungendo a Roma, per affrontare Massenzio, nel 312 d.C.

La tradizione ecclesiastica, riportata dal racconto di Eusebio¹ vuole che Costantino, prima di giungere in vista della metropoli, avesse la visione di una croce di luce sfolgorante nel cielo; la croce avrebbe presentato il motto *In hoc signo vinces* e questo avrebbe indotto Costantino, pagano e da sempre devoto al Dio Sole, ad ordinare alle sue truppe di porre sui labari e sugli scudi il monogramma di Cristo.

Sta di fatto, comunque, che lo scontro diretto tra Costantino e Massenzio si risolse con la morte di quest'ultimo e la conquista di Roma da parte di

Costantino che ottiene la nomina di *Primo degli Augusti*.

L'eliminazione di Massenzio e la conquista dell'Italia alterarono in favore di Costantino l'equilibrio tra quest'ultimo e Licinio. Si rendeva necessario quindi un incontro tra i due imperatori d'Occidente. Il convegno ebbe luogo a Milano nel 313 d.C.

In questa occasione i due Augusti pubblicano l'Editto di Milano che segna l'inizio della definitiva affermazione del Cristianesimo. In esso viene riconfermato quanto già concesso nell'Editto di Nicodemia; inoltre si accorda la restituzione ai Cristiani dei beni confiscati, con il Cristianesimo portato alla pari delle altre religioni. Nell'editto, inoltre, si trova un'implicita professione di fede monoteistica, in quanto i termini utilizzati nella formulazione dell'Editto parlano di *Divinità* anziché di *Dei*.

Dal testo dell'Editto: Noi Costantino Augusto e Licinio Augusto felicemente

riuniti in Milano, e trattando di ciò che riguarda la sicurezza e utilità pubblica, abbiamo creduto che uno dei primi nostri doveri fosse di regolare ciò che interessa il culto della divinità, e di dare ai cristiani, come a tutti gli altri nostri sudditi, la libertà di seguire la loro religione, onde richiamare il favore del Cielo sopra di noi e sopra tutto l'Impero.

Perciò abbiamo preso la risoluzione di non negare a chi voglia la possibilità di seguire col cuore e con l'affetto le osservanze del culto cristiano allo stesso modo in cui si può praticare qualunque altra religione, affinché Dio supremo che onoriamo continui a ricolmarci delle Sue grazie. Il che apertamente vi dichiariamo, facendovi sapere che abbiamo generalmente accordato ai cristiani una piena facoltà di praticare la loro religione. E come concediamo questo a loro, anche agli altri vien concessa la potestà intera e libera di religione e di culto. Editto CCCXIII. *Noi vogliamo che in tutto questo adope-*

Fig. 2 - Epigrafe posta sulla facciata del duomo di Milano e commemorante l'editto di Costantino del 313 d.C.

riate il vostro ministero alla maniera più efficace e sollecita, ed affinché questa legge giunga a cognizione di ognuno, la farete affiggere ovunque, in modo che nessuno possa dire di ignorarla.

Sulla base dell'editto si rende possibile l'avvicendamento tra due forme di cristianesimo "il primo è rivoluzionario, metafisico, in un certo senso calamitato da un'idea suicida: rinuncia ai beni terreni e sofferenze per conquistare la vita eterna. Il secondo, aperto a mercanteggiamenti, si dà carico dell'eredità del mondo romano."²

Le vicende successive portarono una sempre maggiore affermazione e diffusione del Cristianesimo, e ancora

sotto Costantino, si procedette alla costruzione della Santa Anastasis a Gerusalemme, con una progressiva formazione e trasformazione della struttura gerarchica dell'amministrazione del culto e con la scissione della Chiesa di Oriente da quella di Roma e la creazione di nuove componenti del credo rispetto alle sue forme originali e l'incorporazione di elementi pagani.

Il processo di trasformazione dei rapporti di tolleranza tra le religioni raggiunse quindi il suo apice nel 391 e nel 392 d.C., quando l'Imperatore Teodosio, detto dai cristiani "Il Grande", battezzato nel 380 d.C., emise il provvedimento legislativo *Nemo se hostiis polluat* mettendo al bando i credo pagani e istituendo il Cristianesimo quale religione di Stato.

Questo primo atto, del 24 febbraio, rinnovava la messa al bando di qualunque cerimonia sacrificale, fosse questa pubblica o privata, regola già applica-

ta in precedenza, ma in più vietava le tradizionali cerimonie di Stato ancora in uso a Roma, e cosa ancor più importante, vietava l'accesso ai santuari e ai templi dedicati alle divinità e, da ultimo, proibiva in maniera esplicita l'apostasia dal cristianesimo.

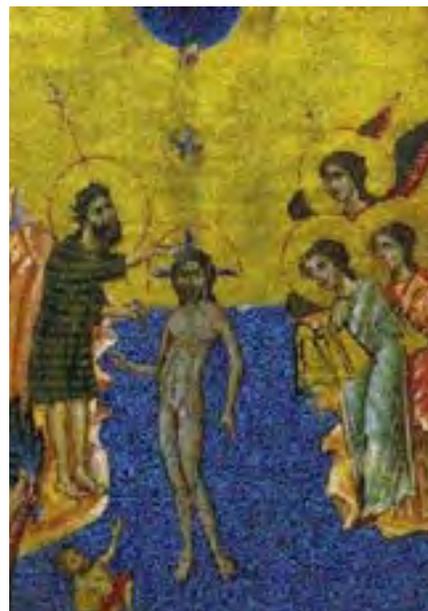
Pochi mesi dopo, il 16 giugno 391, fu emanato il decreto di Aquileia, che prevedeva l'estensione delle disposizioni di cui sopra anche all'Egitto.

Ma è con il terzo editto del 391 che la persecuzione s'intensificò al punto tale da favorire i primi interventi di demolizione degli edifici pagani; ad Alessandria, Petra, Areopoli, Canopo, Eliopoli, Gaza come in Gallia e in molte altre località dell'Impero i Cristiani distruggono e saccheggiano i tempi dedicati agli altri credo con in benestare dell'Impero.

Infine, si arriva al quarto editto, emanato a Costantinopoli l'8 novembre del 392, caratterizzato da una intransigenza assoluta nei confronti delle tradizioni

locali non conformi al Cristianesimo, che prevede la pena di morte per chi effettuava sacrifici e pratiche divinatorie, la confisca delle abitazioni dove si fosse scoperto il luogo di riti pagani, oltre alla proibizione di libagioni, altari, offerte votive, torce, divinità domestiche del focolare, corone e ghirlande, fasce sugli alberi...

Questo modificarsi delle condizioni, con il passaggio del Cristianesimo da persecuito a persecutore, e con la completa estensione all'Impero portava con sé l'inizio di una grande attività edificatoria, operante sia con la messa in opera di nuove costruzioni che con il riadattamento di templi prima dedicati



Figg. 3/6 - Il battesimo per immersione, la sua rappresentazione in scultura e pittura è frequente, sia negli ornamenti dei battisteri, che nelle cattedrali.

ad altre divinità.

Fino al 311-313 a.C. le cerimonie del rito Cristiano si dovevano tenere in segretezza; dall'Editto di Milano in poi le costruzioni dedicate ad ospitare il culto cominciarono a poter essere realizzate in forme complesse e rappresentative, palesi nel tessuto urbano per mostrare oltre che per celebrare.

Uno dei riti chiave del Cristianesimo, specialmente in quel periodo è il Battesimo; il valore dell'atto ha perso la propria intensità col passare del tempo, ma nel IV secolo era una cerimonia officiata prevalentemente agli adulti, che facevano la propria scelta di appartenenza religiosa.



Figg. 7/8 - Il battistero di Parma, a pianta ottagonale esterna e poligonale a sedici lati all'interno; è stato edificato tra il XII e il XIV secolo. Veduta esterna e scorcio dell'interno.



Nella cerimonia, nella sua forma originale, la processione dei novizi accedeva al battistero entrando dal portale rivolto verso occidente, in ragione di una simbologia secondo cui i neofiti volgevano le spalle alle tenebre per incamminarsi verso la luce.

Appena entrati, un presbitero si faceva loro incontro per iniziare la cerimonia, tracciando una croce sulla loro fronte

e chiedendo loro se rinunciavano a "Satana e alle sue lusinghe". Subito dopo, tolta la tunica, i novizi accedevano al fonte battesimale, dove entravano e si immergevano.

Nel rito ambrosiano era praticata l'immersione orizzontale, con un valore simbolico molto forte che portava il novizio a mimare la propria morte e resurrezione come cristiano.

A volte al bagno nel fonte seguiva la lavanda dei piedi, oppure l'unzione. Successivamente avveniva la consegna di una veste nuova e bianca, seguita dal rito della confermazione, con l'imposizione delle mani da parte del vescovo, a simboleggiare la presa di possesso dello spirito, che si teneva in una parte del battistero che era detta *consignatorium*. Completata questa parte della



mysteriis espone quali devono essere le modalità del battesimo e da precise indicazioni sulle caratteristiche formali degli spazi delegati alla cerimonia. Tutto questo porta a una forte presen-

cerimonia, il corteo si ricomponeva e usciva dal battistero passando dalla porta orientale, o comunque da quella rivolta verso la chiesa, i nuovi cristiani potevano quindi accedere per la prima volta alla sacra messa eucaristica che veniva appositamente celebrata in quell'occasione con il nome di *Missa pro Baptizatis*.

Questo rito si teneva in forma così solenne, solamente due volte l'anno, in occasione della Pasqua e della Pentecoste, ma l'indicazione era comunque quella di battezzare *quam primum*, che valeva a dire in età neonatale, mentre la cerimonia estesa era riservata agli adulti.

Il rito è espresso in questa forma e regimentato dalle indicazioni di Sant'Ambrogio, massimo fautore del rito battesimale, che nelle sue omelie, raccolte nel *De sacramentis* e nel *De*



za simbolica, l'edificio del battistero è rappresentativo dell'iniziazione al Cristianesimo, ma è anche, quando questo avrà permeato la società, il passaggio con cui si viene ammessi a pieno titolo nella comunità e il battistero è l'edificio in cui questa cerimonia si espleta. La simbologia, da trasporre sia in architettura che negli apparati scultorei che la corredano, è allora molto complessa, gli aspetti più significativi riguardano la tripartizione

del prospetto, per indicare la Trinità, e la suddivisione in due parti dei fronti interni, a simboleggiare la dualità della figura di Cristo; la presenza di una volta a chiudere lo spazio centrale mostra al nuovo cristiano un elemento che simboleggia il paradiso, per questa ragione la volta non dovrebbe mai essere declamata all'esterno, ma coperta da un tetto a falde, in quanto l'elemento simbolico deve essere visibile solo ai novizi e ai cristiani, la denuncia all'esterno avverrà solo nei battisteri



edificati o ristrutturati in epoca più tarda, in misura della loro funzione rappresentativa e dimostrativa dell'opulenza della città o del benefattore dell'opera.

Tra i molti simboli, basati su numeri e combinazioni numeriche o su simbologie complesse – l'acqua corrente, il pesce – appare molto importante secondo le indicazioni di Sant'Ambrogio il numero otto: *OCTACHORUM SANCTOS TEMPLUM SURREXIT IN USUS OCTAGONUS FONDS EST MUNERE DIGNUS EO. HOC NUMERO DECVIT SACRI BAPTISMATIS AULAM SURGERE QUO POPULIS VERA SALVIS REDIIT*³. L'importanza del numero otto è legata alla sua rappresentazione dell'ottavo giorno, ovvero della resurrezione di Cristo come uomo nuovo, ma anche della rinascita del



Fig. 9 - Il battistero di Firenze, a pianta ottagonale, con abside, probabilmente edificato a partire dal IV-V secolo d.C.

Fig. 10 - Il battistero di Pistoia, a pianta ottagonale, ed edificato tra il 1337 e il 1361 d.C. su disegno di Andrea Pisano, in sostituzione di un precedente battistero a pianta quadrata.

Fig. 11 - Il battistero di Pisa, a pianta circolare, fondato nel 1052 d.C.

Fig. 12 - Il battistero di Lucca, a pianta quadrata, la struttura attuale sorge su una serie di preesistenze cresciute a partire da un fonte battesimale più antico.

novizio alla sua nuova vita come cristiano; dalle omelie di Sant'Ambrogio si può trarre anche: *IN OCTAVO NUMERO RESURRECTIONIS EST PLENITUDO*, ad ulteriore conferma del valore attribuito a questo numero.

Di conseguenza la pianta ottagonale, su cui impostare l'intero edificio, o solamente il fonte battesimale, è da ricondursi a questa indicazione, inoltre l'impianto ottagonale ben si presta agli orientamenti e a sviluppare trame impostate su croci quadrate appoggiate su quattro dei lati del poligono.

Il fonte battesimale è il centro del battistero perché è anche il centro del rito, questo è spesso molto ricco e molto articolato, di forma ottagonale, ma anche circolare o quadrato, o può

addirittura essere recuperato da manufatti di diverso utilizzo⁴.

Le necessità di concretizzare le simbologie per rendere ancora più efficaci ed evocativi i manufatti influisce fortemente anche sul fonte, che ricco e scultoreo, è spesso un'ulteriore raccolta di simbologie cristiane, a volte mediate dalla tradizione locale del luogo di edificazione. Quasi sempre l'altare è rialzato su tre gradini che nella cerimonia servono a sottolineare le tre rinunce a Satana da compiersi durante il rito del battesimo.

Il battistero ha come scopo quello di accogliere una cerimonia di grande rilevanza sociale, collettiva, compiuta da una processione di adulti che compiono una scelta, e quindi carica di un'enfasi particolare.

La diffusione del Cristianesimo, e il suo permeare la società, comporta però un rapido processo di conversione di tutta la popolazione dell'area europea, e nel momento in cui non rimangono quasi più adulti da battezzare e il rito si compie *quam primum* per i bambini, l'importanza cerimoniale dei riti del battistero tende a diminuire.

Da prima, la cerimonia del battesimo per immersione comincia ad essere praticata con sempre minor frequenza e alla fine il battesimo per aspersione, compiuto da un sacerdote e senza la necessità di un grande fonte battesimale,

soppianta completamente la procedura maggiore.

Anche i battisteri cessano di essere costruiti, la cessata necessità di diffusione di ciò che oramai è ovunque non li rende più necessari, e i fonti battesimali per i bambini possono essere ricavati nelle chiese e in ambienti di risulta.

Inoltre il non avere quasi più adulti da battezzare comporta la minore necessità di un edificio esterno alla chiesa atto ad accogliere i novizi e costituire quindi una sorta di ambiente filtro verso la chiesa e la comunità cristiana.

Attorno al 1100 d.C. questo stato di cose è già consistente, e gli unici battisteri che si continuano a costruire o che si rinnovano, sono quelli con funzioni rappresentative che esulano dalla pratica del rito, ma servono a mostrare, assieme ad altre preesistenze la forza e la ricchezza della città in cui sorgono.

Nei secoli successivi, questo genere architettonico non viene più preso in considerazione, al contrario, numerosi battisteri minori, vengono incorporati da edifici adiacenti o di nuova costruzione, ritrasformati in chiese o smantellati in parte o completamente; il battesimo viene officiato in fonti presenti all'interno della chiesa, più o meno sontuose, o in semplici bacini marmorei sollevati su colonnine, posti in spazi secondari della costruzione.



13

Fig. 13 - Il fonte battesimale della basilica di San Frediano a Lucca, opera di Maestro Roberto; è un sontuoso esempio dell'abbandono del battistero come architettura autonoma e dell'inclusione della sua funzione in uno spazio apposito ricavato nelle chiese.

Note

¹ Eusebio di Cesarea, *Storia eccl.*, 1, 714

² Da Bruno Zevi, in *Controstoria dell'Architettura in Italia - Preistoria E Medioevo*, p. 64.

³ La scritta è presente in un'epigrafe attribuita allo stesso Sant'Ambrogio e posta nel battistero milanese di San Giovanni alle Fonti.

⁴ Come a Vicenza, dove mancando la possibilità di erigere un battistero, nel XIII secolo viene improvvisato un fonte battesimale in una cappella intitolata a San Giovanni Battista portandovi all'interno un manufatto d'epoca longobarda, una vasca lapidea di abbeveraggio dotata di una sponda da pozzo, fatta costruire dal gastaldo "Rodoald". Questa condizione particolare perdurò fino al sec. XIX.

Quadro storico

Nel 1152 d.C. sotto la direzione di Diotisalvi, architetto e scultore medioevale, fautore del progetto originale del battistero, inizia i lavori del nuovo San Giovanni a Pisa, in quella che oggi è nota come Piazza dei Miracoli.

Il battistero che si sarebbe costruito non era certo il primo per Pisa, che già a poca distanza dalle fondazioni del nuovo presentava ancora, con tutta probabilità, il primo battistero, oggi completamente scomparso.

Di questo edificio esiste in realtà ancora la parte basamentale, completamente interrata, posta al di sotto del piano di

calpestio entro il perimetro dell'attuale cimitero monumentale che chiude verso nord la piazza dei Miracoli. Nel dicembre 1936 durante alcuni sondaggi archeologici, il basamento venne riportato alla luce, rilevato, studiato, e nuovamente sepolto nel febbraio del 1937¹.

Si trattava di un edificio di ben più modeste dimensioni di quello attuale², a pianta ottagonale di sei metri di lato e con una piccola abside cilindrica, simile a quella che doveva essere all'origine anche nel battistero di Firenze.

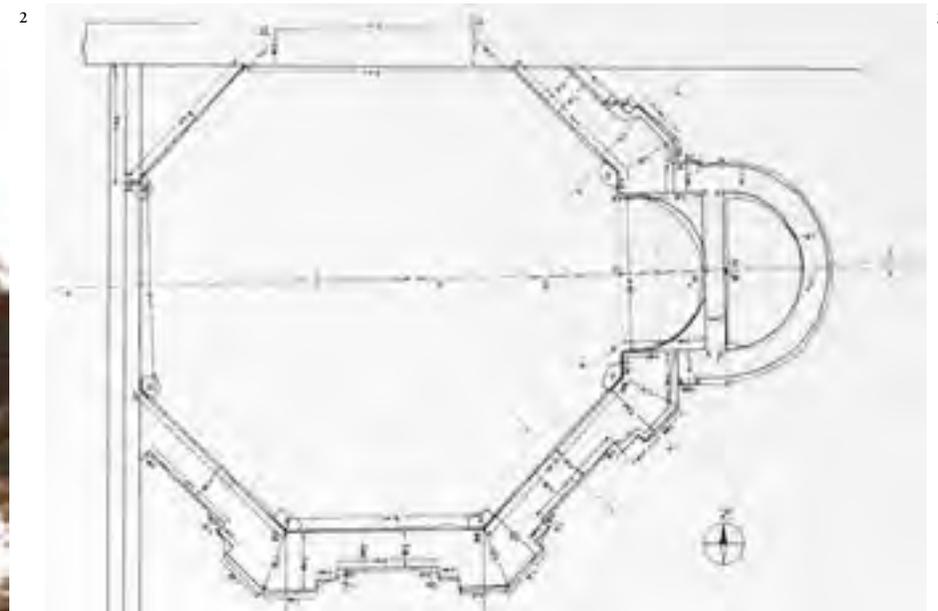
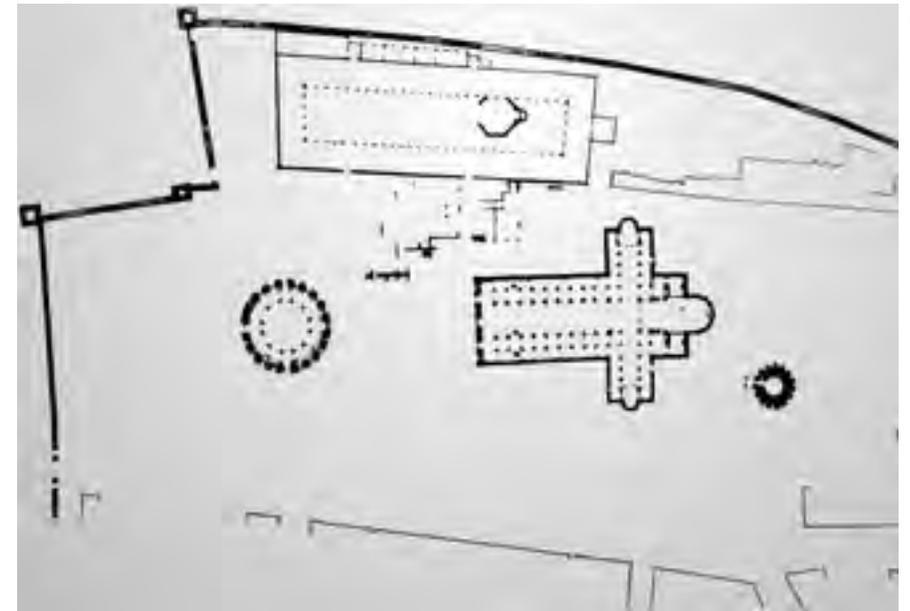
All'epoca in cui l'opera di Diotisalvi ha inizio, Pisa è all'apice della propria importanza, la città, ricca, è in continuo



Fig. 1 - La Piazza dei Miracoli con indicazione dei reperti rinvenuti durante gli scavi degli anni '30, dai disegni di P. Sanpaolesi.

Fig. 2 - Foto dello scavo del basamento del primo battistero di Pisa, 1936.

Fig. 3 - La pianta del primo battistero nella rappresentazione di F. Severini.





⁴ già si trovano varie costruzioni, tutte difficilmente ricollocabili, prevalentemente ad uso liturgico, probabilmente una parte di città in parte decadente e in cattive condizioni⁵
In quest'area iniziano i lavori di trasformazione che definiranno la piazza così come, secondo le sue linee principali, oggi è ancora visibile. L'intervento non

riguarda solamente la liberazione del suolo, ma anche la ridefinizione del confine della città in quella direzione, con la costruzione della cinta muraria, che per la sua struttura non può essere considerata a pieno titolo "difensiva" e quindi in buona parte realizzata secondo scopi formali di ridefinizione della quinta urbana e per dare un



ampliamento. Inoltre la conclusione della Prima Crociata, nel 1099 d.C. a cui ha partecipato con centoventi navi, ha reso Pisa particolarmente presente nell'oriente, con una roccaforte pisana ad Accon (San Giovanni d'Acridi) e con l'arcivescovo pisano Daiberto voluto dal Papa Urbano II come patriarca di Gerusalemme.

Al di là della valutazione storica dell'operato pisano e dello stesso Daiberto³, il dato di fatto molto importante è che con queste condizioni l'idea e la simbologia legate alla Terra Santa, al tema del Santo Sepolcro, dovevano essere quanto mai avvertite presso la comunità pisana⁴.

In questo stesso periodo i lavori di trasformazione della città si concentrano su un'area marginale all'edificato, dove



limite chiaro alla grande piazza e per determinarne le modalità di percezione dai punti di vista ravvicinati⁶.

Sulla base di queste considerazioni, l'intervento si sviluppa secondo due direzioni: la ridefinizione dello spazio urbano di quest'area, con una sua enorme valorizzazione, e la definizione di un ambiente fortemente simbolico e adeguato a mostrare la ricchezza della città.

La simbologia sottesa all'impostazione urbanistica è di certo grande e articolata, ma di fondo si può ravvisare la volontà di voler replicare in una interpretazione mediata da una lettura colta, la raffigurazione del Santo Sepolcro di Gerusalemme, nella forma con cui il complesso si doveva presentare all'epoca, con la cattedra-

Fig. 4 - Scorcio esterno della chiesa del Santo Sepolcro a Pisa, edificata nel secondo decennio del XII secolo ad opera di Diotisalvi.

Fig. 5 - Veduta interna, dal sottoinsiù, della volta ottagonale che copre il vano centrale della chiesa del Santo Sepolcro a Pisa.

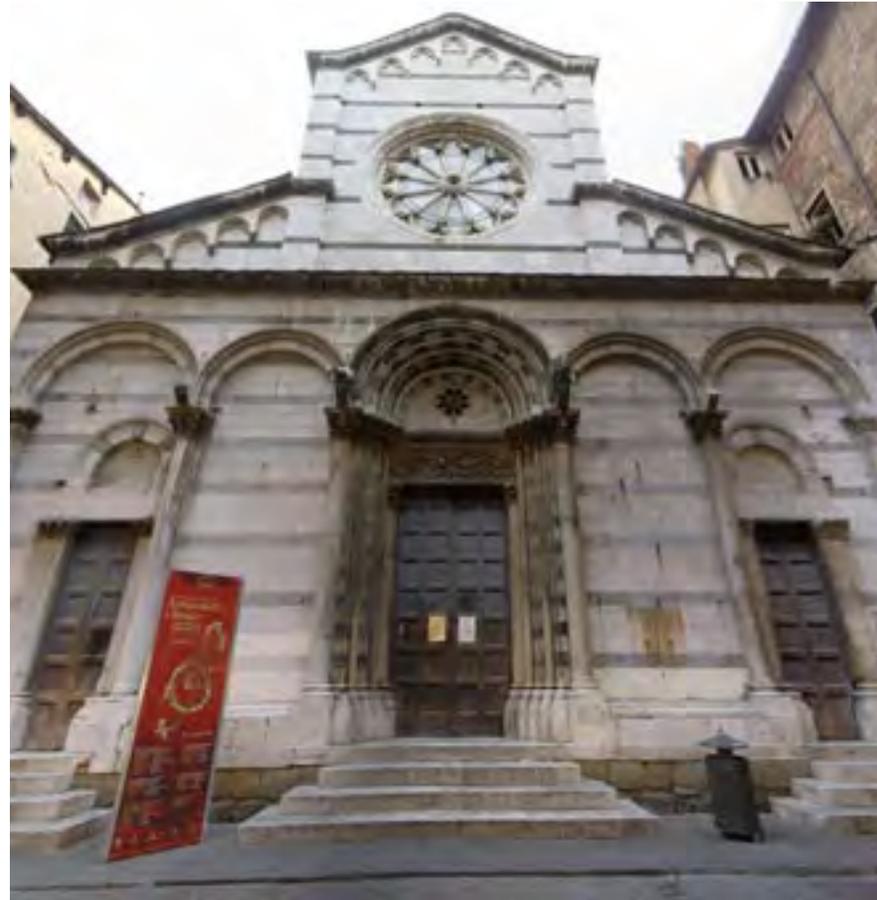
Fig. 6 - Veduta del campanile della chiesa di San Nicola a Pisa.



le in luogo del *Martyrion*, la cinta muraria ed il fronte del cimitero monumentale anziché il fronte roccioso del monte Calvario e con il battistero a costituire l'equivalente dell'*Anastasis* di Costantino; il tutto collocato su una spianata regolare, ben delimitata, come a Gerusalemme in quei tempi⁷.

A queste condizioni, il battistero non poteva certo più essere il modesto fabbricato allora presente, e doveva essere sostituito con un'opera adeguata, il battistero di Diotisalvi, il più grande battistero mai realizzato.

Diotisalvi chiamato a dirigere il cantiere del Battistero, imposta il progetto mediando elementi formali della facciata e della cultura architettonica romanica, per riproporre un modello fortemente ispirato all'*Anastasis* così



come si può ipotizzare che questa dovesse apparire allora.

La sua produzione precedente aveva già risentito dell'influsso delle terre dell'Oltremare, benché lo studio su questo autore sia ancora aperto, in virtù di una modesta quantità di informazioni certe reperibili, e dell'eventualità che al nome *Deutesalvet*, possa corrispondere non un'unica persona, ma una famiglia di costruttori e scultori⁸, a lui sono in genere attribuite, oltre che il battistero, la chiesa del Santo Sepolcro, sita nei pressi dei lungarni di Pisa, il Campanile della chiesa di San Nicola, sempre a Pisa e alcune opere di incerta paternità, di certo fortemente rimaneggiate rispetto ai caratteri originali, come la chiesa di San Cristoforo, a Lucca e la cappella di Sant'Agata, a Pisa; oltre a queste opere, preservate sostanzialmente integre, sono attribuibili all'opera di Diotisalvi alcuni edifici civili e militari di cui si può reperire solo la traccia documentaria, si tratta di alcune torri costiere pisane, di cui non pare essere rimasta alcuna traccia, e tra cui il Ragghianti include il faro del porto di Pisa⁹.

Tra le opere di più certa attribuzione, meritano maggior attenzione, in rapporto a quanto verrà progettato da Deotisalvi per il battistero, soprattutto la chiesa del Santo Sepolcro e la chiesa di San Cristoforo. La chiesa del

Fig. 7 - Veduta dal sottoinsiù dell'interno del campanile di San Nicola.

Fig. 8 - La chiesa di San Cristoforo a Lucca, forse la parte basamentale è dovuta a Diotisalvi, l'attribuzione viene fatta sulla base di un'epigrafe collocata all'interno, che però altri storici hanno voluto identificare come il luogo di sepoltura dell'architetto.

Fig. 9 - L'epigrafe che permette di supporre una relazione tra la chiesa di San Cristoforo e Diotisalvi.



Fig. 10 - Bassorilievo nel piedritto di una finestra dell'abside della cattedrale di Pisa, alcuni studi cercano di riconoscervi una firma cifrata di Diotisalvi.

¹⁰ Santo Sepolcro, è un edificio a pianta centrale, anche questa risente fortemente del riferimento all'*Anastasis*, e presenta in una forma più semplice e meno articolata alcune soluzioni che successivamente verranno adottate per il battistero.

Nella chiesa di San Cristoforo, l'opera di Diotislavi è limitata alla parte basamentale, che presenta partizioni e soluzioni dei particolari assimilabili a quelli del basamento del battistero pisano.

Studi recenti hanno cercato di individuare una paternità o un contributo maggiore di questo artista nelle opere della Piazza dei Miracoli, individuando elementi stilistici o firme cifrate nell'abside e nella facciata della cattedrale, nella parte basamentale della torre¹⁰, tuttavia il processo conoscitivo della sua opera non può però essere portato a termine con sicurezza, in virtù, soprattutto della poca consistenza delle fonti e del fatto che molto spesso le attribuzioni si basano su congetture o confronti stilistici difficili da verificare.

Al di là di questo Diotisalvi, sembra essere una figura molto legata al suo tempo, capace di interpretare l'iconografia del Cristianesimo impiegandola in soluzioni capaci di esprimere una grande correttezza formale e di realizzare spazi che enfatizzano le celebrazioni

per cui questi sono pensati e capace di mediare stili e soluzioni che permettono l'armonizzazione delle proprie opere nel contesto in cui si collocano.

Note

¹ I rilievi allora eseguiti possono essere reperiti in A. Niccolai, A. Manghi, F. Severini, *Gli scavi nel Camposanto monumentale nel 1939*, Pisa, 1942.

² Il primo battistero è stato oggetto di numerosi studi circa l'originale aspetto dell'edificio, oltre alle ipotesi formulate da Piero Sanpaolesi, meritano attenzione: A. Niccolai, A. Manghi, F. Severini, Op. Cit.; Letizia Pani Ermini e Daniele Stiaffini, *Il battistero e la zona episcopale di Pisa nell'alto medioevo*, Pacini editore, Pisa, 1985; Pietro Cavallo, *I battisteri del periodo paleocristiano: forme e tipologie - Il modello fiorentino di S. Giovanni e il battistero paleocristiano di Pisa*. Tesi di Laurea in Architettura, relatore professor Marco Cardini. Firenze, 1997.

³ Buona parte della critica storica tende a screditare la figura di Daiberto, in ragione dei suoi forti contrasti con il re Baldovino, circa la questione dell'impiego dei fondi che dovevano

essere spesi per le opere in Terra Santa, Conclusasi con la sua destituzione, il suo rientro a Roma, la sua riabilitazione da parte del Papa e alla sua morte lungo il viaggio di ritorno.

⁴ Il tema è stato ben approfondito in: Piero Pierotti e Laura Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001.

⁵ Circa alcune dissertazioni sulle condizioni dell'area della Piazza dei Miracoli si veda: Antonio Caleca e Aurelio Amendola, *La dotta mano - Il Battistero di Pisa*, Edizioni Bolis, Bergamo, 1991.

⁶ Circa le ipotesi sul rapporto cinta muraria risulta molto esauriente il testo: P. Pierotti e L. Benassi, Op. Cit.

⁷ La tesi è accolta dai principali critici di storia dell'arte; in merito ai rapporti con Gerusalemme, si veda: P. Pierotti e L. Benassi, Op. Cit.

⁸ A. Caleca e A. Amendola, Op. Cit.

⁹ C.L. Ragghianti, *La torre pendente di Pisa*, Firenze, Selearte Monografie, 1995.

¹⁰ P. Pierotti e L. Benassi, Op. Cit.

Evoluzione dell'organismo architettonico

Nella trattatistica, pur non essendoci una concreta diatriba, le vicissitudine costruttive e la paternità di più parti del complesso architettonico del battistero sono oggetto di differenti e discordanti teorie che tentano di mettere in rilievo uno degli aspetti progettuali rispetto agli altri.

E' comunque evidente la significativa stratificazione di numerosi interventi, soluzioni iniziate e poi abbandonate, trasformazioni e operazioni di ricuci-

tura stilistica e strutturale.

Lo sviluppo principale di questa architettura può comunque essere organizzato intorno a quattro periodi principali differenziati tra loro dalle figure che si sono trovate a condurre la costruzione e che hanno dato la loro impronta ad una parte dell'edificio.

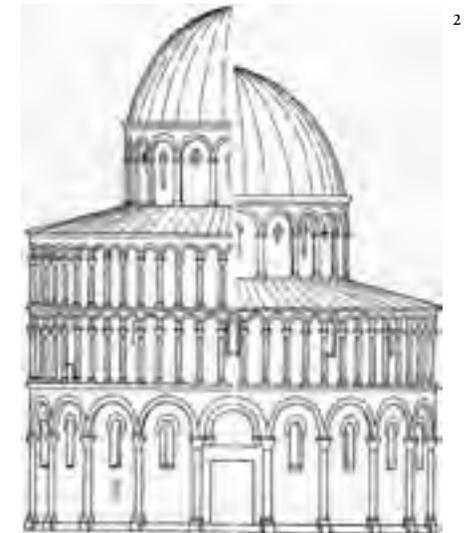
Diotisalvi

Sia in alzato che in planimetria i caratteri fondamentali dell'edificio attuale, sono riconducibili al progetto di Diotisalvi e rispetto a questo le trasfor-

mazioni successive hanno preservato i dimensionamenti e le proporzioni generali dell'edificio.

L'attribuzione dell'opera è data sulla base di una delle due iscrizioni di fondazione poste sui pilastri all'interno dell'edificio, su questa si trova scolpita la scritta: *DEOTISALVI MAGISTER HUIUS OPERIS*. La stessa lapide indica la data della fondazione del battistero, il 1153 d.C.

Le vicende dell'opera di Diotisalvi non sono molto documentate e lo stesso tende ad essere una figura di difficile collocazione nel panorama



2

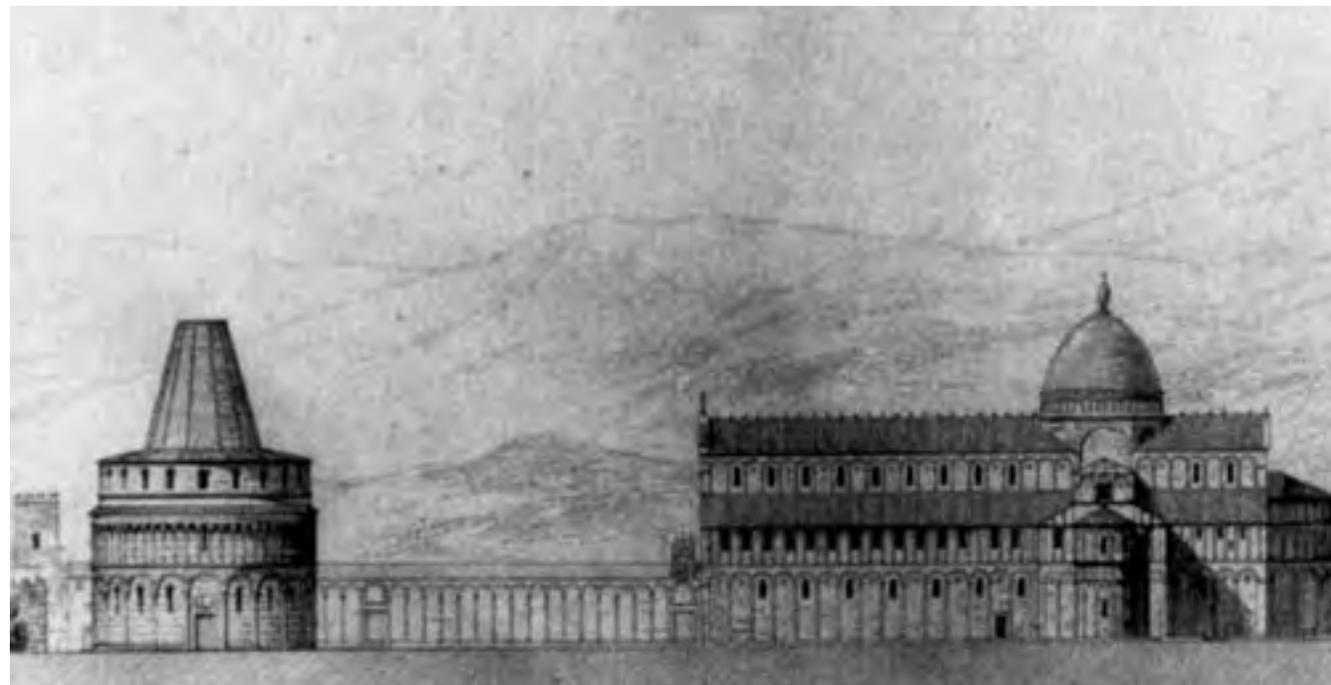
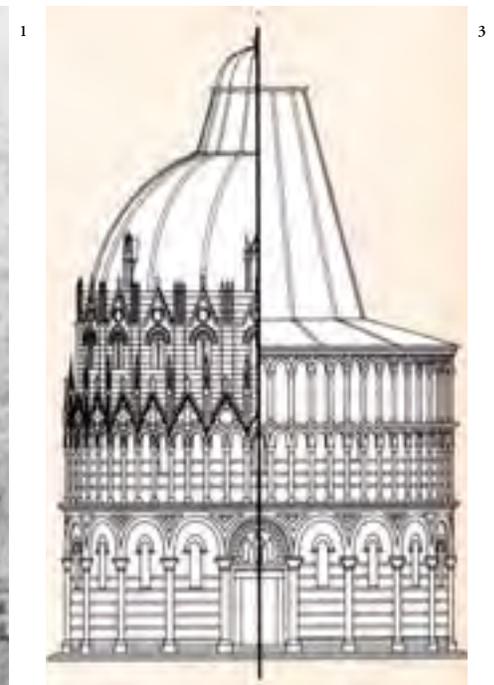


Fig. 1 - Ricostruzione ipotetica eseguita da Georges Rohault De Fleury, alla metà del XIX secolo.

Figg. 2/3 -Due ipotesi di ricostruzione del progetto originale di Diotisalvi per il battistero di Pisa. Secondo Fabio Redi. Per quanto possibili, resta dubbia la scelta attribuita a Diotisalvi di adottare una copertura a cupola, scelta mai attuata nelle sue altre architetture, come, per esempio, la chiesa del Santo Sepolcro, sempre a Pisa.



3



⁴ stilisticamente inquadrabili nell'ambito della produzione scultorea del primo duecento, legata all'attività di quei



⁵ e, al di sopra della risega, la galleria del secondo ordine, comprensiva della corona di colonne ed archi. Si tratta di elementi che possono considerarsi come una reinterpretazione della facciata del Duomo, E' probabile che la decorazione dell'esterno, negli intenti di Diotisalvi, dovesse riprendere lo schema adottato da Rinaldo e da



⁶ to originale del battistero vi dovesse essere una ricerca di essenzialità e di forme comuni a quanto stava venendo costruito nella piazza. L'interno appare invece più libero dai modelli ripresi dalla cattedrale, nella tradizione degli edifici destinati all'ufficio del battesimo. Sulla forma che avrebbe dovuto assumere il battistero secondo la volontà di Diotisalvi sono state fatte molte ipotesi e tra le più interessanti sono di certo quelle che vogliono vedere una relazione tra la riorganizzazione di questa parte di Pisa e il Santo Sepolcro a Gerusalemme³, e il battistero come rivisitazione del modello dell'*Anastasis* di Costantino.

storico e artistico del periodo, il suo intervento viene individuato sulla base delle notizie offerte dallo storico Bernardo Maragone negli *Annales Pisani*¹, testimone oculare delle prime vicende edilizie della costruzione e delle trasformazioni che Pisa subisce con la costruzione della cinta muraria che delimita la Piazza dei Miracoli e la riorganizzazione della Piazza stessa; altro intervento utile ad individuare le parti a lui attribuibili è l'analisi stilistica del monumento. Secondo il cronista pisano, l'edificio iniziale era articolato in due anelli concentrici. Su quello centrale furono innalzate le colonne che ancora si vedono. Poiché i capitelli che sormontano le colonne appaiono

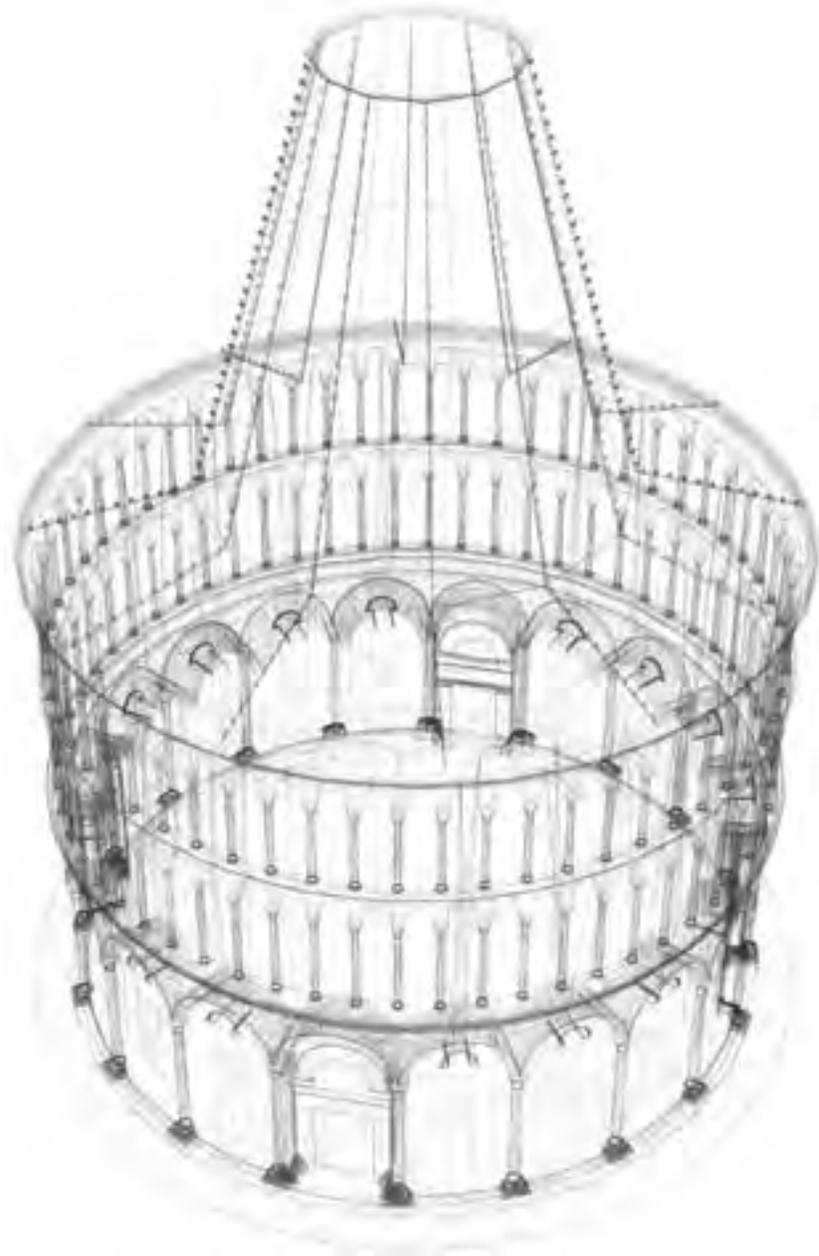
gruppi di maestri lombardi noti con il nome collettivo di "Guidi", è presumibile che l'intervento di Diotisalvi vada circoscritto alla zona immediatamente al di sotto di essa. A Diotisalvi possono dunque essere ricondotti, all'interno, il paramento murario dei pilastri, la loro pianta pentagonale e le complesse modanature delle basi; è probabile che risalgano al suo intervento anche le arcate cieche che corrono intorno al paramento esterno a formare il primo ordine, concluso da una spessa cornice

Busketo per la facciata della Cattedrale di cui, intorno alla metà del XII secolo, doveva essere già completato almeno il primo ordine di loggette². Da qui, l'ipotesi che il prospetto esterno previsto da Diotisalvi dovesse articolarsi in più ordini di arcatelle cieche. E' comunque intuibile che nel progett-

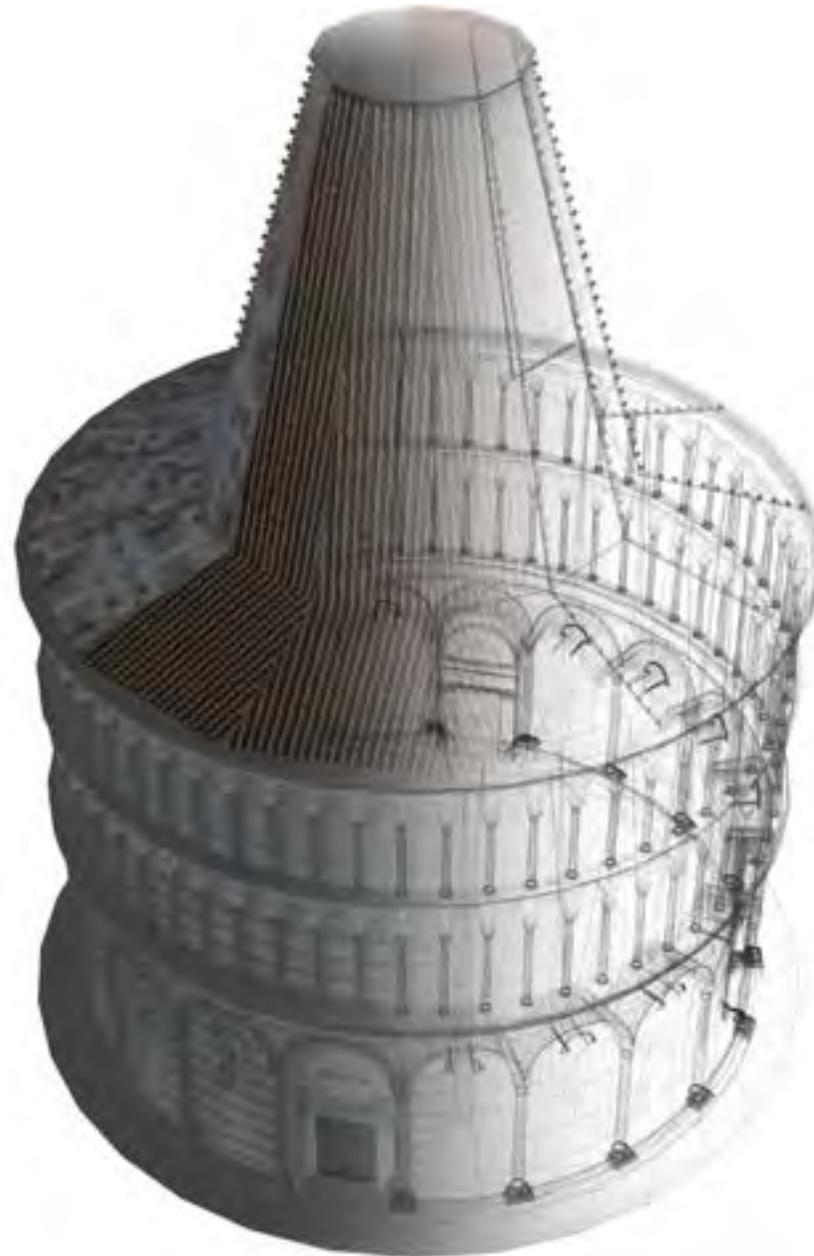


Figg. 4/7 - Ipotesi di ricostruzione del battistero secondo il progetto originale di Diotisalvi. Vedute dei fronti Est, Ovest, Sud e Nord. Il modello tridimensionale digitale da cui gli elaborati sono tratti è stato realizzato nell'ambito del seminario "3D e multimedia" del corso di Disegno Automatico del V anno del corso di Laurea in Architettura, ad opera degli allievi Cuauhtemoc Giancaterino e Paolo Giacomelli. Il seminario è stato tenuto in concomitanza con lo sviluppo della presente ricerca e a fatto da banco di prova per alcune soluzioni di elaborazione dei modelli digitali tridimensionali.

8



9



Figg. 8/9 - Il modello tridimensionale digitale di un'ipotesi di ricostruzione del progetto originale di Diotisalvi per il battistero di Pisa. Veduta *wireframe* e veduta con *texture* applicate e *wireframe* sovrapposto.



10

Fig. 10 - Il modello tridimensionale digitale, con le *texture* applicate utilizzato per la realizzazione di un fotomontaggio con il battistero nel suo stato reale.

Sono molto numerose le ipotesi di ricostruzione, tra queste appaiono molto interessanti soprattutto quelle di Georges Rohault De Fleury, che realizza una tavola dove i monumenti della piazza sono idealmente visualizzati secondo un loro progetto originale, con la torre priva della pendenza e il battistero chiuso con una copertura dodecagonale, aperta alla sommità e con un unico ordine di logge nella seconda partizione del prospetto.

Sulla base di questa ipotesi viene qui presentata un'esperienza di ricostruzione svolta nell'anno accademico 2002-2003 con gli studenti del Corso di Disegno Automatico, in un seminario orientato all'acquisizione di capacità di rappresentazione per la ricostruzione di edifici solamente progettati oppure demoliti o fortemente trasformati.

Tra i vari progetti di ricostruzione digitale, quello del battistero secondo uno degli ipotetici progetti di Diotisalvi, basato sull'idea di Georges Rohault De Fleury⁴ e su una seconda interpretazione frequentemente adottata negli articoli e nei trattati sull'argomento, che lo presenta come nell'ipotesi dello studioso francese, ma con l'aggiunta di un secondo ordine di colonne nella facciata, forse più adeguato a soddisfare l'aspetto simbolico, frequente nei battisteri di presentare tre ordini come

equivalente della trinità.

La ricostruzione eseguita con grande cura è qui presentata negli elaborati migliori, con vedute in prospetto e in prospettiva, di cui una composta con una fotografia dello stato attuale per mettere in evidenza l'impronta significativa che il progetto di Diotisalvi ha dato a questo monumento e di come questa sia stata trasformata dagli interventi successivi.

I lavori di edificazione del battistero hanno avuto una prima fase di grande fervore, ma successivamente, il cantiere subisce un progressivo rallentamento, fino ad arrestarsi completamente. E' comunque probabile che a questo punto la copertura, realizzata secondo il progetto di Diotisalvi fosse completata o che fosse comunque stata realizzata una qualche sorta di copertura, ipotesi non dovuta a dati certi, ma supponibile in base a varie notazioni che indicano alla metà degli anni ottanta l'utilizzo del battistero per cerimonie di una certa rilevanza, come quella dell'investitura di Operaio del Duomo. I segni tangibili di una ripresa, non documentata dalle carte, ma deducibile per analisi stilistica, si possono stimare intorno agli inizi del XIII secolo. Lo testimonierebbero alcune opere di finitura di ispirazione bizantineggianti, eseguite presso i portali nord ed est della costruzione. Tutte le decorazioni

di queste zone mostrano infatti una sostanziale unità stilistica, che trova una matrice comune di riferimento nella produzione artistica di Bisanzio e possono essere accomunate con le decorazioni del portale della chiesa di San Michele degli Scalzi a Pisa, eseguito nel 1204. La rispondenza con tale tipo di produzione è così marcata che, secondo alcuni, almeno l'architrave del portale nord potrebbe in realtà costituire un elemento di spoglio, sottratto ad una qualche chiesa di Costantinopoli, e fatto pervenire a Pisa dopo il saccheggio di quella città nel 1204. Oppure si può pensare alla presenza in Pisa di maestranze di formazione o forse di origine bizantina, emigrate a Pisa; oppure, a maestri locali fortemente permeati di bizantinismo. Infatti, nel portale est, solo i busti

dell'architrave, e i profeti nella ghiera della Lunetta lasciano individuare una chiara adesione alla cultura greca. Gli altri elementi - le semicolonne a fogliami, le formelle degli strombi, l'architrave figurato - presentano invece sensibili scarti rispetto alla tradizione bizantina, vere e proprie innovazioni, o contaminazioni e reinterpretazioni secondo elementi della cultura locale.

I Guidi

Analogamente alla decorazione dell'esterno, la costruzione dell'interno del Battistero dovette riprendere intorno al primo decennio del XIII secolo, o forse negli ultimi anni del XII secolo. I capitelli dei pilastri e delle colonne, e le corrispondenti mensole sul muro perimetrale, su cui sono impostate le

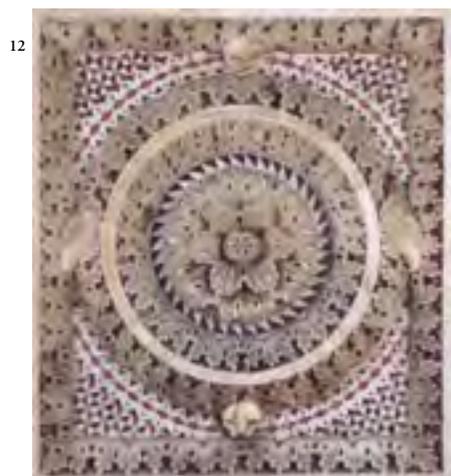
11



volte a crociera della navata anulare, sono infatti attribuibili a tale periodo e ascrivibili all'intervento delle maestranze lombardo-lucchesi note con il nome collettivo dei Guidi. Le mensole, in particolare, mostrano affinità marcate con la produzione di Guidetto e con le decorazioni del frontespizio della Cattedrale di San Martino a Lucca, firmata dallo scultore nel 1204⁵. Più incerta è invece l'attribuzione dei capitelli delle colonne e dei pilastri del peristilio, che presentano marcate disomogeneità formali e qualitative, e

che fanno supporre un intervento con larga partecipazione di aiuti, svoltosi nell'arco della prima metà del XII secolo.

Nel complesso le decorazioni, composte da fogliami, animali, sembrano tuttavia rispondere ad un programma iconografico unitario, anche se di difficile lettura, in quanto articolato secondo un procedimento paratattico, non lineare e di tipo evocativo e fortemente simbolico. In esso, una forte componente fantastica, più evidente nelle mensole, dove compaiono



13



14



15



Fig. 11 - La firma *Deutesalvet* iscritta in uno dei pilastri del primo ordine interno del battistero.

Figg. 12/15 - Fotopiani dei plutei del fonte battesimale. Sono stati eseguiti da Guido Bigarelli nel 1246; e vengono identificati sulla base del soggetto rappresentato. A partire da sinistra: pluteo delle aquile; pluteo dell'Apocalisse; pluteo del cavallo rampante e pluteo dei donzelli e del falco.



16



17



18



19

sirene, uomini silvani, teste di fauni, si associa alla evocazione di elementi demoniaci come il grifone, l'ariete e il drago, e di visioni più rassicuranti, nelle quali viene messo in risalto l'intervento positivo dell'uomo⁶.

Al di là della decorazione dei capitelli e delle mensole, l'intervento dei Guidi nella costruzione appare meno chiaro e forse, di fatto la sua consistenza potrebbe essere limitata alla realizzazione delle parti scultoree, a meno che non gli si voglia attribuire la copertura a

botte della galleria del primo piano, molto spesso attribuita al successivo intervento di Nicola Pisano, e, all'esterno, l'innalzamento del muro perimetrale fino a poco sopra il piano di calpestio del matroneo.

A membri più tardi della discendenza dei Guidi, quelli legati alla famiglia dei Bigarelli, è attribuita la realizzazione di alcuni fondamentali elementi di arredo dell'edificio: il fonte battesimale, firmato da Guido Bigarelli nel 1246 e la recinzione presbiteriale, attuata ne-

gli stessi anni, a cui si aggiungerà, nel 1260, il pulpito di Nicola Pisano.

Nicola Pisano

Dopo l'andamento discontinuo del cantiere duecentesco, un nuovo periodo di grande attività per la costruzione dell'edificio si verifica intorno alla metà del secolo. A governare la nuova ripresa sono l'arcivescovo Federico Visconti, principale protagonista della revoca dell'interdetto papale che, dal 1241 al 1256, si era abbattuto sulla città a causa della manifesta politica ghibellina dei pisani, e Nicola Pisano, impegnato dal 1256 al 1260 nella realizzazione del pulpito, probabilmente per commissione dello stesso Visconti. Con Nicola Pisano lo stile decorativo del battistero muta profondamente. Il suo intervento, è attestato da una iscrizione, posta nel muro perimetrale del matroneo, verso sud, a destra della porta d'ingresso: *ANNO DOMINI MCCLXXVIII AEDIFICATA FUIT DE NOVO*.

È plausibile che l'iscrizione faccia riferimento alla conclusione della nuova fase costruttiva avviata da Nicola Pisano. I segni dell'operato dell'artista all'interno dell'edificio sono stati individuati non con assoluta certezza nella presenza di un elemento che innalza il sesto dell'arco dei capitelli guidetteschi e che conferisce un maggiore slancio, determinando le proporzioni di tutta la galleria del secondo ordine. Fattore fondamentale del nuovo intervento è una radicale revisione del progetto di Diotisalvi e l'intenzione di accentuare le relazioni fra i diversi elementi architettonici - pareti, sostegni, coperture - cercando di adattare anche le parti già costruite alle nuove intenzioni.

Non è però chiaro se, almeno a livello ideativo, tali innovazioni non possano essere ricondotte al precedente intervento dei Guidi con cui Nicola ha peraltro lavorato più volte in stretto contatto in questo stesso giro di anni. Più chiaramente leggibile è il contributo di Nicola Pisano per la decorazione esterna: esegue gli archetti della gal-



20



21

Figg. 16/21 - Fotopiani dei plutei del fonte battesimale. Sono stati eseguiti da Guido Bigarelli nel 1246; e vengono identificati sulla base del soggetto rappresentato. Sono qui rappresentati i plutei delle due arieti (16); delle due capre (17); dei due grifi (18); dei due tori (19); delle due donne (20); dei due uomini con barba.

22



leria già impostata da Diotisalvi, con decorazioni a ovuli interrotte al centro da protomi umane o ferine, separati tra loro da altrettante sculture di teste poste alle imposte degli archi⁷.

Qui la scelta stilistica fatta da Nicola Pisano ha una forte similitudine con quanto da lui stesso eseguito nella cupola del Duomo di Siena e, in virtù di tali analogie, databili al quinto decennio del secolo. Esse sembrano dunque appartenere alle prime fasi dell'operato dell'artista.

Tuttavia, è assai probabile che esse siano state messe in opera alcuni anni più tardi: lo suggeriscono i busti su cui si impostano le protomi alla base degli archi, non sempre pertinenti con le teste stesse, e forse lavorati *in situ* al momento della sistemazione dei pezzi. Ma, al di là di ciò, è chiaro che la galleria, così come si configura, costituisce una interpretazione in chiave moderna di un elemento già previsto nel progetto di Diotisalvi; una revisione che si fonda su una complessa articolata varietà di fonti e stimoli culturali. La stessa impostazione si ravvisa nella galleria a vimperghe e pinnacoli che corona gli archetti del loggiato esterno, contenente una serie di busti attribuibili, per una minima parte, a Nicola Pisano e per la parte preponderante al figlio Giovanni e alla sua scuola⁸.

Essa, probabilmente, risale ad una fase

ulteriore, immediatamente successiva al 1278, indicata quale momento della riedificazione, o meglio della ripresa del cantiere, secondo un nuovo progetto, del Battistero.

Giovanni Pisano

Giovanni interviene nel Battistero, nei lavori già avviati dal padre, forse a partire dagli anni immediatamente successivi al 1278; dapprima a fianco dello stesso Nicola e successivamente, dopo la morte di questi, in modo autonomo, come dimostra un documento del 1284, in cui egli figura intento a lavorare da solo con altri collaboratori. Nell'apparato scultoreo realizzato dai due è difficile distinguere chiaramente l'operato del padre da quello del figlio, ed è possibile supporre un

momento iniziale di stretta collaborazione fra i due scultori. Si tratta in particolare delle statue che decorano le edicole del coronamento e gli apici delle soprastanti vimperghe, ideate da Nicola: trenta grandi busti nella zona inferiore nove sono attualmente esposti al Museo dell'Opera del Duomo. Le sculture, pur eseguite con una certa sommarietà di finitura, giustificata dall'altezza elevata della loro collocazione, e in gran parte estremamente consunte dalla lunga esposizione agli agenti atmosferici, possono tuttavia in linea di massima essere ricondotte all'attività di Giovanni: esse compongono infatti un ciclo unico che ben si inserisce nella cultura "gotica" dell'artista e che trova riscontro nelle statue da questi ideate per la facciata del Duomo di Siena. L'operato di Giovanni Pisano comporta la realizzazione di un parco scultoreo molto ampio e ricco, ma è probabile che dovette estendersi anche alla struttura architettonica del battistero, infatti, Giovanni era attivamente impegnato anche nella realizzazione di opere d'architettura, così come attestano il suo intervento per la facciata del Duomo di Siena, oppure le architetture "verosimili" raffigurate nei rilievi del pulpito del Duomo di Pisa.

Su queste basi, può forse essere attribuita a Giovanni la realizzazione della zona soprastante le vimperghe

nicolesche e dell'intero terzo ordine⁹. Il tutto costituisce infatti una ingegnosa struttura che recupera e rilegge con discrezione cornici, finestre, timpani e pinnacoli degli ordini sottostanti, creando tuttavia con essa pungenti contrasti, in un gioco di conferme e disaccordi con gli assi sviluppati a partire dagli ordini inferiori. Viene infatti esibito e riassunto, prima di concludersi nella struttura dodecagonale della cupola, il gioco geometrico che anima la struttura esterna dell'edificio: le venti arcate dell'ordine basamentale si moltiplicano nel loggiato del primo ordine, intervallati regolarmente dalle monofore e conclusi, con spezzatura del ritmo di base, dalla corona di cuspidi e pinnacoli; così, nel terzo ordine, il ritorno alla partizione per venti riprende il ritmo dell'ordine basamentale.

Il completamento

I lavori di completamento del muro perimetrale esterno, con l'esecuzione delle finestre del terzo ordine esterno e della struttura interna corrispondenti al completamento degli archi del loggiato del matroneo, già impostati da Giovanni Pisano devono essersi protratti a lungo, dopo la morte dell'artista, nel corso dell'intera metà del XIV secolo, a causa delle continue

Fig. 22 - Busto di profeta, opera di Giovanni Pisano, collocato nella corona di cuspidi del secondo ordine della facciata.

difficoltà finanziarie in cui l'Opera di San Giovanni veniva a trovarsi. Un segno tangibile di ripresa potrebbe essere trovato, a partire dalla fine degli anni cinquanta, con la presenza nel cantiere del battistero dello scultore e architetto Cellino di Nese, come documentato

dagli archivi dell'Opera. All'ultima fase dei lavori, che porterà la conclusione del cantiere, partecipano numerose maestranze, parte principale dell'intervento è il definitivo assetto della copertura, concepito e impostata tra il 1360 e il 1365.

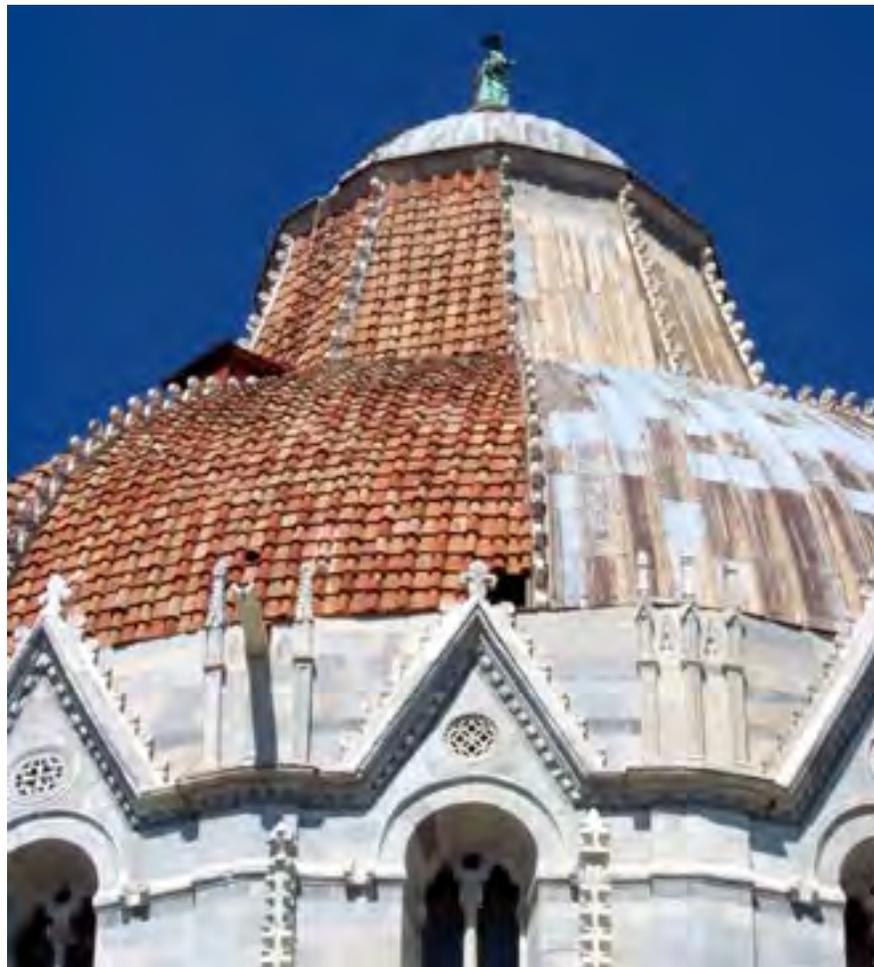


Fig. 23 - La cupola del battistero, il manto di copertura è in parte realizzato con speciali elementi di cotto e in parte con lastre di piombo.

Il primo elemento di tale sistema ad essere realizzato furono probabilmente gli archi radiali, sui quali si possono distinguere delle riseghe e numerose buche pontai, forse utilizzate per sostenere la centinatura di sostegno all'esecuzione della cupola. L'aggiunta del cupolino emisferico a chiudere la volta centrale dodecagonale ha poi completato il tutto.

Tra il 1384 e il 1386 il battistero doveva ormai essere vicino al completamento: il pittore Antonio Veneziano lo raffigura completo di cupola e cupolino in una delle Storie di San Ranieri nel Camposanto Monumentale.

Più incerta è la vicenda che porta alla scelta di adottare due tipi di copertura differente il rivestimento della volta, se da una parte le sempre crescenti difficoltà finanziarie possono essere state la ragione per rinunciare ad eseguire per intero la copertura nelle costose lastre di piombo, tuttavia il completamento della copertura utilizzando elementi in cotto appositamente formati e realizzati, non deve aver comportato un significativo risparmio, si può quindi credere che la scelta possa essere dipesa da una valutazione relativa alla diversa esposizione e si sia scelto il piombo solo per le parti esposte ai venti che potevano portare la salsedine dal mare¹⁰.

Nel 1395 l'orafo Turino di Sano ultimava con tutta probabilità la statua con

San Giovanni Battista a coronamento del cupolino e dell'intero edificio. Con essa, veniva così posta fine alla lunga vicenda edilizia del Battistero.

Note

¹ Piero Pierotti e Laura Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001.

² Antonio Caleca e Aurelio Amendola, *La dotta mano - Il Battistero di Pisa*, Edizioni Bolis, Bergamo, 1991.

³ P. Pierotti e L. Benassi, Op. Cit.

⁴ Georges Rohault De Fleury, *Edifices de Pise, relevés, dessinés et décrits*, Bance, Paris, 1862.

⁵ A. Caleca e A. Amendola, Op. Cit.

⁶ Per una più ampia trattazione sui capitelli scultorei del battistero di Pisa si veda: Monica Chiellini Nari, *Le sculture nel Battistero di Pisa*, Pacini editore, Pisa, 1989

⁷ Una parte di queste decorazioni è stata sostituita nel corso del XIX secolo, alcune delle sculture rimosse sono conservati presso il Museo dell'Opera Primaziale.

⁸ Antonio Caleca e Aurelio Amendola, Op. Cit.

⁹ Antonio Caleca e Aurelio Amendola, Op. Cit.

¹⁰ Fabio Redi, Pisa. *Il Duomo e la Piazza*, Silvana Editoriale, Milano 1996.

Il modello geometrico del Battistero

Al di là dei numerosi progetti tra loro sovrapposti ed intersecati, il battistero si presenta con un aspetto compositivo e ornamentale compiuto e chiaro, proporzionato sia nello ricchezza delle fasce alte dell'esterno che nell'essenzialità degli interni.

A garantire unitarietà e completezza dei rapporti giocano due elementi tra loro combinati: la presenza di un progetto di proporzionamento geometrico complessivo e la suddivisione in parti infinitesime e densissime dell'apparato ornamentale, tanto fitto da apparire comunque unitario.

Le simmetrie ad assetto variabile, sia secondo la profondità che secondo la varietà degli elementi componenti gli ornati, contribuiscono a dare vivacità all'apparato, ma non appaiono mai caotiche.

Come è stato già detto il progetto originale di Diotislavi prende ispirazioni dal Santo Sepolcro di Gerusalemme, come del resto fa l'intero progetto di ristrutturazione della piazza.

Se si vuole comprendere meglio la matrice compositiva alla base del progetto del battistero pisano è bene prendere per prima cosa in esame l'*Anastasis*, facendo riferimento a quello che gli storici ipotizzano circa l'aspetto origi-

nale che questo monumento doveva avere nel XII secolo.

L'imperatore Costantino, provvedendo a far edificare un edificio adatto a custodire in maniera più adeguata la tomba di Cristo, aveva adottato la soluzione del mausoleo.

Utilizzò cioè quel modello di sepoltura che la tradizione romana destinava agli imperatori e alle personalità di particolare importanza. Il mausoleo, in genere, è strutturato secondo una pianta centrale, con una doppia struttura con una muratura di forma cilindrica, con funzioni di contenimento ed una cupola interna cuspidata. Fra l'interno del cilindro e l'estradosso della cupola veniva riversata della terra, con evidente significato simbolico, fino



Fig. 1 - Veduta interna dell'*Anastasis* in una raffigurazione del secolo XVII (De Bruyn, 1681).

Fig. 2 - Scorcio della volta di copertura del vano centrale dell'*Anastasis*, oggi, dopo i discussi restauri del 1996.



a formare una spianata circolare che lasciava emergere al centro la parte terminale della cuspidata. In questa forma architettonica si sostanziano due requisiti: la tradizione della tomba a *tholos* mediterranea e la monumentalità che si addiceva a una sepoltura imperiale.

L'*Anastasis*, per quanto possibile ricostruire dalle descrizioni antiche o dedurre da ciò che resta dell'edificio costantiniano, era strutturato secondo un grande cilindro dal quale emergeva la cupola fortemente cuspidata, aperta in alto alla maniera del Pantheon romano. Fra lo spazio circolare centrale,

corrispondente al diametro della cupola, e il muro pieno del perimetro esterno correva un deambulatorio¹. La ricostruzione eseguita dai crociati aveva modificato fortemente l'aspetto originale dell'edificio, dopo queste trasformazioni, la cupola poggiava su tre livelli di arcate, corrispondenti a due deambulatori sovrapposti, al piano terreno e primo piano, affacciati sul vano centrale e a una parete con finestrate in funzione di tamburo, aperta sulla copertura a terrazza che faceva da tetto alla galleria superiore. Il basamento dell'edificio presentava dodici colonne e otto pilastri intervallati nel rapporto

di due a uno². La funzione primaria di struttura emergente destinata a custodire e a segnalare la presenza di una sepoltura illustre doveva però modificarsi rapidamente per assumere una serie di significati che probabilmente non erano, o non erano tutti, nelle intenzioni di Costantino. La destinazione liturgica del *Martyrion* era chiara fin dalle origini: posto a

guardia del Golgota, era la sede dove si rinnovava simbolicamente e pubblicamente il sacrificio di Cristo. Era, cioè, l'*ecclesia* intesa come unità fisica, luogo di incontro e di preghiera collettiva per tutti i cristiani. Non era invece altrettanto definito il ruolo dell'*Anastasis* e questo lasciò spazio a molteplici interpretazioni simboliche. La forma circolare ricordava il cielo e

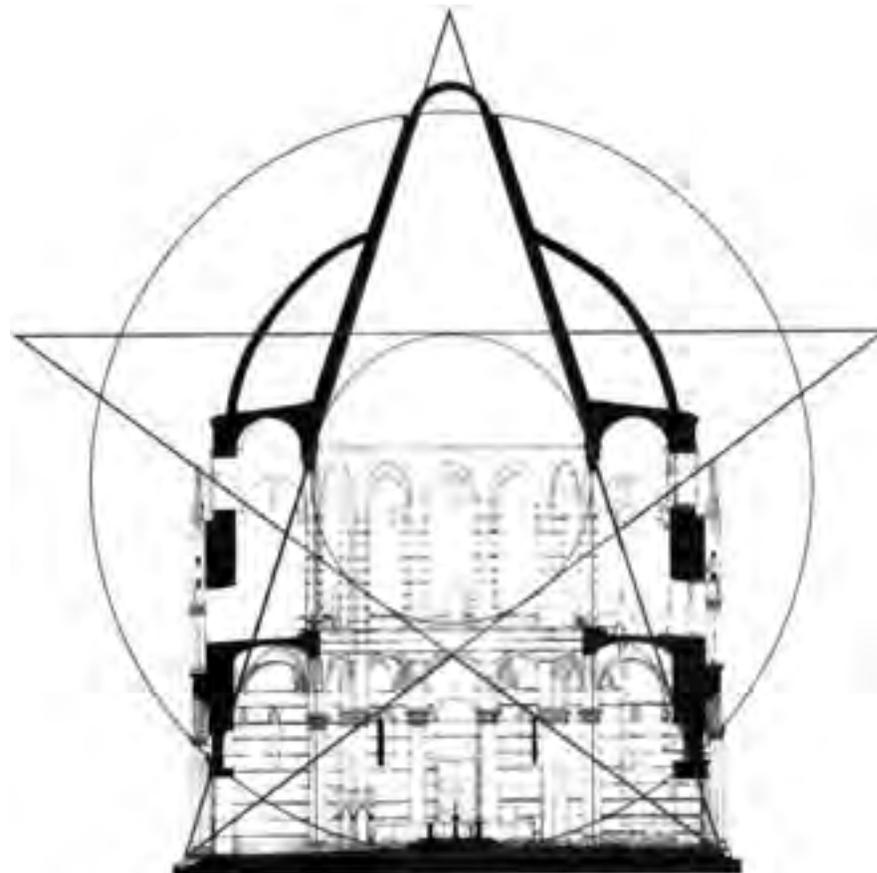


Fig. 3 - Secondo le ricerche condotte da Leonello Tarabella, nella sezione del battistero è individuabile una matrice compositiva basata sulla sezione aurea, ritrovabile in una stella regolare a cinque punte passante per la volta piramidale e ampia quanto la base del monumento, tale matrice risulta inoltre esclusivamente basata su parti del battistero attribuite all'opera di Deotisalvi.

Fig. 4 - Considerazioni matematiche circa l'applicazione della sezione aurea al battistero di Pisa, da: P. Pierotti e L. Benassi, *Deotisalvi, l'architetto pisano del secolo d'oro*, Pisa 2001

3

La sezione aurea nel battistero pisano

Uno degli elementi necessari per la costruzione di una circonferenza è il valore del π . I medievali non usavano i numeri irrazionali, ma si servivano delle frazioni. Dunque come era possibile tracciare una circonferenza? Semplicemente usando una frazione e cioè

$$\frac{\text{circonferenza}}{\text{diametro}} = \frac{25}{4} = 6,25 = 2\pi$$

Nel XIII secolo, il matematico pisano Leonardo Fibonacci spiega che per ottenere una circonferenza in pancia si deve moltiplicare il diametro, misurato in pertiche, $(3 + 1/7)$. La meraviglia è scoprire che $(3 + 1/7)$ equivale a 3,1428571 un valore che si avvicina straordinariamente al nostro π . Altro esempio è quello della serie di Fibonacci. La serie è composta dai seguenti numeri: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, ... tale sequenza di numeri segue la legge secondo cui ciascun numero è uguale alla somma dei due che lo precedono. Se consideriamo la sequenza dei quozienti di un numero di Fibonacci diviso per il suo successore, otteniamo

$$\frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{5}{8}, \frac{8}{13}, \dots$$

Queste sono le cosiddette frazioni continue, che rispondono alla forma:

$$b = \frac{a}{1 + \frac{a}{1 + \frac{a}{1 + \dots}}}$$

La più semplice fra le frazioni continue simmetriche illimitate è $\tau = (1, 1, 1, \dots)$ dove τ soddisfa l'equazione

$$\tau = 1 + \frac{1}{\tau} \text{ cioè } \tau^2 - \tau - 1 = 0, \text{ la cui radice positiva è } \tau = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 0,61803398875$$

Questo valore corrisponde a quello presente nella legge della sezione aurea. La sezione aurea è la divisione in un segmento AB per mezzo di un punto C, scelto in modo tale che il rapporto tra le due parti a e b in cui resta diviso il segmento, sia il medesimo che intercorre tra b e l'intero segmento a + b, cioè

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a+b} \text{ o anche } \frac{b}{a} = \frac{a}{b} + 1 \text{ ponendo } x = \frac{1}{b} + 1 \text{ cioè } x^2 - x - 1 = 0$$

con che risulti $x = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = \tau$
valeadire $b = \tau \cdot a$

Tale relazione è stata sfruttata anche nel Battistero. Ad esempio, se prendiamo la misura del diametro interno (30,48 m) e si applichiamo quanto sopra detto, otteniamo

$$b = 30,48 \times \tau = 18,83\text{m}$$

Il valore b è il segmento aureo del diametro interno e corrisponde al diametro di un cerchio più piccolo e interno al primo, sulla cui circonferenza poggiano i pilastri e le colonne! Di relazioni straordinarie come queste ce ne sono molte, si noti tra le altre la sorprendente coincidenza tra un disegno inscritto all'interno di una losanga sulla facciata del duomo e il disegno dell'interno del battistero secondo linee geometriche.

4

la cupola si identificava appunto con la calotta celeste. L'apertura lasciata in alto, che poteva essere dettata oltretutto da una necessità costruttiva, rappresentava ovviamente l'uscita di Cristo verso il cielo, la sua resurrezione ma anche la discesa della grazia di Dio sui pellegrini che si recavano in visita al Sepolcro. Le dodici colonne possono essere facilmente identificate con i dodici apostoli.

Ma, assai più in profondità, intorno all'edificio dell'*Anastasis* s'intrecciavano e si fondevano i concetti di vita e di morte: se l'uomo nasce con la morte nell'anima per effetto del peccato

originale e il battesimo lo apre alla vita dello spirito, allora la morte e resurrezione di Cristo hanno l'analogo fine di aprire alla vita eterna lo spirito dell'uomo dopo la morte del corpo.

Possono così ritrovarsi nella forma architettonica dell'*Anastasis* le funzioni di un battistero e di un sepolcro, in quanto entrambi simboli di queste due tappe fondamentali della salvezza dell'anima.

E questo può spiegare perché tanto spesso la costruzione di un battistero in moltissime parti del mondo cristiano si ispiri alle forme, teoricamente antitetiche, di un mausoleo.

L'architettura dell'*Anastasis* contiene anche riferimenti numerici che divengono suggestivi e che, con il perfezionarsi della dottrina, assumono significati propri del Cristianesimo.

La ripartizione interna in venti parti forse rispondeva in origine a un principio di armonia puramente matematica: soddisfaceva cioè la numerazione decadica, adottata dai romani. La suddivisione della circonferenza in venti parti si ottiene interpolando fra loro due decagoni regolari concentrici e sfasati di diciotto gradi; ma il lato del decagono inscritto è pari alla sezione aurea del raggio della circonferenza cir-

coscritta. Il sistema decadico escludeva implicitamente anche un altro metodo di computo, quello orientale basato sul sette e adottato tradizionalmente dagli ebrei, un simile riferimento culturale non poteva trovare spazio nel luogo dove si ricordava una morte ritenuta loro responsabilità.

Venti è il prodotto di quattro per cinque. Quattro, in oriente ma anche nel mondo greco, è il numero che si riferisce alle quattro direzioni del mondo, alle quattro stagioni, ai quattro elementi e quindi alla Terra.

Cinque è il numero delle piaghe di Cristo (alle mani, ai piedi, al costato)

	metri	piedi pisani ~0,486 m.	braccia pisane ~0,5836 m.	pertiche pisane ~2,916 m.
Circonferenza esterna massima	111,47	236	196,5	39,3
Circonferenza esterna senza semicolonne	112,15	230,8	192,2	38,5
Diametro esterno con semicolonne	36,5	75,1	62,5	12,5
Diametro esterno senza semicolonne	35,7	73,45	61,2	12,2
Larghezza intercolumnio alla porta est	5,95	12,2	10,2	2
Larghezza intercolumnio alla porta sud	5,95	10,8	9	1,8
Larghezza intercolumnio alla porta ovest	5,7	11,7	9,8	1,95
Larghezza intercolumnio alla porta nord	5,16	10,6	8,8	1,8
Circonferenza interna	95,79	197,1	164,1	32,8
Diametro interno	30,48	62,7	52,2	10,45
Spessore muro comprese le semicolonne	3,01	6,2	5,15	1
Spessore muro senza le semicolonne	2,61	5,4	4,2	0,9
Larghezza vano scale (al piano terreno)	0,97	2	1,7	0,3
Altezza al colmo da terra	52,6	108,2	90,1	18

5

Fig. 5 - Le misure del battistero di Pisa convertite in unità di misura pisane medievali. Da: Laura Benassi, *Il primo battistero*, in *Deotisalvi, l'architetto pisano del secolo d'oro*, Pisa 2001.

ma è anche il simbolo dell'uomo e quindi della perfezione umana. Testa, mani, piedi formano i vertici di un pentagono che può essere iscritto in una circonferenza: così l'homo ad circulum ci viene tramandato, da Vitruvio in poi, ed è uno dei cardini della progettazione architettonica classica, sempre intesa a misura d'uomo. La costruzione del pentagono definisce anche il teorema della sezione aurea, spesso applicato proprio negli edifici a pianta centrale.

La Terra e l'uomo, posti sotto la calotta circolare che li include e rappresenta il cielo, rimandano all'idea del creato.

Al numero venti si arriva attraverso la serie del quattro, ossia immaginando una sequenza di quadrati iscritti nella circonferenza della cupola che evocano il passaggio progressivo dalla materialità terrena alla spiritualità celeste. Otto (i pilastri) è il numero simbolo fatto proprio dagli imperatori del sacro romano impero, inteso appunto come figura intermedia fra il quadrato (il potere terreno) e la circonferenza (il potere divino).

Ottagonale fu la cappella palatina di Aquisgrana fatta costruire da Carlo Magno; nella figura dell'ottagono si riconoscevano insistentemente Federico I e Federico II di Svevia, entrambi incoronati imperatori nella medesima cappella palatina.

Nel numero dodici (le colonne) come si è visto era facile individuare gli apostoli; ma dodici sono anche le costellazioni dello zodiaco, i mesi dell'anno, le porte della Gerusalemme celeste, che così veniva rappresentata sulla base della descrizione proposta nell'Apocalisse³.

Nel battistero pisano Diotisalvi accoglie molti elementi significativi dell'*Anastasis* e li arricchisce alla sua maniera.

Ne riprende la struttura a mausoleo in primo luogo, con il cilindro esterno e la cupola interna troncoconica strutturata secondo la tecnica delle tombe a tholos: è l'unico battistero del periodo a pianta circolare.

Ne raccoglie e ne integra simbolicamente la numerologia: uno è la cupola, che rappresenta Dio; due sono gli ordini di arcate interni (la doppia natura, divina e umana, di Cristo); tre sono gli ordini esterni (la Trinità); quattro sono le porte, orientate secondo le direzioni del mondo, e i pilastri; otto sono le colonne; dodici è la ripartizione generale dell'interno; sedici le monofore e le arcate cieche esterne al piano terreno; venti infine, complessivamente, le arcate esterne.

Diotisalvi accoglie anche l'idea delle grandi finestre che a Gerusalemme si aprono nel tamburo dell'*Anastasis*.

Queste sono in tutto dodici, come le

arcate corrispondenti che si affacciano sul vano centrale del battistero, e dividono dunque l'angolo giro del perimetro in porzioni di trenta gradi. Ogni finestra corrisponde a un mese dell'anno o, se si preferisce, a una costellazione dello zodiaco e attraverso ognuna di esse si possono dunque registrare la posizione e lo spostamento degli astri lungo la calotta celeste.



6

Note

¹ P. Pierotti e L. Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001

² Oggi però l'*Anastasis* ha un aspetto molto mutato, in virtù delle molte manomissioni, non ultime quelle contemporanee come quella del 1810, dovuta all'architetto greco Comninos,

e il rifacimento della cupola, nel 1867 ad opera dell'architetto Mauss e da ultimo i restauri recentemente ultimati che hanno malamente alterato l'aspetto dell'edificio.

³ L. Lazzereschi, *La forma della città medievale tra XI e XIV secolo*, Firenze, Alinea, 1994.

Il presente paragrafo è stato redatto in base ad una revisione del testo di Piero Pierotti, Il tema dell'Anastasis, il mausoleo, la numerologia; in Piero Pierotti e Laura Benassi, Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro, Pacini editore, Pisa, 2001.

Lo stato del rilievo

Il battistero è già stato rilevato più volte, mai, in tempi recenti, si è però tentato un rilievo "da zero", complessivo di tutto il monumento.

La forma, le dimensioni e la grande complessità dei decori devono aver dato non poche preoccupazioni a tutti coloro che si sono accinti ad affrontare la misurazione di questa preesistenza isolata, facile da cogliere con una sola occhiata, ma difficile da scomporre nelle sue parti.

I problemi maggiori derivano dalle dimensioni e dalla morfologia delle componenti, che nella quasi totalità dei casi non sono semplici elementi retti disposti secondo la forma circolare della pianta, ma sono in tutto e per tutto adeguati a quella forma, con forme originali, innesti e combinazioni molto complesse, inoltre la costruzione fortemente stratificata crea delle situazioni dove l'intervento di misurazione, dovendo essere applicato a soluzioni inattese e inconsuete deve essere condotto con progetti di rilievo specifici. Inoltre con una conformazione generale di questo genere, con un esterno spesso difficilmente accessibile e con un interno ugualmente impegnativo, con le due gallerie molto alte e il sistema delle volte con soluzioni mai ripetute, specie nella galleria del piano

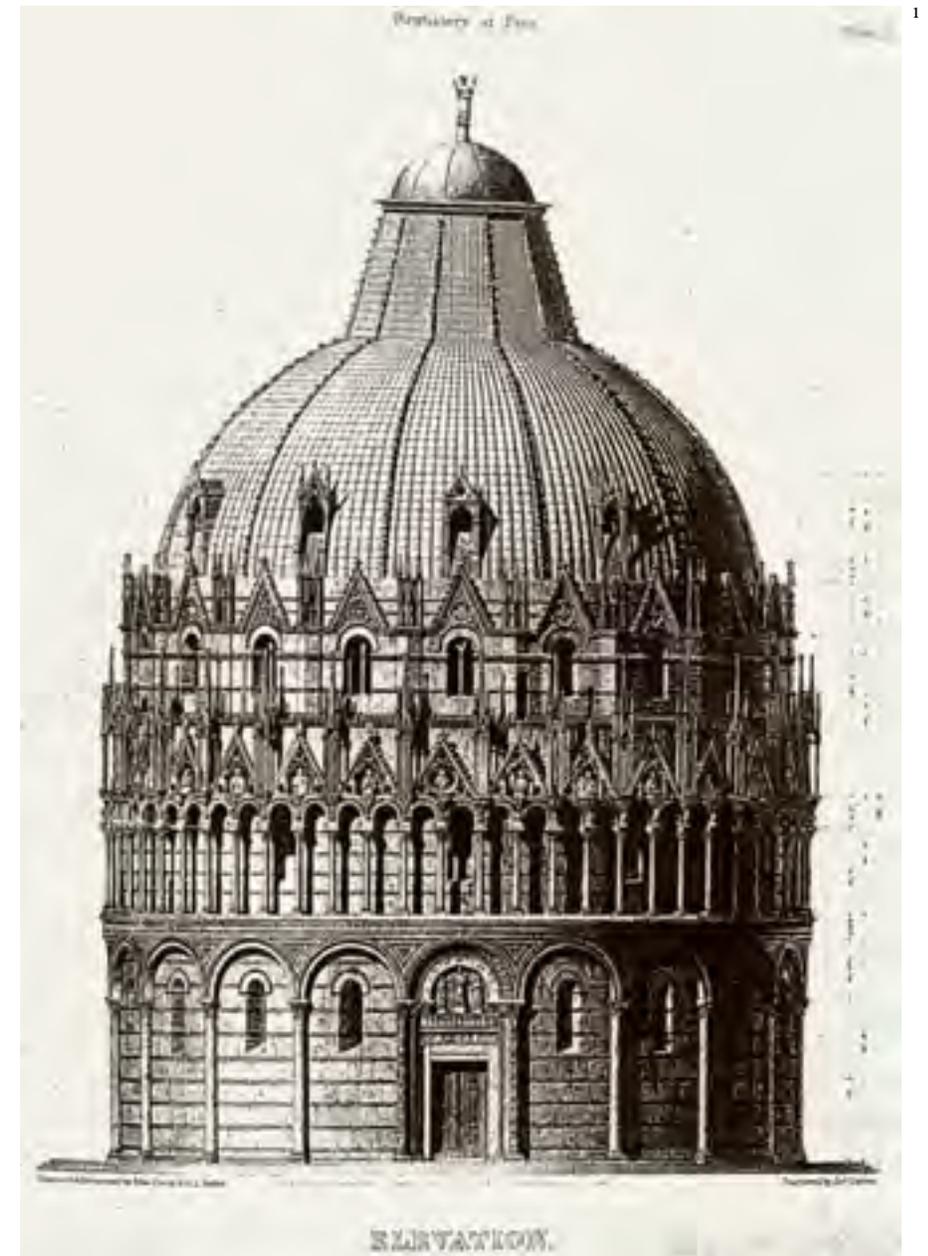
terreno ed il sistema della volte della cupola con ambienti privi di superfici di riferimento piane. Tutto questo, contestualmente con l'utilizzo delle strumentazioni classiche del rilievo diretto si presentava indubbiamente poneva delle grandi difficoltà.

Ciò non sembra aver molto inquietato due studiosi stranieri, gli inglesi Edward Cressy e G.L. Taylor, il cui rilievo dell'intero complesso monumentale della piazza dei Miracoli, eseguito a partire dal 1817 e pubblicato per la prima volta nel volume a cura dello stesso Cressy, *Architecture* edito a Londra nel 1829, viene presentato con delle belle tavole illustranti piante, prospetti e sezioni eseguite da James Carter¹.

Il rilievo eseguito da Cressy e Taylor è stato da subito la base per lo sviluppo di numerose rappresentazioni del battistero, il rilievo viene ripreso e rappresentato in maniera più stilizzata e meno carica di espedienti grafici da Ladislaus Rupp, con una serie di illustrazioni realizzate per essere pubblicate in *Chiese principali*, a Milano, sempre nel 1829².

Le tavole originali in cui i rilievi ottocenteschi vengono restituiti non sono mai grandi, le tavole di Rupp misurano meno di mezzo metro in altezza e poco più di trenta centimetri in larghezza e rispetto a queste quelle di Carter hanno dimensioni quasi dimezzate.

Fig. 1 - Il fronte Est del battistero nell'illustrazione di James Carter. Il titolo originale della tavola è: Baptistery at Pisa. Elevation. / Measures & Delineated by Edward Cressy & G.L. Taylor, Engraved by Ja.s Carter. La matrice originale della stampa, in acciaio, misura 265 per 205 millimetri.



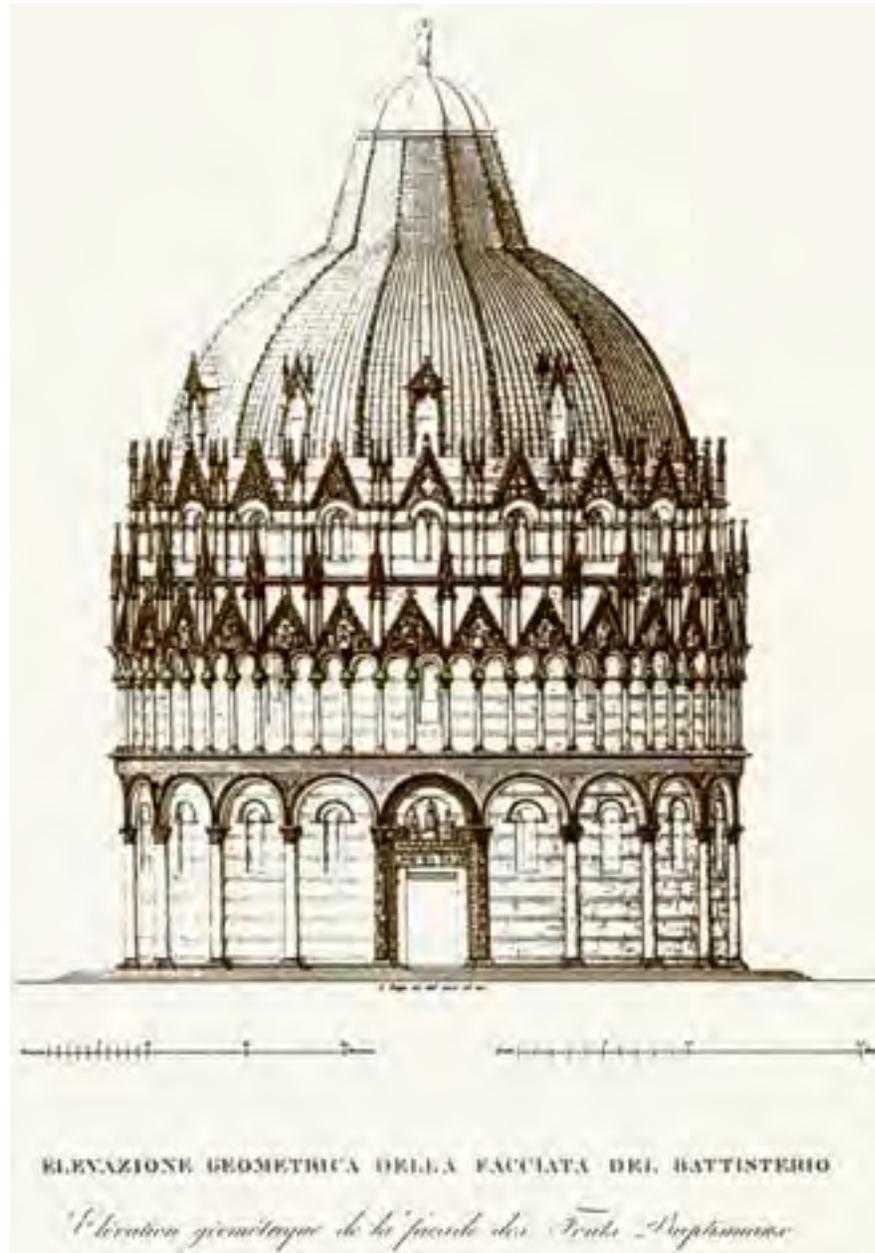
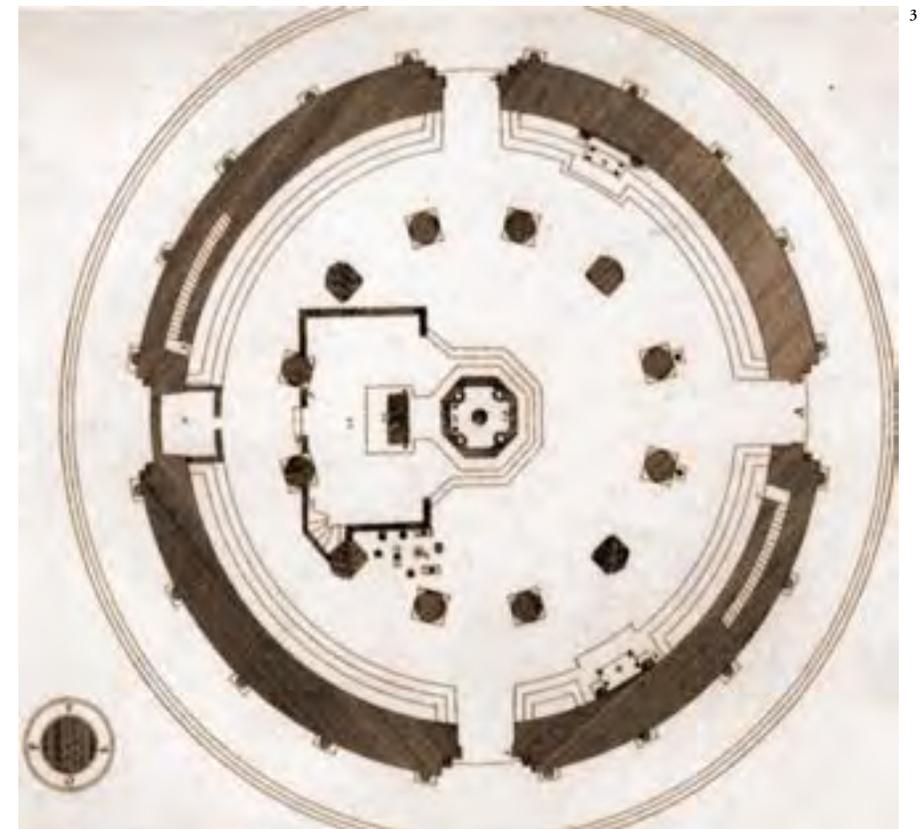


Fig. 2 - Il fronte Est del battistero nell'illustrazione di Ladislaus Rupp.

Fig. 3 - Pianta del battistero, eseguita da J. Martini, 1705.

² In quello stesso periodo, in forma dichiarata, cosa che invece non è per Rupp, Grassi Ranieri riprende il rilievo di Cresy e Taylor e lo pubblica a Pisa in *Le Fabbriche*³, adottando scelte grafiche simili a quelle degli inglesi, ma con un risultato qualitativo sensibilmente inferiore. I due studiosi inglesi, saranno successivamente ricordati per essere stati i primi a misurare la pendenza esatta

della torre campanaria, la famosissima torre pendente, per l'appunto. Non erano invece i primi a misurare e a rappresentare scientificamente il battistero e gli altri monumenti, misurazioni e disegni di pianta e in alzato ne erano stati eseguiti alcuni, tra questi, sono piuttosto interessanti quelli raccolti in *Theatrum Basilicae Pisanae*, ad opera di J. Martini, un volume edito a Roma nel 1705.



Inoltre esistono numerose rappresentazioni della pianta o della planimetria del complesso monumentale, precedenti al rilievo inglese, ma si tratta di un insieme di rappresentazioni sommarie per quel che riguarda l'aspetto architettonico del battistero, del camposanto monumentale e della cattedrale e della torre. Il ruolo determinante di Cresy, Taylor e Carter sta nel produrre elaborati

5 dettagliati, accurati, ricchi di dettagli minuti, che raffigurano i monumenti come mai prima. Coloro che riprendono come base la loro rappresentazione lo fanno per restituire in forme grafiche diverse le stampe ricche di chiaroscuri della pubblicazione originale. Chi opera altre misurazioni complessive è il francese Georges Rohault De Fleury, che esegue le sue ricerche a Pisa

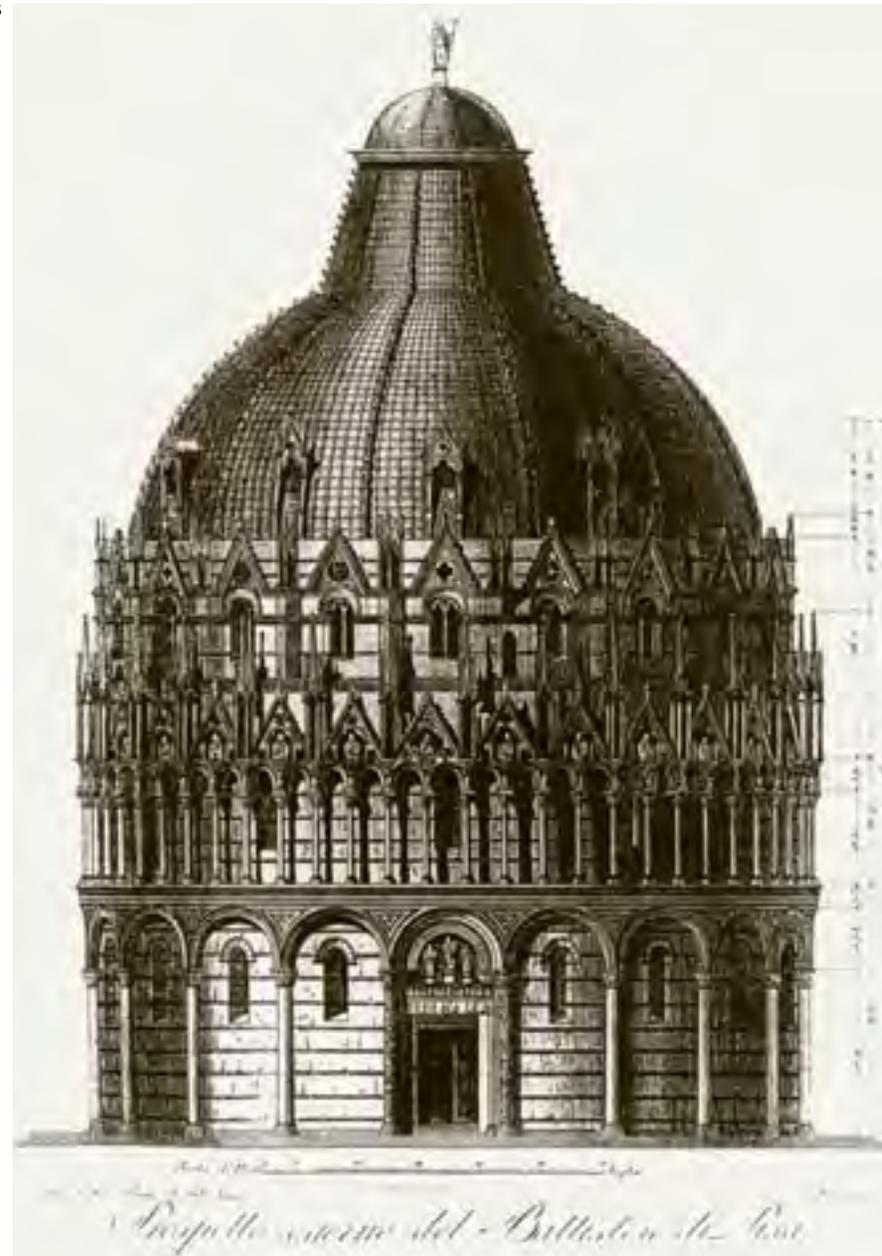
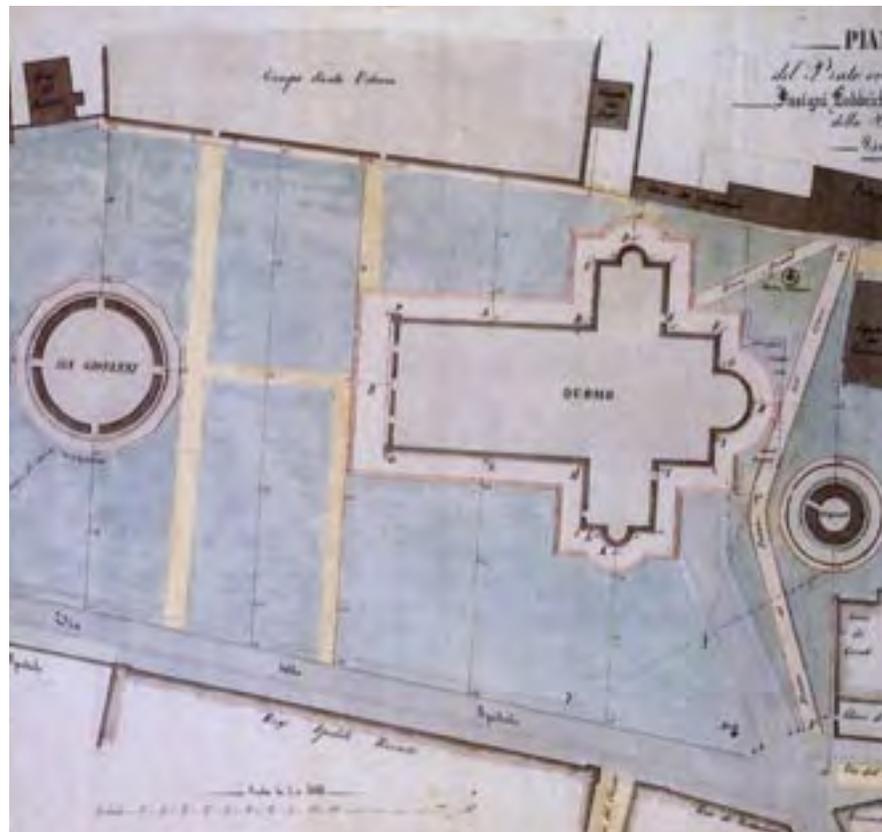


Fig. 4 - Pianta del complesso monumentale della piazza eseguita dall'Opera Primaziale, 1837.

Fig. 5 - Il fronte Est del battistero, nella reinterpretazione del rilievo di Cresy & Taylor eseguita da Ranieri Grassi, 1831.

intorno nella seconda metà del XIX secolo⁴, che esegue anche delle rappresentazioni con ipotesi circa l'aspetto che potrebbero avere i monumenti della piazza se non si fossero manifestati eventi impreveduti (i cedimenti della torre) o trasformazioni formali

e stratificazioni di interventi (la lunga vicenda del cantiere del battistero). Da allora, l'eccellenza del lavoro condotto dagli studiosi inglesi e francesi, e la mancanza di trasformazioni significative del monumento, eccezion fatta per la soppressione di una delle due

scale di collegamento tra il primo piano e gli spazi interstiziali delle volte di copertura, e alcune modifiche operate sia sulle sculture esterne che su quelle interne e sulle lapidi poste nella pavimentazione, ha posto le condizioni per non far sentire la necessità di eseguire nuovi rilievi complessivi, di certo non di quella portata comunque; fino ai giorni nostri, tutte le operazioni di rilievo sono state parziali o si sono tenute ad un livello di dettaglio molto inferiore rispetto alla ricchezza degli elaborati del XIX secolo.

Studi, esami, ricerche, tesi di laurea hanno analizzato e replicato le misurazioni, ma la base di riferimento è rimasta sempre il rilievo inglese, usato negli studi, rielaborato e semplificato numerosissime volte, intergrato di nuove parti, ma si tratta sempre di integrazioni, aggiornamenti di un rilievo di eccezionale fattura, ma vecchio di un secolo e mezzo.

Note

¹ Laura Zampieri, *Pisa nell'Ottocento, testimonianze iconografiche a stampa del mutamento di una città*, Bandecchi & Vivaldi Editori, Pontedera, 1994 p. 105.

² L. Zampieri, Op. Cit.p. 98.

³ L. Zampieri, Op. Cit.p. 121.

⁴ L'insieme dei suoi rilievi e dei suoi studi a Pisa, *Edifices de Pise, relevés, dessinés et décrits* viene pubblicato a Parigi nel 1962.

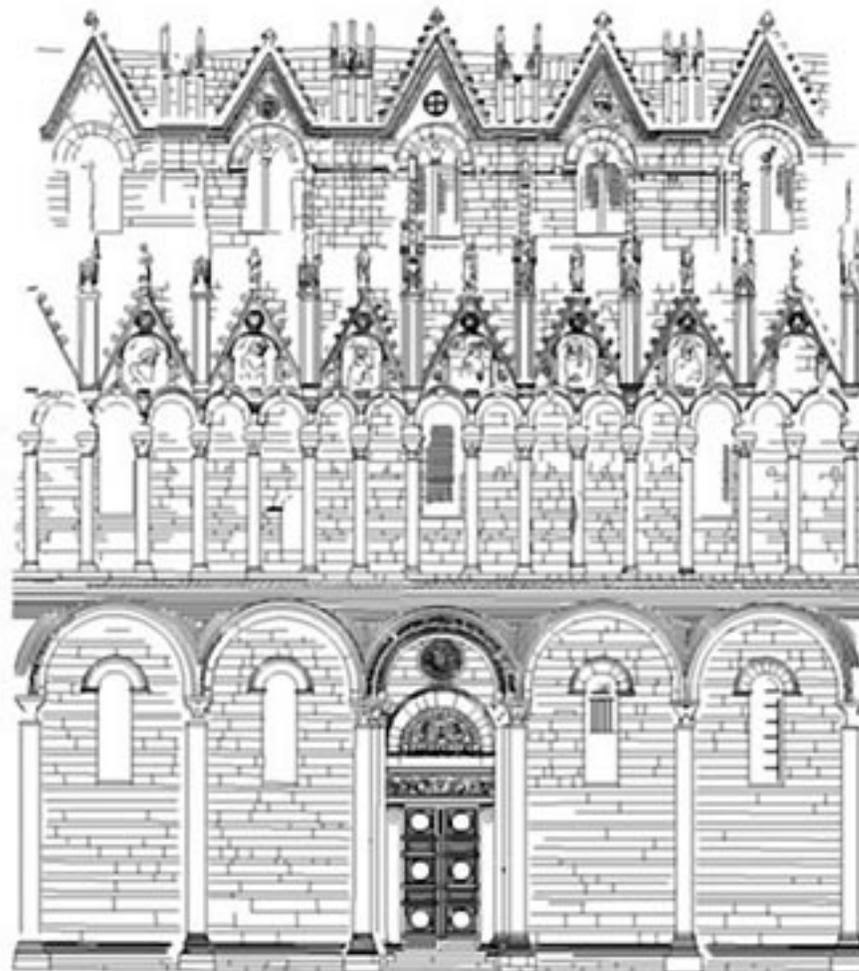


Fig. 6 - Estratto da una Tesi di Laurea del prof. Paolo Brandinelli: restituzione di un rilievo stereofotogrammetrico con restitutore ottico di una porzione del battistero, il prospetto viene presentato come "svolto" ovvero con tutti gli elementi privati della loro reale curvatura.

IL RILIEVO DEL BATTISTERO

Il quadro operativo

La ricerca qui presentata ha cominciato il suo percorso a partire dalla convenzione stipulata dal Dipartimento di Progettazione dell'Architettura della Facoltà di Architettura di Firenze con l'Opera Primaziale di Pisa per il rilievo e la restituzione in forma digitale tridimensionale del battistero di Pisa¹, nell'ambito della quale l'obiettivo è stato produrre un modello tridimensionale digitale accurato del Battistero di Pisa, un modello basato su un rilievo adeguato e adatto all'impiego in numerosi settori di studio e ricerca, nonché base di partenza per lo sviluppo di ulteriori elaborazioni multimediali utili per la produzione di materiale divulgativo.

Trattandosi di un lavoro molto impegnativo e molto articolato si è scelto di percorrere la strada di un rilievo prevalentemente basato su alcuni dei sistemi di misurazione più avanzati disponibili², integrato, là dove riscontrato più pratico e conveniente, con tecniche di rilevamento manuali tradizionali³.

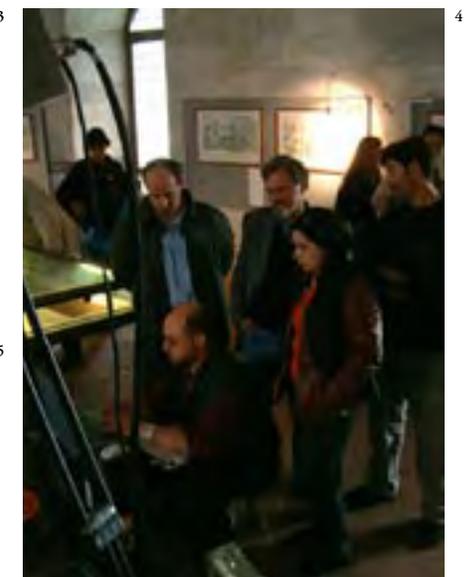
La varia e motivata compagine di operatori, appositamente approntata per far fronte ad un rilievo tanto impegnativo, richiedeva coordinamento, non solo a livello operativo, ai fini delle operazioni vere e proprie di misurazione, ma soprattutto nelle fasi

successive, quelle di gestione dei dati e di condivisione delle informazioni; una parte delle procedure e delle soluzioni originali, che sono parte dei risultati di questa ricerca, derivano da questa necessità.

Le operazioni di misurazione hanno avuto inizio nel maggio 2002, questo primo intervento, ha richiesto poco più di una settimana; si è poi tenuta una seconda sessione di lavori, alla fine dell'agosto dello stesso anno, per completare il rilievo con le misurazioni del sistema delle volte della copertura, questa volta utilizzando uno scanner laser con funzioni di presa panoramica⁴.

Il successivo sviluppo degli elaborati ha seguito l'andamento delle fasi previste dalla convenzione, così che da prima si è provveduto all'organizzazione di tutti i dati "grezzi" raccolti nelle operazioni di rilievo, comprendenti quindi le nuvole di punti degli scanner, gli eidotipi dei rilievi tradizionali, e le monografie del rilievo topografico. Successivamente, con le prime operazioni di elaborazione è stato possibile produrre il primo modello complessivo basato della nuvola di punti, descrittiva dell'intero edificio, questo elaborato, di per suo già un notevole risultato, è stato oggetto della seconda fase di consegna.

Una volta completato un modello generale affidabile della nuvola dei



Figg. 1/7 - Istantanee del gruppo di lavoro durante le operazioni di misurazione, maggio 2002.

punti, composizione di tutte le scansioni eseguite con i laser, si è potuto procedere allo sviluppo di un modello tridimensionale digitale basato su superfici e quindi tale da richiedere un'interpretazione del modello rilevato che al tempo stesso, riduceva il numero delle informazioni raccolte, ma rendeva anche il modello fruibile secondo letture più convenzionali e versatile per gli scopi della rappresentazione. L'intera operazione, dal rilievo alla definizione del modello tridimensionale digitale elaborato, ha richiesto un anno di tempo, le prime operazioni di rile-

Note

¹ Il responsabile della convenzione per il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura è il prof. Marco Bini

² Per il supporto nell'impiego degli scanner laser si è ricorsi alla collaborazione con il NubLab del Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara, diretto da Marcello Balzani, Per le operazioni di rilevamento con scanner laser eseguite dal NubLab hanno partecipato: Federico Ferrari, Alessandro Greco, Manuela Incerti, Federico Uccelli e Nicola Zaltron.

³ Il gruppo di ricerca è composto, oltre che dal prof. Marco Bini, da Stefano Bertocci, Mauro Giannini, Giovanni Pancani, Paola Puma, Francesco Tioli, e dal sottoscritto, Giorgio Verdiani. Hanno partecipato alle operazioni di rilievo: Gianni Sani, Rocio Serrano Alonso, Nicoletta Brunori, Mi-

vamento si sono tenute nella seconda settimana del maggio 2002 mentre la consegna a conclusione della convenzione si è tenuta alla fine di aprile 2003⁵.

A intervallare le varie fasi di elaborazione, ci sono state varie occasioni di presentazione pubblica dei risultati conseguiti, derivanti dalle relazioni tra le varie parti partecipanti al rilievo, e che hanno richiesto la preparazione di elaborati specifici di presentazione, per la maggior parte presentazioni multimediali, grafiche e testuali, delle fasi intermedie del progetto.

chele Cornieti, Simona De Cristofano, Elena De Lisio, Lorenzo Dini, Martha Aida Donoso Albuquerque, Gian Paolo Germani, Paolo Giannelli, Federico Gigetti, Bruno Grasso, Luciana Pochinu Carta, Giovanni Rossi, Cristhian Soverini, Duccio Troiano, Massimo Zucconi. Hanno partecipato alle operazioni di restituzione: Gianni Sani, Rocio Serrano Alonso, Paolo Giacomelli e Cuauhtemoc Giancaterino.

⁴ Le operazioni di scansione sono state eseguite a cura di Frederic Castello, della MENSI S.A. France.

⁵ Lo specifico ambito operativo ha permesso inoltre di sviluppare e consolidare il rapporto tra la Sezione di Disegno e Architettura la struttura italiana di Leica Geosystem.



Figg. 8/12 - Istantanee del gruppo di lavoro durante le operazioni di misurazione, maggio e agosto 2002.

I sistemi digitali di acquisizione

Prima di passare ad esporre la metodologia utilizzata per le principali procedure adottate nel rilievo del battistero di Pisa, è bene prendere in esame un sintetico panorama delle tecnologie maggiormente diffuse per il rilievo digitale, questo come premessa utile a capire successivamente le ragioni delle scelte vincolate alle strumentazioni effettivamente impiegate e le prospettive di sviluppo nella progettazione di rilievi basati su sistemi tecnologici evoluti.

Negli ultimi anni le tecnologie di rilievo digitale hanno visto una notevole e rapida evoluzione, rendendo sempre più pratici ed utilizzabili anche da operatori privi di una vasta formazione specifica sistemi che permettono di restituire modelli digitali di spazi, oggetti, e architetture.

Al tempo stesso il continuo perfezionamento dei software per la modellazione di elementi tridimensionali e per la resa fotorealistica di questi hanno reso possibile, con sempre maggior semplicità, creare immagini di oggetti "virtuali" (usando l'abusatissimo termine) impiegati per realizzare immagini difficilmente distinguibili, a colpo d'occhio, dalle riprese di un buon fotografo.

Tuttavia, alla richiesta di produrre

un modello tridimensionale digitale rappresentante un elemento reale, si devono fare delle scelte importanti ed impegnative che determineranno la qualità del risultato ottenuto, il suo costo e la sua efficacia rispetto alle finalità nelle quali l'operazione di creazione del modello si colloca.

I sistemi di rilevamento tecnologicamente più evoluti (come gli scanner laser 3D a triangolazione o a tempo di volo e le range camera) permettono di ottenere modelli assolutamente precisi e dettagliati che offrono un forte effetto grafico già dalla prima acquisizione, ma di contro richiedono competenze specialistiche, costi elevati delle attrezzature, disponibilità di *workstation* con livelli di prestazioni elevatissimi. L'utilizzo di strumenti con tecnologie maggiormente consolidate e di conseguenza di più facile reperibilità (come le stazioni totali o i sistemi software per la fotogrammetria monocamera), richiede comunque delle competenze avanzate nella gestione del progetto di rilievo oltre ad una particolare perizia nel definire quest'ultimo in modo da ottenere la corretta attendibilità del risultato rispetto alle finalità d'uso del modello, magari con un'unica soluzione di acquisizione delle informazioni. In ultima analisi, poi, ci si può trovare nelle condizioni di poter ricorrere esclusivamente a strumenti tradiziona-

li, ovvero ad operare per rilievo diretto, eventualmente con il supporto di strumenti manuali specifici come la dima; in questo caso il rapporto finalità del rilievo - accuratezza delle misurazioni dovrà essere particolarmente curato per evitare di ottenere risultati inadatti allo scopo prefissato.

Nel rilievo tradizionale, il rilevatore pianifica il proprio lavoro in modo da eseguire le misurazioni di quanto ritenuto necessario per comprendere e per rappresentare correttamente il manufatto oggetto di studio. Ovviamente la completezza della misurazione è relativa al tipo di strumentazione in uso e alla capacità dell'operatore di far buon uso di quanto a disposizione.

Le tecnologie di rilevamento digitale permettono di cogliere un enorme numero di misure in un tempo molto breve, in maniera immediata rispetto al rilievo discretizzato, producendo una sorta di modello intermedio, tra il reale ed il rappresentato, costituito dalla nuvola di punti nella quale l'architettura misurata viene scomposta.

I punti colti sull'oggetto possono anche essere molto ravvicinati e inoltre la possibilità di misurare elementi posti a grandi distanze rende possibile raggiungere la totalità dell'oggetto rilevato senza bisogno di impalcature. Ogni scanner laser ha, ovviamente, una serie di limiti, questi sono dovuti in-



Fig. 1 - Organigramma del processo di acquisizione delle informazioni nel rilievo digitale.

nanzitutto all'ampiezza dell'angolo di campo secondo cui il segnale laser può operare, e dal fatto che per poter essere

misurato, il punto deve essere raggiunto dal segnale, per cui, se un elemento transitorio (come un passante) oppu-

re permanente (come un pilastro) si trova sul percorso del segnale, questo misurerà esclusivamente la distanza sul

primo elemento raggiunto, generando un vuoto per tutta l'area equivalente all'ombra proiettata dall'ostacolo secondo la sorgente del laser.

In altre parole, come una sorgente di luce posta di fronte ad un oggetto ne proietta l'ombra su tutto ciò che si trova dietro l'oggetto stesso, così questi sistemi di misurazione presentano spesso delle ombre che all'atto pratico risultano essere parti non misurate del soggetto. Tecnicamente queste aree nulle sono dette "spazi di occlusione".

Ne consegue che tra la limitatezza dell'angolo di campo dello scanner e gli spazi di occlusione, risulta sempre necessario eseguire un certo numero di scansioni sufficienti a coprire la totalità del soggetto con una serie di prese che una volta ricomposte tra di loro daranno come risultato la completa nuvola di punti 3D, descrizione totale dell'oggetto rilevato.

Perché queste molteplici prese possano essere ricomposte tra di loro, risulta necessaria la definizione di una serie di elementi comuni di certa collocazione, si procede quindi a posizionare un certo numero di mire speciali sull'organismo architettonico in una misura tale da poter avere almeno tre punti comuni e non allineati ogni due scansioni eseguite.

Queste mire possono essere dei comu-

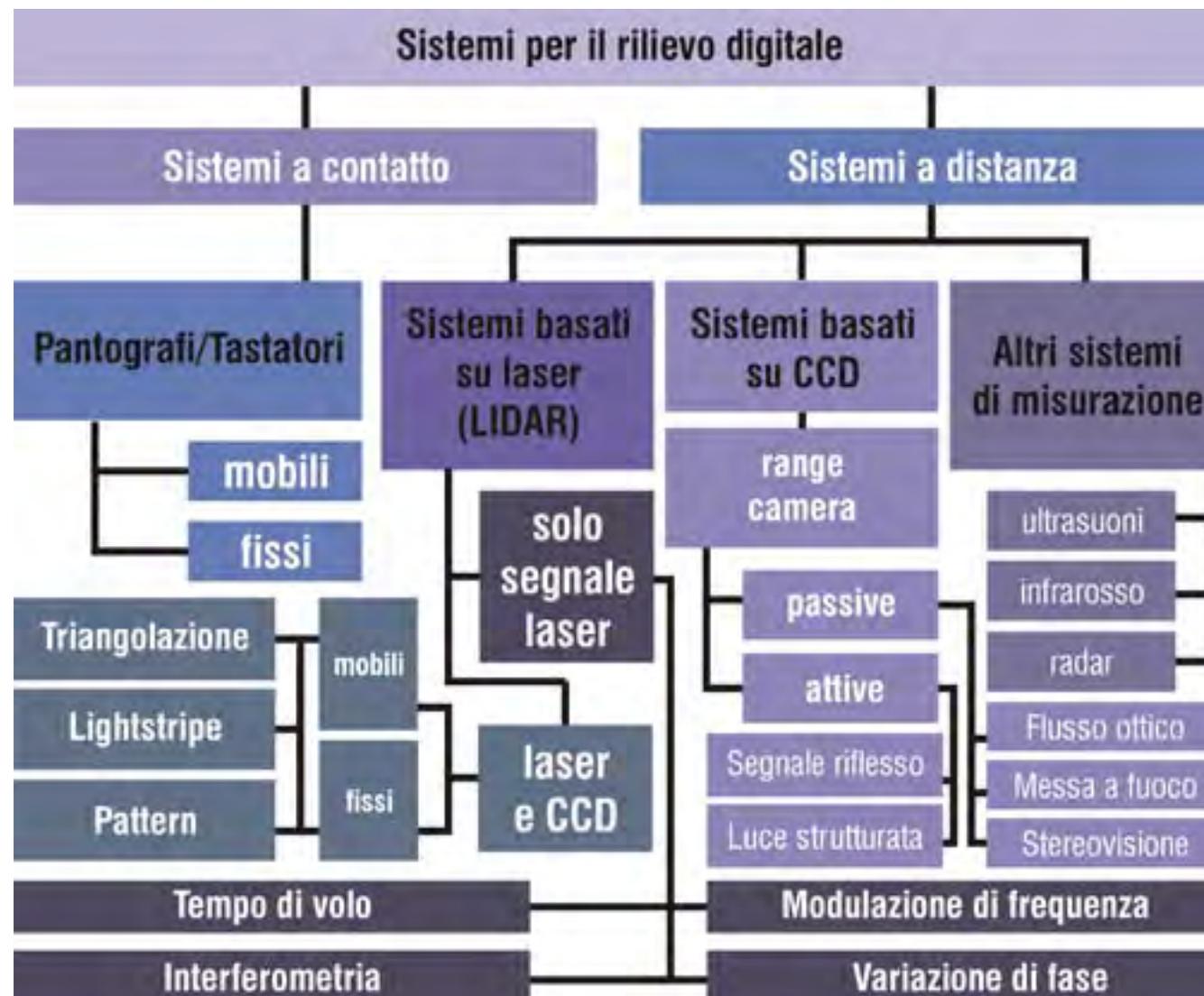


Fig. 2 - Struttura principale delle strumentazioni per il rilievo digitale, suddivisione basata sulle tecnologie impiegate.

ni target catarifrangenti piani, oppure delle sfere di dimensione nota e indeformabili, utili per permettere una facile individuazione anche se poste in forte scorcio rispetto alla sorgente del laser.

Il rilievo con il laser e la precisione della disposizione delle mire, può però non essere sufficiente a garantire la piena correttezza del modello ottenuto, specialmente nel caso in cui l'architettura rilevata sia molto grande e le scansioni molto numerose.

A garantire e a permettere la georeferenziazione del rilievo si ricorre in genere all'apporto di un completo rilievo topografico, eseguito su tutti i target applicati, oltre che su un certo numero di punti di verifica.

La nuvola di punti radi generata secondo il rilievo topografico e la moltitudine di nuvole di punti fitti generata dagli scanner, vengono infine ricomposte per generare un unico grande modello complessivo, fase preliminare di ogni successivo passaggio di elaborazione.

Quanto appena esposto è parte del contesto operativo valido per tutte le apparecchiature attualmente diffuse per il rilievo digitale, per alcune di queste un problema può risultare particolarmente accentuato oppure divenire marginale in virtù della modalità operativa dell'apparecchiatura

stessa, ma per tutte le strumentazioni cose come gli spazi di occlusione, la necessità di referenziare le varie prese, il rapporto con gli errori propri della misurazione, e la necessità di software adeguati all'hardware in uso, sono elementi fondamentali per una corretta impostazione del rilievo.

Se si prendono quindi in considerazione le principali tipologie di strumentazioni per il rilievo digitale, queste possono essere distinte o per tipo di area operativa, ovvero breve, medio o lungo raggio, o per tecnologia utilizzata per l'esecuzione del rilievo. Ovviamente le due distinzioni sono legate tra loro, in quanto i sistemi a lungo raggio richiedono l'uso di determinate tecnologie che in genere risultano meno efficaci nei rilievi di dettaglio a corto raggio.

Tuttavia poiché dovrebbe essere compito di chi esegue il progetto di rilievo stabilire l'insieme di strumentazioni necessarie per eseguire le misurazioni,

si procederà ad esporre le famiglie di strumentazioni suddivise per tipologie tecnologiche, in maniera da non vincolarle espressamente ad un campo di azione, limitandosi a contestualizzarle a delle condizioni operative generiche.

Sistemi a contatto

Con il termine "sistema a contatto", si intende, un sistema che misura la posizione del punto con cui viene a contatto lo strumento; in questo senso, i pantografi digitali, detti anche *tastatori* sono sistemi a contatto, dove, come è ovvio, per poter misurare un punto diventa necessario poterlo raggiungere. Si tratta del sistema di rilievo digitale più vecchio ed elementare nella sua semplicità e tra tutti l'unico che richieda una pianificazione di ciò che

effettivamente si va a misurare a monte dell'operazione stessa. Infatti, benché i software di gestione di questo tipo di strumentazione, rendano sempre più veloce e pratico il processo di rilievo, l'operatore non può certo permettersi di battere una quantità indefinita di punti presenti sull'oggetto per poi affittirne la densità in corrispondenza dei punti meno definiti, certo nulla toglierebbe di operare in questa maniera, ma il processo complessivo non porta certo alla produzione di un modello chiaro e ottimizzato, con il rischio di una descrizione sommaria

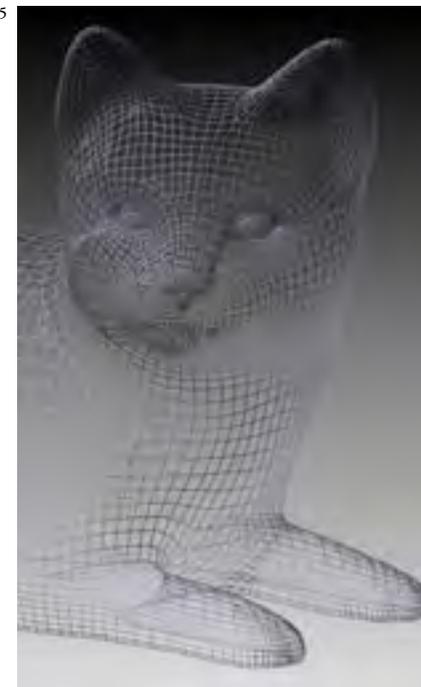


Fig. 3/4 - Braccio pantografo Microscribe, di questo strumento esistono più modelli, diversi per livello di precisione e raggio d'azione raggiungibile dal braccio.

Fig. 5 - Modello tridimensionale digitale ottenuto dalle misurazioni di un gatto di ceramica.

di alcune parti. In questo contesto risulta necessario eseguire un rilievo per linee guida o per sezioni, oppure, meglio ancora, secondo una combinazione di queste due. Secondo questa procedura, si dovranno individuare sull'oggetto da rilevare una serie di linee di spina, tali da racchiudere tra loro superfici il più uniformi possibili per tipo di curvatura o andamento dei piani, e successivamente, eseguire delle sezioni attraverso queste superfici in modo da scomporre l'oggetto in elementi rappresentabili attraverso gli



strumenti generici di un CAD evoluto. In sostanza quello che l'operatore deve fare è estrarre dall'oggetto tutti gli elementi guida che gli saranno utili per la sua successiva ricostruzione, e quindi il processo risulterà fortemente legato al software di destinazione di quanto rilevato. Infatti un programma in grado di mettere a disposizione strumenti di disegno avanzati, come superfici *NURBS* o *Subdivision Surface*, permetterà di sviluppare modelli sulla base delle procedure basate su linee guida e sezioni, mentre l'impiego di CAD capaci di produrre esclusivamente geometria poligonale e Mesh non permetterà di rappresentare con facilità il modello geometrico dell'oggetto a meno di non rilevare un numero molto elevato di punti con significativi raffittimenti in corrispondenza delle parti con curvature maggiormente accentuate. Inoltre, i software CAD specializzati per l'interfacciamento con questi stru-

menti permettono l'utilizzo di funzioni specifiche molto efficaci, come la possibilità di definire dei piani di sezione "virtuali" lungo l'oggetto, in questa maniera, ogni volta che il puntatore del braccio misuratore attraverserà quel piano il punto corrispondente verrà automaticamente registrato

producendo sequenze di punti perfettamente complanari. I tastatori possono essere divisi in due gruppi molto diversi per campo d'uso e possibilità di applicazione, il primo gruppo, quello dei tastatori automatici è oggi pressoché sparito, in virtù dei costi e degli ingombri elevati, ed il se-

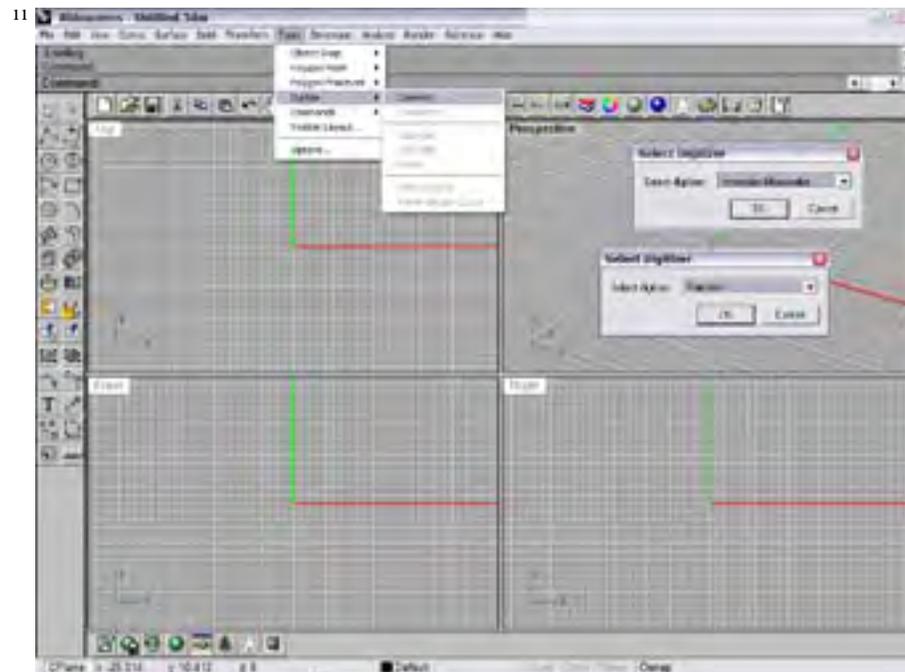


Figg. 6/8 - Esempi di applicazione di un braccio pantografo digitale, da sinistra: rilievo di oggetti, rilievi antropometrici, rilievo per ingegneria inversa.

Fig. 9 - Schema della composizione di un braccio pantografo Faro.

Fig. 10 - Puntali intercambiabili di un modello della Faro, la diversa forma serve a rispondere a diverse esigenze di misurazione.



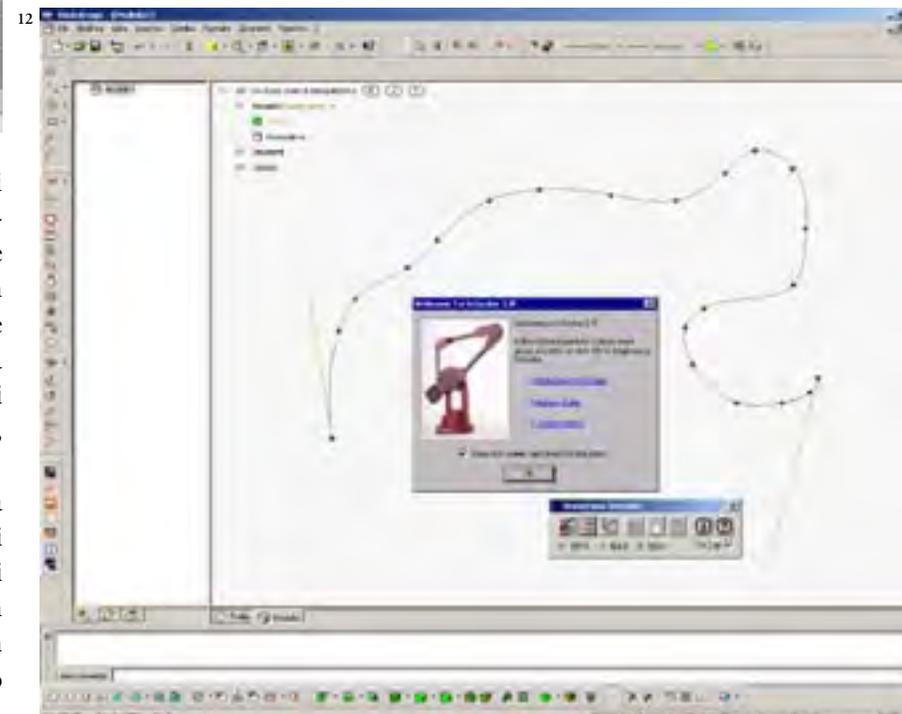


condo costituito dai modelli a braccio, è oggi molto diffuso. Nel primo caso si tratta di una macchina di grandi dimensioni, molto pesante e non facilmente trasportabile, costituita da un ampio vano con un piano di appoggio basculante e un braccio mosso su tre assi, capace di raggiungere, spostandosi sulla verticale, un qualunque punto presente del vano sottostante; in questa maniera l'oggetto rilevato deve essere posto all'interno della macchina, che provvederà a toccare una maglia di punti secondo un passo prestabilito. Questo tipo di apparecchiatura offre

una elevata precisione e permette di misurare oggetti con dimensioni massime di una automobile; ovviamente gli spazi di occlusione sono elevati in conseguenza del tipo di movimento e della poca versatilità, ma per un sistema pensato per la misurazione di oggetti liberamente posizionabili su un piano, si tratta di un problema modesto. Nel caso dei pantografi a braccio la macchina è dotata di una base di appoggio ed è normalmente dotata di aste con tre snodi, uno alla base, uno in mezzzeria, ed un ultimo al raccordo con il puntale che deve entrare in contatto

con l'oggetto da misurare. Il braccio normalmente non presenta sistemi propri di memorizzazione dei dati, e di conseguenza il sistema deve essere collegato ad un computer per permettere di archiviare i dati via via che questi vengono raccolti. La connessione, in virtù del modesto flusso di dati dovuto al rilievo avviene in genere attraverso una porta seriale, e nei modelli più recenti, per aumentare la versatilità dello strumento, su porta *USB*. La mobilità del punto che rileva e la

snodabilità del macchinario rendono virtualmente assenti gli spazi di occlusione, ma i reali limiti fisici del braccio e la dimensione modesta, ma reale, della punta misuratrice rendono comunque impossibile, in determinate condizioni, la misurazione di alcune parti, per cui può risultare necessario riposizionare in maniera differente il braccio pantografo per raggiungere tutte le parti di ciò che si sta rilevando. Alla stessa maniera, il braccio è vincolato da un'estensione fisica, che nei



Figg. 11/12 - Interfacciamento di un braccio pantografo *Microscribe* in due CAD tridimensionali: *McNeel Rhinoceros* e *Think3 Thinkdesign*.

modelli di maggior dimensione può arrivare a coprire un volume grosso modo sferico di tre metri di diametro, con centro nello snodo della base dello strumento.

All'aumentare della dimensione della sfera operativa del braccio, aumentano anche le dimensioni delle sezioni delle parti componenti l'apparecchiatura, e le caratteristiche dei materiali utilizzati

per la costruzione che devono essere tali da ridurre al minimo eventuali deformazioni fonte di riduzione della precisione della misurazione.

La referenziazione tra diverse campagne eseguite da posizioni diverse del braccio viene effettuata il più delle volte battendo tre o più punti comuni, non allineati e indiscutibilmente riconoscibili, comuni ogni due

campagne.

La precisione di un rilievo eseguito con questo tipo di strumentazione si aggira tra il mezzo centimetro e il millimetro per i modelli di massima accuratezza, che per lo più vengono utilizzati per operazioni di ingegneria inversa e per il rilievo di manufatti di modeste dimensioni, nonché per la prototipazione rapida di modelli di studio per elementi di design o per l'impiego in computer grafica. Il costo relativamente contenuto e la facilità di impiego hanno permesso una discreta diffusione di queste apparecchiature, al punto che alcuni software di modellazione generici, come *Mcneel Rhinoceros 3D* e *Think3 Thinkdesign* hanno presentato nelle loro versioni più recenti funzioni di interfacciamento diretto ai modelli di braccio prodotti dalla *Microscribe*¹ e dalla *Faro*² (tra i più diffusi in assoluto).

I limiti principali di queste strumentazioni stanno nella necessità di raggiungere l'oggetto per poterlo misurare, nei tempi piuttosto elevati necessari per eseguirne la misurazione e nel bisogno di una postazione di lavoro tale da garantire stabilità all'apparecchiatura una volta che questa entra in funzione, cosa difficilmente ottenibile, nel campo architettonico anche nel caso di poter disporre di una buona impalcatura. I principali pregi consi-

stano nella buona precisione, nel costo relativamente contenuto e nel modesto impegno richiesto nell'impiego della strumentazione.

Assimilabili a questo tipo di tecnologia è anche quella piuttosto ingegnosa, dei sistemi a pantografo che trasmettono un movimento ad una tavoletta grafica collegata ad un computer con un software CAD operativo e in modalità disegno. Questo metodo, alquanto curioso, è una soluzione applicabile solo ad oggetti di piccole dimensioni, e non permette di ottenere un modello tridimensionale dell'oggetto ma solo la rappresentazione bidimensionale di profili dell'elemento rilevato. Si tratta di un sistema presumibilmente destinato a cadere in disuso, e che comunque non ha mai avuto una particolare diffusione.

Sistemi a distanza

Tutti quei sistemi che non necessitano di un contatto fisico per poter fissare le coordinate del punto che si vuole misurare si basano di massima su tecnologie laser oppure a luce strutturata; in tutti e due i casi si tratta di strumentazioni che coprono una gamma di impieghi molto ampia, che a seconda dei modelli possono rilevare elementi posti a pochi centimetri di distanza oppure posti a centinaia di metri dallo scanner.

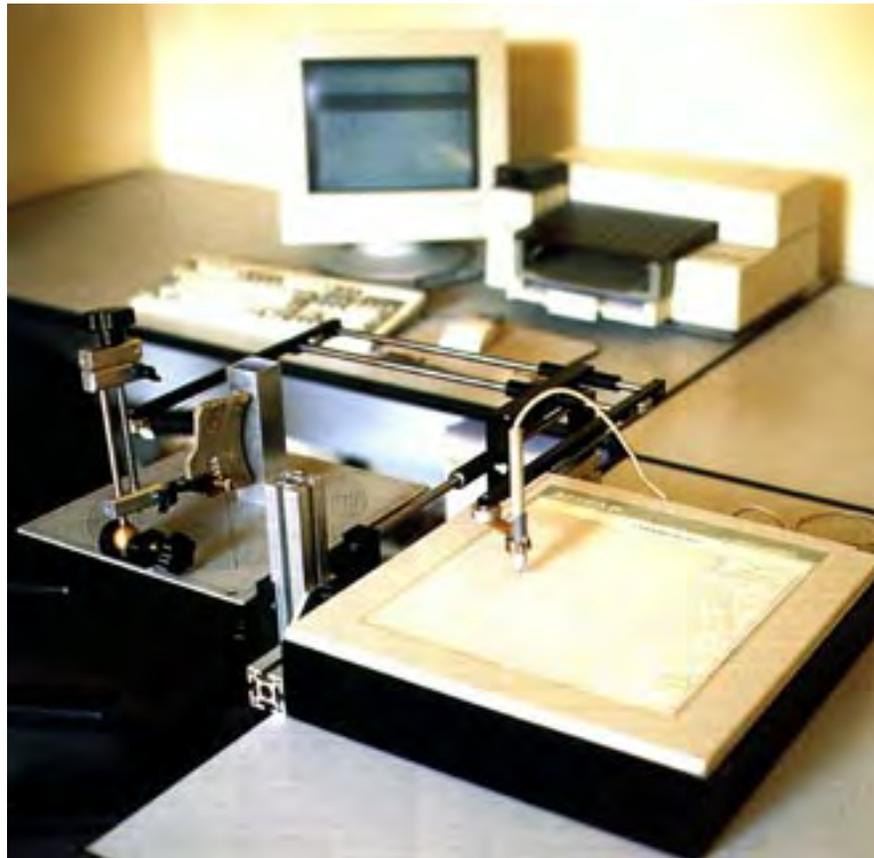


Fig. 13 - Sistema di rilievo bidimensionale sviluppato per il tracciamento dei profili di un oggetto, la sua applicazione principale sono le misurazioni di reperti archeologici.

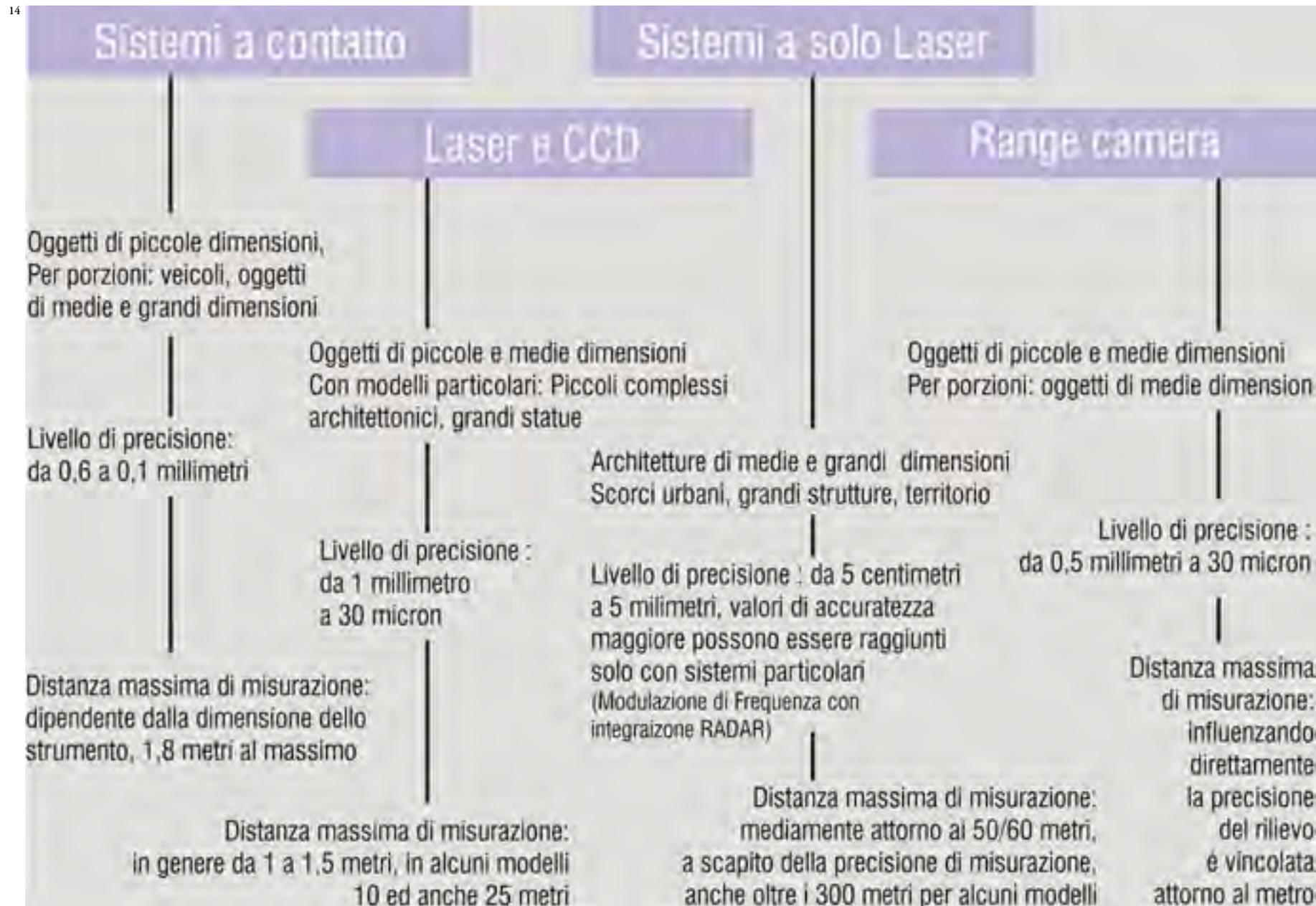


Fig. 14 - Schema delle strumentazioni del rilievo digitale, suddivise sulle base delle tipologie di impiego.

Sistemi basati su processi trigonometrici

Gli scanner laser cosiddetti *a triangolazione* sono molto diffusi e presentano due aspetti di particolare interesse: il primo relativo al forte consolidamento che questa tecnologia ha avuto da che è stata sviluppata ad oggi; il secondo inerente invece la notevole precisione che questo tipo di misurazione permette di ottenere. In alcuni modelli il margine di errore sulla posizione del punto misurato può aggirarsi attorno al centesimo di millimetro e questo rende questo tipo di apparecchiature particolarmente indicate per la misurazione di oggetti da cui si voglia ottenere un elevato dettaglio di resa o su cui si vogliono compiere analisi non alterate da un livello di errore troppo alto. Inoltre le caratteristiche dei laser normalmente impiegati in queste strumentazioni sono tali da rendere molto semplice misurare elementi di quasi qualunque materiale e con qualsiasi trattamento di superficie.

La mancanza di contatto tra macchina misuratrice e oggetto misurato e la possibilità, in alcuni modelli, di posizionare l'apparecchiatura ad una distanza significativa, rendono particolarmente appetibile questo tipo di strumentazione per il rilievo di sculture, reperti archeologici, fossili, elementi

di particolare fragilità, dipinti. Il sistema di misurazione adottato non è comunque lo stesso per tutti i sistemi che basano il processo di rilievo su principi trigonometrici: i sistemi prevalentemente impiegati sono quello della triangolazione attiva (*Active Triangulation*) e della striscia di luce (*Lightstripe*). Nel caso del sistema basato su triangolazione, questo è simile al processo di proiezione in avanti della topografia; in pratica una sorgente laser e un sensore CCD capace di recepirne la posizione sono posti nell'apparecchiatura ad una distanza nota e non

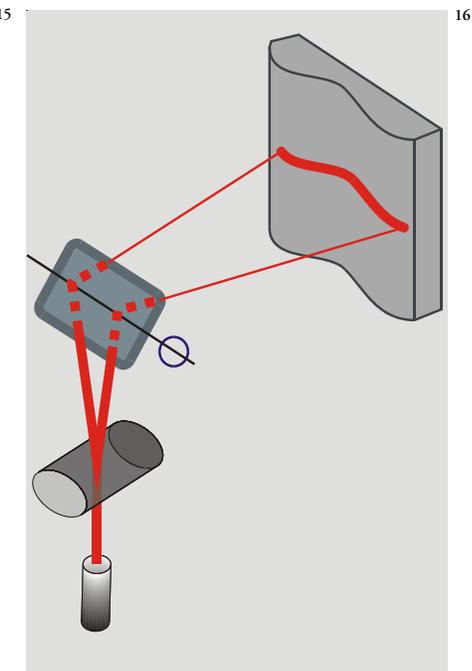
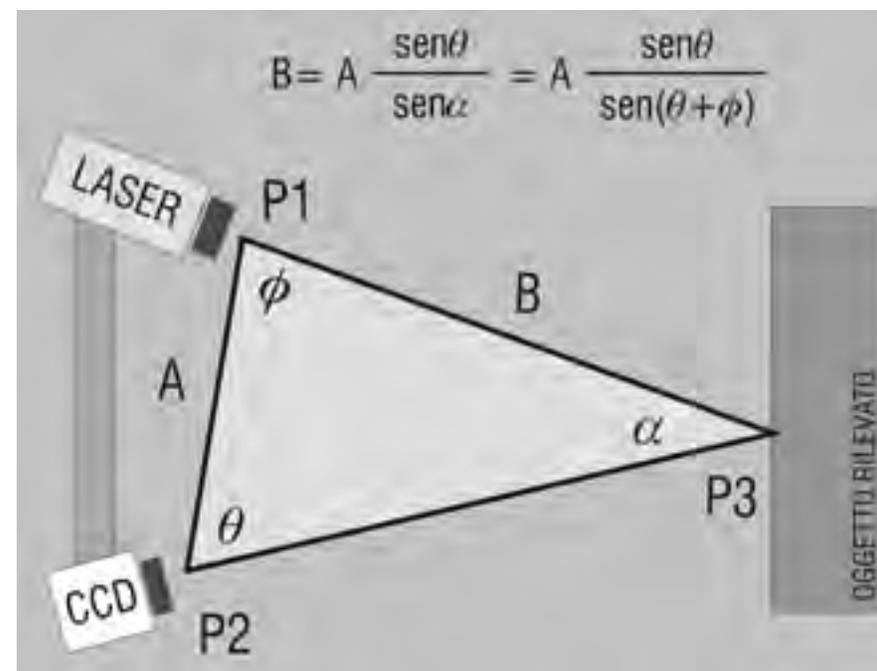
modificabile; il segnale del laser viene quindi emesso secondo un angolo noto e viene registrato da un *CCD* che trasferisce i dati ad un software. Quest'ultimo, sulla base dei dati noti, permette di posizionare nello spazio il punto rilevato individuandone le coordinate secondo i valori di X, Y e Z. In altre apparecchiature il sistema di misurazione a triangolazione è invece basato sul *Lightstripe*, dove una striscia orizzontale di luce viene generata sull'oggetto facendo passare l'emissione del laser attraverso una lente cilindrica. La luce riflessa dall'oggetto è ricevuta

dal *CCD* dell'apparecchiatura e, per triangolazione, convertita in un'informazione di distanza. Il processo viene quindi ripetuto facendo passare una seconda striscia di luce, questa volta orizzontale sulla stessa parte misurata per mezzo di uno specchio di Galvano, in maniera tale da ottenere un'informazione metrica tale da poter generare un modello tridimensionale della parte misurata.

Questo genere di sistema è molto accurato, e permette di rilevare oggetti di varia dimensione da distanze corte e medie con una qualità elevatissima

Fig. 15 - Schema del funzionamento di un sistema laser di rilevamento basato sulla triangolazione attiva.

Fig. 16 - Schema del funzionamento di un sistema laser di rilevamento basato sul sistema *Lightstripe*.



17



di risultato. Si deve comunque tenere conto dell'effettiva capacità di misurazione che questo tipo di tecnologia permette di effettuare; infatti, in virtù del fatto che il sistema è comunque basato su un sistema di triangolazione, perché un qualunque punto possa essere misurato, deve essere visibile e raggiungibile sia dall'emissione del laser, che dal CCD che percepisce la posizione di quest'ultimo. Di conseguenza, elementi con profonde cavità o con fori di piccolo diametro, risulteranno difficilmente misurabili, e potrebbe verificarsi la condizione per

cui alcune parti dell'oggetto rimangono comprese entro uno spazio di occlusione a prescindere dal numero di scansioni effettuate.

Non si tratta inoltre di sistemi velocissimi di misurazione; certo, il tempo necessario per rilevare un oggetto varia a seconda delle sue dimensioni e del modello si scanner in uso³, ma tra le varie tecnologie di rilievo a distanza, non sono certo gli scanner basati su processo trigonometrico a raggiungere i valori più alti di prestazione. Oltre all'effettiva velocità di acquisizione relativa ad una singola scansione,

19
direttamente dipendente dal livello di performance del laser e del CCD, i tempi risentono del numero di operazioni che devono essere compiute dall'operatore e dal numero di scansioni che devono essere eseguite, soprattutto in virtù del campo, in genere modesto, di copertura offerto da questo genere di apparecchiature.

Inoltre si tenga presente che qui come in altri casi, all'aumentare della velocità di acquisizione dei dati, il livello di precisione ottenibile tende a ridursi significativamente, a prescindere dalle specifiche tecniche della macchina: il massimo livello di precisione non sarà mai conseguibile in combinazione

18



con la massima velocità operativa dello strumento. È quindi compito dell'operatore pianificare il rilievo in modo da ottenere un corretto rapporto tra i tempi richiesti per la scansione e la qualità delle misurazioni effettuate, che incideranno sulle caratteristiche del modello che si dovrà successivamente sviluppare.

A contribuire alla notorietà di questi sistemi di rilievo ha fortemente contribuito il *Digital Michelangelo Project* della Stanford University⁴, che nel 1999⁵ ha eseguito il rilievo della statua

Fig. 17 - Sistema per la misurazione di oggetti Picza sviluppato dalla Roland, si tratta di un'apparecchiatura fissa, non utilizzabile fuori da un laboratorio, ma la filosofia del prodotto prevede una maggior facilità d'uso.

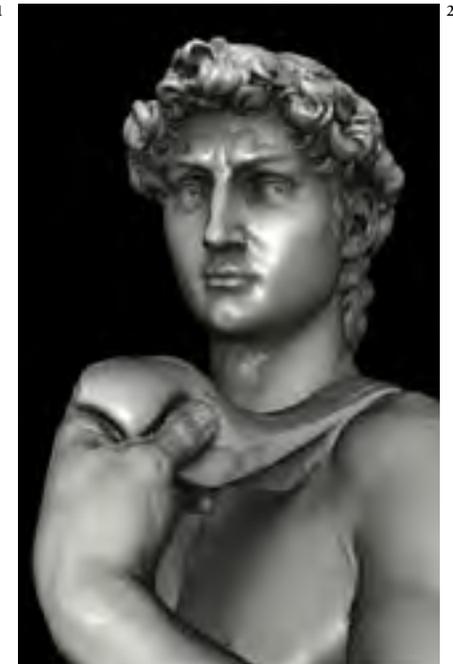
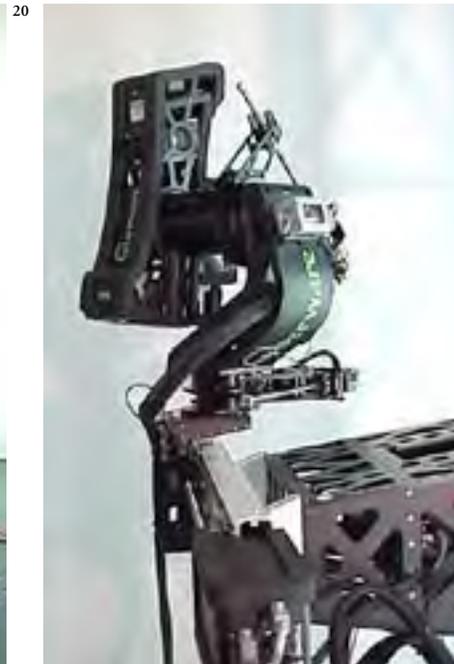
Fig. 18 - Il Minolta Vivid 700, forse uno degli scanner Laserstripe più diffusi.

Fig. 19 - Il Minolta Vivid 900, lo scanner laser di punta della ditta giapponese, rappresenta l'evoluzione del modello 700.

del David di Michelangelo⁶ utilizzando uno scanner laser appositamente prodotto dalla Cyberware⁷.

Il modello digitale del David⁸ è stato acquisito secondo una maglia di punti di 0,29 millimetri⁹, e da questo sono stati successivamente elaborati vari modelli, alcuni completi, con maglie poligonali ridotte a uno e a due millimetri, e alcuni modelli parziali a piena risoluzione.

Al di là delle applicazioni di particolare rilevanza, gli scanner laser in commercio sono comunque fortemente orientati per proporre un impiego con un campo di copertura che raramente supera i due metri di distanza, con una copertura massima di poco più di un metro quadro. Di



Figg. 20/21 - *The Large Statue Scanner*, lo scanner laser appositamente approntato dalla *Cyberware* per l'Università di Stanford per i rilievi eseguiti nell'ambito del *Digital Michelangelo Project*. Veduta di insieme e particolare dell'unità di acquisizione.

Fig. 22 - Uno dei modelli per superfici ottenuti dal rilievo della statua del David, parte degli obiettivi del *Digital Michelangelo Project*.

Fig. 23 - Lo scanner della *Cyberware* all'opera sulla testa della statua del David.



Fig. 24 - Sistema di gestione di un modello a risoluzioni multiple dei dati del rilievo della statua del David eseguito dalla Stanford University.



25



26

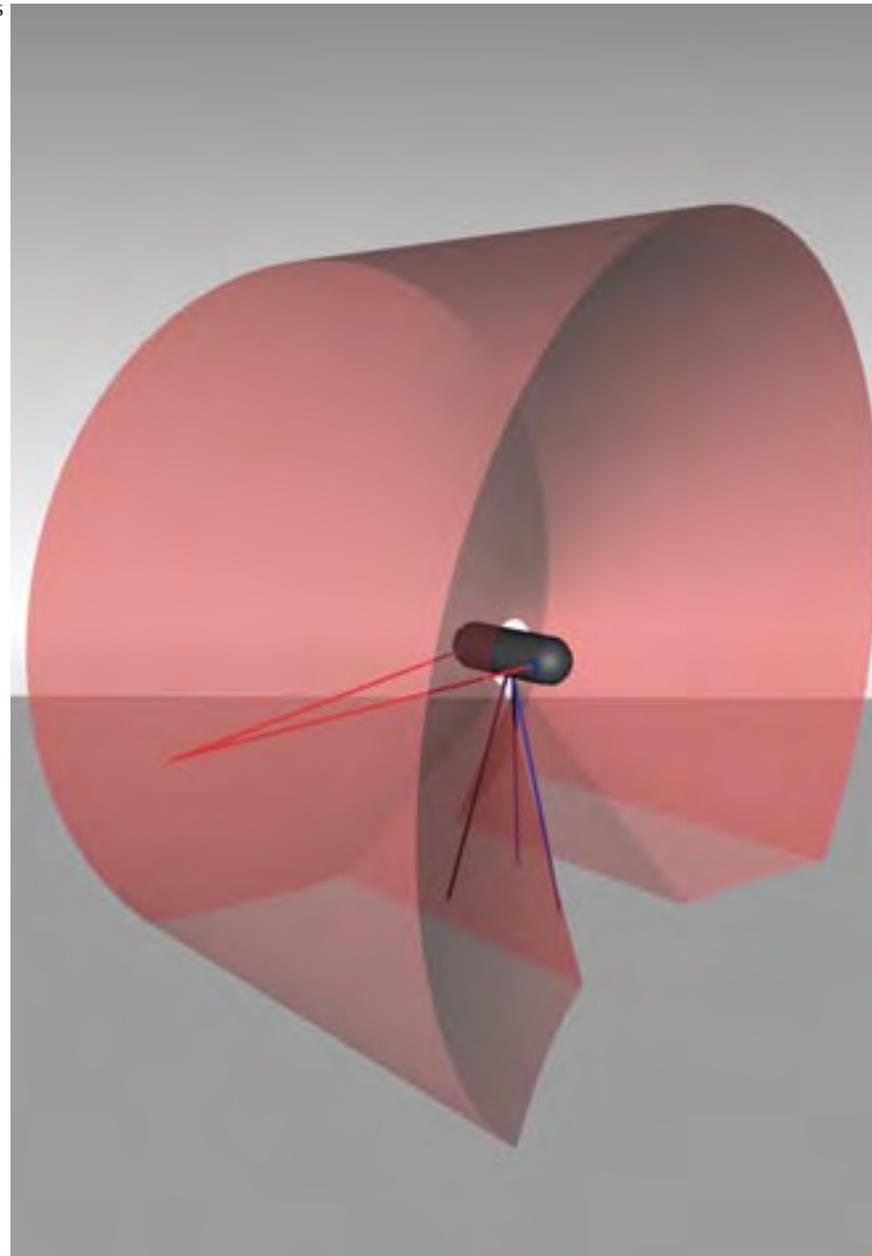
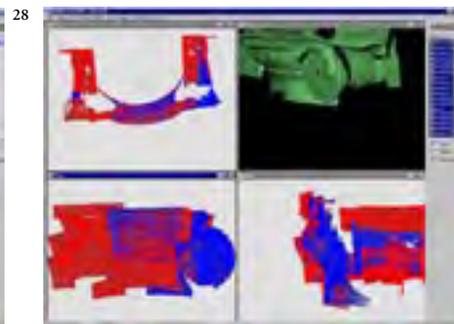
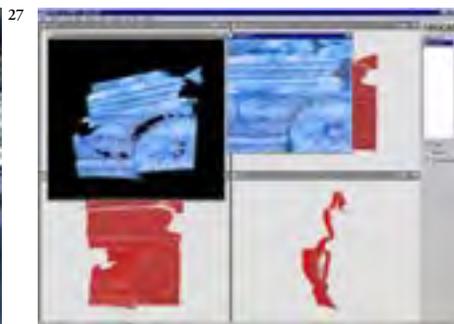


Fig. 25 - Due scanner a triangolazione *Mensi*, il *SOISIC 25* e il *SOISIC 10*, hanno la particolarità di eseguire una scansione con elevata accuratezza a grande distanza (il codice del modello corrisponde alla massima distanza raggiungibile in metri). Tutti e due i modelli permettono inoltre la scansione panoramica con una rotazione di 320°.

Fig. 26 - Visualizzazione spaziale del campo di ripresa di un modello *Mensi SOISIC*.



conseguenza i tipi di oggetti rilevabili sono di dimensioni contenute, oppure devono essere rilevati per parti per poi essere ricomposti nelle fasi successive di elaborazione del rilievo.

Il limite operativo è ad oggi difficilmente superabile per i sistemi basati su *Lightstripe*, in virtù del sistema di illuminazione che non può mantenere la propria affidabilità a distanze elevate, mentre, con particolari accorgimenti, i sistemi a triangolazione attiva possono essere spinti ad operare anche a distanze medie su ampie aree di copertura. E' il caso di due modelli sviluppati

dalla ditta francese Mensi, nella serie SOISIC, dove il modello S-10 e il modello S-25 raggiungono distanze, rispettivamente, di dieci e venticinque metri. Questi due scanner permettono inoltre di coprire un'area ampissima, in virtù della motorizzazione del corpo dello scanner che fa compiere una rivoluzione al gruppo di misurazione secondo un angolo di trecentoventi gradi. In questo modo l'area scansionata corrisponderà ad un volume corrispondente ad una rivoluzione quasi completa, eseguita sul vertice di una piramide di altezza dieci metri e

con angolo di campo di quaranta gradi (il campo operativo effettivo del sistema a meno della rotazione).

Questo modello di scanner, particolarmente versatile, permette quindi di rilevare spazi molto ampi ed oggetti molto estesi, con una particolare vocazione per il rilievo di spazi interni molto articolati, in virtù della funzione di ripresa panoramica.

Ovviamente la funzionalità panoramica deve essere ben considerata e pianificata dall'operatore, perché, se da un lato riduce il numero delle postazioni di scansione che si devono

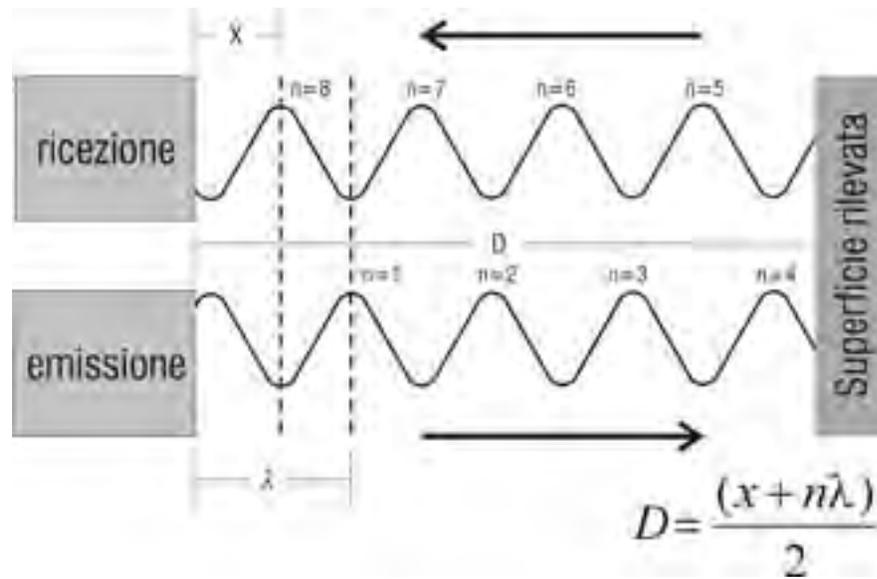
eseguire, dall'altro produce degli spazi di occlusione molto ampi e dalla forma, a volte, molto strana¹⁰, che possono risultare molto difficili da saturare senza produrre, al tempo stesso, delle sovrapposizioni della scansione¹¹.

Oltre alle macchine che cercano di espandere il proprio campo operativo dagli oggetti agli interni e a all'architettonico, esistono modelli che, sacrificando la mobilità dell'apparecchiatura, cercano di semplificare il processo di acquisizione riducendo al minimo le operazioni a carico dell'operatore.

Figg. 27/30 - Impiego del *Minolta Vivid 700* per la creazione del modello tridimensionale digitale di un capitello. Da un intervento di rilievo del NubLab di Ferrara.

Figg. 31/35 - Impiego del *Minolta Vivid 700* per la creazione del modello tridimensionale digitale di un ammonite. Da un intervento di rilievo del NubLab di Ferrara.



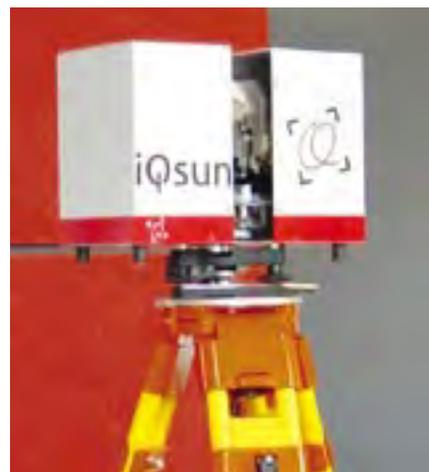


del tempo impiegato nello svolgimento dell'azione appena descritta. Il sistema di misurazione dello scanner si basa quindi sulla conoscenza della distanza

Fig. 38 - Lo scanner *Time Of Flight* sviluppato da *iQsun*, si tratta di una strumentazione con funzionalità panoramiche ed un ingombro molto contenuto.

Fig. 39 - Schema di funzionamento di un sistema *Phase Shift* per la misurazione delle distanze.

Figg. 40/41 - Lo scanner prodotto dalla *Metricvision MV200*, a fronte di una ragguardevole stazza, permette misurazioni di alta precisione a grandi distanza, la tecnologia impiegata la tecnologia utilizzata è un sistema a modulazione di frequenza (*FMCW*) con integrazione *RADAR*; in Europa è distribuito da *Leica Geosystem* ed è rinominato *LM200*.



del punto e degli angoli zenitali ed azimutali del raggio emesso per determinare l'esatta collocazione del punto raggiunto che viene rappresentato in uno spazio tridimensionale digitale. Il processo, è semplice, ma richiede apparecchiature di grande precisione, si tenga presente che la luce del segnale a impulsi del laser si sposta di circa trenta centimetri in un nanosecondo; di conseguenza il sistema di temporizzazione impiegato per misurarne il tempo di andata e ritorno deve essere assolutamente preciso ed efficiente.

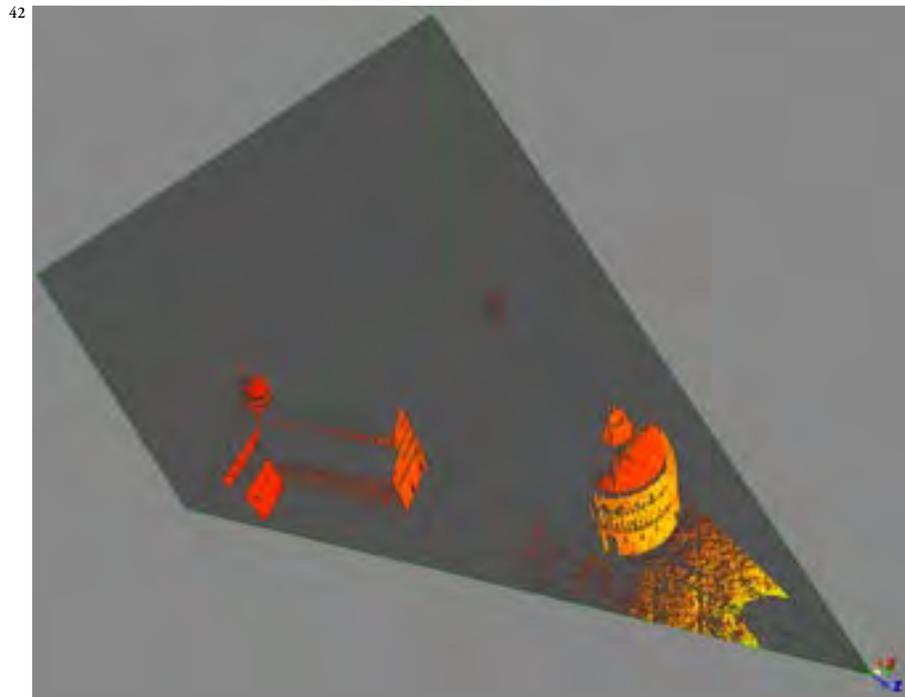
In alternativa ai sistemi a tempo di volo basati su impulsi laser, esistono sistemi basati sul processo detto *Phase Shift* (Variazione di Fase), dove, il se-

³⁹ gnale del laser non viene emesso per impulsi, ma è un segnale continuo con una lunghezza d'onda nota, il segnale viene quindi diretto verso l'oggetto che si vuole rilevare, che come nel caso del *Time of Flight* rifletterà verso la sorgente una certa quantità di segnale. In questa maniera, il ricevitore permetterà la misurazione della distanza in quanto questa sarà proporzionale alla variazione di fase subita dal segnale tra andata e ritorno. Per il resto, la misurazione degli angoli permetterà, anche in questo caso di completare il posizionamento del punto.

Un ulteriore perfezionamento di questa tipo di tecnologia si è avuto con l'introduzione dei sistemi di misurazione basati sul metodo della *Frequency Modulation (FMCW)* che si basa su l'impiego di un segnale



modulato secondo un'onda di forma triangolare. Il variare del segnale di ritorno rispetto a quello di invio, in funzione del tempo trascorso durante



il processo, permette di misurare la distanza dell'oggetto; inoltre, per le sue caratteristiche, questo sistema di misurazione si presta all'integrazione con sistemi di misura basati su radar, permettendo di consolidare l'efficacia del procedimento.

Questa tecnologia adottata dalla Metric Vision per lo scanner MV200¹³, che risulta essere uno degli scanner laser di maggior precisione (ma anche di maggior costo, peso ed ingombro) esistenti sul mercato, riuscendo ad eseguire misurazioni con un margine di errore tra i cinquanta micron (nel caso

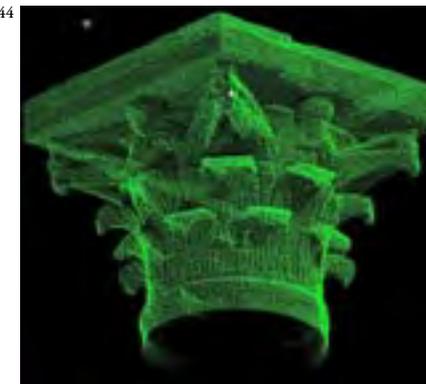
di rilievo eseguito alla velocità di due punti al secondo) e i trecento micron (nel caso di rilievo eseguito alla velocità di mille punti al secondo).

Oltre che per la tecnologia di misurazione adottata, gli scanner di tipo *Time of Flight* possono essere inoltre divisi in due categorie principali, quella degli scanner con campo di ripresa fissa e quelli panoramici; i primi permettono di eseguire la scansione secondo un certo angolo di campo verticale ed una altro orizzontale, generalmente uguali, eseguendo quindi l'acquisizione della posizione di tutto ciò che si trova entro

un volume piramidale a base quadrata con vertice nello scanner.

I modelli panoramici, attualmente molto diffusi, si comportano, alla base, nello stesso modo, ma la movimentazione motorizzata del gruppo di misurazione permette di acquisire dati secondo un volume che risulterà dalla rotazione della piramide secondo uno o due assi. Il risultato, in questi casi, è un'acquisizione pressoché completa di tutto l'ambiente circostante, a meno, come è inevitabile, delle parti rimaste comprese negli spazi di occlusione.

Oltre al valore delle coordinate, tutti questi sistemi permettono inoltre di associare ad ogni singolo punto rilevato anche un valore di colore RGB o un tono di grigio, basato sulla valutazione della riflettanza dei diversi materiali



che compongono l'oggetto rilevato.

Sia che la tecnologia di acquisizione sia la classica *Time of Flight*, la *Phase Shift* o la FCMW con integrazione Radar, sia che il sistema permetta scansioni a campo fisso o riprese panoramiche, il processo di misurazione restituirà i punti rilevati sull'oggetto mirato con una velocità molto elevata e con una densità che potrà essere anche inferiore al centimetro, sia in orizzontale che in verticale.

Ne consegue che il modello digitale prodotto è una vera e propria nuvola di punti, geometricamente e cromaticamente distinti che permetterà, via software, una successiva elaborazione per la produzione di modelli tridimensionali di varia accuratezza, di sezioni e di rilievi eseguiti direttamente sul modello digitale tridimensionale dei punti.

Ogni scanner laser ha, ovviamente, una serie di limiti; questi sono dovuti in-

Fig. 42/43 - Scansioni del battistero di Pisa eseguite con lo scanner laser *Time Of Flight Cyrax 2500*. Attraverso il software di gestione della scansione è possibile visualizzare i punti sia secondo i falsi colori che come toni di grigio sulla base dei valori rilevati dallo scanner.

Fig. 44 - Porzione della scansione di uno dei capitelli delle colonne interne del battistero di Pisa; scansione eseguita con scanner laser *Time Of Flight Cyra Cyrax 2400*.

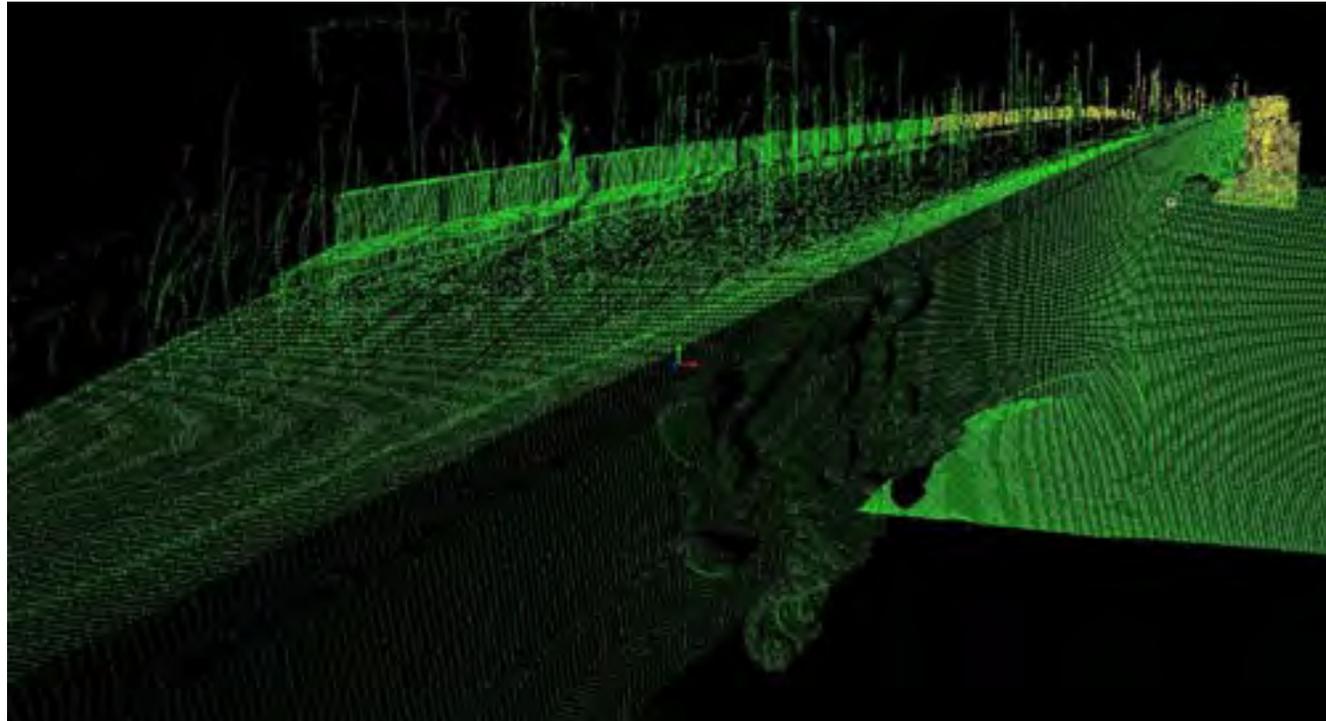


Fig. 45 - Scansione del Ponte Santa Trinita a Firenze, eseguita con scanner laser *Cyra Cyrax 2400*; le linee di punti verticali sono dovute al passaggio di veicoli e persone durante le operazioni di scansione.

Fig. 46 - Scansione della facciata del Duomo di Ferrara, eseguita dal NubLab con uno scanner laser *Cyra Cyra 2400*; veicoli parcheggiati e altri ostacoli creano ampi spazi di occlusione.

nanzitutto all'ampiezza dell'angolo di campo secondo cui il segnale laser può operare e dal fatto che per poter essere misurato, il punto deve essere raggiunto dal segnale, per cui, se un elemento transitorio (come un passante) oppure permanente (come una colonna) si trova sul percorso del segnale, questo misurerà esclusivamente la distanza sul primo elemento raggiunto, generando un vuoto per tutta l'area equivalente all'ombra proiettata dall'ostacolo secondo la sorgente del laser. In altre parole, come una sorgente di

luce posta di fronte ad un oggetto ne proietta l'ombra su tutto ciò che si trova dietro l'oggetto stesso, così questi sistemi di misurazione presentano spesso delle specie di ombre che all'atto pratico risultano essere parti non misurate del soggetto. Tecnicamente queste aree nulle sono dette "spazi di occlusione". Ne consegue che tra la limitatezza dell'angolo di campo dello scanner e gli spazi di occlusione, risulta sempre necessario eseguire un certo numero di scansioni sufficienti a coprire la

totalità del soggetto con una serie di prese che una volta ricomposte tra di loro daranno come risultato la completa nuvola di punti 3D, descrizione totale dell'oggetto rilevato.

La ricomposizione delle varie scansioni avviene successivamente, attraverso il software di gestione delle nuvole ed è basata su di una serie di punti noti, introdotti dal rilevatore, detti target, che dovranno quindi essere comuni tra due scansioni in un numero sufficiente e secondo una geometria tale da garantire una buona precisione di

⁴⁵ collimazione tra le diverse scansioni effettuate. L'elemento target è in genere una mira moderatamente riflettente piana oppure sferica, nel caso in cui la si debba utilizzare in una posizione di forte scorcio rispetto alla stazione di presa.

Gli scanner basati su tecnologia *Time of Flight* permettono quindi di acquisire con una certa rapidità modelli 3D di nuvole di punti rappresentanti scorci urbani, interni ed edifici monumentali, con una grande quantità di particolari; tuttavia questa tecnologia è soggetta, in maniera molto maggiore che per gli scanner basati su metodi trigonometrici e rispetto alle *Range Camera*, al fenomeno del rumore. In pratica, se si suppone che il margine di errore per ogni punto battuto si aggiri intorno al mezzo centimetro, e considerando che questo errore è possibile per ogni singolo punto rilevato e che questo potrà quindi essere posizionato secondo una sfera di diametro cinque millimetri attorno alla posizione presunta



corretta, allora si può verificare che a partire dal rilievo di una superficie piana, l'insieme dei punti risultanti non sia il luogo geometrico di quel piano, ma, al contrario, descriva una superficie irregolare e frastagliata, con una conseguente restituzione impropria dell'oggetto rilevato.

Se i software per la restituzione del rilievo offrono strumenti piuttosto efficaci per la riduzione del fenomeno del rumore, va detto che questi danno i risultati migliori nell'impiego con superfici piane, cilindriche o comunque omogenee per andamento, permettendo di semplificare la nuvola di punti affetta da un fenomeno di rumore troppo accentuato. Il discorso diventa tuttavia molto più difficile e complesso per la risoluzione delle nuvole di punti affette da questo errore che descrivono elementi scultorei, o parti di ornato, come capitelli, modanature e statue. In questo caso i software che normalmente sono abbinati ad uno scanner di questo genere



Fig. 48 - Scansione del Ponte Santa Trinita a Firenze, eseguita con scanner laser *Cyra Cyrax 2400*; posizionando il punto di vista del programma di visualizzazione ad una quota rialzata rispetto al posizionamento reale dello scanner, gli spazi di occlusione e gli elementi di disturbo risultano maggiormente evidenti.

offrono una possibilità di intervento limitata e comunque le tecnologie per intervenire in maniera efficace sono ad oggi ancora in fase di sviluppo¹⁴. Nel capitolo dedicato alla restituzione del rilievo, i metodi software per affrontare e cercare di risolvere questo problema saranno affrontati in forma più estesa; in questo contesto quello che deve essere preso in considerazione è come evitare o come ridurre il fenomeno del rumore nelle scansioni.

Infatti, la pianificazione del rilievo è la prima e fondamentale fase in cui,

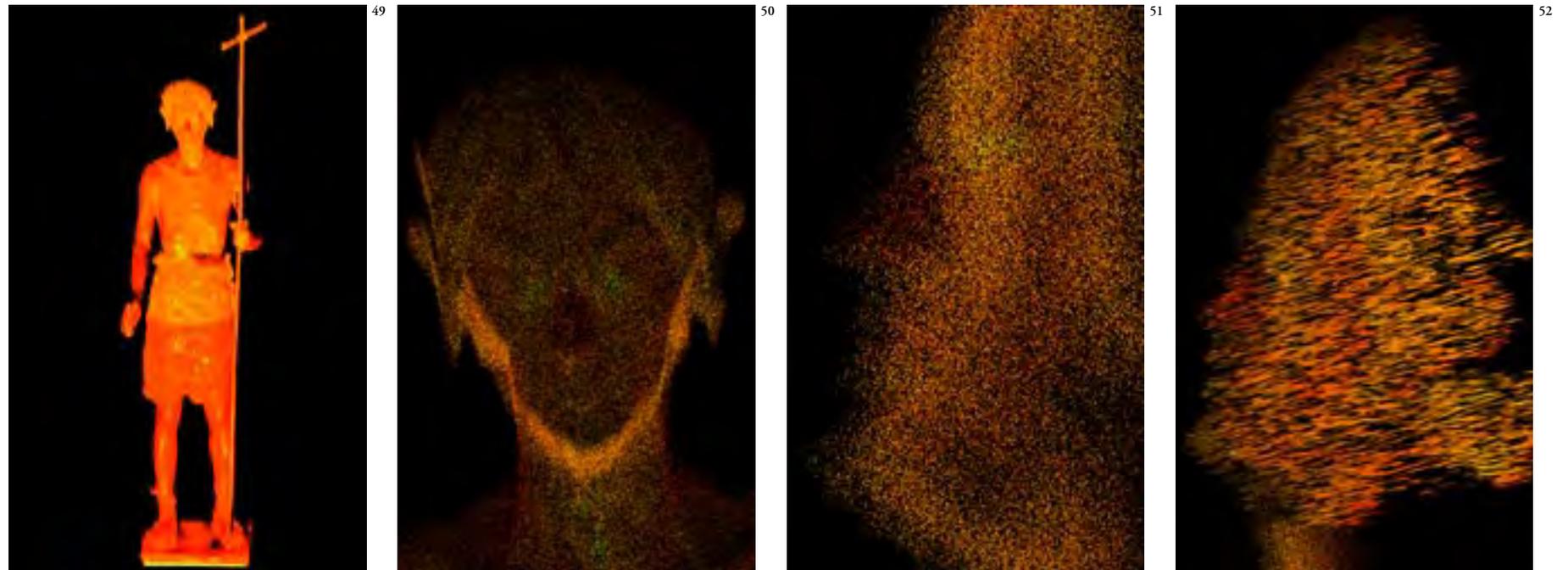
definendo le operazioni successive, si pongono le basi per evitare che errori propri delle apparecchiature vengano amplificati rendendo difficoltose le successive operazioni di gestione del dato rilevato.

Lo scanner dovrebbe essere utilizzato per cogliere misurazioni entro una distanza conforme alle specifiche tecniche dello scanner stesso; il fatto che, comunque, molti modelli di scanner *Time of Flight* colgano comunque punti a distanze anche molto superiori a quelle massime nominali, non signi-

fica che il dato raccolto possa essere considerato preciso allo stesso livello di quello raccolto entro il raggio di azione suggerito per quella apparecchiatura. Ovviamente, se non si ha modo di ripetere la misurazione delle parti poste a maggior distanza in altro modo, si potrà procedere comunque alla misurazione, spingendo lo strumento oltre i propri limiti, consci però del fatto che una parte del dato restituito sarà soggetto ad un margine di errore superiore a quello stimato e previsto per la parte compresa entro la distanza di

Fig. 49 - Dettaglio di una scansione della facciata del Duomo di Ferrara, eseguita dal NubLab con uno scanner laser *Cyra Cyra 2400*; elementi scultorei non raggiungibili se non con ponteggi e scale possono essere rilevati con grande facilità, ma il fenomeno del "rumore" deve essere contenuto, pena l'impossibilità di utilizzare la scansione.





Figg. 49/51 - La statua di San Giovanni Battista posta al centro del fonte battesimale del battistero di Pisa, scansione eseguita con scanner laser *Cyrax Cyra 2500*, forzando l'impiego di una maglia di scansione di un millimetro per un millimetro.

Questo scansione, eseguita a solo scopo dimostrativo del fenomeno del "rumore" pur presentando, apparentemente, un livello di dettaglio elevato, non è in realtà utilizzabile.

Fig. 52 - Superficie *Mesh* generata con procedura automatica a partire dalla scansione della statua di San Giovanni Battista, il risultato è incoerente e la superficie "frantumata" in centinaia di frammenti.

Con nessuna delle procedure di restituzione testate è stato possibile restituire un modello impiegabile.

lavoro convenzionale.

Quindi se lo scanner *Time of Flight* che si sta utilizzando ha una distanza massima di lavoro supponiamo di cinquanta metri, le parti dell'edificio poste ad una distanza superiore potranno, essere anche rilevate, ma l'affidabilità delle misure eseguite in quelle parti sarà decisamente inferiore e l'operatore si comporterebbe in maniera scorretta se ne garantisce la qualità rispetto alla loro reale possibilità di impiego.

Ugualmente errato è procedere alla copertura di tutte le parti di un ambiente complesso aspettandosi di poter

utilizzare in maniera efficace anche le prese di scorcio di elementi entrati nella ripresa marginalmente; in altre parole, se per esempio nell'area della scansione insiste una statua o una colonna, per questa deve essere prevista una serie di scansioni che la avranno come soggetto principale; non si può pretendere che questa venga restituita per risulta di frammenti colti da altre scansioni eseguite su altre parti del complesso.

Ogni scanner presenta una propria griglia minima di presa dei punti, un centimetro, due centimetri, mezzo

centimetro, a seconda dei modelli, il software attraverso cui si eseguono le scansioni permette di impostare questa griglia, e, in alcuni casi, permette di settare valori inferiori al valore minimo di passo della griglia e, quindi di ottenere scansioni anche ogni millimetro. Inoltre, è possibile settare i parametri di distanza in maniera volutamente erronea, in modo da forzare lo scanner ad eseguire la scansione con un interesse di griglia superiore a quello impostato. Con questi accorgimenti avremmo prodotto scansioni con distanza tra i punti di tre, due, un millimetro, che

all'apparenza potranno anche sembrare dettagliatissime e accurate, ma inutilizzabili ai fini dell'elaborazione del modello, in virtù del rumore prodotto che sarà tale da rendere impossibile la generazione di superfici coerenti a partire da questo genere di dati.

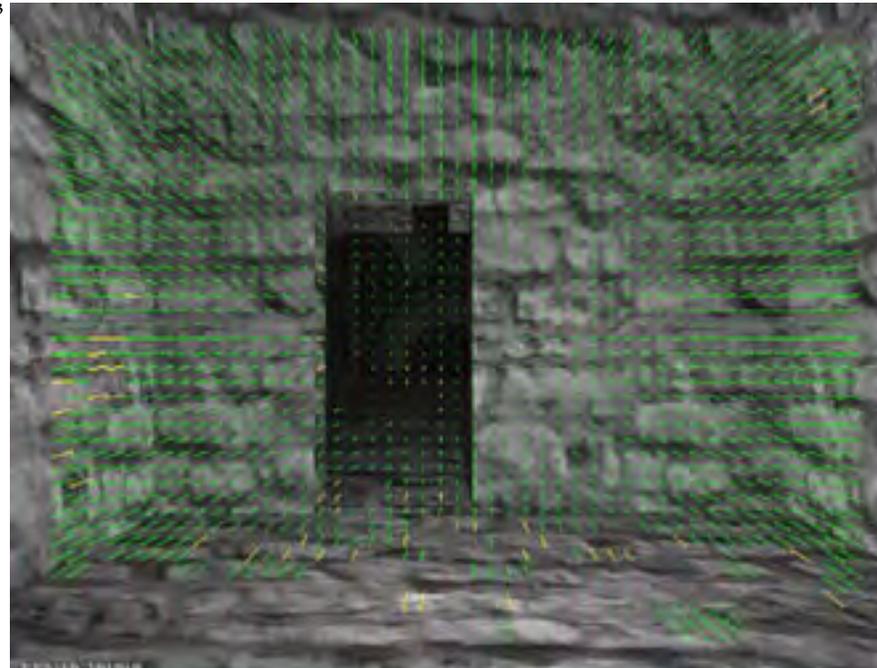
È perciò inutile e controproducente eseguire operazioni di questo genere, che inducono un aumento elevato dei tempi di scansione senza produrre risultati in alcun modo impiegabili.

Infine, è sempre buona norma verificare progressivamente il lavoro che si sta svolgendo, specie nel caso in cui si stia

rilevando un edificio o un complesso molto articolato, in maniera tale da evitare che il lavoro condotto risulti successivamente manchevole di parti o eccessivamente campionato in altre; benché raramente sia possibile pianificare le procedure di rilevamento in modo tale da poter eseguire le operazioni di ricomposizione delle singole scansioni contemporaneamente alle operazioni di rilievo, si deve comunque prevedere nella pianificazione della campagna di misurazione, una serie di fasi di verifica e accertamento del lavoro eseguito in modo da ottimizzare il lavoro nella sua stessa fase di svolgimento e perfezionare continuamente il progetto di rilievo.

Range camera

Una range camera è uno strumento di scansione a distanza, in alcuni modelli molto simile ad uno scanner laser a triangolazione attiva. La range camera si differenzia dagli scanner laser a *triangolazione attiva* e *Lightstripe* per il semplice fatto che nel sistema di misurazione non viene utilizzato alcun laser per le funzioni di misurazione. Esistono due principali famiglie di range camera, quelle che utilizzano un *metodo passivo* di misurazione e quelle che invece impiegano un *metodo attivo* di misurazione.



Al primo gruppo appartengono un insieme di strumentazioni che basano le proprie procedure di misurazione, secondo formule geometriche, sulla semplice lettura dell'immagine, o sul confronto di differenze basate su piccole variazioni di una serie di immagini; questi strumenti utilizzano prevalentemente il metodo del confronto stereoscopico, della messa fuoco a misurazione di contrasto, dell'*Optical Flow* (Flusso Ottico) per cercare di misurare ogni pixel componente l'immagine digitale acquisita, in pratica la "passività" della strumentazione

consiste nella sua non influenza sulle caratteristiche dell'immagine acquisita.

Al gruppo delle range camera attive, appartengono invece quelle strumentazioni che proiettando un proprio segnale luminoso, alterano le caratteristiche dell'immagine acquisita e basano la propria misurazione sulle modalità di questa alterazione. I sistemi più diffusi di questo genere sono il sistema a *misurazione dell'intensità luminosa del segnale riflesso* e i sistemi a *luce strutturata*.

Di tutta la famiglia delle range camera,

la tecnologia maggiormente utilizzata e capace di dare risultati pratici efficaci e confrontabili per qualità e ricchezza di informazioni con i sistemi laser a corto raggio, risulta essere quella basata su luce strutturata.

La struttura tipica di una *range camera* a luce strutturata è composta da una solida barra di alluminio su cui sono montati una telecamera con un *CCD* capace di restituire un'immagine di buona qualità¹⁵ e un proiettore a cristalli liquidi, il tutto montato su un robusto cavalletto di tipo fotografico. Le due periferiche sono collegate e controllate direttamente da un computer che attraverso un software specifico permette l'esecuzione della scansione. Esistono inoltre sistemi di maggior ingegnerizzazione, che presentano l'insieme di proiettore più telecamera racchiusi entro una carrozzeria che serve a proteggere le componenti e a dare una maggiore ergonomia alla strumentazione.

Alla stessa maniera, esistono range camera di questo genere con più di un *CCD* di misurazione, in maniera tale da aumentare la qualità e la velocità di produzione del modello digitale tridimensionale.

La scansione avviene in maniera molto semplice e rapida, dopo aver posizionato l'apparecchiatura a una breve distanza dall'oggetto di cui si

Fig. 53 - Graficizzazione del processo di misurazione con tecnologia *Optical Flow*; durante lo spostamento di una telecamera secondo una direzione nota, lo spostamento di ogni singolo *pixel* viene registrato e sulla base del suo spostamento viene calcolata la sua posizione nello spazio.



⁵⁴ per se porta alla creazione di un modello tridimensionale digitale, è lungi dal rappresentare la completezza dell'oggetto ripreso; è quindi necessario eseguire più riprese in modo da comporre un mosaico di porzioni tali da costituire alla fine l'intero oggetto. Mano a mano che il processo di acquisizione prosegue, le varie parti vengono allineate e fatte collimare, con l'ausilio di un software specifico per gestire le scansioni per porzioni e il confronto tra modelli tridimensionali digitali. Da ultimo, una volta che tutte le prese sono state eseguite, un raffinato processo di calcolo eseguito dal software permetterà di estrapolare un unico modello, ottimizzato nelle parti sovrapposte e unito in un unico oggetto tanto più definito tanto più numerose e ravvicinate all'oggetto rilevato sono state le singole scansioni effettuate.

vuole ottenere la scansione, si procede ad avviare il processo di proiezione/acquisizione, che comporta l'illuminazione dell'oggetto con una serie pattern di barre verticali di dimensioni note, la ripresa della telecamera viene acquisita attraverso il computer per tutta la durata della proiezione. L'intero processo dura, in genere attorno ai due secondi.

L'immagine della telecamera, derivando e presentando una serie di elementi di misura nota, può essere convertita in un modello tridimensionale dove ogni pixel componente l'immagine ripresa può essere posizionato nello spazio digitale in maniera analoga alla posizione di quella stessa piccola porzione dell'oggetto reale.

La singola scansione, anche se già di

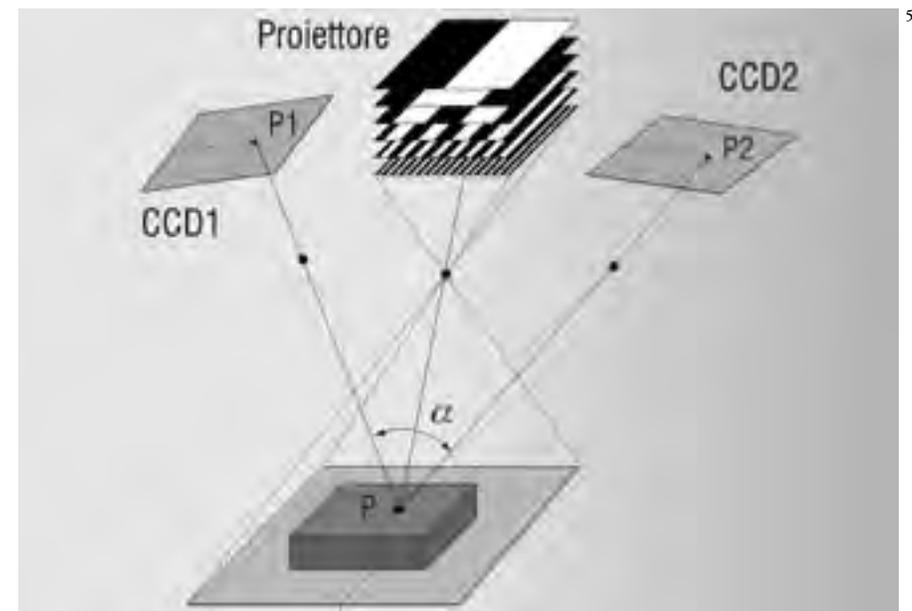


Fig. 54 - La range camera Atos II, prodotta dalla Gom, ha la particolarità di presentare due sensori CCD posti simmetricamente rispetto al proiettore di pattern.

Fig. 55 - La range camera Atos II in fase di scansione, il modello acquisito, un prototipo in scala 1:1, presenta un insieme di target necessari per la referenziazione delle singole prese.

Fig. 56 - Schema del funzionamento del processo di misurazione utilizzato nella range camera Atos II.



utilizzata su strutture non pienamente stabili, come scalei, impalcature, ponteggi, stativi e simili, a patto che queste possano garantire per pochi secondi l'immobilità della strumentazione.

Di contro si tratta di una strumentazione che presenta dei sensibili limiti di impiego, dovuti essenzialmente a due fattori, il primo legato al fatto che la telecamera deve essere in grado di poter distinguere chiaramente il pattern proiettato. Il che significa che se l'illuminazione dell'ambiente è troppo elevata il pattern risulterà

labile o invisibile e quindi non sarà possibile eseguire alcuna misurazione; il secondo elemento limitante è dovuto alla dimensione massima dell'area misurabile che, a prescindere dalla qualità della strumentazione impiegata, influirà comunque sul risultato. Infatti, poiché la misurazione è eseguita per ogni singolo pixel acquisito, se questo nell'immagine corrisponderà per dimensione ad un'area di un millimetro per un millimetro si otterrà un certo tipo di risultato, se invece questo dovesse corrispondere ad un'area di un

centimetro per un centimetro, è ovvio che il livello qualitativo del risultato sarà molto differente. Essendo quindi la qualità della scansione direttamente dipendente dalla dimensione del pixel e quindi dalla distanza tra l'area ripresa e la telecamera, diventa inevitabile dover porre la strumentazione molto ravvicinata all'oggetto rilevato, raramente a più di un metro di distanza, per poter ottenere misurazioni efficaci.

Questi due fattori impongono quindi un impiego in studio o comunque in situazioni ben controllate. Nel caso

della misurazione in esterni, a meno di condizioni particolarmente favorevoli, questa dovrà essere condotta esclusivamente con il buio, di notte, per evitare che la luce solare impedisca l'esecuzione della scansione.

La tecnologia delle *range camera* attive a luce strutturata ha portato anche allo sviluppo di un sistema, "ibrido" tra queste e gli scanner laser, ovvero una particolare strumentazione dove al posto di un proiettore a cristalli liquidi viene impiegato un proiettore a luce laser. Il sistema di misurazione rimane



Figg. 57/64 - Esperienza svolta con il seminario del corso di Disegno Automatico "Il rilievo di oggetti 3D complessi: la Vespa", nell'ambito del quale alcune parti di una Vespa della Piaggio sono state digitalizzate con una *Range Camera*. Le operazioni si sono tenute presso il Laboratorio di Optoelettronica della Facoltà di Ingegneria di Firenze, sotto la supervisione dell'Ing. Gabriele Guidi. Nella sequenza delle immagini, la ripresa del parafrangente del veicolo e la nuvola di punti ottenuta.

invariato, ma la maggiore intensità ed efficacia del laser rende più versatile il sistema.

Note

¹ Maggiori informazioni sulla linea dei prodotti *Microscribe* possono essere reperiti in Internet all'indirizzo www.immersion.com.

² Maggiori informazioni sulla linea dei prodotti *Faro* possono essere reperiti in Internet all'indirizzo www.faro.com.

³ Un recente modello sviluppato dalla ditta inglese *3Dscanner* riesce a raggiungere una performance di acquisizione di 23.000 punti al secondo, un valore elevato anche per sistemi tecnologicamente più veloci, dovuto essenzialmente all'impiego di un set multiplo di sensori *CCD*, ben tre, per la ricezione del segnale del laser.

⁴ Il sito Internet ufficiale del progetto è <http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>, data la notorietà di questo lavoro, il tema è stato ampiamente trattato

su numerose pubblicazioni sia edite in sola forma digitale che cartacee.

⁵ Le scansioni sono state eseguite nell'arco di quattro settimane a partire dalla metà di febbraio.

⁶ Il progetto della Stanford University, condotto dal professor Marc Levoy, non si è comunque limitato alla scansione del David, che resta, semplicemente, l'operazione di massima rilevanza del gruppo di lavoro, infatti il gruppo di lavoro ha operato per oltre un anno sul territorio Italiano eseguendo il rilievo tramite scansione laser di numerose opere di Michelangelo e di alcune sculture minori. Maggiori informazioni sull'attività della Stanford University in Italia possono essere raccolte dal sito Internet <http://graphics.stanford.firenze.it/>.

⁷ Si tratta di una ditta americana di Monterey, California, specializzata nella produzione di scanner a corto raggio. Maggiori informazioni sulla strumentazione utilizzata possono essere reperiti sul sito Internet della *Cyberware*: www.cyberware.com

⁸ I "numeri" del rilievo eseguito sono a tutt'oggi impressionanti: 480 scansioni eseguite, due miliardi di punti rilevati, settemila immagini referenziate, trentadue gigabyte di dati memorizzati, gruppo di lavoro di 22 persone, 3500 ore di lavoro (scansioni, elaborazioni, sviluppo).

⁹ Oltre allo scanner della *Cyberware*

sono stati utilizzati, per le parti più difficili da raggiungere, anche un pantografo digitale *Faro Arm*, e uno scanner con sistema *Lightstripe* della *3Dscanner*.

¹⁰ Oltre al problema di spazi di occlusione dalla forma difficilmente controllabile, questo modello di scanner ha una distanza tra laser e *CCD* molto elevata, il che comporta l'aumento della distanza minima operativa e nel caso si voglia evitare la produzione di spazi di occlusione dovuti a rientranze o forature.

¹¹ La sovrapposizione non è da considerarsi in alcun modo riduttiva della qualità del rilievo eseguito, tuttavia un'ottimizzazione della copertura dell'oggetto rilevato deve sempre essere ricercata, pena un forte aumento dei tempi di scansione e un notevole aumento dei tempi di elaborazione successiva e del peso complessivo del progetto.

¹² Si tenga inoltre conto del fatto che nel caso di macchine basate su piattaforma rotante può risultare difficile, nel caso di oggetti molto complessi, riuscire a risolvere alcuni problemi legati alle occlusioni dovute a fori o fessure dell'oggetto rilevato.

¹³ La *Metric Vision* è una ditta statunitense con sede a Newington VA, maggiori informazioni circa la ditta e lo scanner *MV200* possono

essere reperite presso il sito Internet www.metricvision.com. Si tenga presente che le strumentazioni *Metric Vision* sono distribuite in Europa sotto il marchio *Leica Geosystem*, e che il modello in questione è stato rinominato *LR200*.

¹⁴ In particolare, sull'applicazione dei processi basati su *Radial Basis Function* (RBF) si veda: J. C. Carr, R. K. Beaton, B. C. McCallum, W. R. Fright, T. J. McLennan, T. J. Mitchell, *Smooth surface reconstruction from noisy range data*, Applied Research Associates, Christchurch, New Zealand e Dept. Mathematics and Statistics, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003

¹⁵ La telecamera in uso può essere analogica oppure digitale, indifferentemente, tuttavia si tenga conto che nel caso di telecamera analogica, sarà necessario che il computer utilizzato per le operazioni disponga di una scheda di acquisizione video da segnale analogico di una qualità sufficiente a non compromettere la qualità delle immagini riprese. Se invece si impiega una telecamera digitale, il problema della qualità del trasferimento delle immagini diventa assolutamente secondario in quanto basandosi sulla lettura diretta del dato raccolto dalla telecamera dipende direttamente da questa per la bontà del risultato ottenuto.

Il sistema di rilievo adottato

La struttura data a questo intervento di rilievo è stata improntata secondo un modello che, nelle intenzioni del gruppo di ricerca, doveva avere delle fasi di misurazione tali da coprire un tempo contenuto e, soprattutto, essere conciliabili con i tempi che la continua frequentazione turistica del battistero imponeva.

Di conseguenza il progetto di rilievo è stato così strutturato: un intervento oneroso sia in termini economici che di risorse umane con i sistemi laser *Cyra*, inteso a coprire tutti gli interni, e tutti gli esterni del monumento, con una risoluzione di inquadramento secondo una maglia di cinque centimetri e con successivi raffittimenti, la dove ritenuto necessario, di un centimetro o di due centimetri. Per accelerare i tempi di scansione si poteva contare sull'impiego simultaneo di due scanner laser *Cyra*, un *Cyrax 2400* ed un più recente *Cyrax 2500*, tutti e due con capacità di presa fissa secondo un cono ottico di circa quaranta gradi di campo. Successivamente, per ridurre i tempi di scansione del sistema delle volte della copertura, si è ricorsi all'adozione di uno scanner panoramico *Mensi*, il *GS-100*, che ha permesso di coprire tutti gli ambienti, alquanto frammentati con un numero contenuto di stazio-

ni e con un tempo di rilievo molto ridotto.

Poiché le scansioni delle rampe di scale risultavano molto difficoltose, in virtù della ristrettezza del vano e della continua frequentazione turistica a cui è soggetto il battistero, si è preferito adottare, per questa parte, il rilievo manuale tradizionale, grazie ad una squadra che, operando di notte, è riuscita a concludere le operazioni di misurazione con buona velocità senza richiedere la sospensione dell'accesso al monumento da parte dei numerosi visitatori.

Come raccordo e valida base di riferimento per ogni parte del rilievo, sia laser che tradizionale, è stato eseguito un completo rilievo topografico, attuato con stazione totale, e progettato in maniera funzionale all'intervento degli scanner, tale da garantire la corretta messa in relazione di tutte le acquisizioni dati effettuate.

Per completare gli interventi veri e propri di misurazione è stata eseguita anche una completa campagna fotografica e video tesa a documentare sia l'architettura, come supporto per la sua successiva restituzione, sia le operazioni di rilevamento stesse. La documentazione fotografica è stata eseguita in buona parte con apparecchi digitali¹, per poter verificare quanto fotografato subito dopo lo scatto e, in numerosi

Figg. 1/2 - Gli scanner laser *Cyrax 2400* e *2500* durante le fasi di scansione del battistero di Pisa.



casi, potersene servire per la redazione immediata di eidotipi o di monografie del rilievo topografico. Le riprese fotografiche digitali sono state utilizzate sia in modalità standard classica, che per la produzione di mosaicature, finalizzate alla produzione di immagini di effetto o di documentazione particolarmente efficaci dal punto di vista grafico². Anche le riprese video eseguite³ sono state di valido supporto alle successive operazioni di restituzione; in particolar modo le riprese delle scale, che hanno permesso di produrre un'immagine



3



5



4

Fig. 3 - Lo scanner laser *Mensi GS-100*, utilizzato per le scansioni degli spazi tra l'estradosso della cupola e l'intradosso della volta.

Fig. 4 - Schematizzazione della suddivisione degli interventi di rilievo secondo strumenti e metodi adottati.

Fig. 5 - Lo scanner *Mensi GS-100* durante le fasi di scansione del sistema delle volte di copertura.

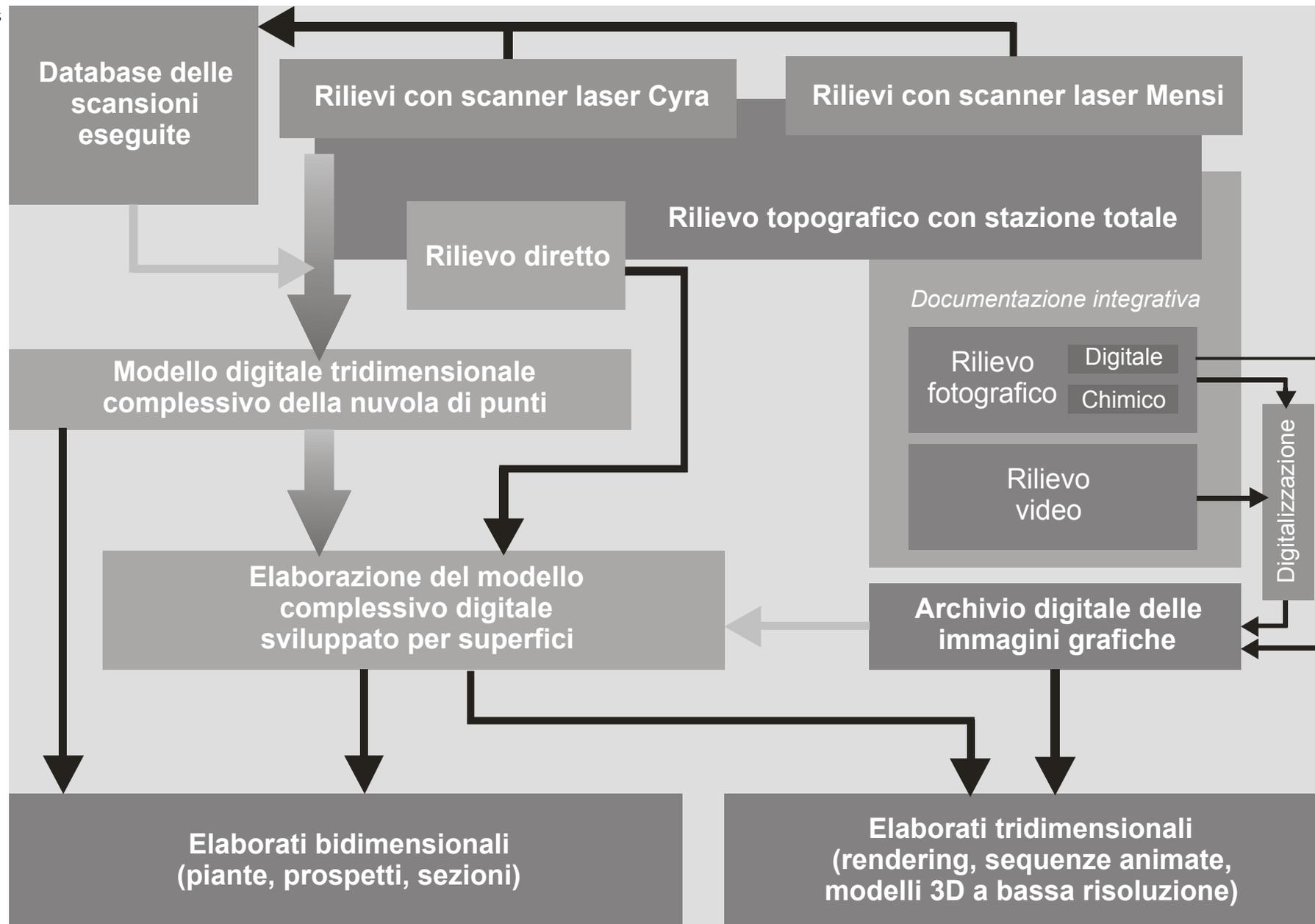
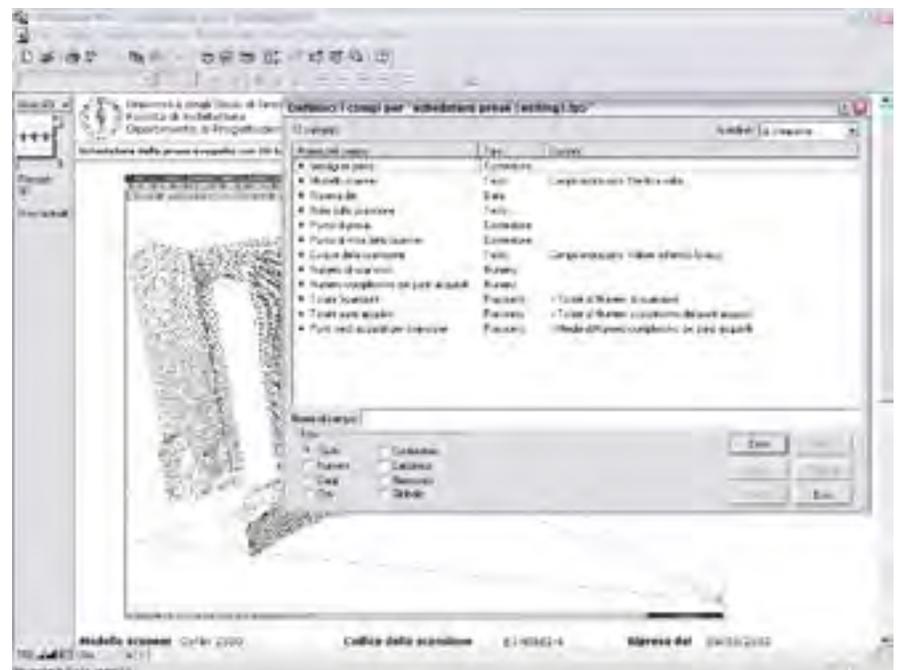


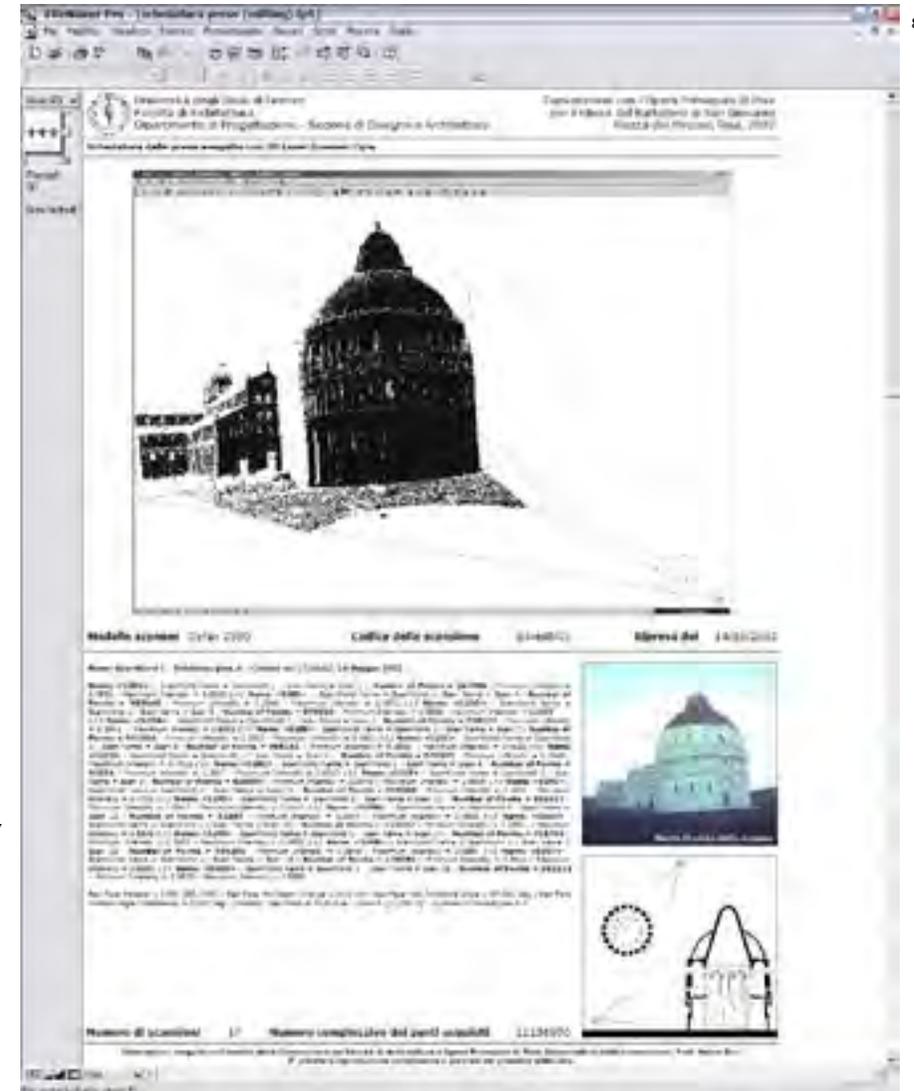
Fig. 6 - Organigramma complessivo delle operazioni di rilievo e di restituzione per il battistero di Pisa.

dinamica e completa di ogni rampa, corredata di tutte le immagini relative alle singole aperture che da questa affacciano all'esterno o all'interno del monumento. Tutti i filmati eseguiti sono stati in seguito digitalizzati⁴ e archiviati in una forma che conciliasse un buon rapporto qualità/dimensione del filmato⁵ con una valida possibilità di distribuzione⁶. La soluzione di trasferire in forma digitale i filmati oltre a permetterne una facile duplicabilità, ha consentito di trasferire l'elaborato su un tipo di supporto che lo rende non soggetto a decadimento, cosa che

si verificherebbe se il filmato restasse su nastro magnetico, ed ha permesso di mantenere inalterato il livello qualitativo delle riprese anche dopo un numero elevato di visualizzazioni; inoltre, la modalità propria della visualizzazione del filmato digitale, consente di individuare rapidamente all'interno di filmati anche piuttosto lunghi le sequenze di interesse. Altro fattore di interesse nell'utilizzo di questa procedura è la possibilità, offerta dai sistemi cosiddetti di "cattura video" di eseguire la registrazione in forma non dinamica del filmato, ov-

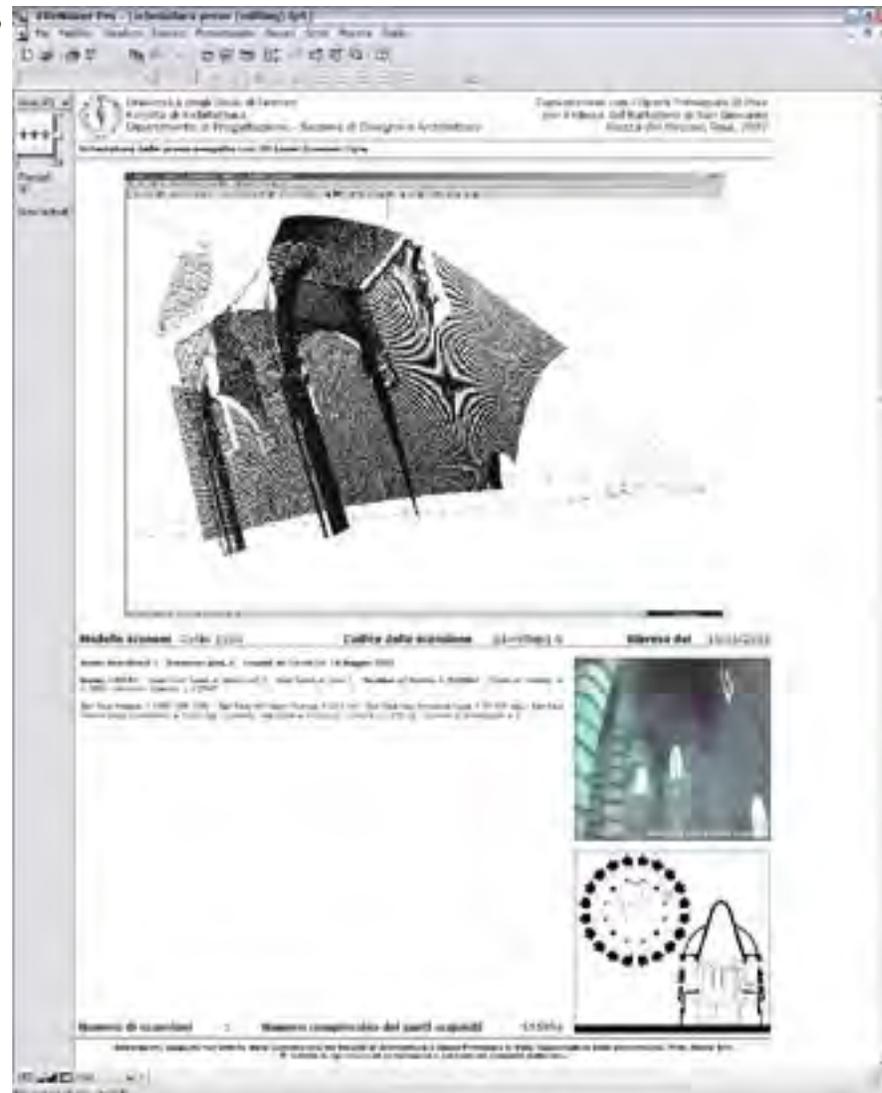


Figg. 7/8 - Il *database* approntato per la schedatura delle singole scansioni: la definizione dei campi per la scheda tipo e l'interfaccia per la consultazione dei dati e la visualizzazione.



vero di campionare singole immagini con un determinato intervallo. Questa soluzione, benché non permetta di ottenere immagini di alta qualità⁷, consente tuttavia di ottenere sequenze interessanti, sia allo scopo di documentazione e di estrazione di dettagli dal filmato, sia per la realizzazione di immagini di tipo panoramico. Un utilizzo di questa documentazione fotografica

a bassa risoluzione può essere molto utile nelle fasi di restituzione seguenti a quelle di acquisizione dei dati. Avere la possibilità di indicare punti di appoggio o particolarità emerse nel corso del rilievo individuandoli su fotografie, la cui risoluzione anche se non eccessiva permette una discreta visibilità dei particolari a schermo, risulta di notevole utilità per le fasi di restituzione. Si ha



così una vera e propria integrazione dei dati del rilievo; per cui, in fase di elaborazione, le informazioni acquisite mediante diversi tipi di procedure, che in mancanza di una accurata gestione nell'organizzazione dei dati potrebbero essere poco intelligibili, specialmente per personale che non ha direttamente eseguito il lavoro sul campo, possono trovare una ricucitura sia a livello

della loro reale utilità in relazione agli scopi del rilievo sia in relazione alla possibilità di un riscontro immediato della porzione di oggetto a cui si riferiscono.

Un ulteriore ambito di indagine si è aperto una volta completate le operazioni di rilievo con lo scanner laser, con metodi topografici e diretti. Infatti le operazioni eseguite hanno prodotto

una imponente mole di dati digitali e una modesta quantità di basi cartacee, che ha richiesto il ricorso a particolari soluzioni per la gestione e il trattamento dei dati acquisiti.

È risultato subito evidente che l'insieme di tutte le scansioni eseguite, ammontando ad oltre trecento scansioni concentrate in circa ottanta punti di ripresa, avrebbero portato una quantità di dati notevoli. Era necessaria una pianificazione che non poteva limitarsi ad una archiviazione semplicemente ottenuta mediante una operazione di copiatura dei dati

su CD-Rom. Si è così ritenuto necessario organizzare una forma rapida di schedatura e ordinamento del lavoro condotto, al fine da rendere più semplice e trasmissibile a terzi il senso e la completezza di quanto eseguito.

La soluzione scelta è stata quella di realizzare un database delle scansioni eseguite⁸, basato su una scheda dalla struttura piuttosto semplice, ma completa nelle informazioni essenziali per l'identificazione della singola scansione e delle sue caratteristiche. In questa maniera, si è proceduto ad attribuire un codice identificativo ad ogni scansione

	Data di scansione	Codice scansione	Punto di ripresa	Punto di vista	Gruppo dati	Descrizione	Materiale
1	01-01-2000	01-01-01	01-01-01	01-01-01	01-01-01	01-01-01	01-01-01
2	01-01-2000	01-01-02	01-01-02	01-01-02	01-01-02	01-01-02	01-01-02
3	01-01-2000	01-01-03	01-01-03	01-01-03	01-01-03	01-01-03	01-01-03
4	01-01-2000	01-01-04	01-01-04	01-01-04	01-01-04	01-01-04	01-01-04
5	01-01-2000	01-01-05	01-01-05	01-01-05	01-01-05	01-01-05	01-01-05
6	01-01-2000	01-01-06	01-01-06	01-01-06	01-01-06	01-01-06	01-01-06
7	01-01-2000	01-01-07	01-01-07	01-01-07	01-01-07	01-01-07	01-01-07
8	01-01-2000	01-01-08	01-01-08	01-01-08	01-01-08	01-01-08	01-01-08
9	01-01-2000	01-01-09	01-01-09	01-01-09	01-01-09	01-01-09	01-01-09
10	01-01-2000	01-01-10	01-01-10	01-01-10	01-01-10	01-01-10	01-01-10

Figg. 9/10 - Il database approntato per la schedatura delle singole scansioni: una scheda tipo e la visualizzazione in modalità elenco di tutte le schede.

e a sviluppare una scheda tipo che oltre al codice attribuito, contenesse: uno screenshot della scansione aperta nel programma di gestione dello scanner; l'immagine archiviata con la scansione e rappresentante il punto di vista dello scanner; uno schema grafico rappresentante il posizionamento in pianta e in alzato dello scanner per quella specifica scansione; il tipo di scanner utilizzato; il numero di punti contenuti in quella scansione; il numero complessivo di scansioni eseguite secondo quel punto di vista; un estratto testuale direttamente ottenuto dal software di gestione delle scansioni per corredare la scheda di un volume significativo di informazioni utili alla comprensione delle caratteristiche della scansione stessa senza la necessità di trascrivere un numero elevato di valori⁹.

Tra i pochi accessori concessi nella redazione di questo archivio essenziale, un campo "calcolatore", che tenesse conto del numero complessivo dei punti di tutte le scansioni inserite nel database, in modo da sapere, prima ancora di avere eseguito la completa integrazione di tutte le scansioni tra di loro, che il numero totale dei punti presi ammontava a poco più di centosettanta milioni (centocinquanta milioni acquisiti con gli scanner *Cyra* e circa venti milioni acquisiti con lo scanner *Mensi*).

Note

¹ Essenzialmente è stata impiegata una fotocamera *Fuji 6900z* con sensore a 3,3 *Megapixel*, con ottica zoom equivalente ad un 35-210 mm nel formato 35 mm. Ad integrazione, dove necessario è stata inoltre impiegata una fotocamera standard *Nikon FE-2* con ottica 17 mm e una fotocamera panoramica *Horizon* con 120 gradi di campo su pellicola 35 mm.

² Al fine di produrre mosaicature di buona qualità è risultato particolarmente efficace il software, specifico per questo tipo di applicazione, *Stitcher 3.1*, prodotto dalla *Realviz*.

³ La telecamera impiegata, una comune *Handycam Sony in standard Video-8* è risultata particolarmente versatile soprattutto per la capacità di eseguire riprese in condizioni di luce scarsissima, permettendo, se necessario, la ripresa anche in condizioni di buio quasi totale grazie alle funzioni di intensificazione luminosa e alla lampada da ripresa incorporata.

⁴ La digitalizzazione del filmato è avvenuta con una scheda di acquisizione video *ATI All-In-Wonder 128 pro*, la procedura di acquisizione video è stata eseguita da prima ad alta qualità, successivamente i filmati sono stati ricompresi per permetterne l'archivia-

zione anche su supporto CD-Rom.

⁵ I filmati digitali, per poter garantire fluidità di movimento, devono permettere un flusso di dati costante, questo si può ottenere, anche su computer di elevate prestazioni, attraverso una forte compressione dei dati, compressione che, in questo caso, non potrà essere altro che distruttiva. Di conseguenza, con l'indice qualità/dimensione si indica un valore che mette in relazione la qualità evidente di quanto si sta visualizzando con la quantità di dati che devono essere archiviati per poter descrivere ogni singolo fotogramma del filmato.

⁶ I formati di compressione del filmato sono detti *CODEC*, quelli di tipo più evoluto non è mai né standard né universalmente compatibili, quindi si deve sempre avere cura di sceglierne uno di buona diffusione e di facile installazione (nel caso lo si volesse allegare al CD-Rom contenente il filmato che ci si appresta a distribuire). Nel Caso delle riprese eseguite per il battistero di Pisa il *CODEC* adottato è stato l'*MPEG-4*, per il formato *AVI*, nella versione nota come *DivX 4.12*, questo *CODEC*, oltre ad essere gratuito sia per la visualizzazione che per la produzione dei filmati, offre delle prestazioni nel rapporto qualità/dimensione eccezionali, permettendo di archiviare lunghe sequenze video in quantità di dati con

ingombro inferiore a quello offerto da un CD-Rom.

⁷ La risoluzione massima in genere corrisponde a quella del sistema *PAL* (lo standard di trasmissione televisiva europeo) ovvero 512 per 768 pixel a 24 bit di profondità colore. Inoltre il segnale registrato dalla telecamera è interallacciato, per cui si rende necessario l'elaborazione di tutti i fotogrammi acquisiti con un programma di elaborazione delle immagini che permetta la rimozione dell'effetto di interallacciatura, che pur rendendo le immagini più gradevoli alla vista introduce comunque una leggera perdita di nitidezza dell'immagine.

⁸ Per la redazione del database è stato impiegato il software *File Maker Pro 5.03*.

⁹ Infatti, con questa procedura è stato sufficiente predisporre un campo testuale abbastanza ampio nella scheda tipo e quindi eseguire una semplice operazione di copia-incolla testuale tra l'applicazione di gestione delle scansioni e il programma di database.

Rilievi strumentali con scanner laser

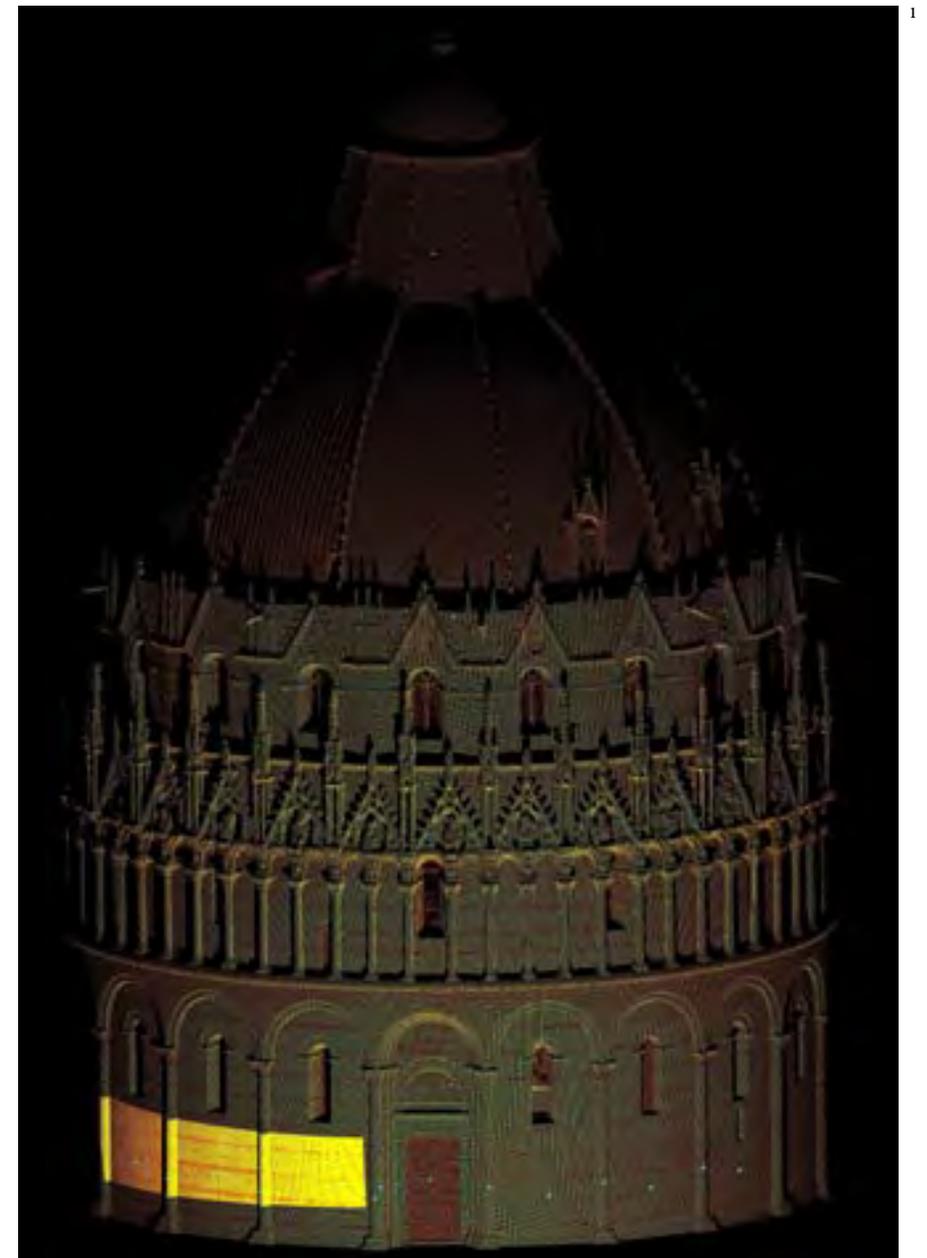
Il progetto di rilievo prevedeva che la maggior parte delle misurazioni sarebbero state effettuate con scanner laser, e così è stato; in virtù delle dimensioni complessive, del volume di dati trattato e dell'interesse prevalentemente rivolto agli aspetti architettonici dell'edificio, la tecnologia utilizzata è stata esclusivamente quella degli scanner *Time Of Flight Cyrax* e *Mensi*. In un primo momento era stata anche ipotizzata la possibilità di impiegare uno scanner con tecnologia *Lightstripe* per integrare le parti scultoree con un rilievo di maggior accuratezza¹, tuttavia, questa eventualità è stata accantonata, essenzialmente per motivi di coerenza, in quanto secondo il progetto stabilito le parti scultoree rilevabili con questo metodo integrativo sarebbero potute essere solamente quelle raggiungibili direttamente senza bisogno di impalcature, per cui il rilievo aggiuntivo si sarebbe limitato al fonte battesimale, ad una parte del pulpito, alle lapidi e alle statue, portando un aggravio significativo nei tempi e nelle modalità di restituzione, ed introducendo sostanzialmente un'operazione aggiuntiva non richiesta rispetto ai termini prestabiliti della convenzione.

La strumentazione impiegata è stata

quindi composta da due scanner *Cyra*, un modello *Cyrax 2400* ed un più recente *Cyrax 2500*, tra loro differenti per il livello di prestazioni, inteso prevalentemente nel senso della velocità di scansione e della massima distanza operativa a parità di accuratezza del risultato. Successivamente è stato impiegato anche uno scanner *Mensi GS-100* con funzioni panoramiche.

Il progetto è stato sviluppato tenendo conto delle prerogative offerte dalle strumentazioni in uso, il che ha significato, per le parti acquisite tramite scanner *Cyra*, un raggio operativo massimo di cinquanta metri, un angolo di ripresa, per ogni scansione, di quaranta gradi e una densità massima della nuvola di punti di un centimetro per un centimetro. Benché queste condizioni risultassero più che soddisfacenti per la copertura totale dell'edificio, le misurazioni eseguite, specie per gli esterni sono state tali da richiedere, in alcuni casi, di spingere lo scanner oltre i cinquanta metri di portata, con un conseguente decadimento dell'affidabilità della misurazione eseguita, questa condizione, tuttavia, per l'ordine di errore previsto e per le caratteristiche di quanto misurato, è stata ritenuta accettabile e, a tutti gli effetti, la sua incidenza sulla correttezza del rilievo è risultata secondaria, infatti le parti interessate alla riduzione di accuratezza

Fig. 1 - Una delle scansioni esterne del battistero, inquadramento 5x5 centimetri, in evidenza, in basso, una delle scansioni di raffittimento a 1x1 centimetri





Figg. 2/17 - Sequenza delle operazioni per l'esecuzione di una scansione con scanner laser *Cyraz 2400*: messa in opera della strumentazione, configurazione della parte software, inquadramento della ripresa, esecuzione della scansione generale, controllo dei risultati.

si trovano tutte nelle parti alte della copertura, tutte al di sopra dell'ultimo ordine e descrivono l'andamento della cupola e della parte uscente della volta, nonché la cupola di sommità e la statua raffigurante San Giovanni. Di conseguenza il passaggio da un margine di errore di circa mezzo centimetro ad un valore di poco superiore, comunque considerabile entro il centimetro², rendeva più che plausibile la rinuncia alla ricerca di punti ripresa speciali³ per l'integrazione delle parti alte.

Inoltre la particolare morfologia del battistero rendeva possibile cogliere l'intero sistema di copertura a partire dai punti di vista a terra, ad esclusione del punto di raccordo coperto dai paramenti del terzo ordine, punto per altro visibile solamente da pochi punti, raggiungibili non senza qualche difficoltà a partire dagli spazi interstiziali del sistema delle volte.

Con queste premesse, il rilievo degli esterni è risultato la parte meno impegnativa del lavoro di misurazione, i punti stabiliti per le stazioni di presa sono stati solamente sei, di cui uno ad integrazione di una prima postazione interrotta a causa della pioggia ed un'altra eseguita in forma aggiuntiva dalla sommità delle mura in prossimità della Porta del Leone.

Per ogni stazione sono state eseguite una scansione generale di inquadra-

mento con maglia impostata a cinque per cinque centimetri e successivi raffittimenti di un centimetro per uno, a copertura completa della costruzione dall'attacco a terra fino all'ultima cornice del terzo ordine di facciata.

Delle sei scansioni solo una è stata eseguita impiegando il *Cyrax 2400* mentre tutte per tutte le altre è stato impiegato il *Cyrax 2500*.

Dalle sei postazioni di presa sono state eseguite settanta scansioni, secondo le quali sono stati campionati poco meno di quarantatre milioni di punti.

Il sistema dei target di riferimento, vista la significativa distanza dello scanner dalla superficie acquisita, poteva essere facilmente collocato senza bisogno di ricorrere a posizionamenti particolarmente alti, per cui si è provveduto a porre una mira piana su ognuna delle venti colonne perimetrali ed una ulteriore serie di mire nella parte centrale delle campate comprese tra le colonne, con un'altezza variabile tra i due e i tre metri⁴.

Il maggior limite delle scansioni eseguite era costituito dalle ampie aree di occlusione dovute al ricco paramento della galleria del secondo ordine del prospetto, le colonne, le statue, le cuspidi e i ricchi ornati, inevitabilmente avrebbero proiettato la propria ombra, secondo la sorgente del segnale laser, sul paramento retrostante. Tuttavia si

18

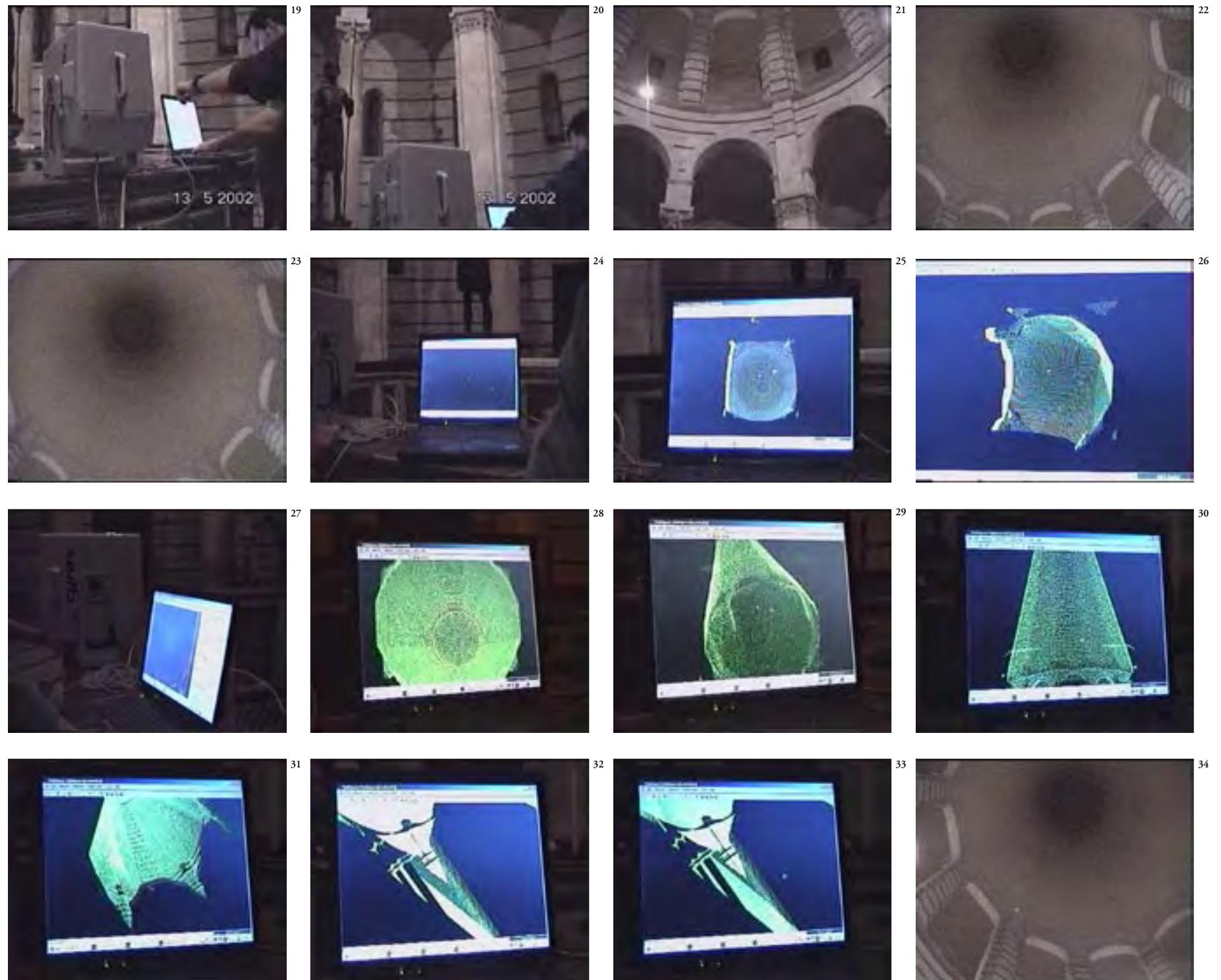


tratta di un problema irrisolvibile, in quanto anche aumentando il numero di stazioni di presa si sarebbe solo potuto ridurre la superficie non rilevata, e questa, dunque non sarebbe mai stata del tutto eliminata, portando, di contro ad un significativo aumento dei dati raccolti, che inevitabilmente sarebbero stati in buona parte ripetitivi di un rilievo già eseguito. Eseguire quindi

un numero limitato di scansioni in virtù delle condizioni particolarmente favorevoli di inquadratura è stata una scelta corretta e ha restituito un volume di dati significativo, ma relativamente facile da gestire, con poche sovrapposizioni e poco sovracampionamento del modello complessivo.

L'intervento negli interni è stato invece di tutt'altra portata e complessità, in-

Fig. 18 - Una delle scansioni eseguite dal sottoinsieme degli intradossi delle volte del peristilio del primo ordine. Eseguita con scanner laser *Cyrax 2500*.



Figg. 19/34 - Sequenza delle riprese eseguite per il rilievo dell'volta dodecagonale a copertura del vano centrale del battistero. Scansioni eseguite con scanner laser *Cyrax 2500*.

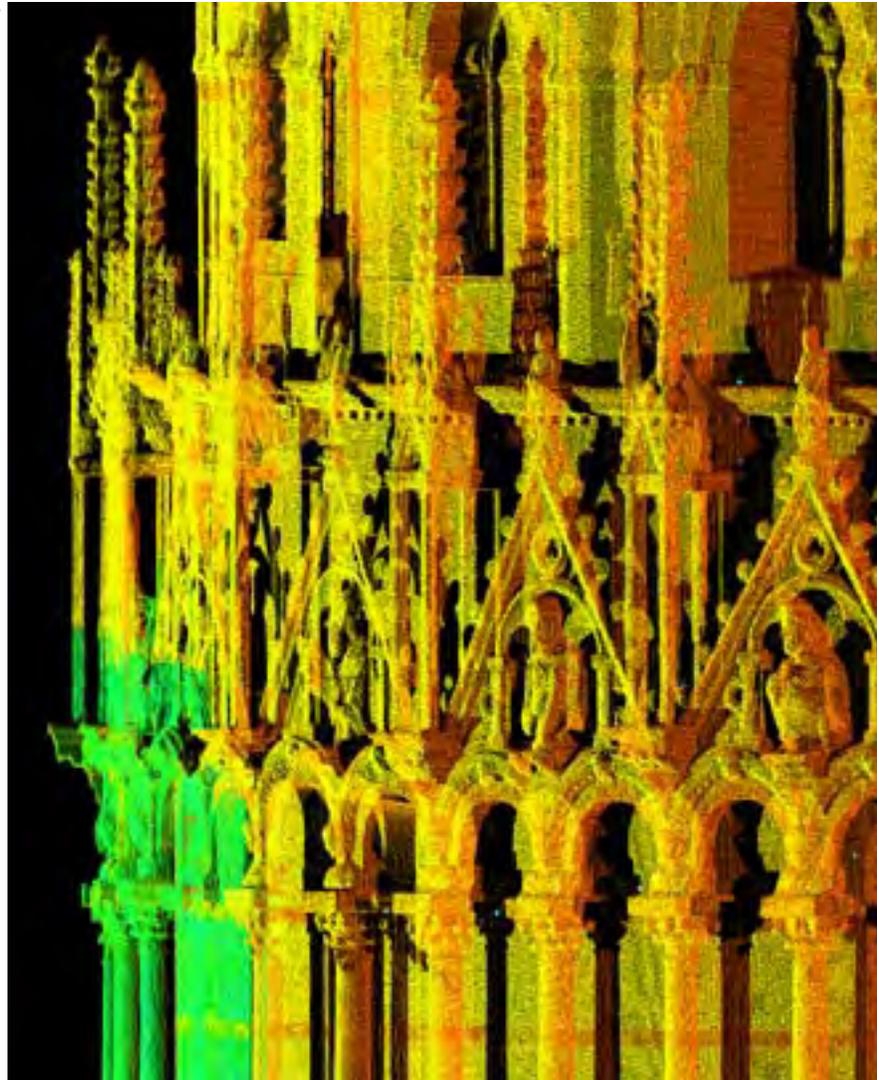
fatti, lo spazio all'interno del battistero può essere inteso, come volumi di scansione, secondo quattro spazi principali, il volume centrale, dalla pavimentazione all'imposta della volta piramidale, il volume della volta centrale, il volume della galleria al piano terra, coperta da volte a crociera, e la galleria del primo piano, coperta con volte a botte. Il doppio ordine di colonne e pilastri, suddivide lo spazio e crea, da qualunque punto di scansione si possa scegliere, ampi volumi di occlusione, che rendono difficoltoso ipotizzare che una semplice scansione "a tappeto" non lasci comunque delle aree piuttosto grandi non documentate. In questo senso, la procedura adottata per l'esecuzione delle scansioni è stata molto impegnativa, prevedendo da prima di posizionare gli scanner nelle prossimità del parapetto della prima galleria, e da qui, dopo aver puntato lo scanner verso la porzione posta sul lato opposto del vano centrale, eseguire tre distinte scansioni, una rivolta verso l'imposta della volta piramidale, una rivolta verso il fronte prospiciente, ed un'ultima puntata verso il piano terreno. In questa maniera si riusciva a scansionare lo spazio secondo un angolo di campo complessivamente ampio circa cento gradi secondo la verticale e quaranta secondo l'orizzontale, il che corrispondeva, fisicamente, a cogliere

un volume che andava dal suolo, con una porzione della pavimentazione e tutto ciò che a terra si trovava, fino alla cornice che copre l'imposta della grande volta.

Poiché l'ampiezza della scansione coglieva da questo punto ben tre campate, si sarebbe potuto ipotizzare un rilievo eseguito secondo una logica del tipo "un affaccio sì, il successivo no", ma in ragione degli ampi spazi di occlusione proiettati dalle colonne si è preferito procedere alla scansione da tutti e dodici gli affacci, per un totale di trentasei stazioni di presa complessive.

Questo risolveva solamente il rilievo a copertura del vano centrale e in sostanza fissava il modello del fonte battesimale, del pulpito e di tutto il prospetto interno dei due ordini di galleria; si è quindi proceduto ad eseguire le scansioni lungo la galleria del primo piano, posizionando lo scanner in modo che la presa si "infilasse" il più possibile lungo la galleria ed eseguendo, anche qui, tre scansioni, una con l'asse dello scanner parallelo al piano di calpestio, e le successive due per innalzamento progressivo dello scanner, fino a cogliere un'ampia porzione delle volte. Questa procedura era motivata dall'altezza del vano che in molti casi risultava tale, rispetto all'angolo di campo dello scanner e

35

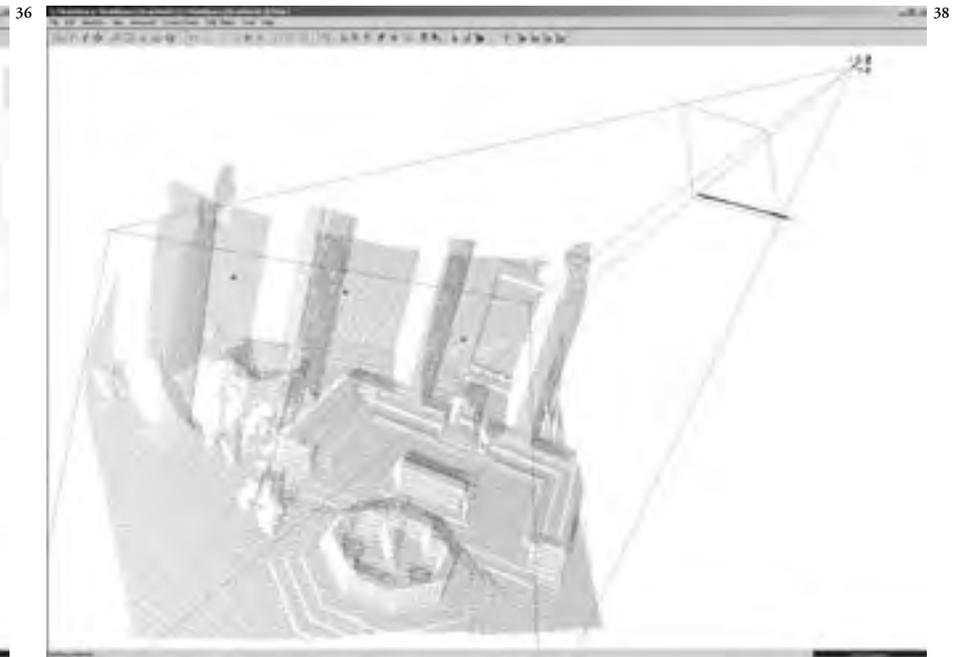


al posizionamento dei target, da definire delle condizioni che portavano a produrre delle scansioni prive di un numero sufficiente di punti di riferimento utili al ricongiungimento dei dati raccolti con l'insieme; questa condizione si verificava soprattutto quando l'apparecchiatura era rivolta verso le volte. In questi casi, al fine di garantirsi rispetto all'effettiva utilità

della scansione eseguita, si procedeva all'esecuzione di specifici raffittimenti in corrispondenza di punti chiave, ben riconoscibili, successivamente battuti per intersezione in avanti attraverso la stazione totale.

L'ampia copertura ottenuta con le scansioni eseguite in affaccio dalla prima galleria, se da un lato ha prodotto una forte sovrapposizione delle scan-

Fig. 35 - Particolare della corona di cuspidi che cinge il battistero, scansione eseguita con scanner laser *Cyrax 2500*, secondo una griglia di 1x1 centimetri.



sioni, saturando molti spazi altrimenti nulli, ma al tempo stesso producendo un forte sovracampionamento sul fonte battesimale, ha comunque reso non necessaria una serie di scansioni da eseguirsi dal piano terra che, a causa della fortissima frequentazione turistica e dell'assenza di spazi riparati dai flussi di visitatori rendeva piuttosto difficoltoso procedere ai rilievi durante l'orario di apertura del monumento. Durante le operazioni di rilievo, più di una volta, per evitare che il continuo passaggio di visitatori inducesse elementi di disturbo nelle scansioni in misura troppo elevata, si è provveduto

a interrompere il transito delle persone, nei momenti di massimo affollamento, invitandole a non attraversare la campata corrispondente alla zona di

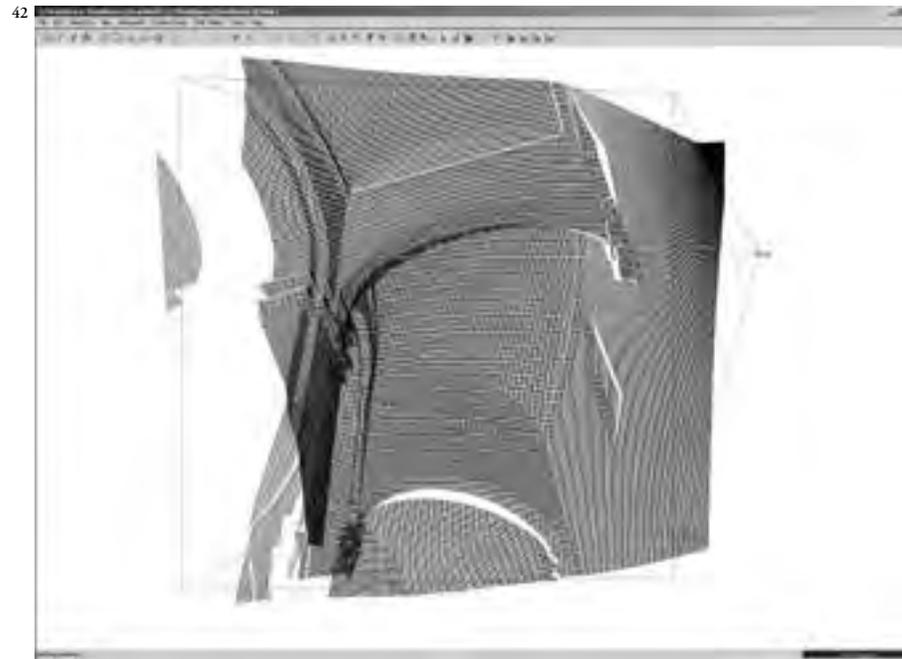
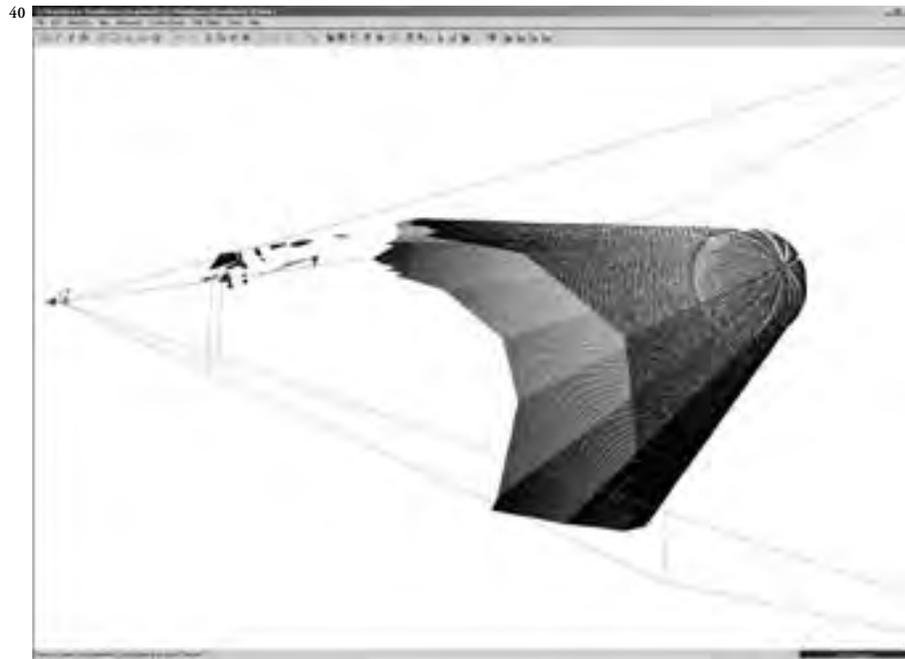
passaggio del segnale dello scanner. Avere un transito di dozzine di persone attorno non è cosa da poco, specie quando si deve posizionare la strumentazione nel bel mezzo dei percorsi che questi visitatori seguono, per questo, la campagna di misurazione della volta centrale e delle volte a crociera a copertura della galleria del piano terra, si sono eseguite di notte, durante l'orario di chiusura del battistero, dalle 20.00 alle 8.00 del mattino. La campagna di rilievo delle volte ha richiesto due notti di lavoro, le stesse in cui, come verrà illustrato più avanti, si sono eseguiti i rilievi del sistema di collegamenti

verticali.

La procedura di rilievo delle volte a crociera ha richiesto la stessa procedura adottata per le volte a botte della

Figg. 36/39 - Scansioni eseguite con lo scanner laser *Cyrax 2500*, visualizzazione della nuvola acquisita e del cono di ripresa dello scanner, l'immagine corrispondente è quella acquisita direttamente dalla telecamera dello scanner. Una delle scansioni degli esterni e una delle scansioni interne eseguite dalla galleria del secondo ordine.





galleria del primo piano, mentre per la volta piramidale le operazioni sono state molto più semplici. Infatti una volta posizionato il *Cyrax 2500* sulla balaustra del fonte battesimale, è subito risultato evidente che l'angolo di campo dello scanner permetteva di cogliere tutta la volta, a partire dalla cornice della sua imposta. Vista l'assoluta distanza di tutte le parti della volta da un qualunque punto ragionevolmente raggiungibile al fine di collocare dei target di riferimento, si è deciso anche in questo caso di appoggiarsi a dei punti fisici per permettere il riallineamento delle scansioni sulla

base del rilievo topografico, è stato quindi compito del rilievo con stazione totale collocare i punti, ancora una volta per intersezione in avanti,



corrispondenti agli angoli delle due cornici dodecagonali corrispondenti all'imposta della volta e all'imposta della cupola di chiusura⁵.

La scansione della volta, vista la sua complessiva semplicità è stata eseguita con una maglia di due per due centimetri, con l'aggiunta di alcuni raffittimenti parziali di un centimetro per uno, corrispondenti alle cornici e alle aree dove era ben visibile un distacco dell'intonaco.

Compiuta questa fase, le operazioni necessarie ai fini del rilievo con scanner laser, per quanto riguardava la prima sessione dei lavori si sono potute consi-

derare concluse, nell'arco di circa dieci giorni il rilievo era stato portato a termine, eseguendo, complessivamente, circa trecento scansioni a partire da



Figg. 40/43 - Scansioni eseguite con lo scanner laser *Cyrax 2500*, visualizzazione della nuvola acquisita e del cono di ripresa dello scanner, l'immagine corrispondente è quella acquisita direttamente dalla telecamera dello scanner. La scansione della volta centrale e una delle scansioni della volta a botte anulare della galleria superiore.



44

Fig. 44 - Operazioni di scansione negli spazi interstiziali della copertura con lo scanner panoramico *Mensi GS-100*.

Fig. 45 - Una delle scansioni eseguite con lo scanner laser panoramico, si nota chiaramente la superficie corrispondente all'estradosso della volta centrale.

ottanta postazioni di ripresa differenti, per un totale di centocinquanta milioni di punti.

Restava ancora da eseguirsi il rilievo degli spazi presenti tra l'intradosso della cupola di copertura e l'estradosso della volta centrale.

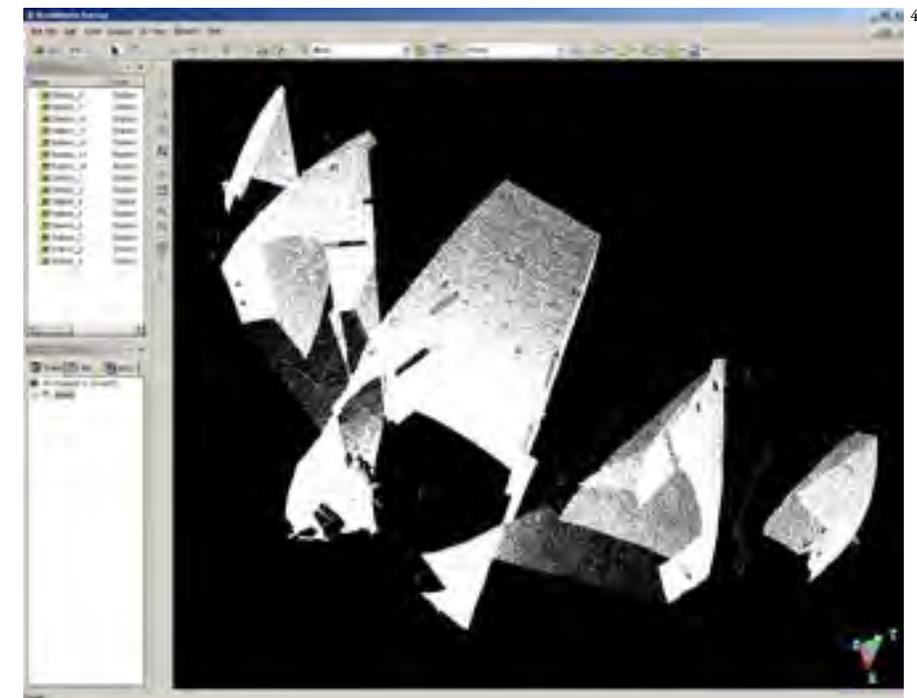
In questo caso la grande frammentarietà del sottovolta, avrebbe richiesto un numero molto grande di scansioni

se si fossero adoperati ancora una volta gli scanner *Cyra* a campo fisso, di conseguenza, è sembrata un'ottima occasione quella proposta dal NubLab di Ferrara di eseguire questa parte del rilievo impiegando uno scanner di tipo panoramico, il *GS-100* della *Mensi*, capace di eseguire scansioni secondo un angolo giro sull'orizzontale e con un angolo di campo verticale di sessanta

gradi.

Il modello tridimensionale digitale che si voleva ottenere doveva restituire in maniera fedele la forma geometrica del sistema delle volte, nonché delle numerose aperture e degli attacchi dei sistemi di collegamento verticale come la scala proveniente dalla galleria inferiore, la scala di accesso alla parte superiore della copertura della cupola esterna e le porte di accesso alla parte inferiore della copertura. L'intradosso della cupola esterna presenta, per ogni settore, una finestrata bifora con un'apertura ampia circa un terzo

della larghezza totale della vela, e che in altezza rimane entro la fascia dei primi quattro metri, queste aperture, tuttavia sono state anticamente tutte tamponate per dare maggiore stabilità alla copertura. La tamponatura è stata un'operazione molto aggressiva verso le forme architettoniche originali delle finestrate, e di queste sono rimaste poco più degli ingombri e poche cornici nella parte alta della finestra. Unica apertura superstita nel suo aspetto originale è la finestra che guarda la facciata del Duomo, preservata nel suo assetto originale, e dalla quale è possibile am-



45

mirare una bella veduta del complesso monumentale della piazza.

Per il resto il paramento murario appare privo di ornamenti o di particolari articolazioni formali, fatta eccezione per alcune buche pontai e per una risega presente in ogni setto divisorio, probabilmente utilizzata durante le fasi di costruzione della cupola esterna per sorreggere la centinatura.

Il modello che si voleva ottenere doveva quindi contenere oltre agli aspetti geometrici complessivi anche tutto l'insieme delle tracce di aperture ormai tamponate e degli ornamenti

superstiti.

Questo spazio è certamente alquanto ampio nella sua complessità, ma la distanza tra l'estradosso della volta centrale e l'attacco a terra dell'intradosso della cupola esterna è di poco meno di cinque metri e mezzo, questa condizione di lavoro poneva quindi il problema di pianificare le operazioni di scansione in maniera tale da coprire tutte le superfici presenti con il minor numero possibile di punti di presa, riducendo al minimo i tempi di lavoro.

Infatti, un altro problema significativo derivava dalla forte frequentazione turi-

47



stica anche di questa parte dell'edificio, con un flusso continuo di visitatori, capace di vanificare qualunque operazione di rilevamento mediante scansione. Per evitare l'interferenza dei passanti, l'unica soluzione veramente efficace, tralasciando la richiesta di chiusura temporanea della struttura, è stata, ancora una volta, quella di avere accesso al complesso nelle ore di

chiusura, ovvero dalle 8.00 di sera alle 8.00 del mattino successivo...

La procedura di intervento è stata così organizzata: in ogni settore della corona lo scanner è stato posto prima a ridosso della vela interna della cupola, nei pressi della mezzeria e successivamente nel suo punto contrapposto a ridosso della superficie esterna della volta centrale. In ogni stazione di presa lo scanner

46

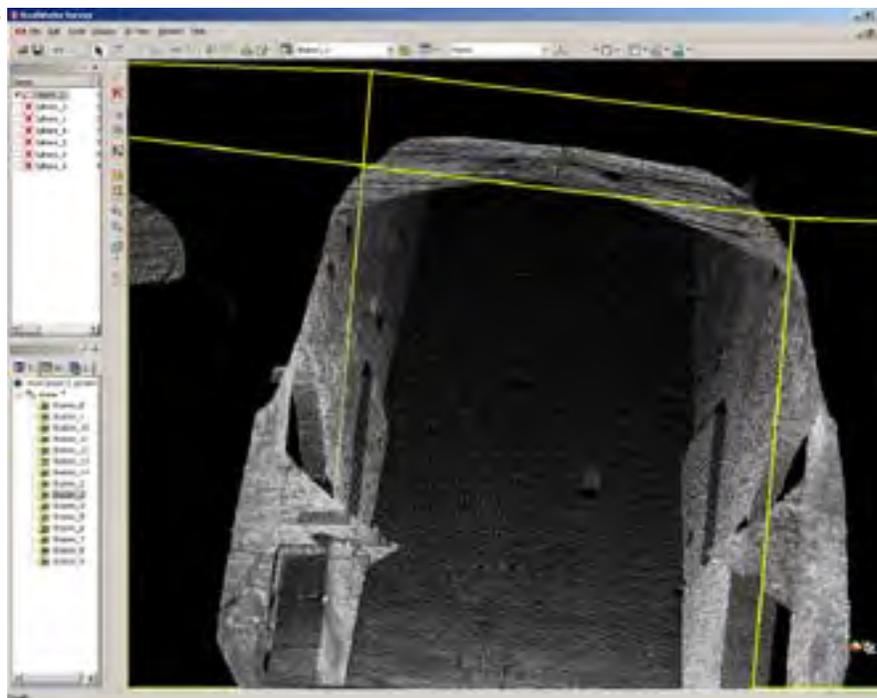


Fig. 46 - Veduta della nuvola di punti di una delle scansioni eseguite con lo scanner panoramico *Mensi GS-100*. Particolare di uno dei settori.

Fig. 47 - Completate le operazioni di scansione delle volte con lo scanner laser *Mensi GS-100*, si sono anche eseguite delle scansioni test degli esterni.

ha eseguito la scansione secondo una rotazione di circa un angolo piatto, cosicché la singola acquisizione ha colto punti secondo una nuvola documentante le vele della cupola e della volta, i setti, le aperture. Attraverso le aperture nei setti il laser ha raggiunto porzioni delle vele poste nei settori prospicienti, la nuvola orizzontalmente si estende quindi tra i venticinque e i trenta metri circa. Appena osservato il primo test di presa, è stato subito evidente che si poteva perfezionare l'operazione rinunciando a buona parte delle scansioni eseguite dalla postazione nei pressi dell'estradosso della volta. Si sono quindi eseguite tutte le scansioni a partire dall'intradosso della cupola mentre quelle a partire dalla volta si sono condotte in maniera alternata, riducendo il numero complessivo di scansioni da ventiquattro a diciotto.

Le scansioni sono state eseguite con una griglia di due centimetri, livello di definizione più che soddisfacente per ottenere il modello secondo le nostre esigenze. Le prime fasi di acquisizione hanno mostrato immediatamente un'immagine di quanto acquisito chiara e leggibile sia a livello di geometria, di tessitura muraria e di documentazione delle particolarità morfologiche più significative.

Per ogni settore delle volte sono stati posti dei target sferici disposti nei

pressi degli attacchi a terra della volta centrale, sui davanzali delle finestrate, e sulla risega dei setti murari, alcuni target supplementari sono stati collocati in punti significativi a seconda delle peculiarità riscontrate nel singolo settore.

I target sono stati tutti segnalati con dei tratti a matita, in maniera da poter ritrovare facilmente la posizione adottata, in quanto in contemporanea alle scansioni si è iniziato il rilievo con stazione totale di quella parte, ed è risultato fondamentale poter fissare in maniera certa le mire sferiche secondo il sistema complessivo del rilievo topografico.

A permettere questo è stata preziosa la possibilità di utilizzare un target sferico a specchi, in tutte le sue parti delle stesse dimensioni dei target posizionati per gli allineamenti delle scansioni.

I segni a terra hanno permesso di riposizionare questa mira speciale in tutti i punti di collimazione e l'insieme delle nuvole di punti è stato fissato in maniera certa nella rete topografica realizzata nell'ambito del rilievo complessivo del battistero.

Le operazioni di scansione sono state completate in tempi molto brevi, nell'arco di due sole notti, per 18 ore effettive di lavoro, si sono eseguite tutte le scansioni del sistema delle volte e si è approfittato del tempo restante per

eseguire delle scansioni aggiuntive degli esterni e degli interni del Battistero e di parti del complesso monumentale della Piazza dei Miracoli.

Con le riprese eseguite attraverso lo scanner *Mensi* la campagna di rilievo digitale del battistero è stata conclusa, e successivamente all'agosto 2002 si sono iniziate le operazioni di elaborazione del complesso dati raccolti e di restituzione del rilievo.

Note

¹ Nella fattispecie lo scanner impiegato sarebbe stato un ben collaudato *Minolta Vivid 700* in dotazione al NubLab di Ferrara.

² L'effettivo errore indotto nell'operare oltre i limiti propri dello scanner non è facilmente valutabile, in quanto su questo incidono in maniera significativa le condizioni ambientali con cui l'acquisizione viene eseguita, oltre alle caratteristiche di risposta manifestate dal materiale componente l'oggetto rilevato.

³ Eventuali punti di ripresa dalla torre pendente o dai camminamenti del transetto della cattedrale sono state scartate perché comunque poste ad una distanza eccessiva, mentre la possibilità di ripresa dalle gallerie della facciata della cattedrale non è stata tentata in

virtù dei passaggi troppo angusti che si sarebbero dovuti percorrere e della posizione ritenuta poco sicura che avrebbe dovuto prendere la postazione di ripresa.

⁴ Il che evitava l'eventualità della rimozione accidentale delle mire, la misura variabile dell'altezza del posizionamento delle mire non è casuale, ma cercata, al fine di evitare che un eccessivo allineamento dei punti di collimazioni produca un effetto "cerniera" al momento di ricomporre tra loro le scansioni.

⁵ Sono stati inoltre battuti alcuni punti sull'anello di ferro presente nell'intradosso della cupola di chiusura, un tempo utilizzato per sostenere la lampada che dava luce al battistero.

Rilievo strumentale con stazione totale

Nel caso del battistero di Pisa le operazioni di rilievo topografico integrato a quello digitale sono state molto complesse ed articolate¹, richiedendo lo sviluppo di una rete topografica di oltre quattrocento punti, comprensivi di tutti i target posizionati sia nel rilievo con gli scanner Cyra che con lo scanner Mensi, di numerosi punti di raccordo e punti rilevanti non direttamente raggiungibili e misurati con il metodo dell'intersezione in avanti.

In linea di massima la rete topografica prodotta è articolata in tre parti principali: l'insieme di poligonali chiuse battute negli interni, la rete degli esterni, con l'inserimento di punti di appoggio perimetrali e il gruppo di punti legati alle scansioni eseguite con lo scanner panoramico Mensi, eseguite negli spazi tra intradosso della cupola ed estradosso della volta. Tutta la rete topografica associata alle scansioni eseguite con gli scanner Cyra è stata basata su target piani, con la generazione di una poligonale aggiuntiva complessiva di raccordo tra i punti battuti direttamente su prisma e i punti corrispondenti ai target e agli elementi significativi. Nel caso degli interni, i punti significativi sono stati individuati essenzialmente sugli spigo-

li delle cornici dei pilastri, della volta centrale² e sui piedritti delle aperture perimetrali³.

La rete topografica degli esterni ha invece seguito essenzialmente i target propri dell'insieme delle scansioni laser, introducendo solo alcuni punti aggiuntivi e curando soprattutto la realizzazione di una buona poligonale perimetrale per il raccordo dell'intera rete. Questi ultimi punti di consolidamento esterni si sono poi rivelati fondamentali per il raccordo dell'insieme dei punti presi nei sottovolta, infatti, per la struttura del battistero, questa zona non permette di entrare in contatto visivo con alcuna parte interna del battistero⁴. Perciò si è dovuti ricorrere a legare queste campagne con l'insieme passando per le finestre perimetrali, che hanno richiesto di fissare una serie di punti esterni, distanti, ma facilmente ricollegabili alla rete esterna complessiva.

La rete dei punti topografici è risultata fondamentale per le operazioni di messa a registro di tutte le scansioni, in quanto non solo ha ridotto notevolmente il numero di scansioni che altrimenti si sarebbero dovute eseguire per raccordare interni ed esterni di una struttura così complessa, ma ha permesso di ricomporre separatamente, su la stessa base dei dati di registrazione, le acquisizioni effettuate con gli scan-

ner Cyra e quelle con lo scanner con funzioni panoramiche della Mensi, permettendo poi di introdurre l'insieme dei punti di quest'ultimo nella nuvola complessiva gestita dal software *Cyclone* della Cyra con una semplice operazione di importazione⁵.

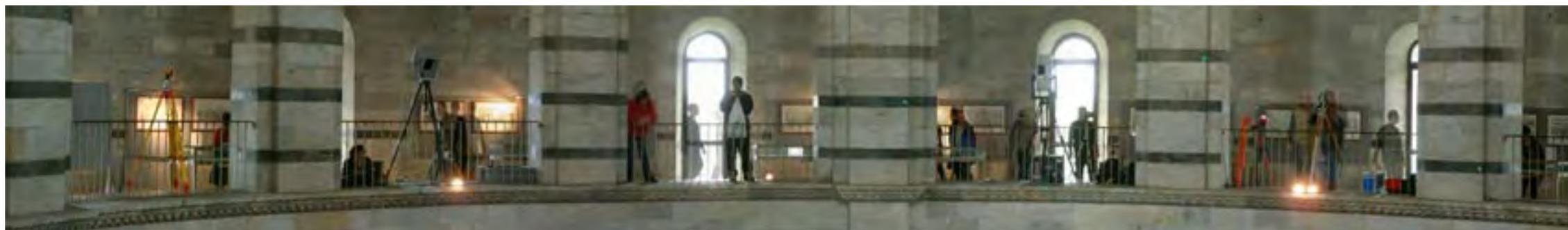
Dalle prime esperienze di integrazione dei sistemi topografici con i nuovi a scansione laser sono emerse interessanti considerazioni sul corretto modo di far interagire questi metodi e su come una programmazione delle fasi di presa debba essere eseguita tenendo sempre presente l'apporto delle metodologie tradizionali possono offrire; infatti i rilievi eseguiti con scanner laser offrono una grande accuratezza e rapidità di acquisizione dei dati metrici, ma la natura di queste apparecchiature, originariamente non sviluppate per l'impiego nel settore architettonico, non permette di impostare con praticità e affidabilità un sistema di riferimento complessivo⁶.

Inoltre la correlazione delle varie scansioni tra loro può portare, in determinate condizioni, ad un accumularsi di errori dovuti ad un'erronea valutazione della posizione delle mire di riferimento; se poi le mire fissate sono non solo target riconosciuti in modalità automatica dallo scanner, ma punti integrativi aggiunti con procedura manuale dall'operatore, la



possibilità di far accrescere l'errore complessivo del rilievo, in virtù di una progressiva sommatoria di piccoli spostamenti, è un fattore da tenere fortemente in considerazione.

Figg. 1/3 - Istantanee dalle fasi del rilievo topografico, maggio 2002.



Per esempio, se si esegue una serie di scansioni lungo il perimetro murario di un edificio di grandi dimensioni e ci si trova nella condizione di dover chiudere la serie di scansioni con l'ultima presa sovrapposta alla prima, avendo modo di porre come target solo elementi di margine comuni agli estremi di due singole scansioni, è assai probabile che andando a ricomporre la sequenza delle prese, la chiusura del rilievo possa presentare dei margini di errore significativamente più alti rispetto all'errore medio presente nell'allineamento delle singole scansioni. Questo è un processo abbastanza ovvio, infatti nulla impedisce che l'errore presente nella sequenza vada a sommarsi progressivamente e non a bilanciarsi, e comunque anche in questo caso la collimazione della prima e dell'ultima scansione potrebbero presentare errori significativi. In virtù di queste due problematiche, tutte le volte che il rilievo con scanner laser richiede una georefe-

renziamento certo dell'oggetto misurato o tutte le volte che l'organismo architettonico presenta una configurazione tale da assoggettare a errori progressivi la ricomposizione basata su target, è da prevedere l'integrazione del rilievo laser con un rilievo topografico con stazione totale.

La soluzione di adottare come sistema di inquadramento e calibrazione delle scansioni eseguite con il laser una stazione totale è legata essenzialmente al fatto che queste due strumentazioni, in virtù del tipo di dato da ambedue misurato, che è per tutte e due "puntiforme", ben si prestano all'utilizzo combinato.

In questa maniera, definendo una rete topografica sufficiente alla georeferenziazione e al consolidamento della rete dei punti target, si potrà fare affidamento su un sistema sicuro, atto a fare da base per la ricalibrazione degli errori complessivi dovuti ad inesattezze del riallineamento delle singole

scansioni.

Inoltre, la pianificazione di un rilievo strumentale laser e topografico, richiedendo una sovrapposizione minima tra le singole prese del laser, permette di ridurre il numero delle scansioni, e di ottimizzare le operazioni di rilevamento soprattutto per la messa in relazione tra dati acquisiti all'interno ed all'esterno dell'edificio.

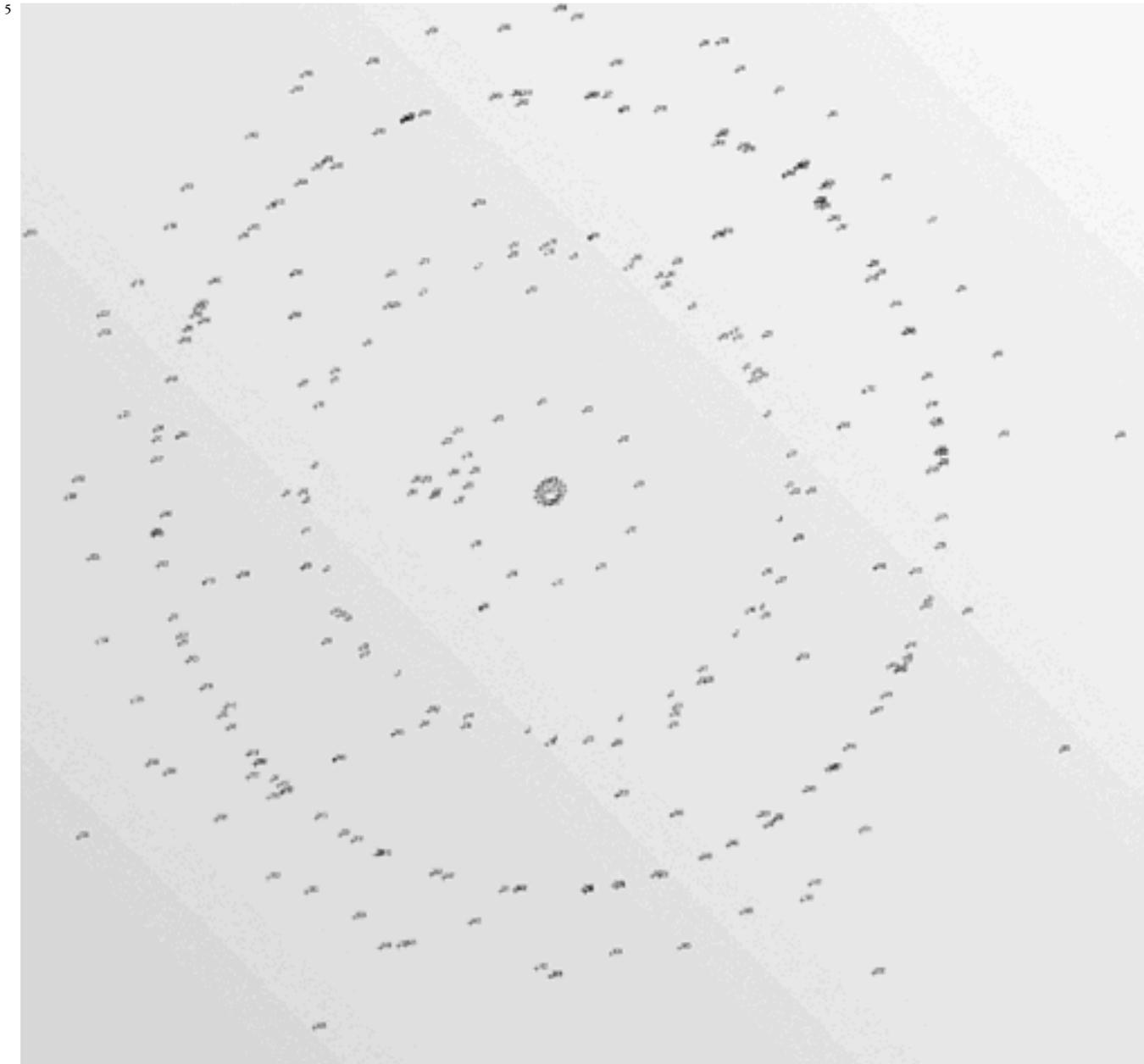
Infatti da un lato la presenza di una rete di punti noti permette di limitare le scansioni al numero effettivamente necessario a ridurre in maniera accettabile gli spazi di occlusione, risolvendo il bisogno di eseguire scansioni "di raccordo" necessarie per correlare i punti target tra di loro e, al tempo stesso, una volta definita una rete topografica di relazione interno-esterno, le scansioni potranno essere eseguite separatamente e senza la necessità di compiere scansioni di raccordo attraverso vani scala, corridoi o aperture, processo che in genere induce aumenti significativi

dell'errore complessivo presente nel rilievo digitale.

La procedura seguita è abbastanza semplice, si stabilisce la realizzazione di una rete topografica dove i punti scelti corrispondono, o comprendono, i target dello scanner laser, inoltre ci si prende cura di eseguire la misurazione di alcuni punti aggiuntivi scelti su porzioni inaccessibili al posizionamento dei target là dove si ravvisa il rischio di avere una maggior sprecisione in virtù del tipo di materiale o dello scorcio in relazione con le funzionalità del laser impiegato.

Stabilita la rete topografica, topografo e operatore del laser possono iniziare l'acquisizione dei dati del rilievo anche in indipendentemente e con tempi diversi, a patto che le mire poste per entrambi i rilievi siano a tutti e due note, ben riconoscibili e preservino correttamente la loro posizione per tutto il tempo necessario all'esecuzione dei due rilievi. In questa maniera

Fig. 4 - Il sistema per il rilievo del battistero completamente schierato nella galleria superiore: i due scanner Cyra e la stazione totale.



il rilievo risulta eseguito secondo una logica del tipo “nuvole dense e nuvole rade” con la nuvola di punti “rada” costituita dal rilievo topografico a fare da ossatura e da base per l’inquadramento di tutte le “nuvole dense” dovute alle scansioni eseguite con il laser.

Una difficoltà nel coordinare le operazioni delle due apparecchiature può derivare dalla diversità di risposta dei target utilizzati dallo scanner laser rispetto a quelli riconosciuti dalla stazione totale. Infatti i target previsti per l’impiego con lo scanner laser possono risultare poco percepibili alla stazione topografica e in questo caso diventa necessario poter approntare un doppio sistema di mire, sovrapponibili o sostituibili secondo necessità, atto a soddisfare i requisiti di rilevanza delle due strumentazioni senza indurre errori significativi per l’una o l’altra apparecchiatura. All’atto pratico si ha la necessità dotarsi di sistemi di mire piane e spaziali efficaci, la dove non sia prevista dal produttore dello scanner una soluzione compatibile è compito dell’operatore avviare con la ricerca di un sistema efficace, quest’ultima eventualità comunque è sempre meno frequente, in quanto i set di mire sono sempre più articolati e versatili. In linea di massima, il target piano presenta un fattore di riflettanza molto modesto, il più delle volte in-

Fig. 5 - L'insieme dei punti battuti con stazione totale nel rilievo del battistero, veduta zenitale.



Fig. 6 - L'insieme dei punti battuti con stazione totale nel rilievo del battistero, veduta assonometrica isometrica.

Fig. 7 - Sfera con prisma di specchi adatta al rilievo con stazione topografica, prodotta dalla *Mensi*, permette di integrare con perfetta corrispondenza i punti battuti con la stazione totale alla rete di target dello scanner.

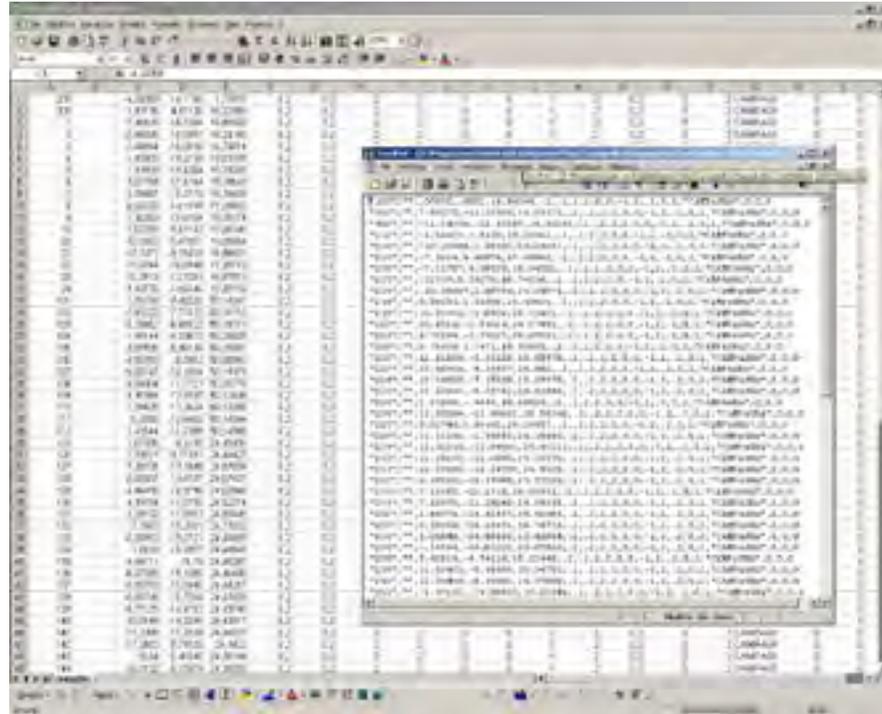
Fig. 8 - Una delle sfere target standard investita dal segnale del laser, la sfera con prisma e le sfere standard hanno esattamente la stessa dimensione, il centro del prisma coincide con il centro della sfera.



sufficiente per il rilevamento da parte della stazione topografica, in questo caso si dovrà aver cura di porre anche un target adesivo catarifrangente sovrapponibile alla mira. L'errore indotto dall'operazione di "scambio" delle mire può essere più o meno accentuato dalla diversa dimensione dei due target o da scostamenti tra la posizione del punto come riconosciuto dallo scanner e il posizionamento del target per la stazione totale.

La questione diventa molto più complessa nel caso in cui per le scansioni

si siano adottati dei target sferici, se questi devono essere rilevati anche attraverso la stazione totale, l'unica opzione che non introduce un errore significativo è quella di ricorrere a speciali target "alternativi" alla classica mira sferica, ovvero degli elementi che oltre a replicare la stessa forma del target sferico classico introducano in più una caratteristica di rilevabilità da parte della stazione topografica. In questo senso esistono due tipologie di mira possibili: quella sferica con prisma di specchi incluso nella struttura



della sfera stessa e con punto misurato coincidente con il centro della mira e quella con mire catarifrangenti poste all'esterno secondo un asse con punto medio sul centro della sfera. Nel primo caso si avrà a disposizione un vero e proprio prisma per stazione totale, posizionabile in sostituzione della mira sferica al momento opportuno e rilevabile secondo il centro della mira, permettendo di registrare il punto nella stessa esatta posizione in cui lo rileverà lo scanner. Nel secondo caso, lo strumento topografico dovrà rilevare

i due punti posizionati esternamente alla sfera, in questa maniera non si otterrà direttamente la posizione del centro della sfera, ma questa dovrà essere ricavata o per impostazione della stazione totale, quando questa lo permetta, oppure in un secondo momento attraverso un software CAD⁷. La prima soluzione è evidentemente quella più rapida e meno problematica, ma si deve comunque tenere presente che il prisma presenterà certe caratteristiche di risposta che non è detto siano perfettamente compatibili con qualunque

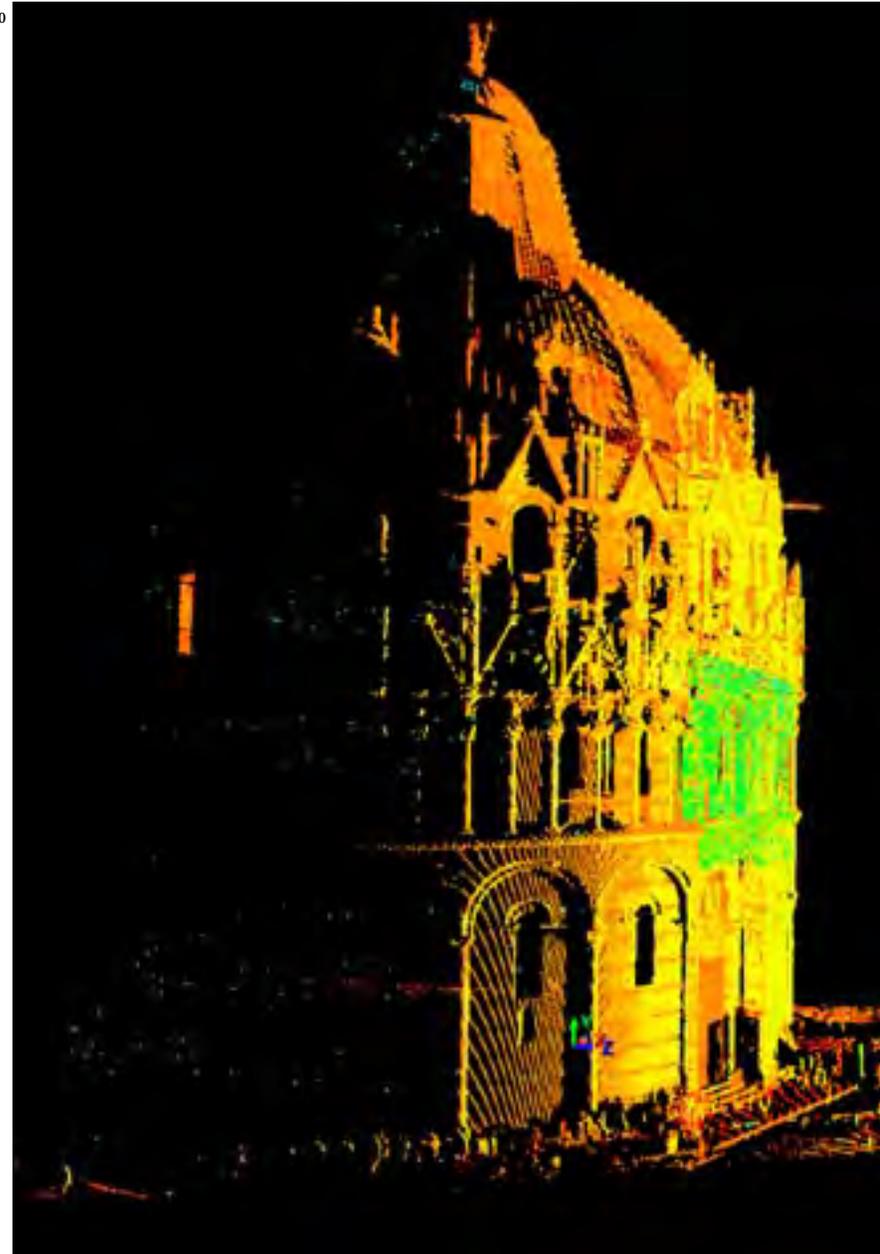


Fig. 9 - Il file contenente tutte le coordinate del rilievo topografico in formato testuale, espresse come file "xyz", aperto in un programma di elaborazione per file di testo e in uno per foglio elettronico.

Fig. 10 - Referenziazione di una delle scansioni con il rilievo topografico, i punti di quest'ultimo sono evidenziati in ciano.

stazione totale⁸. L'operazione di ricomposizione delle nuvole sulla base della rete topografica viene compiuta nelle fasi di costruzione del modello complessivo, l'operatore avrà cura di importare nel programma di gestione delle nuvole di punti il file⁹ della rete topografica, imponendolo come base e riferimento di tutte le operazioni di allineamento successive. Le singole scansioni del laser saranno allora tutte georeferenziate, permettendo di stabilire, nelle fasi successive di elaborazione di piani di sezione e di livellamenti certi. L'errore dovuto alla grande estensione dell'edificio in rapporto alla "rigidità" del sistema di riferimento basato su target sarà fortemente ridotto in quanto ogni scansione verrà fissata su punti chiari e l'eventuale difformità sarà ridistribuita sulle zone di sovrapposizione tra le scansioni.

Questa procedura, detta "registrazione", richiede dei tempi più o meno lunghi a seconda della complessità dei dati che si devono elaborare e dal numero complessivo delle scansioni che si devono calibrare.

Benché si tratti di un processo in linea di massima non soggetto a imprevisti, la registrazione può porre alcune difficoltà operative, specialmente se alcuni dei target non vengono riconosciuti in maniera corretta o se emergono delle inesattezze nell'insieme delle scansioni

o nel rilievo topografico.

In questo caso è comunque possibile cercare di consolidare il rilievo laser e quello topografico con interventi di individuazione di punti target posizionati "virtualmente" all'interno della nuvola dei punti. In genere si tratterà di riconoscere punti evidenti e facilmente collocabili nella scansione, come per esempio spigoli di cornici, elementi angolari con evidenti cuspidi, discontinuità dei materiali di rivestimento o degli ornati, e porre su questi un nodo identificativo che dovrà poi essere presente anche nel rilievo topografico. Questa procedura può essere adottata anche per integrare la registrazione con punti difficilmente raggiungibili, rilevati nelle prese topografiche con il metodo dell'intersezione in avanti.

Note

¹ Il rilievo topografico è stato magistralmente eseguito dall'arch. Mauro Giannini, del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura della Facoltà di Architettura di Firenze.

² Sono stati battuti tutti gli angoli sia sulla cornice inferiore, di imposta della volta, sia su quella superiore, di imposta della cupola di chiusura.

³ Le scansioni eseguite verso la volta centrale e verso le volte a botte e a crociera delle due gallerie, non permettevano, per inaccessibilità, il posizionamento dei target. Di conseguenza, tutti questi punti sono stati battuti per intersezione in avanti e sono stati abbinati alle scansioni con introduzione manuale di vertici.

⁴ Fa eccezione una sorta di botola chiusa con un lucernaio, che si affaccia attraverso una delle volte a botte che coprono la galleria al primo piano, ma questa, in virtù della posizione e della particolare scomodità in relazione al posizionamento della stazione totale, ha reso preferibile evitarne l'utilizzo.

⁵ Essendo le due nuvole di punti riferenziate alla rete topografica, l'operazione di incorporarne una nell'altra si può eseguire con una semplice operazione che prevede l'esportazione dell'insieme dei dati dal programma di gestione dello scanner in formato *CSV* o analogo, e la sua successiva importazione nel programma di gestione della seconda nuvola dei punti, in virtù del corretto

posizionamento delle due parti rispetto allo stesso sistema di riferimento, il risultato complessivo risulta ugualmente preciso nella sua collocazione.

⁶ E' possibile, ovviamente, porre in bolla la stazione laser, ma questa operazione avviene comunque con sistemi generici, analoghi a quelli che si potrebbero utilizzare per la messa a livello di una macchina fotografica.

⁷ Questa seconda soluzione, proposta dalla ditta francese *Mensi*, cerca di ovviare con una certa macchinosità al costo elevato delle mire con elemento a specchi, proponendo una soluzione più economica.

⁸ Per permettere il settaggio della stazione totale sulla base del prisma speciale, normalmente la sfera con sistema di specchi riporta annotato nella propria scheda tecnica il valore numerico corrispondente al fattore di risposta che, si deve impostare sulla stazione totale.

⁹ L'operazione di importazione è in genere basata sull'acquisizione di un file testuale di tipo *CSV*, in questo caso si deve sempre verificare che il software di gestione dati della stazione totale permetta l'esportazione di dati di questo genere in un formato compatibile con le richieste del software di gestione della nuvola dei punti, vari inconvenienti possono derivare dall'utilizzo di separatori dei decimali non congruenti, come per esempio la virgola per il programma della stazione totale ed il punto nelle richieste del programma del laser.

Rilievo diretto

Il sistema di collegamenti verticali presente nel battistero è impostato secondo un sistema molto semplice, quello di due lunghe e ininterrotte rampe che partendo dal piano terreno raggiungono gli spazi interstiziali tra l'intradosso della cupola e l'estradosso della volta piramidale. Al piano terra, all'interno, lungo tutta la superficie libera della muratura perimetrale, si sviluppano tre gradoni che seguono lo stesso andamento delle pareti, da questi gradini, in due soli punti, si trova l'accesso alle due scale di collegamento con i piani superiori.

Le scale si sviluppano entro la muratura dell'edificio, e ne seguono lo stesso andamento, presentando, solo nel tratto che dal piano terreno porta alla prima galleria, alcuni pianerottoli quando la rampa incontra le aperture delle finestre, per il resto la scala è un unico e ininterrotto susseguirsi di gradini, eseguita in blocchi marmorei di un sol pezzo, che incontra aperture piccole e grandi, passa davanti a finestre, e offre affacci sia sull'esterno che sull'interno.

La prima rampa, doppia, conduce dal piano terreno alla galleria, mentre la seconda, originariamente doppia, ma successivamente murata perché ritenuta pericolante, prosegue verso

gli spazi della copertura solo a partire dalla rampa che si imbecca dal lato sud. Il secondo tratto di rampa si restringe progressivamente verso la propria conclusione e al progressivo restringimento corrisponde anche un degradarsi della qualità d'esecuzione del manufatto, che è via via sempre più irregolare e meno curato nelle soluzioni e nella pezzatura degli elementi.

Un vano così angusto e un andamento così complesso, con numerose situazioni complesse avrebbe richiesto un numero molto elevato di scansioni se rilevato tramite scanner laser, inoltre sussisteva una problematica aggiuntiva molto difficile da aggirare, ovvero, il transito giornaliero di decine e decine di visitatori che utilizzavano la rampa con imbocco da sud per accedere alla prima galleria e al piano superiore e la scala con uscita a nord per tornare al piano terreno a partire dalla prima galleria. Una frequentazione continua che non tanto poneva il problema della misurazione con strumentazioni ingombranti, quanto quello di garantire la possibilità di preservare i target di raccordo delle scansioni dalla curiosità di qualche turista di passaggio. Intervenendo con lo scanner si sarebbero dovute eseguire alcune dozzine di scansioni secondo postazioni di stazione continuamente diverse e posizionare un numero molto grande

Fig. 1 - Uno degli eidotipi realizzati durante il rilievo del sistema di collegamenti verticali del battistero.



di target di riferimento, che successivamente avrebbero dovuto essere presenti per poter essere rilevati con la stazione topografica. Un'operazione complessivamente fattibile, ma piuttosto onerosa dal punto di vista dei tempi e molto impegnativa dal punto di vista della continua movimentazione delle apparecchiature, soprattutto soggetta a complicazioni non irrilevanti nel caso della rimozione accidentale delle mire di raccordo.

In queste condizioni operative, la scelta adottata per il rilievo è stata alquanto immediata, e si è preferito ricorrere al

rilievo diretto per documentare questa parte dell'edificio.

Il problema del continuo flusso di visitatori non veniva però risolto e per aggirare il problema si decise di eseguire le misurazioni durante l'orario di chiusura del battistero, dalle 20.00, la sera, alle 8.00 del mattino.

Il rilievo in notturna non poteva comunque essere attuato pazientemente e per parti modeste in un numero indefinito di notti di lavoro, per cui si è preferito organizzare una serie di squadre di lavoro di due persone¹, che intervenendo a turno, nell'arco di

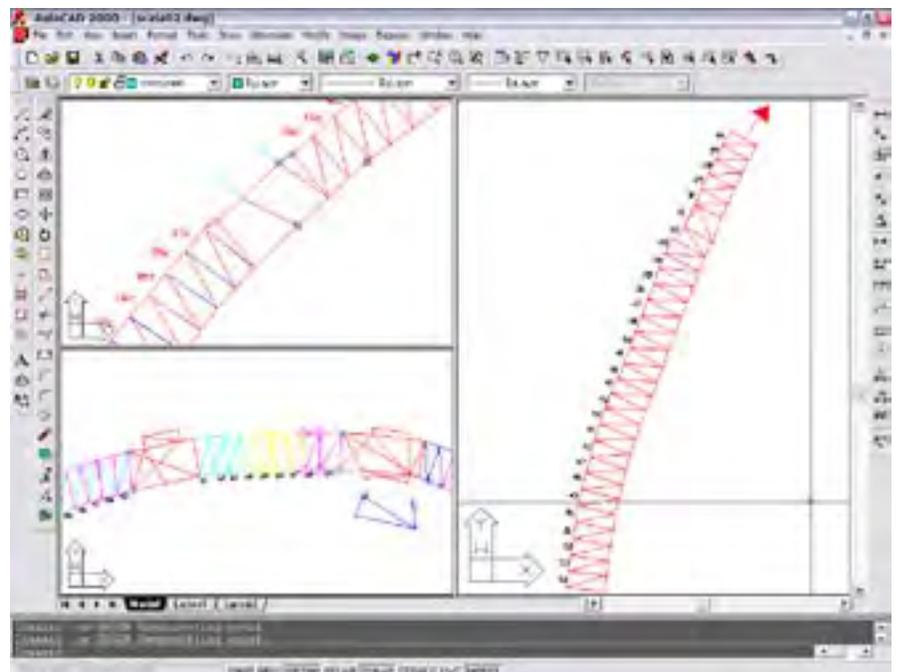
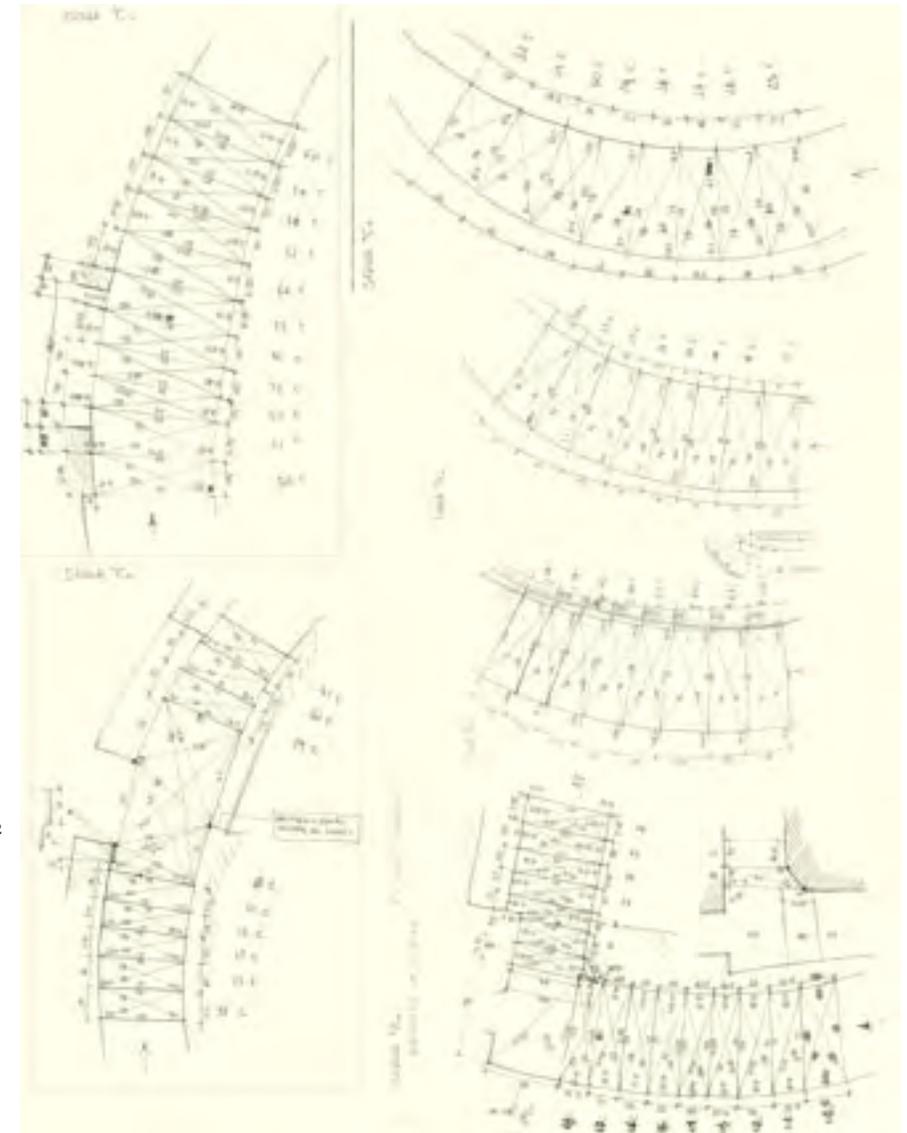


Fig. 2 - Schermata di lavoro di Autocad con una delle restituzioni in corso di completamento.

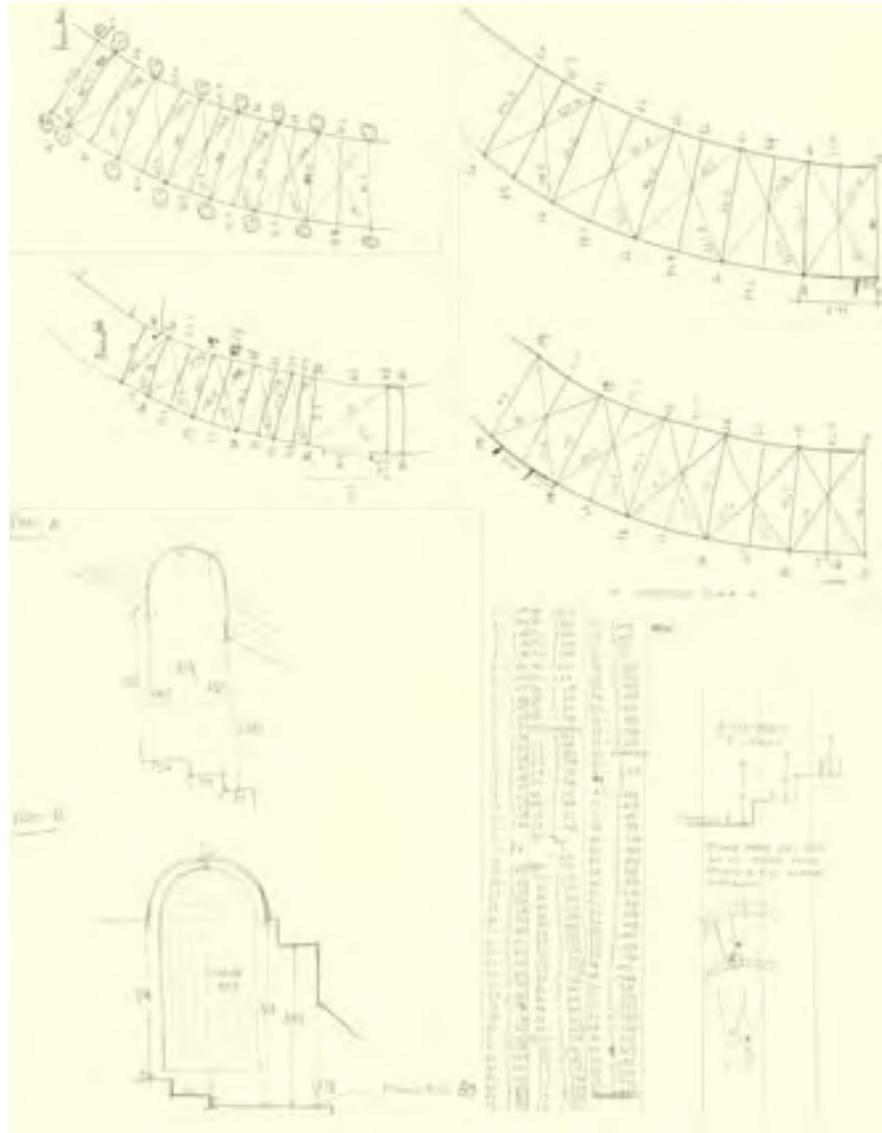
Fig. 3 - Uno degli eidotipi realizzati durante il rilievo del sistema si collegamenti verticali del battistero.



due notti, rilevassero l'intera doppia scalinata. Questa struttura di lavoro, permetteva inoltre di continuare le operazioni di scansione di altre parti contemporaneamente al rilievo della scala, permettendo quindi di sfruttare le due giornate di lavoro notturno per eseguire tutte le scansioni da postazioni difficili da tenere durante l'orario di

apertura del battistero.

Il rilievo diretto è svolto sotto la supervisione del prof. Stefano Bertocci e dell'arch. Paola Puma, e operato da una dozzina di squadre di rilievo, che hanno proceduto alla trilaterazione dei singoli gradini, alla presa di misure di inquadramento di alzata della parti maggiormente significative. Durante



la prima notte di lavoro si è proceduto a rilevare una prima parte della rampa sud, nonché ad eseguire le riprese fotografiche e video a supporto delle operazioni di restituzione del rilievo; nella seconda notte di lavoro si è provveduto a concludere le misurazioni della rampa sud e quelle della rampa nord.

All'intervento delle squadre è stato necessario premettere un breve incontro di pianificazione, necessario per uniformare le caratteristiche di notazione e della grafica degli eidotipi che si sarebbero dovuti redare, soprattutto in ragione del fatto che le operazioni di restituzione sarebbero state svolte da uno, al massimo due operatori e

comunque non necessariamente appartenenti alle squadre di rilievo. In questa maniera si è proceduto assegnando una numerazione complessiva ai gradini, eseguendo per ognuno di questi la misurazione della pedata, secondo i lati e secondo le diagonali, e dell'alzata, con misurazioni prese verso la parete esterna e verso quella interna. Per ogni gradino si è provveduto ad eseguire la misurazione dell'altezza della copertura, che difficilmente non è direttamente raggiungibile, visto che supera i due metri di altezza solo in corrispondenza di pianerottoli e all'in-

contro con alcune finestrate.

Gli strumenti prevalentemente utilizzati sono stati il classico metro da muratore ed il metro metallico a nastro, mentre per le misurazioni con altezze fuori portata si è utilizzato un distanziometro laser.

Ogni finestra, ogni porta e ogni difformità, lungo l'andamento della rampa sono state oggetto di misurazioni aggiuntive, tutte consolidate dalle necessarie trilaterazioni e adeguatamente documentate se non da una specifica presa fotografica, almeno dalla panoramica video complessiva.

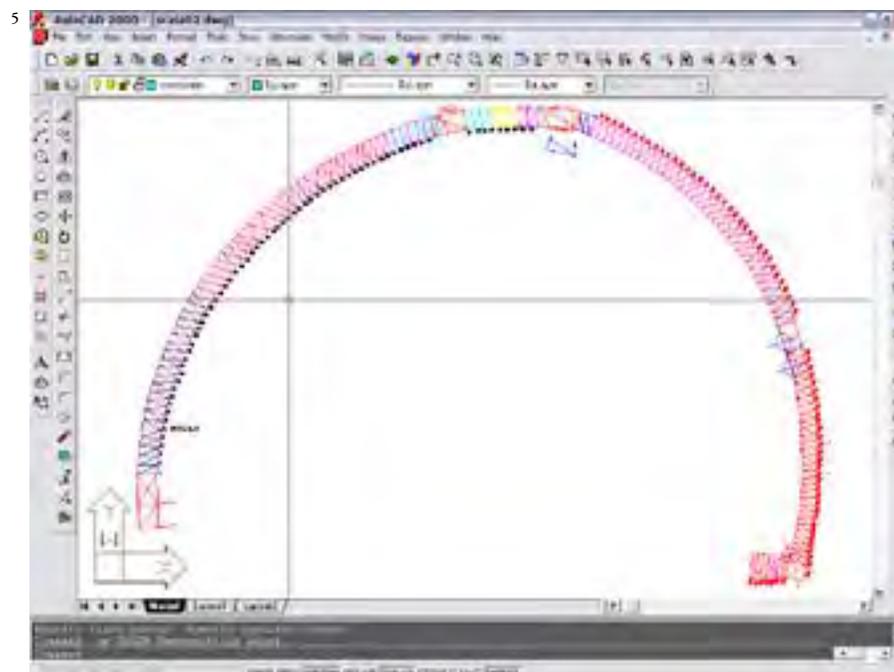
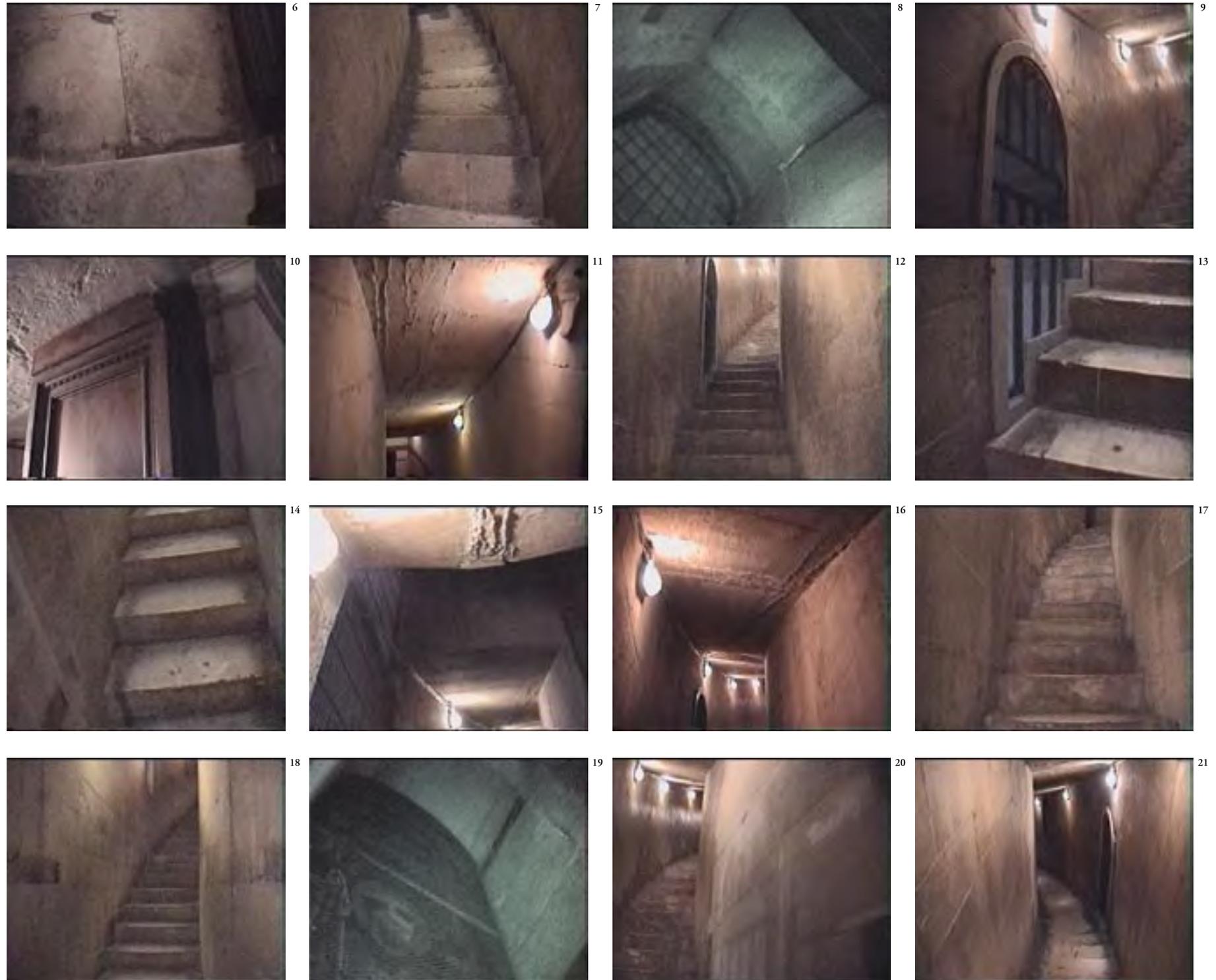


Fig. 4 - Uno degli eidotipi realizzati durante il rilievo del sistema si collegamenti verticali del battistero.

Fig. 5 - Schermata di lavoro di Autocad con una delle restituzioni in corso di completamento.



Figg. 6/29 - Sequenza di fotogrammi tratti dal rilievo video dei sistemi di collegamento verticale del battistero.



Questa procedura, tuttavia, presenta un margine di errore significativo, in quanto, in definitiva, si basa su misure parziali piuttosto piccole rispetto alla misura complessiva dell'oggetto rilevato, tuttavia, la grande affidabilità del rilievo delle pareti entro cui la scala si sviluppa e i vincoli sicuri in corrispondenza degli accessi alla scala, permettevano di compiere l'operazione secondo questa procedura con la certezza che le operazioni di ricostruzione sarebbero avvenute sulla base di una serie di punti chiave, provenienti dal

rilievo con scanner laser, che avrebbero limitato la possibilità di errore derivante da questa procedura di rilievo. Di conseguenza non si è ritenuto necessario procedere alla creazione di piani di livellamento e al loro ricollegamento al rilievo complessivo, cosa che sarebbe comunque risultata alquanto difficoltosa visto l'andamento curvilineo delle rampe.

Le operazioni di rilievo diretto si sono quindi concluse secondo questa struttura operativa e per quanto riguarda il sistema dei collegamenti verticali

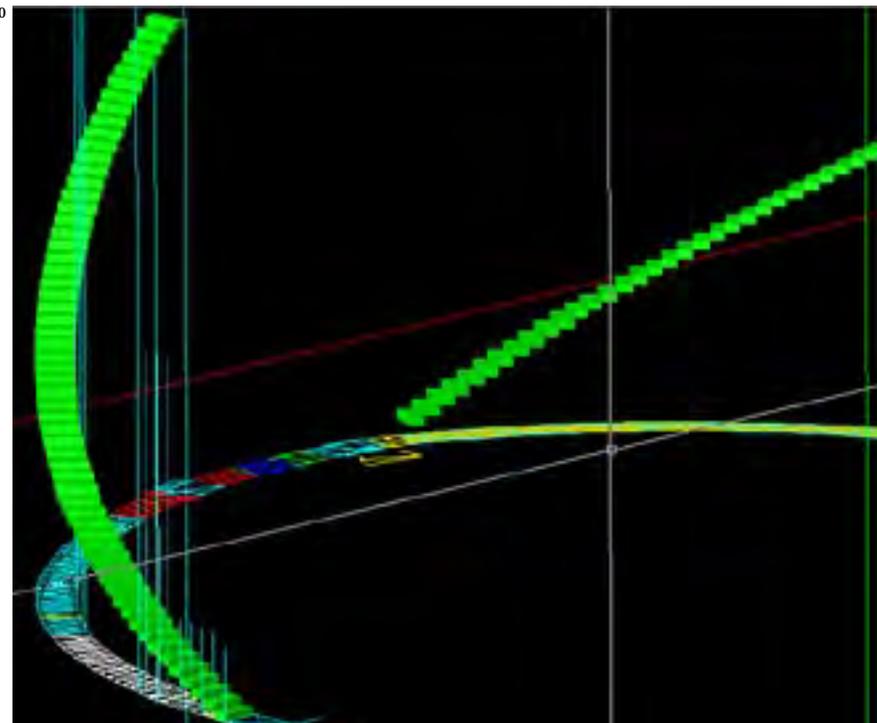
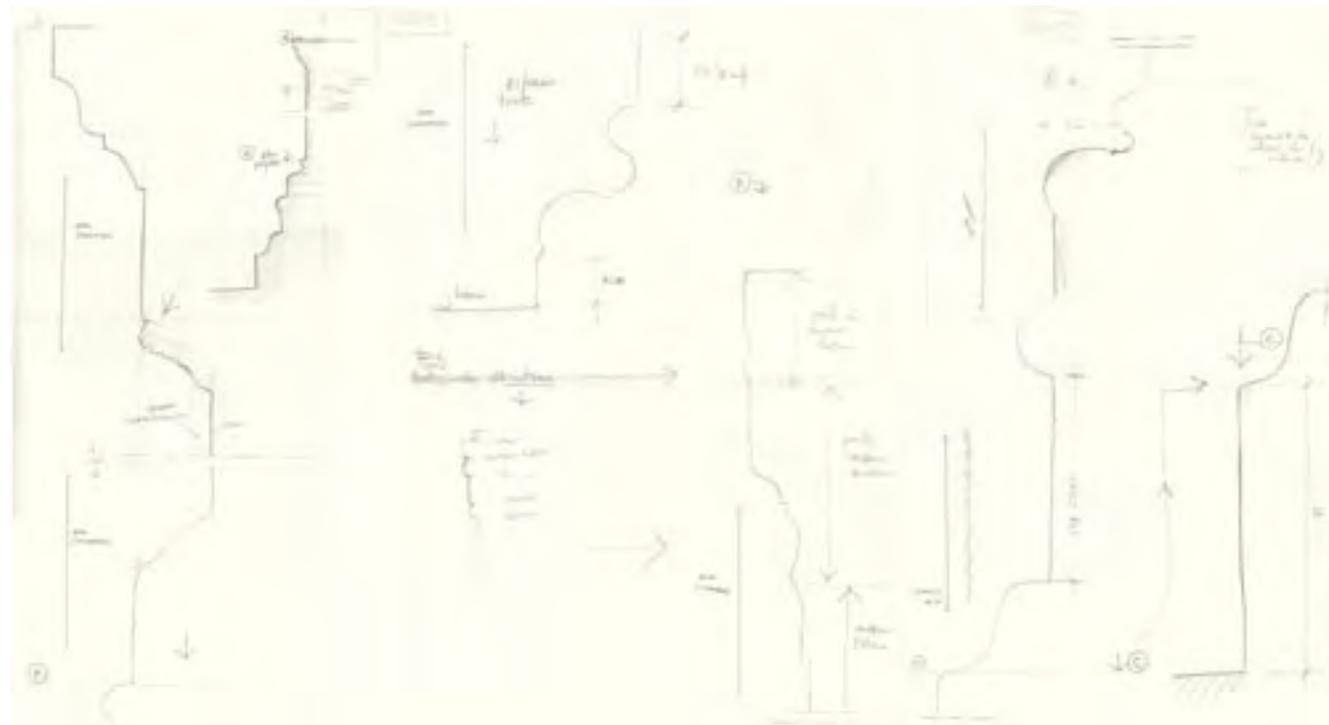


Fig. 30 - Successivamente alla restituzione bidimensionale del rilievo, si è proceduto al suo sviluppo in un modello tridimensionale.



³¹ nell'arco delle due notti previste dal progetto di intervento. Tuttavia, ben più tardi, quando le operazioni di ricomposizione del modello digitale tridimensionale erano ormai molto avanzate, si è reso necessario integrare il lavoro già eseguito con alcune misurazioni aggiuntive. Queste hanno riguardato non una parte in particolare del battistero, ma una serie di dettagli variamente distribuiti, prevalentemente sezioni di modanature e profili di elementi secondari che non risultavano del tutto chiari, o non erano

stati sufficientemente coperti, o che erano rimasti compresi in uno spazio di occlusione da parte del rilievo con scanner laser. Le misurazioni integrative, hanno richiesto all'incirca una giornata di lavoro da parte di due operatori², in virtù della natura di quanto rilevato le misure sono state quasi tutte eseguite tramite dima, con restituzione in scala 1:1, digitalizzazione del profilo e conversione dell'immagine in disegno vettoriale bidimensionale con procedura manuale.



³² Note

¹ I gruppi di lavoro sono stati composti da studenti dei corsi di Rilievo dell'Architettura e da dottorandi di Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente. Hanno partecipato all'esecuzione del rilievo: Nicoletta Brunori, Michele Cornieti, Simona De Cristofano, Elena De Lisio, Lorenzo Dini, Martha Aida Donoso Albuquerque, Gian Paolo Germani, Paolo Giannelli, Federico Gigetti, Bruno Grasso, Luciana Pochinu Carta, Gianni Sani, Cristhian Soverini, Duccio Troiano, Massimo Zucconi.

² Assieme all'arch. Francesco Tioli, abbiamo definito il piano dei rilevamenti integrativi, che si sono eseguiti, alla fine di marzo 2003.

Figg. 31/32 - Eidotipi dei rilievi integrativi eseguiti nell'aprile del 2003 per completare i dettagli del modello tridimensionale digitale complessivo.

Le procedure di elaborazione dei dati

Con la conclusione delle operazioni di rilievo digitale, quello che era stato accumulato a Pisa era una grande raccolta di punti, ognuno con una propria terna di coordinate, ognuno con determinate caratteristiche cromatiche derivanti dalla riflettanza del materiale su cui il laser era andato a riflettersi.

Questa enormità di informazioni ammontava a poco più di due *gigabyte* di dati complessivi, in parte archiviati secondo il formato del programma *Cyra Cyclone 3 (IMP)*, in parte archiviati nello standard del *Cyra CGP (CGP)*¹, e per la parte rilevata con lo scanner Mensi, archiviati nel formato *RealWorks Survey 3 (RCP)*.

Tutto il rilievo compiuto era scomposto nelle singole scansioni, o meglio, era scomposto nelle singole stazioni da cui le scansioni erano state eseguite.

Il che significava che, per esempio, tutte le scansioni eseguite per gli esterni erano concentrate in sei file di cui cinque in formato *IMP* ed uno in formato *CGP*. Al tempo stesso però, se le scansioni degli esterni, prese nel loro stato immediatamente successivo al rilievo, offrivano una vista se non altro efficace dell'edificio rilevato, per gli interni la grande frammentazione che si era dovuta imporre al rilievo comportava

una difficile leggibilità e riconoscibilità della collocazione della stazione sulla base del suo aspetto grafico. Inoltre, in questa fase, tutte le scansioni non solo non erano georeferenziate, né vicevolmente riferite, ma non erano neanche "in bolla", il che significava, al di là del rendere piuttosto faticosa l'operazione di visualizzazione in virtù dell'incerto posizionamento degli assi di riferimento, che qualunque operazione di tracciamento di sezioni orizzontali o verticali, di formulazione di considerazioni in relazione all'aspet-

to geometrico di questa architettura, di ipotesi circa da determinazione di patologie o fenomeni di degrado, non potevano contare su alcun piano di riferimento certo. All'insieme dei dati di tipo "nuvola di punti" andavano inoltre aggiunti i dati del rilievo topografico che potevano essere convertiti in formato testuale *CSV* o *DXF*.

Questa era comunque una condizione prevista, in quanto il passaggio successivo sarebbe stato quello di operare la cosiddetta *registrazione* delle scansioni, operazione, in questo caso, molto lun-

ga e molto complessa.

Prima di passare a questa fase, come già spiegato nel capitolo "*La struttura del rilievo*", è stato ritenuto necessario preparare un database delle scansioni, una loro schedatura utile a meglio conoscere l'insieme dei dati raccolti, e fondamentale per far raggiungere rapidamente padronanza dell'insieme delle informazioni a chi avesse dovuto operare con questi dati.

Le condizioni in cui si passava ad operare erano quindi tali da richiedere un passaggio di uniformazione

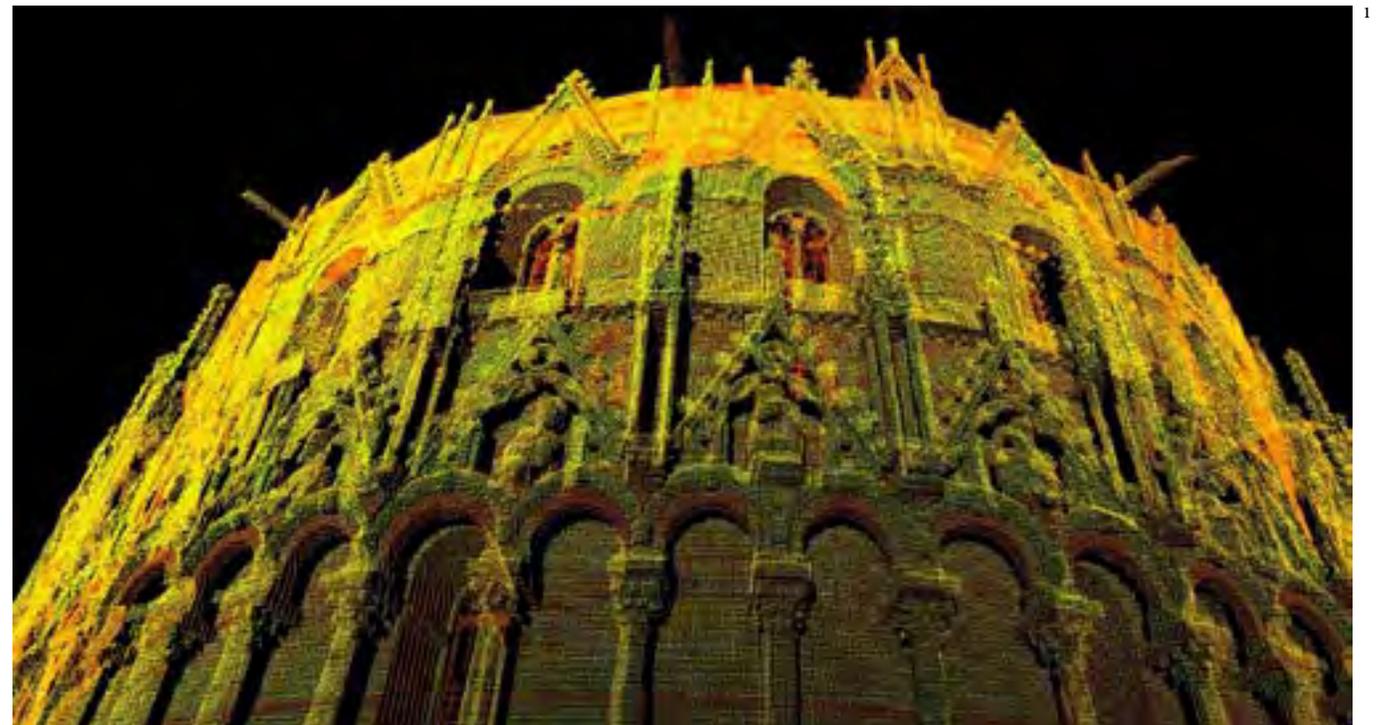


Fig. 1 - Veduta dal sottoinsieme di una delle scansioni degli esterni.

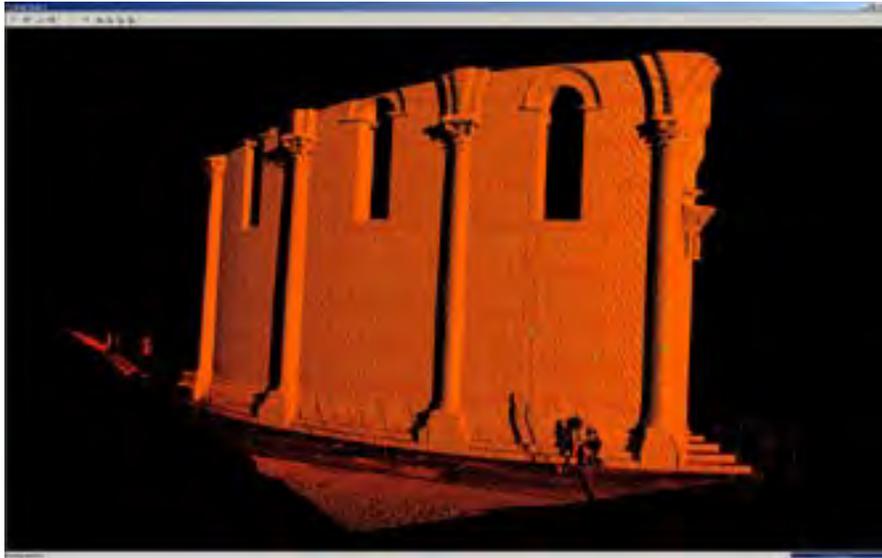
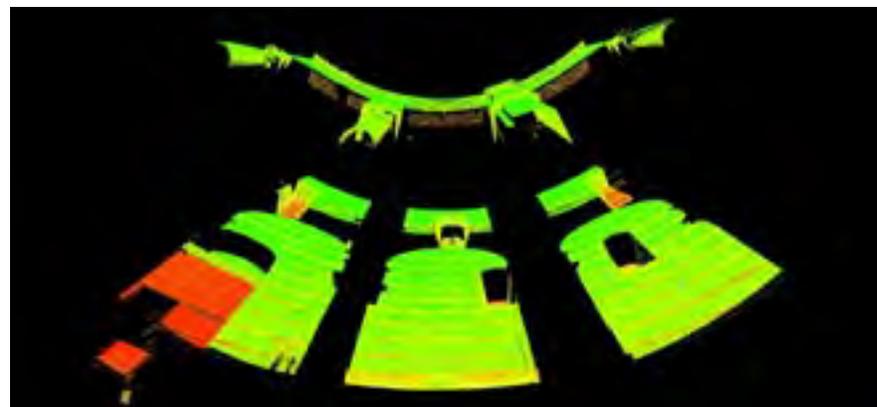


Fig. 2 - Una delle scansioni di raffittimento eseguita sugli esterni prima della registrazione.

Fig. 3 - Una delle scansioni degli interni prima della registrazione, si notino gli ampi spazi di occlusione dovuti ai pilastri.

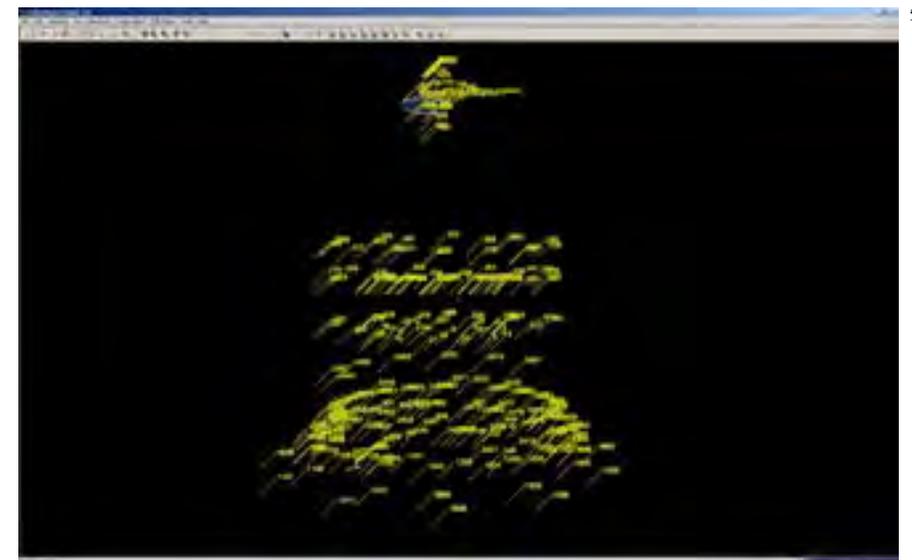
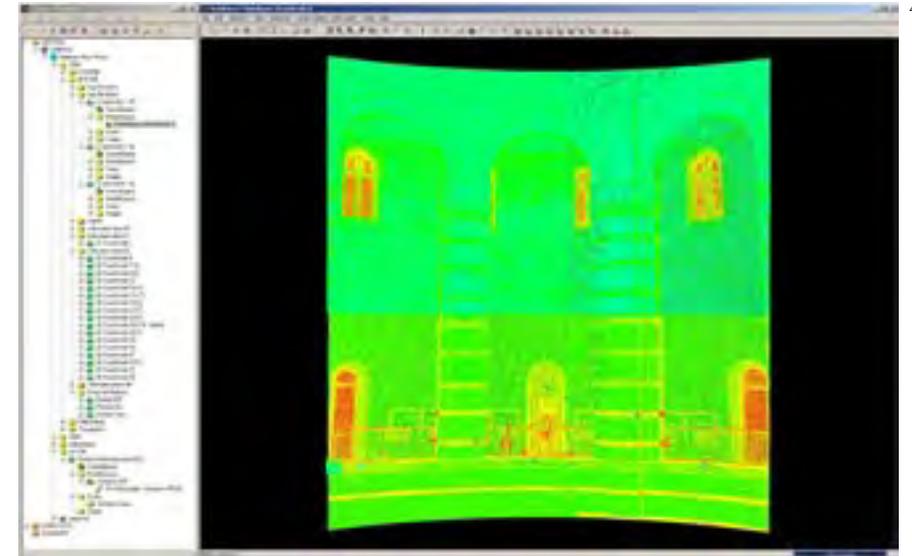
Fig. 4 - Schermata di lavoro di *Cyclone 4.0.2*, con il *modelspace* di una delle scansioni aperto accanto al *browser* del *database IMP* delle scansioni.

Fig. 5 - I punti del rilievo topografico importati in *Cyclone*, vengono riconosciuti come un *controlsace*.



² Il programma in questione è strutturato secondo alcuni moduli operativi: un modulo per le operazioni di scansione, uno per la visualizzazione delle nuvole di punti, uno per l'elaborazione e la modellazione ed uno per la registrazione.

Il modo di gestire i dati è strutturato secondo una logica ad albero, con radice posta nella stazione di lavoro (considerata *server* del sistema) che ha come prima ramificazione uno o più *database*, ognuno dei quali rappresenta un insieme complesso a piacere di nuvole di punti, tutti i dati afferenti al database sono raccolti in un unico file con estensione *IMP*. A fini operativi il file viene visualizzato come suddiviso in una serie di cartelle dette chiamate *PROJECT* e nelle quali possono essere creati, dall'operatore o, in automatico, dal programma stesso, dei contenitori di dati tra loro

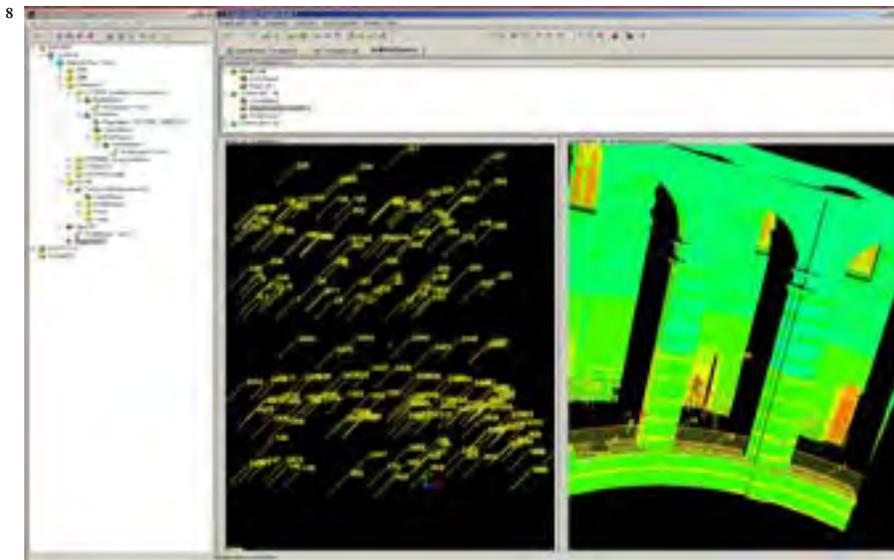


relazionati detti *SCANWORLD*, *MODELSPACE*, *CONTROLSACE* e *REGISTRATION*.

Uno *scanworld* è "una nuvola di punti con origine degli assi posta nella sorgente dello strumento misuratore o che comunque dipende da parametri da quest'ultimo impostati per la de-

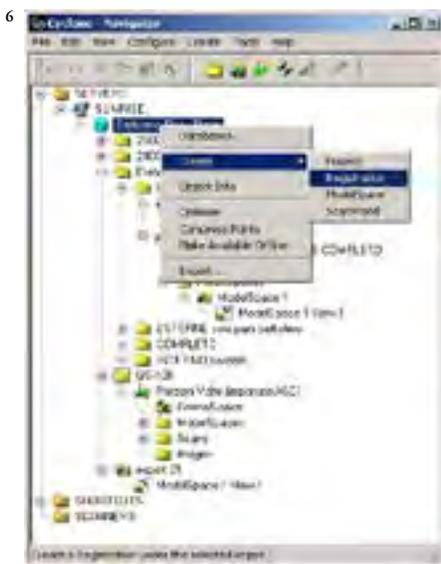
finizione del centro dello spazio del modello digitale tridimensionale.

Il *controlsace* è invece l'insieme dei punti di riferimento provenienti da una scansione, ovvero l'insieme dei target, piani o sferici, restituiti sotto forma di *punti di controllo* della nuvola, se in una scansione si sono posti, per



e visualizzazione della nuvola di punti sia nel caso che questa provenga dal risultato di una registrazione o che sia ottenuta da un singolo *scanworld*, nel *modelspace* si possono creare superfici, suddividere per parti le nuvole, creare elementi geometrici di vario genere, aggiungere notazioni ed elementi di controllo, eseguire misurazioni. Di conseguenza, tutti i dati provenienti dai vari scanner e dal rilievo topografico dovevano essere resi tali da poter essere importati all'interno di *Cyclone* in modo da comparire come degli *scanworld* dotati di un corretto *control-space*, e da li messi tra loro in relazione con una o più *registration*.

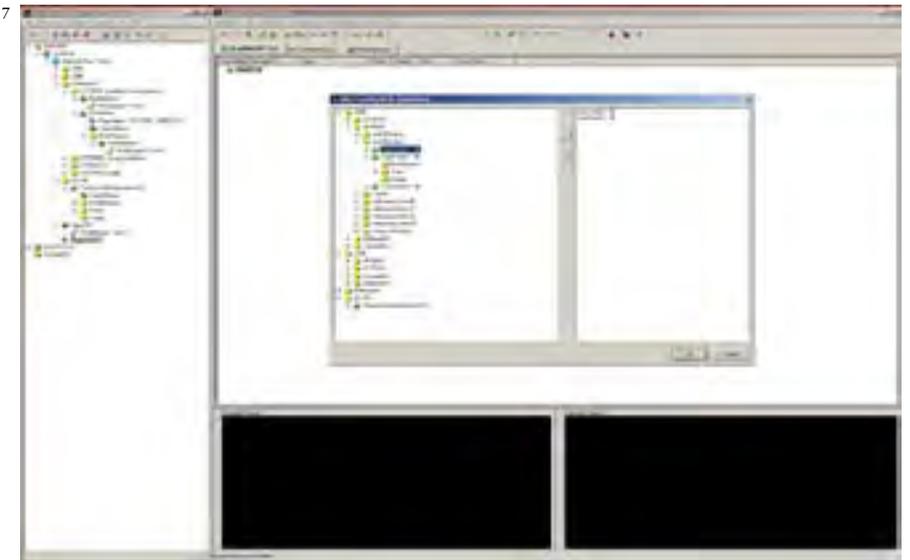
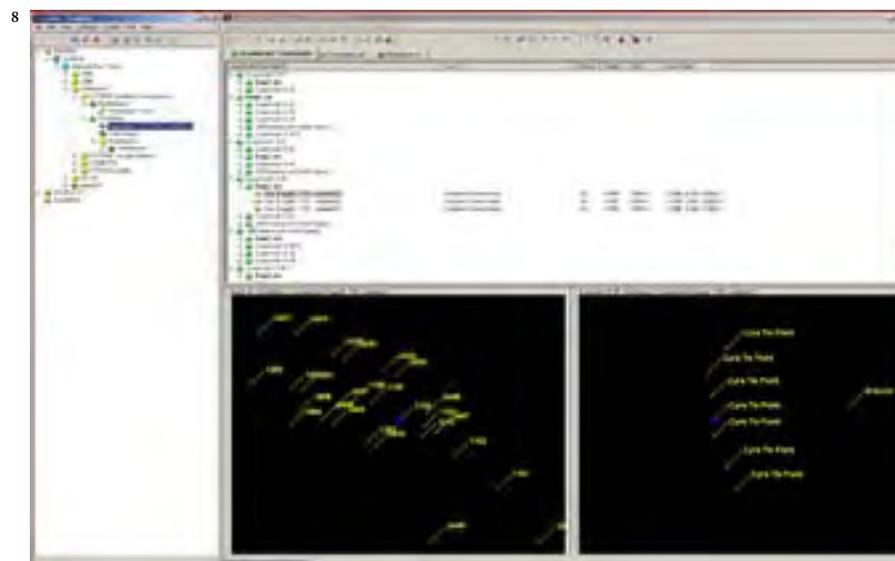
In merito a quest'ultimo punto si tenga presente che nulla vieta di tentare di generare un unico progetto registrato in prima istanza utilizzando tutti gli *scanworld* disponibili in un'unica volta, ma di certo non è questo il metodo più razionale o pratico per procedere, infatti, se si adottasse una procedura di



base dei loro *controlspace*, sia la selezione di quali *scanworld* si vogliono correlare, sia l'attribuzione di quale peso ogni punto dei *controlspace* avrà nell'impostazione del nuovo modello registrato, avviene secondo le scelte dell'operatore. Un *modelspace* è invece uno spazio di editazione, elaborazione

ipotesi, cinque target, allo *scanworld* ottenuto sarà associato un *controlspace* composto da cinque punti. Sulla base di questi punti sarà poi possibile associare differenti *scanworld*.

Creare una *registration* corrisponde a creare uno spazio di lavoro in cui relazionare due o più *scanworld* sulla

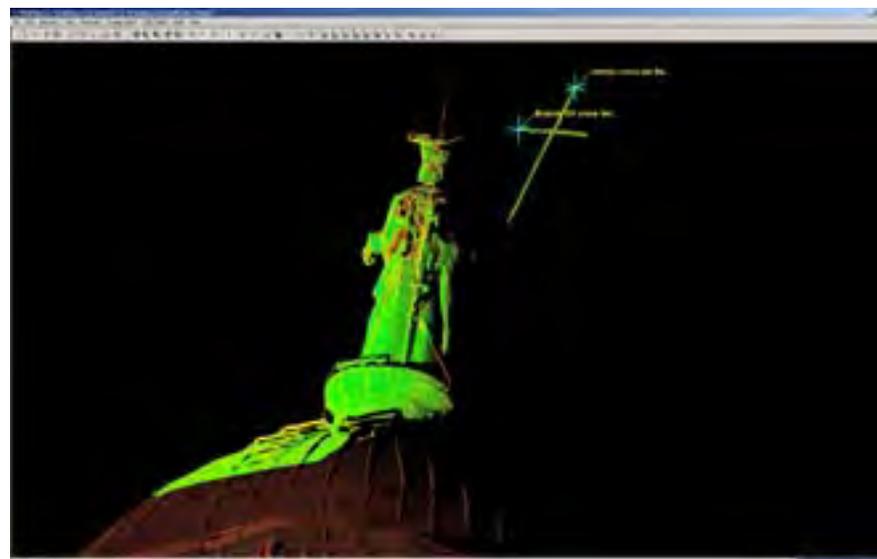
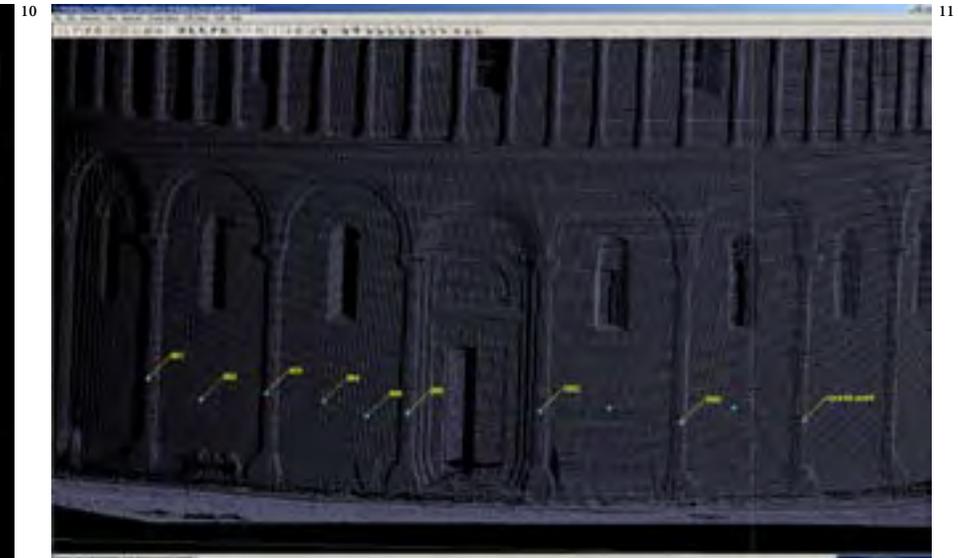
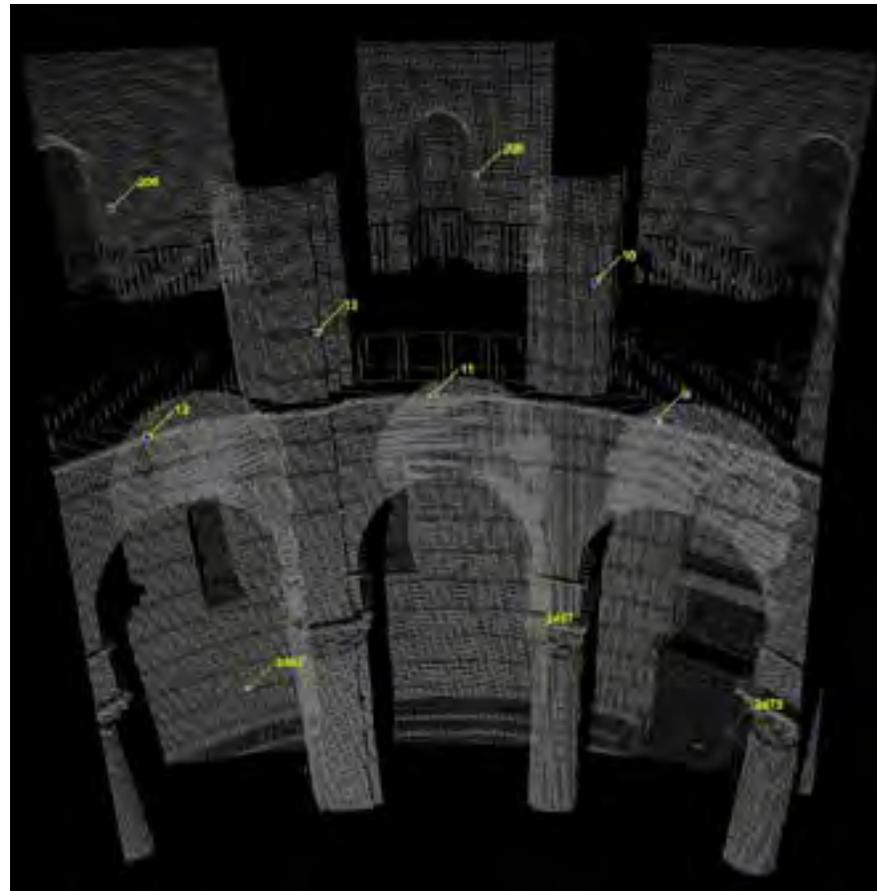


questo genere, non solo sarebbe molto difficoltoso controllare e venire a capo di errori e anomalie sempre presenti in progetti di grandi dimensioni, ma risulterebbe ugualmente faticoso calibrare i punti di controllo per dare il giusto peso alle varie parti del sistema di referenziazione. Si è quindi proceduto a creare in *Cyclone* un nuovo database *IMP* di composizione di tutti i dati raccolti e ad importare al suo interno, per prima cosa, il file corrispondente all'insieme dei punti battuti nel rilievo topografico², questa sarebbe stata la base di tutta la costruzione successiva. L'importazione, avvenuta sulla base di un file testuale *CSV*, ha prodotto la creazione di un nuovo *scanworld* composto esclusivamente dai punti

Fig. 6 - Creazione di una nuova *registration* nella struttura del database *IMP*

Fig. 7 - La *registration* aperta, si procede con l'aggiunta degli *scanworld* che devono essere relazionati.

Figg. 8/9 - Nel modulo di controllo della *registration* di *Cyclone* è possibile eseguire varie operazioni di controllo e calibrazione.



Figg. 10/11 - Due scansioni non referenziate con messi in evidenza i target che compongono il loro *modelspace* e permettono la messa in relazione della nuvola di punti con il dato della stazione totale.

Fig. 12 - Al fine di consolidare l'operazione di registrazione è possibile aggiungere dei vincoli manualmente, nell'esempio l'aggiunta di una serie di vertici di controllo sulle braccia della croce della statua di San Giovanni hanno permesso di compensare delle piccole divergenze dell'insieme delle scansioni dell'esterno.

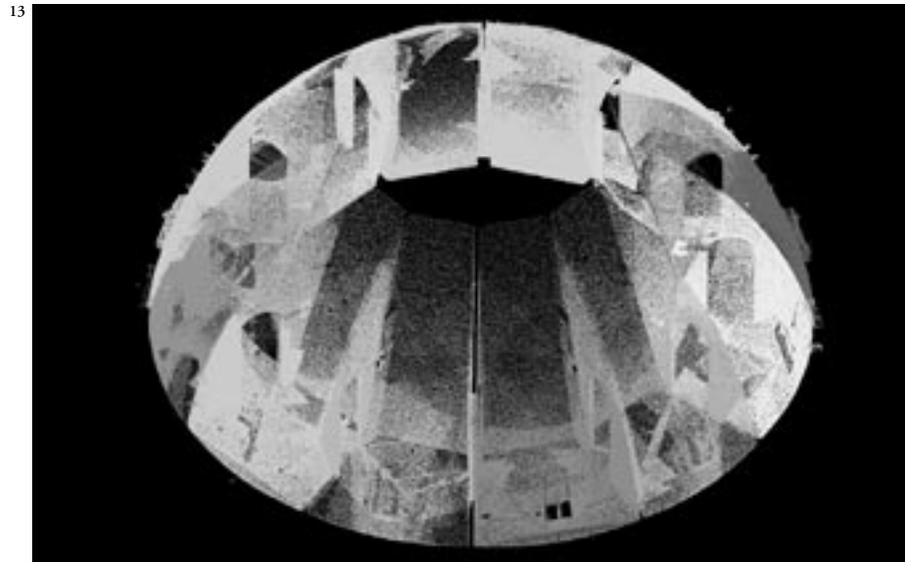
del proprio *controlsapce*, ovvero tutti gli oltre quattrocento punti presi con stazione totale, questi ovviamente presentano una propria numerazione e identificazione, sulla base delle monografie del rilievo topografico, e in corso di rilievo, tutti i target presenti nelle scansioni erano stati nominati con la corretta dizione in relazione a quanto memorizzato dalla stazione totale.

A partire dalla creazione di questo particolare scanworld si è proceduto all'importazione di tutte le parti provenienti dalle scansioni del *Cyrax 2500* e quindi da quelle, in formato *CGP*, del *Cyrax 2400*³. La parte rilevata con il *Mensi GS-100* è stata invece lasciata inizialmente da parte, con la riserva di aggiungerla solamente ad operazioni di registrazione completate per la parte *Cyrax*. A questo punto è stato necessario organizzare in una forma pratica tutto l'insieme delle scansioni, per cui si è deciso di operare la distinzione, creando dei *project* separati, tra scan-

sioni eseguite con il *Cyrax 2500* ed il *Cyrax 2400*, all'interno di ognuno di questi due contenitori si sono creati dei sotto-progetti dedicati alle parti interne e a quelle esterne. Il processo ha seguito questo percorso alla rovescia, per cui da prima si sono referenziati tutti gli esterni acquisiti con il *Cyrax 2400*, e successivamente gli interni dovuti a questa stessa apparecchiatura, in seguito l'operazione è stata ripetuta, divisa ancora una volta tra interni ed esterni per i dati dovuti al *Cyrax 2500*.

Completata la creazione delle registrazioni parziali, si è provveduto alla creazione di un nuovo project esterno al "2400" e al "2500" e detto "ELABORAZIONI" nel quale sono stati assemblati, separatamente tutti gli esterni e tutti gli interni. Infine, registrando i project "INTERNI" ed "ESTERNI" si è prodotto il modello completo di tutti i dati rilevati.

La procedura di registrazione è alquanto



complessa nei passaggi, essenzialmente si procede creando una nuova *registrazione*, aprendola, e caricando all'interno di questa tutti gli *scanworld* che si desiderano utilizzare, il primo ad essere caricato verrà considerato *home scanworld*, ovvero non subirà nessuna modifica di rototraslazione nel corso della registrazione, mentre saranno tutti gli altri *scanworld* ad essere spostati e ruotati sulla base della posizione di questo. Una volta completato la serie di aggiunte, si eseguirà la procedura automatica detta *auto-add constrains*⁴, con cui il software individuerà le corrispondenze, basate sulle dizioni assegnate ai punti, tra *scanworld*. A processo ultimato la finestra di lavoro della *registrazione* presenterà la lista dei vincoli dell'operazione e il valore dell'eventuale distanza minima tra punti di registrazione corrispondenti. Questo valore indica quindi la correttezza dell'allineamento ottenuto, o la validità del punto di calibrazione scelto

che dir si voglia. Prima di poter procedere alla definitiva messa a registro dell'insieme così creato, è ragionevole eseguire le operazioni di correzione manuale che si ritengono necessarie, ovvero variare il coefficiente di incidenza sugli allineamenti dei punti ritenuti meno affidabili, modificando il valore numerico della voce *weight* (peso) corrispondente al *constrain* individuato, in questa maniera, un punto ritenuto meno attendibile, ricevendo un valore di *weight* inferiore ad uno, risulterà meno determinante nella ricomposizione delle scansioni.

Completate le fasi di preparazione, con il comando *register*, si avvierà la procedura automatica di combinazione delle parti, completata la quale, internamente al *database IMP* corrente sarà stato creato un nuovo progetto contenente il modello registrato di tutte le scansioni precedentemente selezionate. A partire da questo particolare modello, si potranno creare tutti i *modelspace*

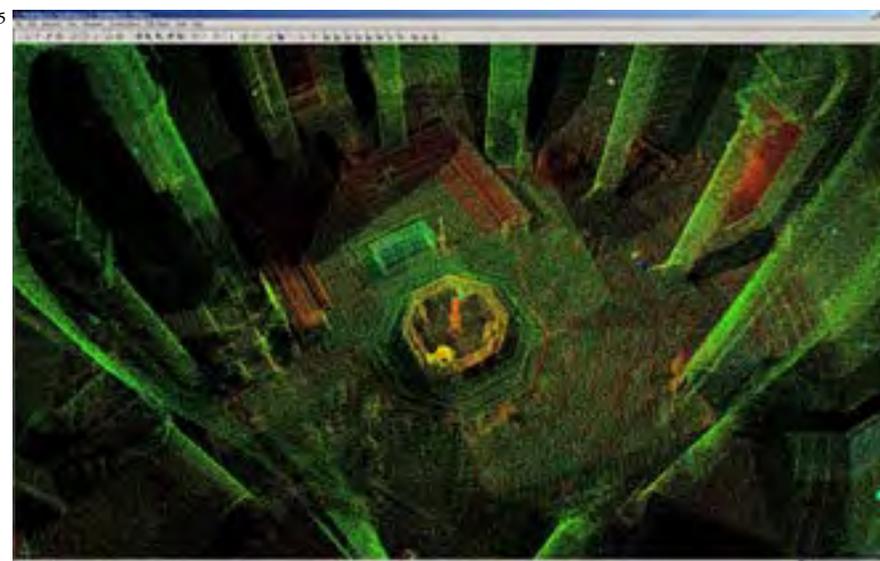
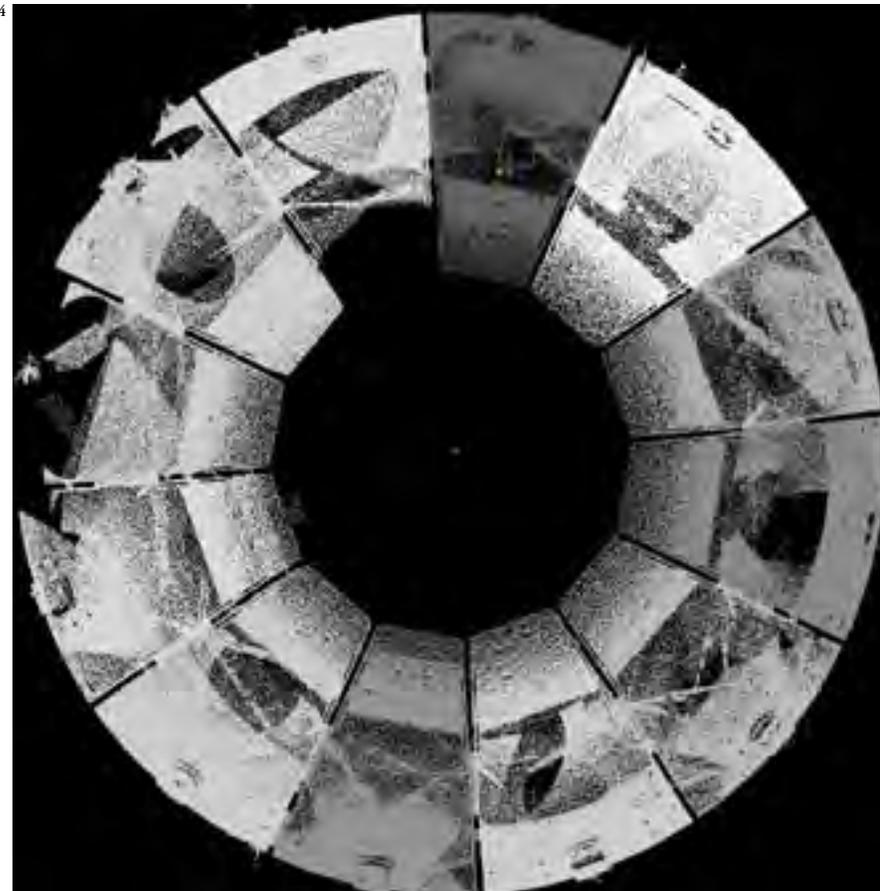
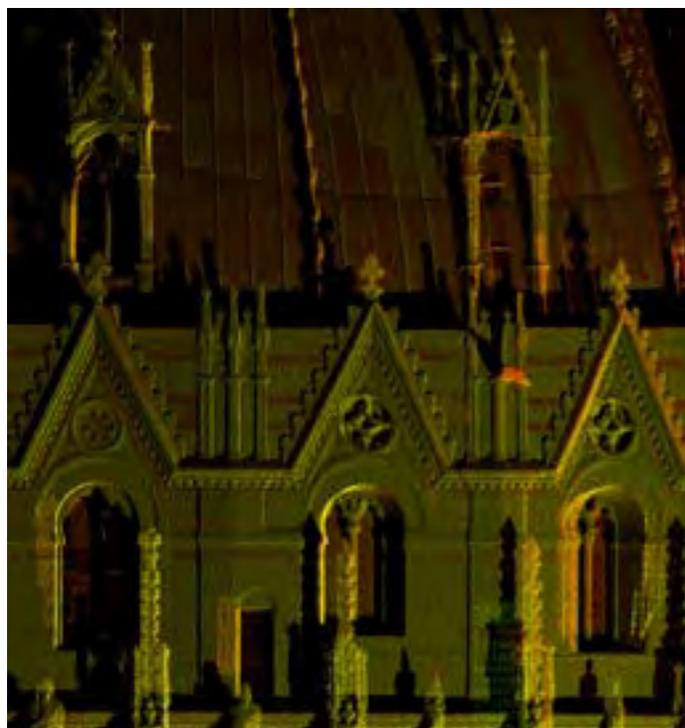
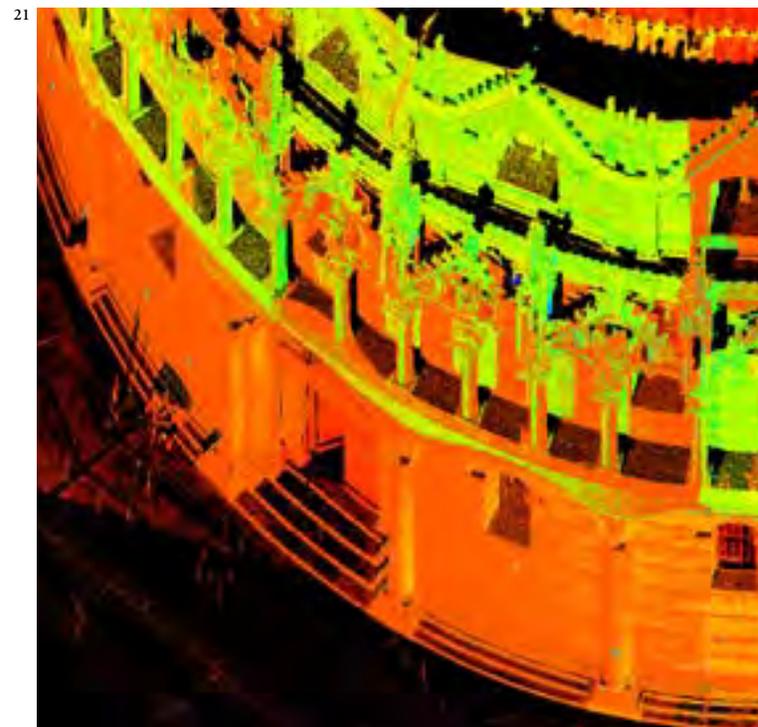
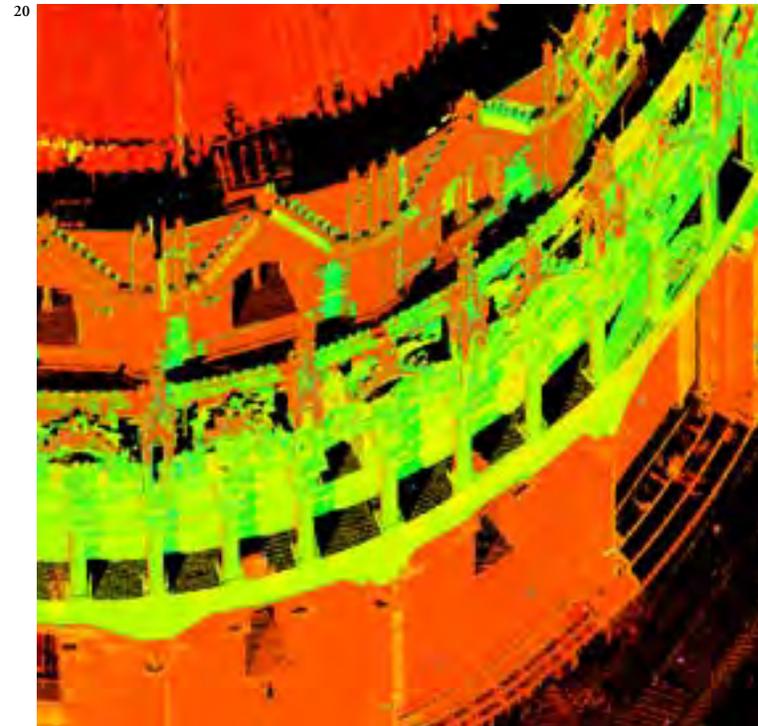
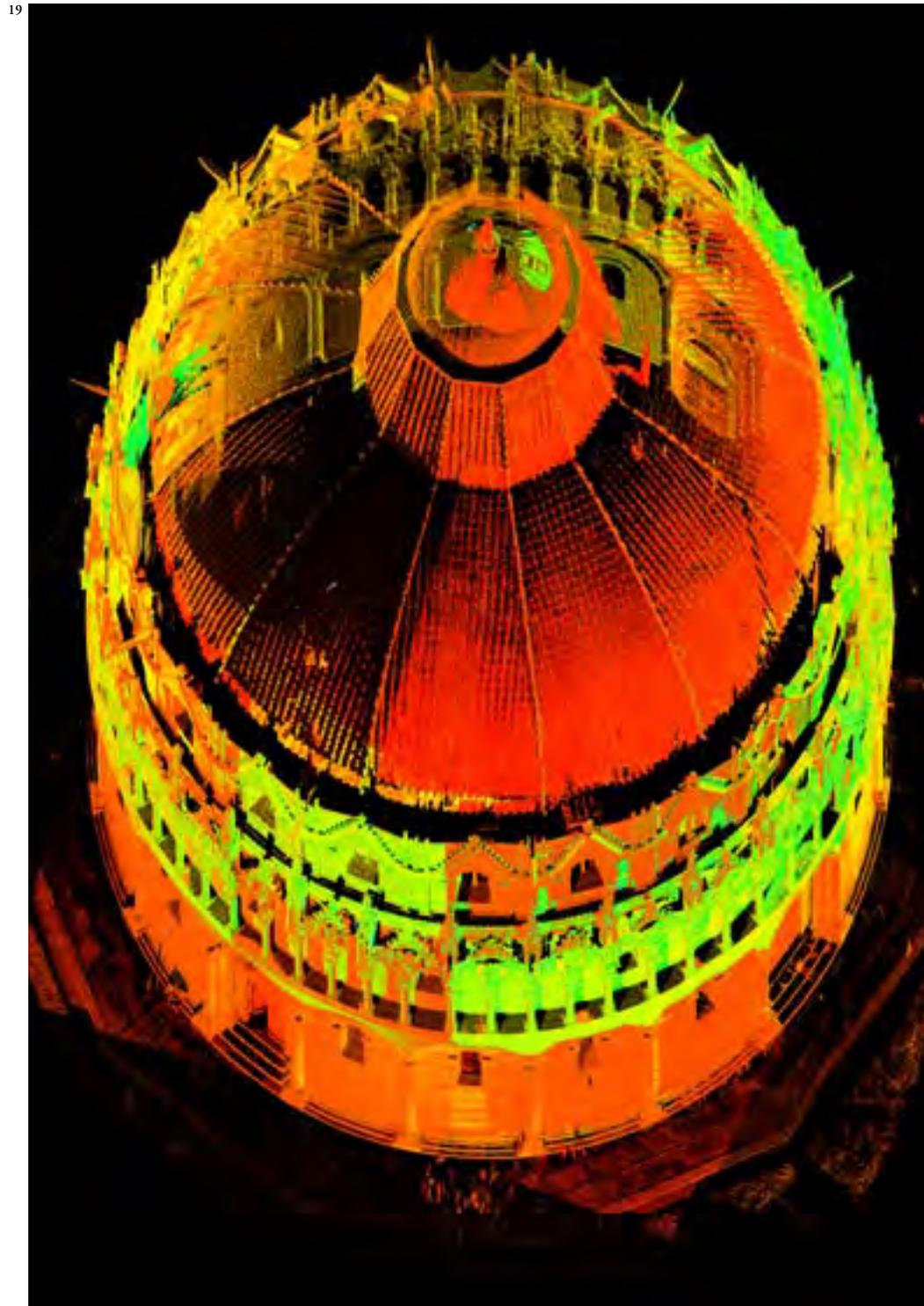


Fig. 13/14 - L'insieme, già rielaborato, del modello tridimensionale digitale degli spazi interstiziali della copertura, ottenuto dalle scansioni eseguite con lo scanner *GS-100* della *Mensi*.

Fig. 15 - Scorcio degli interni del modello completo registrato, veduta verso il fonte battesimale.



Figg. 16/18 - Il modello per punti completo, solo prese esterne, il fronte posteriore è celato, veduta del prospetto est.



Figg. 19/21 - Il modello per punti completo, sole prese esterne, veduta assometrica.

ritenuti necessari per eseguire lo studio, l'analisi e l'editazione del rilievo eseguito.

Nelle operazioni di composizione del rilievo del battistero, la registrazione è stata eseguita in maniera progressiva, allineando gruppi di quattro, cinque singole scansioni sulla base del rilievo topografico e successivamente aggiungendo ulteriori parti.

A operazioni di registrazione concluse, dopo molti giorni di lavorazione, il modello complessivo che è emerso presentava una divergenza massima nei punti di minor affidabilità di un centimetro e mezzo, un risultato, soprattutto indice della grande qualità di esecuzione del rilievo topografico che era stato approntato per questo rilievo.

A questo punto non restava che aggiungere le parti provenienti dallo scanner panoramico, operazione che si sarebbe rivelata molto più impegnativa del previsto, ma portata a termine con un numero di passaggi elevati, ma senza alterare minimamente la qualità complessiva del rilievo o quella delle scansioni del sottovolta.

I dati provenienti dallo scanner *Mensi* avevano ne più ne meno le stesse caratteristiche di quelli acquisiti dagli scanner *Cyrax*, erano frammentati, contenevano i punti dei target corrispondenti al rilievo topografico,

ammontavano, complessivamente a circa venti milioni di punti.

Dopo aver tentato, senza successo, di eseguire la registrazione delle singole prese importandole in *Cyclone*, si è deciso di aggirare l'ostacolo eseguendo la correlazione tra rilievo topografico e scansioni *Mensi* separatamente entro il software di gestione *Mensi*, il *Realworks Survey 3*⁵. Una volta conclusa l'operazione di composizione delle singole parti sul rilievo topografico, l'insieme dei rilievi galleggiava nello spazio del rilievo topografico, correttamente relazionato al suo gruppo di punti cardine.

In questa maniera si era ottenuto, da una parte il modello completo di tutti i punti relativi a interni ed esterni, e dall'altro il totale degli interni degli spazi interstiziali tra le cupole e volta, ambedue correttamente referenziati rispetto allo stesso sistema di riferimento. Il completamento dell'elaborazione dei dati digitali del rilievo era quindi imminente, importando in *Cyclone* come file *CSV*⁶ la nuvola dei punti referenziata da *Realworks*, premesso il settaggio di alcune opzioni di conversione del sistema delle coordinate⁷, il modello parziale⁸ poteva essere congiunto con il totale con una semplice operazione di copia e incolla tra *modelspace*.

Il modello di tutti i punti rilevati è stato così concluso, il *database IMP* creato

ed elaborato, privo di ogni creazione geometrica, ammonta a oltre centosettanta milioni di punti, per un volume di dati di oltre 3,7 *Gigabyte*.

Note

¹ Per ogni software impiegato per l'esecuzione della scansione è indicata l'estensione corrispondente al file generato, nel caso dei prodotti *Cyra*, il software *CGP* è stato usato per la gestione e l'archiviazione dei dati con lo scanner *Cyrax 2400*, mentre per l'uso del più recente *Cyrax 2500* si è dovuta utilizzare il nuovo software: il *Cyclone*.

² Questa operazione può comunque essere compiuta in qualunque momento, l'importante è che al momento di eseguire la registrazione degli *scanworld* la parte topografica sia disponibile all'interno del database.

³ Il vecchio formato *CGP* ha numerose similitudini con il nuovo formato *IMP*, ma a differenza di quest'ultimo l'insieme dei dati raccolti non è incorporato in un unico file ma in più archivi. A prescindere da questo, *Cyclone* supporta in perfettamente l'importazione

dei file *CGP* all'interno di un database *IMP*, non alterando nessun aspetto dell'originale.

⁴ Il programma utilizza la parola "constrain" ovvero "vincolo" con cui vengono identificati da quel momento in poi i punti corrispondenti ai target noti presenti nella scansione.

⁵ Le operazioni di registrazione del rilievo *Mensi* sono state curate da Stefano Lemma e Daniele Bartolucci della Geotop Italia.

⁶ Lo svantaggio del passaggio è la perdita delle caratteristiche *RGB* del punto, tuttavia, viste le caratteristiche dello spazio rilevato e la sua grande omogeneità cromatica, questo non è certo da ritenersi una grave mancanza.

⁷ Il file *CSV* esportato a cura della Geotop presentava infatti le coordinate espresse secondo la struttura *ZXY*, mentre la struttura base per l'importazione di un file *CSV* di *Cyclone* prevedeva una struttura *XYZ*, fortunatamente il modulo di importazione permette però di reimpostare l'associazione colonna – coordinata a discrezione dell'operatore.

⁸ Prima di procedere alla sua inclusione nel modello complessivo, in virtù della monocromaticità che avrebbe assunto, si è preferito suddividere la nuvola secondo i dodici vani del sottovolta, per agevolarne le successive manipolazioni.

Diario del rilievo

Tra le caratteristiche maggiormente eclatanti del rilievo eseguito a Pisa risulta alquanto evidente la grande rapidità di esecuzione. La cronologia che segue è qui redatta per presentare in maniera ordinata, secondo i tempi in cui sono state svolte, le operazioni condotte dal maggio 2002 al maggio 2003, un anno di lavoro e ricerca in cui l'impegno sul rilievo del battistero e sulla sua restituzione è stato continuo, e a tutt'oggi in fase di sviluppo.

Si tenga presente che questi non sono propriamente i tempi del rilievo digitale, in quanto se da una lato un significativo schieramento di strumentazioni e di operatori ha permesso di eseguire le fasi di misurazione in brevissimo tempo, dall'altro, l'esigenza di conoscere, comprendere e ricercare soluzioni, ha portato ad un protrarsi delle fasi di restituzione. Al tempo stesso, un altro fattore di aumento dei tempi è stato il doversi riorganizzare e ampliare nella dotazione tecnologica per poter far fronte in maniera efficace alle necessità operative che il lavoro che si stava affrontando richiedeva.

sono le migliori, in quanto piove continuamente e quindi iniziare dagli interni è una scelta obbligata, dopo una rapida ispezione, si decide di cominciare dalla galleria del primo piano, eseguirne i prospetti, fino a coprire la parte centrale della pavimentazione del piano terra, poi a seguire le infilate della gallerie.

Nella prima giornata viene utilizzato solo il Cyrax 2400, nella speranza che un cambiamento delle condizioni

atmosferiche permetta di iniziare le scansioni con il modello 2500, più adatto agli esterni e alle maggiori distanze. Nella stessa giornata viene pianificato il progetto di rilievo topografico, si prendono gli accordi sulla numerazione dei target e si definisce la struttura principale delle operazioni.

A conclusione della giornata si saranno eseguite sedici scansioni da tre stazioni diverse, a copertura di una

campata della doppia galleria interna.

9 Maggio 2002 – Si proseguono le scansioni negli interni, il tempo è ulteriormente peggiorato, inoltre, durante una schiarita ci si rende conto che la parte della copertura rivestita in piombo, bagnata, riflette in maniera tale da presentare una potenziale alterazione delle misurazioni. Si procede quindi con i rilievi dalla galleria superiore, questa volta

Fig. 1 - Scansione degli esterni, maggio 2002, alcuni visitatori, rimasti seduti a lungo, "fissati" nella nuvola di punti.

8 Maggio 2002 – Si iniziano le scansioni, le condizioni non



impiegando tutti e due gli scanner.

Il rilievo topografico viene portato avanti e vengono eseguite anche le prime intersezioni in avanti a consolidamento dei punti non fisicamente raggiungibili.

Nella serata, alla chiusura del battistero, il cielo è completamente sereno e si allestiscono i due scanner in esterni con l'intenzione di lavorare per tutta la notte ed eseguire quanto più possibile delle facciate. Le postazioni allestite sono posizionate ai due lati della cattedrale, l'avvio dei lavori è molto incoraggiante, ma poco dopo mezzanotte, riprende a piovere e si deve smantellare tutta la postazione in gran fretta, la presa eseguita con il Cyrax 2500 è stata completata, mentre quella eseguita con il modello 2400 deve essere interrotta e dovrà essere successivamente integrata.

Nella seconda giornata si riesce tuttavia a prendere atto della potenza del sistema in uso, realizzando ben ottantatre scansioni da tredici stazioni diverse.

10 Maggio 2002 – Con l'intento di completare i rilievi dalla galleria superiore, che ha il vantaggio di permettere di eseguire tre stazioni consecutive senza dover spostare lo scanner, si riportano tutti e due gli scanner al primo piano, nell'arco,

ma per una serie di contrattempi a fine giornata rimangono ancora tre campate da acquisire.

Il rilievo topografico della parte interna viene concluso.

13 Maggio 2002 – Dopo la pausa del fine settimana per permettere a tutti di rimettersi in forze e per riordinare le idee, si parte con il rilievo diretto del sistema dei collegamenti verticali, a differenze che nelle altre giornate,

il numero di operatori è molto aumentato, ma si opera di notte, a battistero chiuso e il problema della frequentazione turistica non si pone. Mentre con il Cyrax 2400 si riprendono le scansioni dalla galleria del primo piano, con il Cyrax 2500 si eseguono le scansioni della volta centrale e delle volte a crociera della prima galleria.

Nel pomeriggio è stato ripreso anche il rilievo topografico e sono stati

eseguiti tutti i raccordi con l'esterno.

14 Maggio 2002 – Dopo una notte di rilievi con scanner e metro da muratore, le squadre di rilievo si ritirano per passare gli strumenti al secondo gruppo di rilevatori, gli scanner sono subito rimessi all'opera, prima il 2500, negli esterni, dal prato e dalle mura, nei pressi della Porta del leone, e poi, appena possibile, di nuovo negli interni con il 2400



Fig. 2 - Scansione degli esterni, maggio 2002, una coppia rimasta seduta a lungo, "fissata" nella nuvola di punti.

per eseguire le ultime scansioni dalla galleria.

A fine giornata anche il rilievo topografico è concluso e con la chiusura del battistero riparte il rilievo delle scale.

Le scansioni delle volte a crociera vengono completate.

15 Maggio 2002 – In mattinata si concludono le scansioni trasversali lungo la galleria superiore.

Il rilievo digitale eseguito con gli scanner Cyrax è stato portato a termine.

1 Giugno 2002 – Dal Nublalab arrivano le prime immagini a documentazione del lavoro svolto, si tratta di semplici *screenshot* eseguiti in varie modalità di visualizzazione, in questa fase non è ancora possibile elaborare i dati presso il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura a Firenze.

25 Agosto 2002 – Fabrice Castello, della Mensi arriva per la campagna di rilievo con lo scanner GS-100 del sistema delle volte della copertura, le riprese dureranno tutta la notte.

26 Agosto 2002 – Completato il rilievo del sottovolta nelle prime ore del mattino, si eseguono alcune scansioni test degli esterni e degli interni, frattanto il rilievo topografico

viene ripreso per rilevare l'insieme dei target utilizzati dal Mensi e per collegare questa nuova parte della rete topografica con il resto della poligonale.

27 Agosto 2002 – Il rilievo topografico del sistema delle volte è portato a termine e con esso tutta la rete topografica è conclusa.

8 Settembre 2002 – Prima da solo e poi assieme a Francesco Tioli inizio una lunga serie di missioni a presso il laboratorio del Nublalab di Ferrara per l'elaborazione dei dati rilevati con gli scanner Cyrax e Mensi.

20 Settembre 2002 – Il database delle scansioni è completato, la Mensi ha frattanto fatto pervenire i risultati delle loro scansioni che benché ancora parziali mostrano l'efficacia della scelta "panoramica" per quella parte di rilievo. La soluzione da adottarsi per l'implementazione di questa parte del rilievo risulta ancora tutta da definire.

15 Novembre 2002 – Il laboratorio allestito presso il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura è pienamente operativo, la stazione di lavoro appositamente allestita e il software *Cyra Cyclone 4.0* permettono

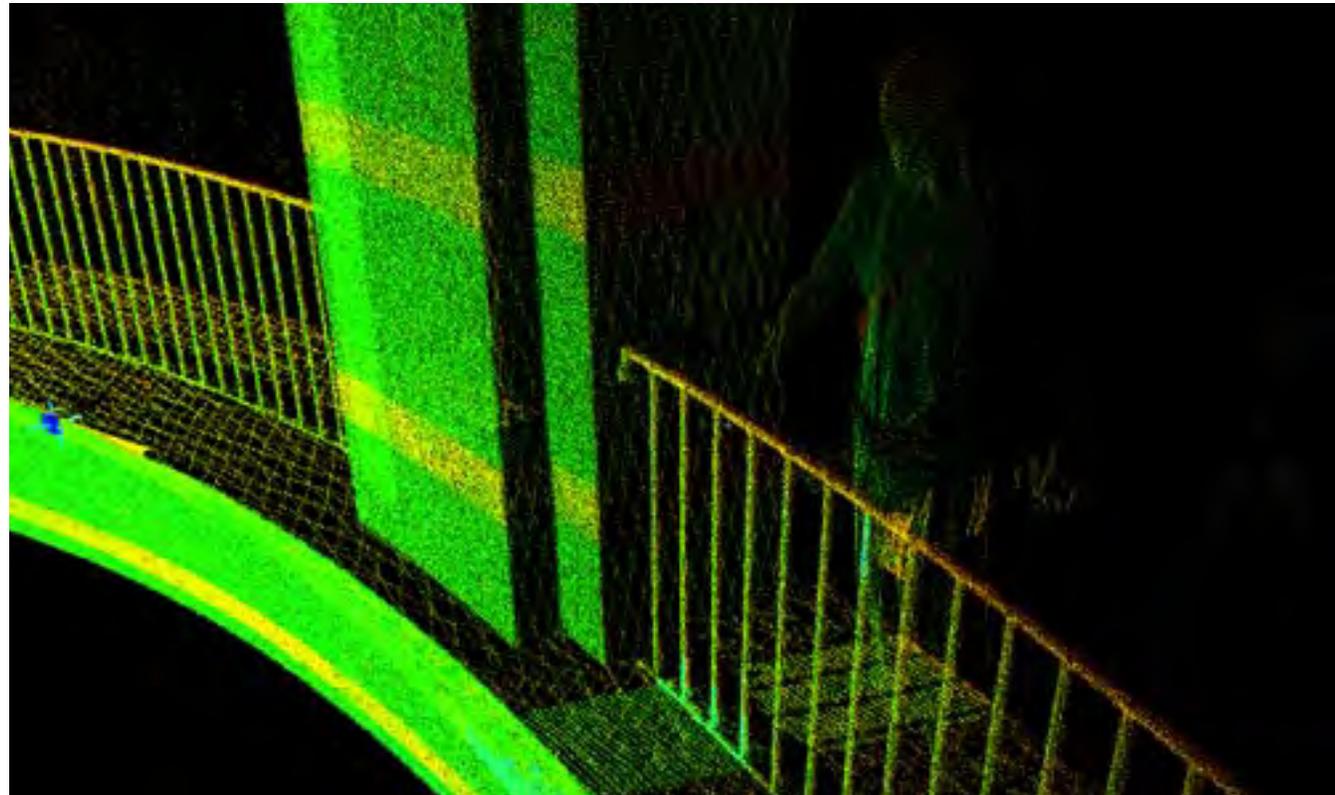


Fig. 3 - Scansione degli interni, maggio 2002, un passante intrattenutosi al parapetto a lungo, "fissato" nella nuvola di punti.

di iniziare le elaborazioni sul rilievo.

10 Dicembre 2002 – Il modello della nuvola dei punti è completamente registrato e messo a punto, a meno delle porzioni eseguite con lo scanner Mensi, per le quali si stanno ancora sperimentando dei sistemi di importazione .

9 Dicembre 2002 – Al fine di ampliare il gruppo di lavoro sulle restituzioni ed elaborazioni del rilievo del battistero, si organizzano una serie di lezioni per il trasferimento delle conoscenze acquisite, la struttura dei corsi è organizzata in lezioni settimanali di due ore per due allievi per volta. A seguire la prima serie di lezioni sono quattro dottorandi di “Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente”: Giovanni Anzani, Lorenzo Bianchini, Giovanni Pancani e Rocio Serrano Alonso.

15 Dicembre 2002 – Incontro, presso il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura con l'Ing. Leonardo Nardini, responsabile della Leica Geosystem Italia e Daniel Chudak, direttore Cyra per i “progetti speciali”, per la presentazione dello stato di avanzamento del rilievo del battistero, dopo aver preso visione del lavoro svolto, Chudak definirà il

nostro lavoro “miglior progetto finora visto in ambito universitario”.

15 Febbraio 2003 – Prime elaborazioni del modello per superfici, test di rappresentazione automatica, test di applicazioni di texture. Elaborazione di un metodo di restituzione per semplificare la produzione di piante e sezioni.

10 Marzo 2003 – Il modello digitale tridimensionale per superfici è avviato nella soluzione che lo porterà a termine, la produzione degli elaborati bidimensionali è in corso d'opera sulla base di un procedimento appositamente escogitato.

4 Aprile 2003 – La Geotop, completa le operazioni di registrazione delle scansioni eseguite con lo scanner Mensi.

8 Aprile 2003 – Finalmente anche la nuvola di punti acquisita con il Mensi GS-100 viene correttamente inclusa nel database totale del modello del battistero.

14 Aprile 2003 – La realizzazione del modello degli interni ha messo in evidenza alcune piccole mancanze del rilievo digitale e di quello diretto, risulta pertanto necessario

organizzare una rapida missione di rilievo diretto a Pisa per acquisire tutte le misurazioni necessarie per concludere la modellazione, si tratta prevalentemente di modanature e cornici del fonte battesimale e di misure di verifica e raccordo per la connessione della restituzione delle scale al modello complessivo.

16 Aprile 2003 – Il modello per superfici di tutti gli interni è portato a termine con uno sforzo enorme, nel mese trascorso dal suo inizio i ritmi di lavoro sono stati stremanti, ma il risultato è molto corretto dal punto di vista del rispetto della struttura della nuvola dei punti e benché con qualche difficoltà il file è ancora gestibile da computer ad alto livello di performance.

20 Aprile 2003 – Prima ipotesi di sviluppare un database orientato agli oggetti per la documentazione del modello tridimensionale in corso d'opera, la finalità di questo prodotto, al di là dello scopo archivistico è quella di aumentare l'efficienza del passaggio a terzi del modello prodotto, riducendo al minimo la necessità di indagine e scoperta da parte di un nuovo operatore e facilitando al massimo l'individuazione di limiti, e parti difficoltose presenti nel modello

realizzato.

7 Maggio 2003 – Completamento di alcuni studi accessori sviluppati a partire da parti del rilievo, come il modello dell'ipotetico progetto originale di Diotisalvi.

9 Maggio 2003 – Incontro, presso il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze con C.S. e F.G. della Cyra, per la presentazione del lavoro svolto presso il battistero. Richiesta da parte loro di collaborazione per la definizione e il consulto sulle direzioni da far prendere alle prossime versioni del software Cyclone.

26 Settembre 2003 - Presentazione dei risultati della ricerca nell'ambito della giornata di studi "l'alta tecnologia nella gestione di Piazza dei Miracoli" presso l'auditorium "G. Toniolo", Museo dell'Opera del Duomo, Pisa.

LA RESTITUZIONE DEL RILIEVO

La nuvola di punti

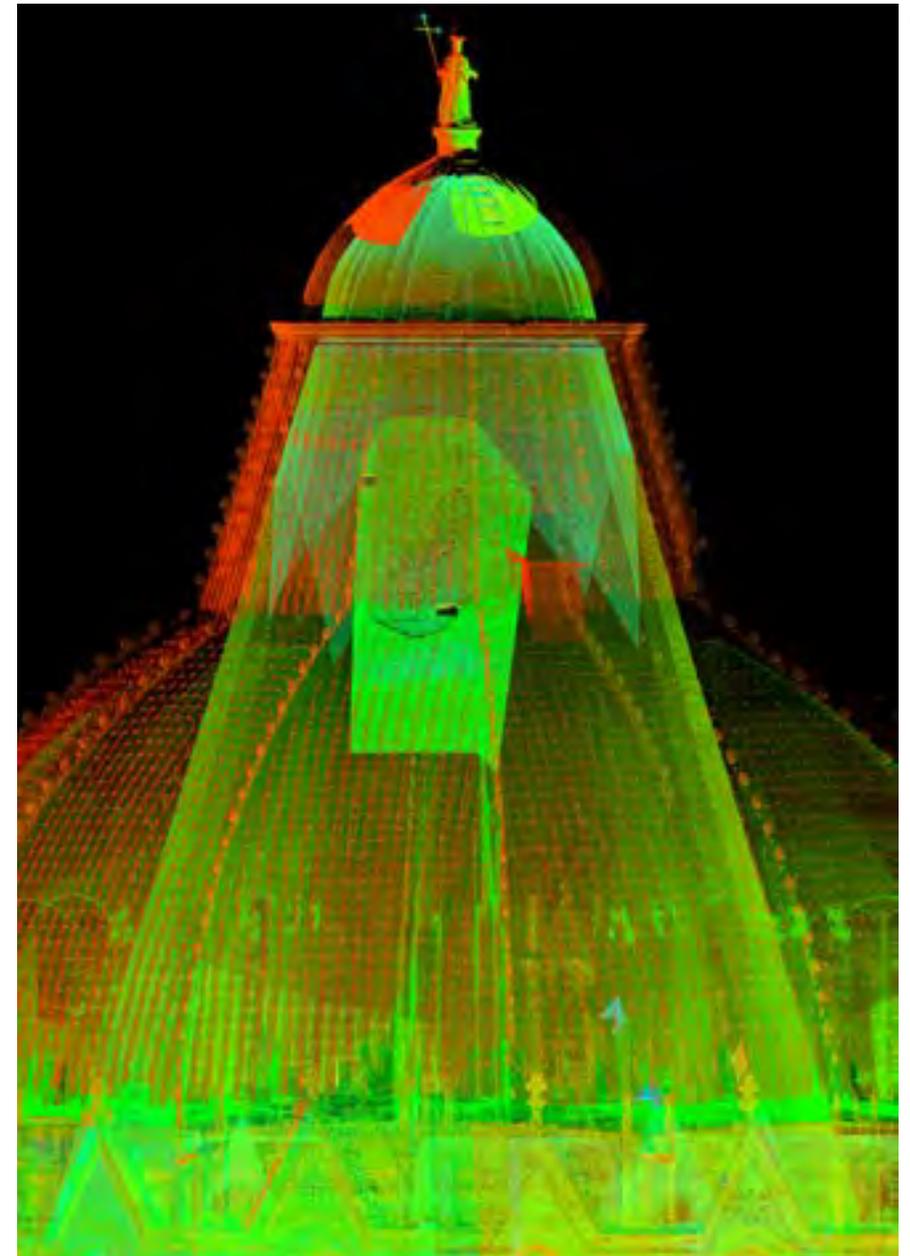
Dopo aver completato la ricomposizione dell'insieme delle nuvole di punti del battistero, quello che si era prodotto era un modello digitale tridimensionale molto complesso, ricchissimo di informazioni, e soggetto a regole e a modalità d'uso specifiche, in alcuni casi inconsuete rispetto alle procedure *CAD* tradizionali.

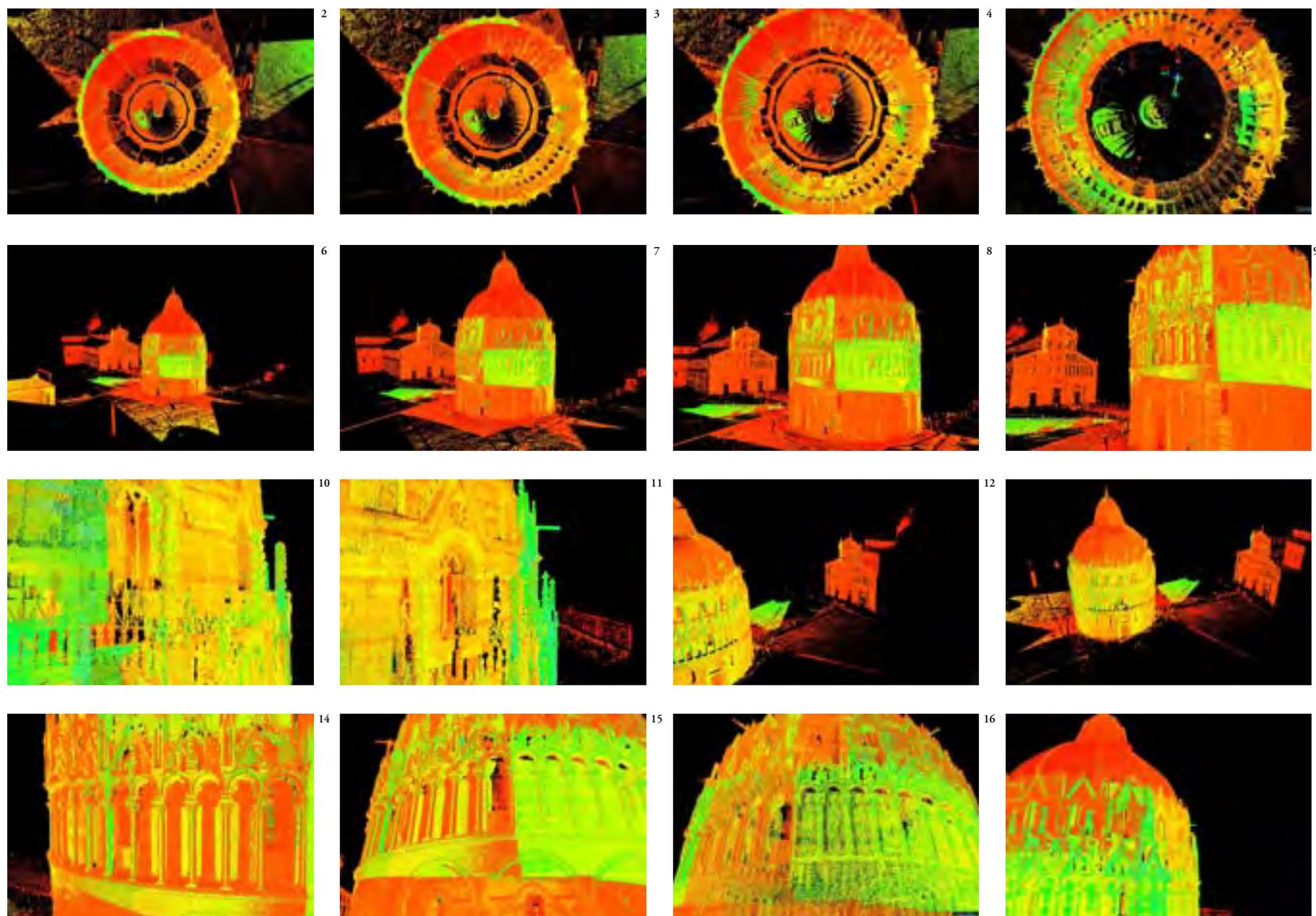
Considerando quanto definito da una nuvola di punti registrata e correttamente strutturata, va detto che come modello tridimensionale è improprio considerarlo una "base di partenza" in quanto questa sua definizione è corretta solo nella misura in cui lo si può definire un oggetto suscettibile di trasformazioni tali da condurlo ad essere un'altra cosa, evoluzione o semplificazione dello stato iniziale. Se invece per "base di partenza" si intendesse che questo modello non è un elaborato completo e fruibile secondo le prerogative di analisi e ricerca che un rilievo permette di applicare e che quindi deve divenire un altro tipo di elaborato per poter essere impiegato, si affermerebbe una cosa non corretta. Si compie invece un'operazione efficace se il modello così generato viene preso come punto di partenza per sviluppi analitici, per estrazione di informazioni, per avviare una qualunque indagine metrologica,

diagnostica, morfologica.

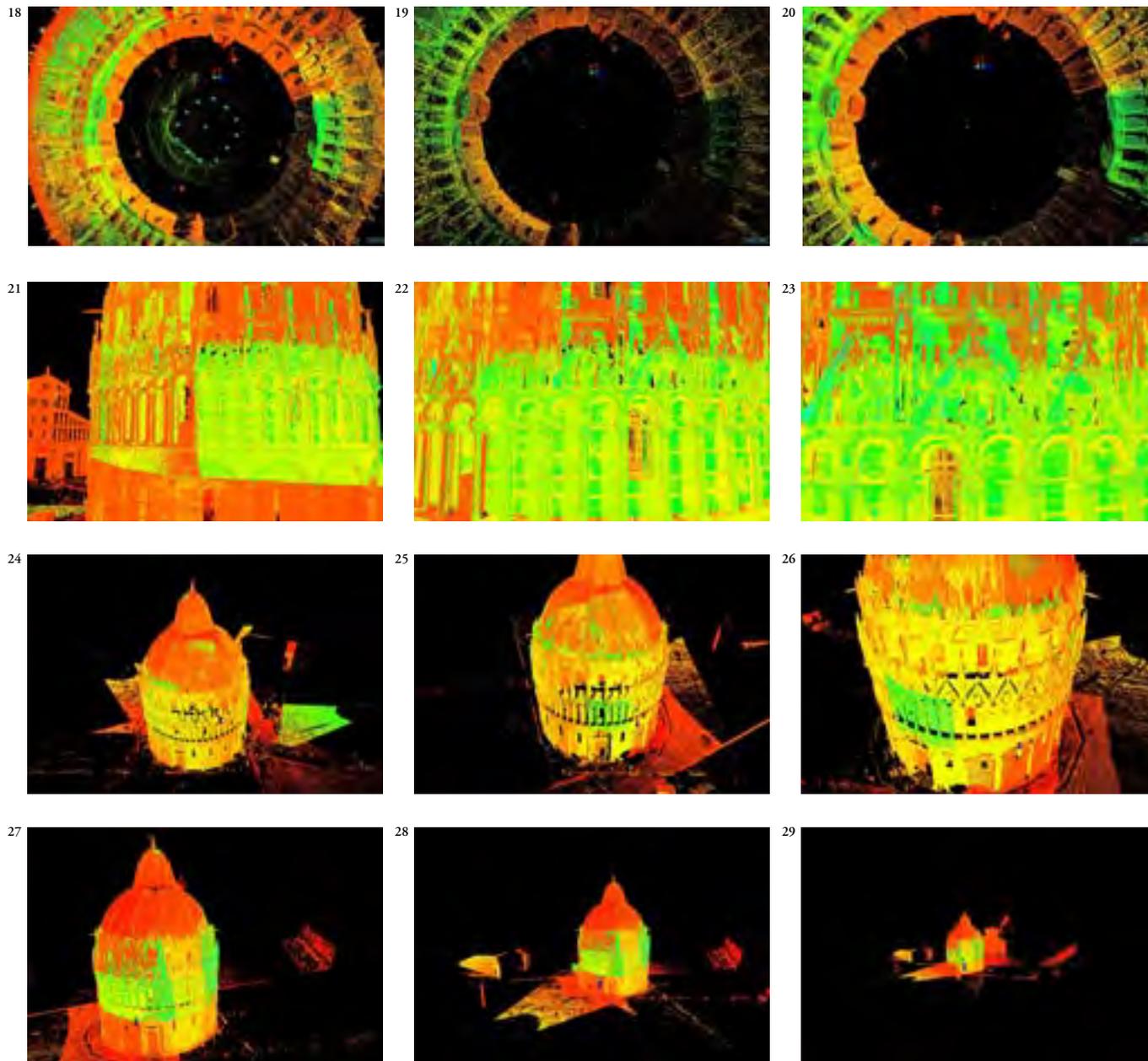
In questo senso è come se si avesse a disposizione una versione maneggevole e versatile dell'architettura rilevata, precisa nella stessa misura in cui il rilievo e la registrazione lo sono stati. Il modello più vicino al reale tra tutti quelli realizzabili è proprio la nuvola di punti, qualunque passaggio successivo, di estrazione, di elaborazione, di trasformazione, porterà a delle interpretazioni¹, a delle scelte che altereranno l'oggettività del dato misurato per adattarlo alle esigenze operative. Parlare di esigenze operative significa che il dato raccolto dallo scanner è tale da essere la manifestazione di un sogno tecnologico che nella sua ampiezza si trova troppo lontano dalla possibilità di essere colto e utilizzato con una procedura umana, che richiede di estrarre una semplificazione percepibile, misurabile, non qualcosa fatto di milioni di punti, ma fatto di cento o cinquecento linee che permettano di rappresentare nella giusta scala il livello di dettaglio che rende comprensibile un disegno. La nuvola di punti è una rappresentazione del reale proveniente da un processo brutale, intelligente e pianificato, ma totale, acquisire a tappeto tre milioni di punti su una parete non si può dire né sottile né raffinato, al limite può essere considerato pertinente, necessario, a seconda della morfologia

Fig. 1 - Particolare della nuvola di punti complessiva con tutte le parti visibili.



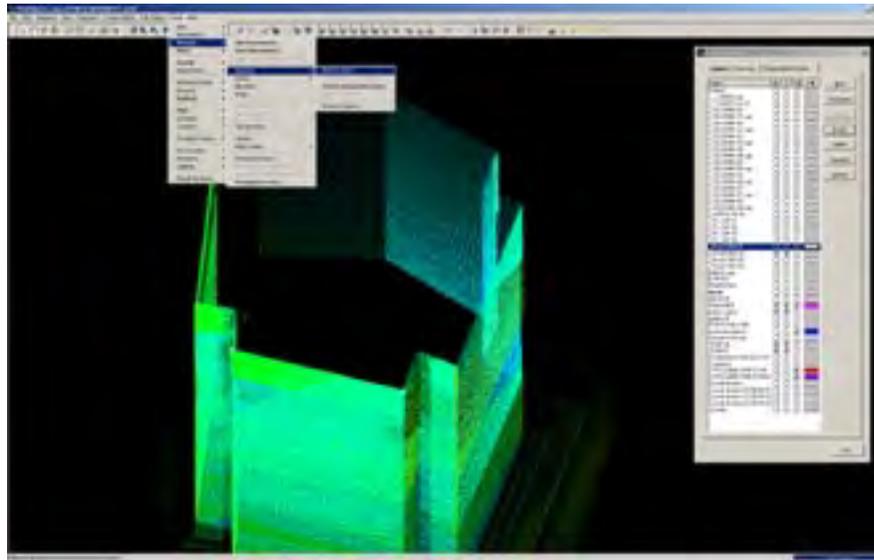


Figg. 2/17 - Sequenza di fotogrammi dell'insieme registrato delle nuvole di punti, parti esterne, comprensive delle porzioni rilevate accidentalmente.



di quanto rilevato e a seconda delle esigenze sottese al rilievo eseguito. Il modello digitale tridimensionale per punti del battistero è il battistero stesso, in una sua rappresentazione fedele e completa, un suo analogo, non in una scala precisa, ma in scala uno a uno in uno spazio definito per tipo di prospettiva e regole di deformazione, dalle caratteristiche dell'interfaccia che lo governa, che fissa l'oggettiva consistenza del monumento nella primavera del 2002 con un'approssimazione inferiore al centimetro. Cosa fare quindi di una creazione di questo genere? Le prospettive di applicazione di sviluppo sono infinite, le operazioni da compiersi secondo volontà: se ne possono estrarre modelli digitali definiti da superfici, ovvero interpretazioni che devono ricorrere alla semplificazione per ovviare ai limiti tecnologici ed umani con cui questo genere di dato porta a scontrarsi, utili essenzialmente per la produzione di elaborati bidimensionali quali immagini di rendering, vedute in prospetto, in prospettiva, in assonometria accurate e in un certo senso tradizionali, eccezionali per via della loro complessità o del loro spiccato realismo a seconda che si siano o meno applicate texture basate su immagini bitmap o ci si sia limitati a mantenere campiture cromatiche omogenee, magari rese in motori di rendering tali da rappresen-

Figg. 18/29 - Sequenza di fotogrammi dell'insieme registrato delle nuvole di punti, parti esterne, comprensive delle porzioni rilevate accidentalmente.



Altro impiego può essere quello di estrarre polilinee significative, sezioni e profili che permettano di leggere in maniera accurata l'andamento di un paramento murario, il suo fuori piombo, le sue deformazioni; questo tipo di elaborato se estratto da una serie di scansioni eseguite in tempi diversi secondo un periodo ragionevolmente lungo, permettono di leggere l'alterazione di un manufatto via via che questa si manifesta, fornendo uno strumento di monitoraggio preciso. Sul settore dell'impiego diagnostico, lo sviluppo di elementi grafici specifici permette inoltre di valutare fenomeni

di deformazione con metodi originali³⁰ non applicabili ad altri tipi di rilievo o di modelli digitali tridimensionali. Per esempio l'applicazione di una *region grow*, oppure la generazione di una superficie piana, permettono di valutare visivamente il divergere di una porzione della nuvola di punti rispetto ad un piano, se si considera quindi, per esempio, uno dei piani dell'intradosso della volta centrale del battistero, da questa possono essere generate delle superfici che approssimeranno ad un piano la nuvola di punti, il volume di punti divergente rispetto a questo piano rappresenterà la deformazione

tare luci e ombre in maniera quasi indistinguibile da quelle presenti in una buona fotografia; il modello digitale per superfici permette però anche un impiego tridimensionale, ovvero quello della produzione di sequenze animate predeterminate o interattive, nel primo caso si tratterà di filmati basati su una sequenza stabilita a priori di rendering sviluppati secondo un percorso, oppure, nel secondo caso, di modelli interattivi, le cosiddette "realtà virtuali" basate sul formato *VRML* o su altri formati vettoriali ottimizzati per la visualizzazione in tempo reale, in quest'ultimo caso però l'operazione di riduzione e semplificazione è tale da non giustificare di per suo l'impiego di strumenti di rilievo così accurati².

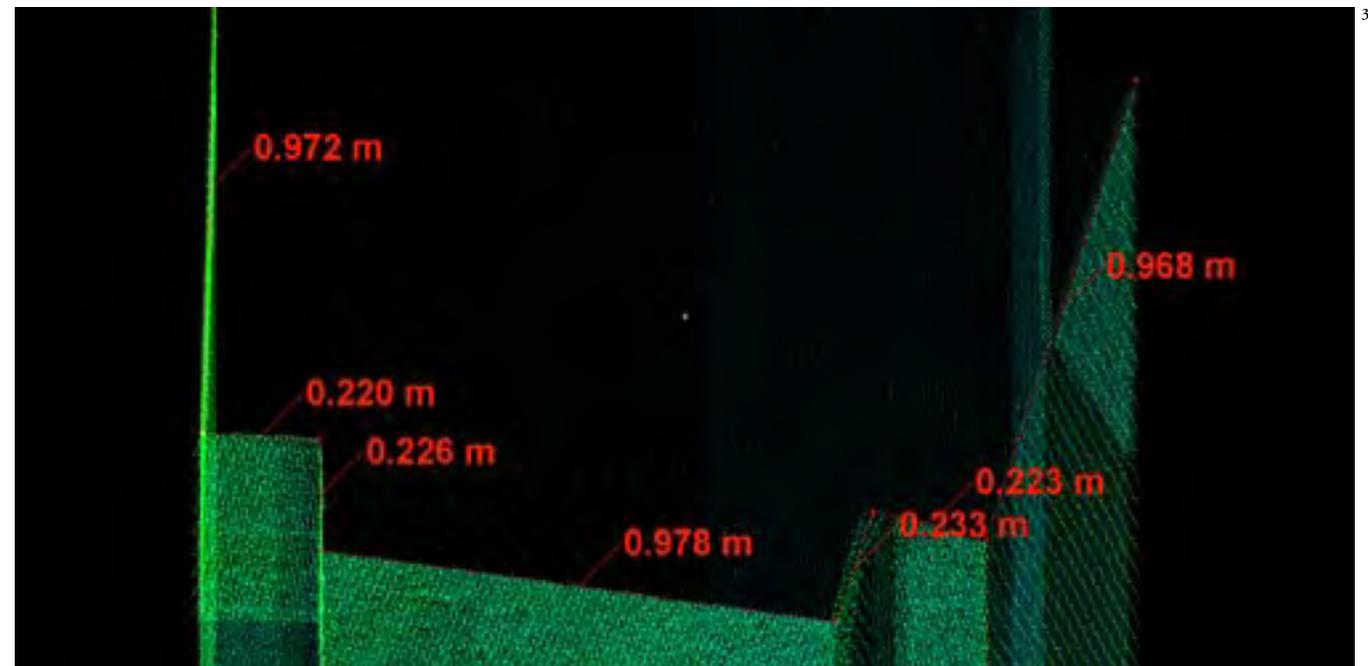


Fig. 30 - Avvio delle procedure di misurazione per uno dei pilastri.

Fig. 31 - Le misurazioni possono eseguite e visualizzate secondo qualunque punto di vista o livello di zoom, il software provvede automaticamente a ruotare e ridimensionare la parte testuale della quota.

della muratura e potrà esser misurato con buona approssimazione.

La nuvola di punti nel suo stato proprio ammette inoltre la possibilità, per l'operatore, di eseguire rilievi diretti all'interno dello spazio digitale definito

dalla nuvola stessa, gli strumenti messi a disposizione sono riconducibili alla struttura classica del rilievo, una sorta di rotella metrica illimitatamente allungabile e precisa³, e ad una dimita con estensione a piacere⁴, a differenza

che nel reale, nello spazio digitale tridimensionale il sistema di misurazione funziona secondo regole di ortogonalità e indeformabilità assolute.

Oltre a prendere misure fissate sui punti colti dallo scanner, l'operatore può fissare dei vertici aggiuntivi, sovrapposti al rilievo digitale, tali da costituire una maglia di riferimento per le misurazioni più importanti, o asso-

ciati a delle notazioni specifiche che permettono di individuare con facilità elementi di particolare interesse⁵.

Secondo questa modalità, quindi, le operazioni compiute dal cosiddetto *virtual surveyor*, il *rilevatore virtuale*, permettono di conoscere la misura precisa di elementi misurati ignorandone le dimensioni, di eseguire le quotature desiderate su oggetti posti

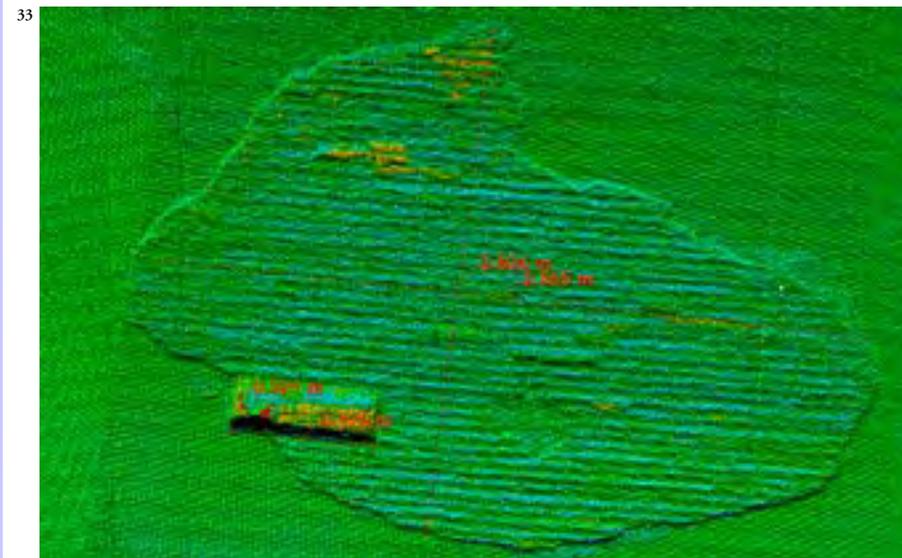


Fig. 32 - Esecuzione di misurazioni generali: altezza interna del battistero.

Figg. 33/34 - Esecuzione di misurazioni specifiche: il distacco dell'intonaco nell'intradosso della volta centrale.

Fig. 35 - Esecuzione di misurazioni generali: diametro del grande vano centrale.

a trenta metri da terra senza dover montare un'impalcatura, di notare particolari lontani e indistinguibili se non con teleobiettivi o con forti ingrandimenti, con la differenza che in questo caso il particolare scorto è subito misurabile.

Questa procedura di misurazione è però da considerarsi più un'operazione puntuale e sporadica, al limite specifica, nel senso che non è certo replicare il rilievo diretto entro il modello digitale tridimensionale lo scopo per cui si è scelto di intervenire con lo scanner laser, o meglio, il rilievo diretto entro lo spazio virtuale è sensato nel momento in cui permette a chi fruisce del modello di selezionare porzioni per il proprio settore di interesse significative e di andare ad operare su parti specifiche, altrimenti molto difficoltose da raggiungere.

La scelta dell'impiego della nuvola di punti nella ricerca e nell'analisi del battistero è limitato nello stesso modo in cui può essere limitato il desiderio di ricerca e di analisi sul battistero stesso, e l'entità del rilievo stesso è tale da permettere di ipotizzare nuovi ambiti applicativi e nuove forme di sviluppo e analisi dei dati che in virtù della messe di punti disponibile permettono di eseguire operazioni non considerabili sulla base di un rilievo diretto o con strumentazioni tradizionali. Al tempo

stesso però questo tipo di dato non è in se stesso una soluzione pronta e fruibile secondo processi ben stabiliti e consolidati, le metodologie di elaborazione possono spesso rivelarsi inadeguate per il campo applicativo stabilito e la definizione di procedure e metodi di impiego entra a far parte della pianificazione e dell'uso della nuvola di punti stessa. Gli spunti possono essere innumerevoli e le strade percorribili sono in buona parte da tracciare, dalla nuvola di punti ad uno dei numerosi risultati perseguibili.

Alcuni di questi percorsi possono essere agevolmente risolti passando per una combinazione di soluzioni per le quali gli strumenti già esistono e già possono essere applicati con piena effettività di soluzione, altri percorsi invece portano a trovare delle soluzioni non ancora mature o parziali, che mostrano una direzione di sviluppo, ma per le quali non esistono ancora gli strumenti dedicati, che devono essere presi in prestito da altri ambiti applicativi e che trovano il loro limite nella natura stessa del dato improprio con cui vengono messi a lavorare.

In ultima analisi esistono percorsi che mostrano possibilità per le quali gli strumenti dovranno essere sviluppati in forma specifica, e che permetteranno lo sviluppo e la trasformazione delle applicazioni per la gestione dei

beni culturali secondo un processo tecnologico che è compito degli operatori, per primi, rendere sempre più al servizio della preservazione delle opere e del potenziamento delle forme di apprendimento e sempre meno fine a se stesso e spettacolare nella misura stessa in cui è veloce, brutale e immediato.

Note

¹ A proposito della trasposizione del dato da scansioni tridimensionali e sulle procedure logiche del disegnatore si veda: Mario Docci, Marco Gaiani, Riccardo Migliari, *Una nuova cultura per il rilevamento*, in *Disegnare Idee Immagini*, Anno XII, NUMERO 23, dicembre, pp. 37-45, Roma 2001.

² In merito allo sviluppo di modelli VRML a partire da rilievi con scanner laser, risulta particolarmente significativa l'esperienza della EDF/DER (L'azienda elettrica francese) per l'addestramento del personale operante nelle centrali nucleari, presentata in occasione della 3th DIMENSION Conference 2002, Parigi 1-2 ottobre, con l'intervento "*Laser scanning & Virtual Reality training at EDF*" a cura di Guillaume Thibault.

³ L'analogia è suggerita dalla consuetudine, in alcuni programmi, come per esempio in *Descreet 3D Studio Max*, di chiamare lo strumento di misurazione "tape" ovvero "nastro".

⁴ Sezioni e profili sono ottenibili non attraverso uno strumento espressamente definito dima, ma attraverso funzioni di sezione della nuvola dei punti, che producono polilinee secondo piani inclinati a piacere.

⁵ In *Cyra Cyclone* risulta particolarmente efficace la modalità di visualizzazione delle quotature e delle notazioni che mantengono costante la dimensione del testo a prescindere dal livello di zoom adottato, in questa maniera risulta molto facile e rapido individuare l'elemento cercato anche in nuvole molto fitte.

I modelli 3D

La convenzione definita tra la Sezione Disegno e Architettura del Dipartimento di Progettazione di Firenze e l'Opera Primaziale di Pisa prevedeva la produzione di un modello digitale tridimensionale del battistero, non solo come modello oggettivo del rilievo eseguito, manifesto in se stesso tramite la nuvola di punti, ma come modello sviluppato a partire da questo in più forme a diversi gradi di semplificazione utili a fornire un prodotto già avviato per lo studio, la divulgazione e la produzione multimediale.

Il processo che si doveva compiere era quindi quello di sviluppare, a partire dalla nuvola di punti una serie di modelli composti non più da una costellazione di vertici colorati, ma da superfici continue atte a definire gli oggetti, in maniera da scomporre agevolmente, secondo le consuetudini del disegno automatico, quanto presente entro un insieme di scansioni, in cornici, capitelli, paramenti murari, statue, pinnacoli, e così via.

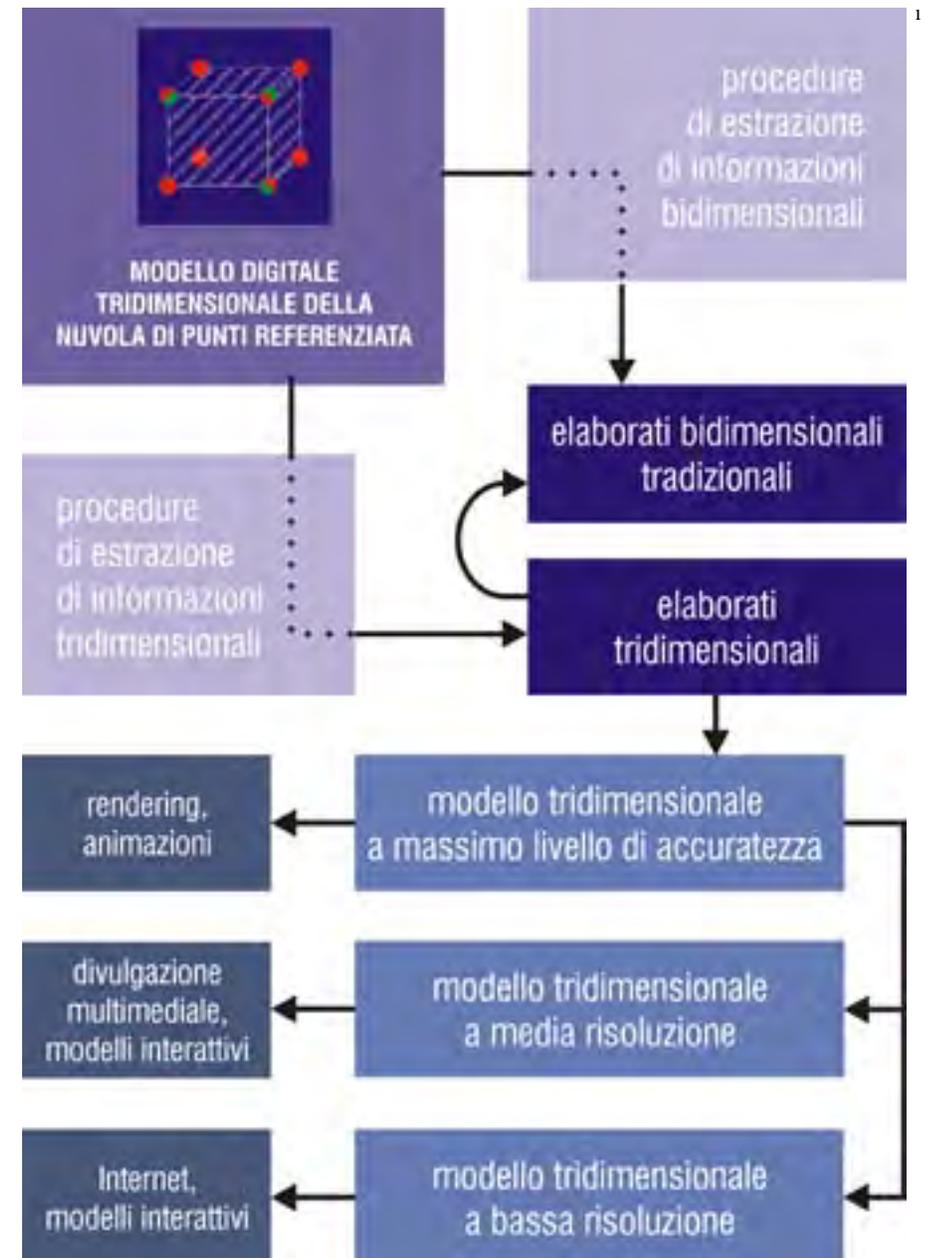
Prima di procedere nell'esposizione delle metodologie sperimentate e di quelle applicate, è bene tenere presente che il volume dei dati che si andava ad affrontare era incredibilmente grande, non si trattava di produrre il modello di una colonna con trabeazione o di

sviluppare una singola rappresentazione, ma si voleva portare a compimento l'intero modello con una produzione efficace di elaborati anche di tipo bidimensionale tradizionale, ovvero piante, prospetti e sezioni; sviluppare procedure efficienti per la restituzione, al di là dei termini della convenzione, era uno degli intenti della ricerca.

Le tecnologie che oggi esistono per la rappresentazione dei modelli tridimensionali digitali non sono molto numerose, essenzialmente sono tutte riconducibili a sistemi geometrici basati su elementi retti o su elementi curvi, ma permettono, attraverso vari strumenti software, di produrre una miriade di risultati finali, magari tra loro somiglianti, ma molto diversi in rapporto al tempo di elaborazione, alla correttezza dei passaggi intermedi, alla concreta corrispondenza rispetto lo scopo prefissato per l'utilizzo del modello ottenuto.

Se si parla di modello tridimensionale digitale per superfici è per via della natura del tipo di procedura di generazione che si tende ad utilizzare, infatti la nuvola di punti acquisita dallo scanner presenta vertici disposti secondo le parti dell'oggetto reale, che trovano per loro struttura le migliori possibilità di costruzione attraverso strumenti che operano per superfici, ovvero per entità geometriche tridimensionali

Fig. 1 - Organigramma delle procedure di elaborazione adottate per la restituzione del rilievo del battistero.



che definiscono piani, retti o curvi, di spessore nullo, ma esistenti secondo le due normali uscenti da ogni elemento minimo costituente la superficie. Nulla vieta di adottare, per la modellazione, strumenti capaci di generare delle entità "solide" ovvero insiemi di superfici definenti volumi "pieni" con eventuali attributi di massa, densità e altre caratteristiche fisiche, ma questo tipo di entità geometrica si presta maggiormente per la definizione di modelli derivanti da rilievi di architetture composte da elementi finiti chiari, distinguibili, magari prefabbricati. In questo caso, allora sistemi di gestione del dato di rilievo mettono a disposizione procedure automatiche per la creazione di primitive geometriche solide e parametriche, come semplici parallelepipedi o sfere, o elementi complessi come travi e pilastri con profili a "C" e a "T" o elementi tubolari. Quest'ultima procedura, detta "fitting" (adattamento)¹ rende molto veloce e pratica la restituzione di manufatti industriali, tuttavia l'ipotesi di utilizzo in una condizione operativa come quella del battistero, ma in generale, nella stragrande maggioranza dei casi operativi dell'architettura tradizionale, non rende questi strumenti particolarmente applicabili o facilmente utilizzabili, a meno di alcuni casi particolari che comunque possono essere al limite

integrati, ma non completamente né significativamente restituiti con questa categoria di strumenti.

Un modello tridimensionale digitale per superfici è dovuto ad un insieme di entità geometriche di varia complessità definite da coordinate spaziali secondo valori cartesiani XYZ, queste superfici possono essere dovute a due principali tipologie geometriche, le *Mesh*² e le *NURBS*³.

La differenza tra queste due tipologie è sostanziale, ed è determinante conoscere differenze e caratteristiche per meglio strutturare il procedimento di costruzione del modello.

Nel caso di superfici *Mesh* ci si trova ad operare con un tipo geometrico molto semplice e sviluppato sulla base di un principio elementare, ovvero l'unione di punti presenti nella nuvola sulla base della loro vicinanza per mezzo di facce triangolari, da un insieme di punti si ottiene un'unica superficie composta di facce triangolari.

Nel caso delle superfici *NURBS*, invece la superficie non è più dovuta ad una semplice operazione di raccordo, ma alla generazione di una superficie propriamente curva, che si sviluppa secondo parametri di regolazione delle tangenze di una griglia di punti di controllo posti esternamente alla superficie stessa.

Questa superficie è ottenuta con una

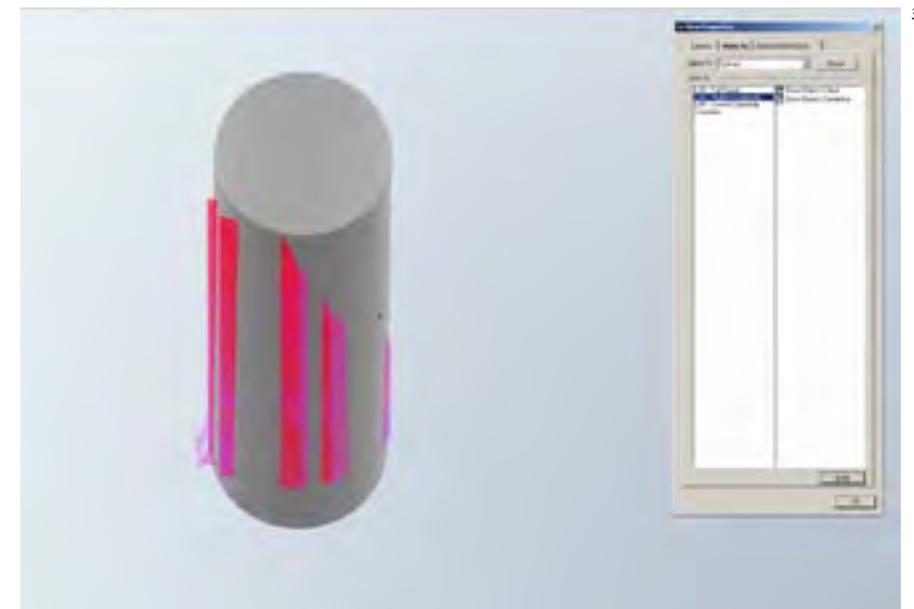
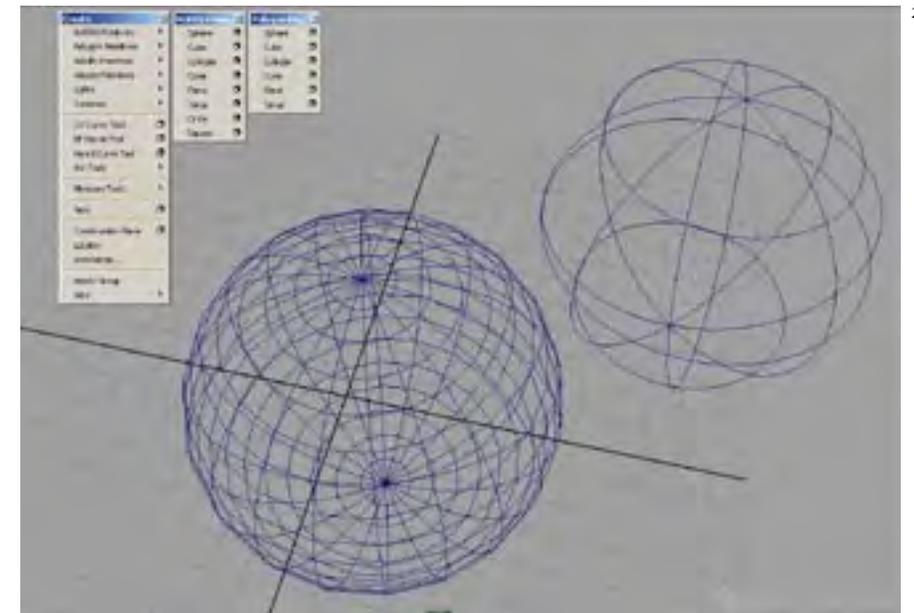
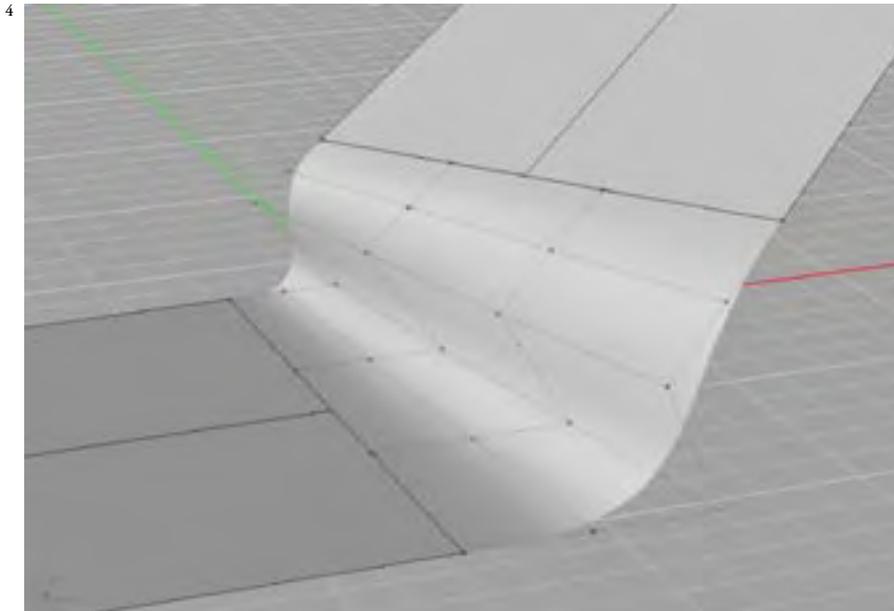


Fig. 2 - Una primitiva NURBS e il suo equivalente poligonale in Alias|Wavefront Maya.

Fig. 3 - Impiego della funzione FIT di Cyra Cyclone: generazione automatica di una superficie cilindrica per interpolazione dei punti di una scansione



interpolazione dei punti selezionati e ha il vantaggio, rispetto alla superficie *Mesh*, di essere descrivibile con una minore quantità di dati, questo diventa molto importante nei modelli di grandi dimensioni e composti da molteplici elementi in quanto il modello completo avrà dei requisiti di sistema per la propria gestione assolutamente inferiori all'equivalente modello generato per *mesh*. In ultima analisi, il procedimento di generazione delle superfici, essendo dipendente da un parametro di tensione risulta indipendente dalla scala di rappresentazione, per cui se si osserva da molto vicino il bordo di una superficie *NURBS* questo sarà sempre e comunque curvo, mentre nel caso di una *Mesh*, poiché gli elementi sono in definitiva sempre retti, per quando densi possano essere i punti della maglia di definizione della superficie, esisterà sempre un livello di zoom tale per cui il bordo della superficie apparirà come una spezzata.

La differenza tra queste due famiglie geometriche è ben distinta in tutti i programmi che supportano questo genere di strumenti della rappresentazione, per esempio in *Maya*, il software di modellazione, rendering e animazione di *Alias|Wavefront*, il menù *Create* presenta due sottomenù distinti detti *Polygon Surfaces* e *NURBS Surfaces*, presentando una dizione assoluta-

mente corretta per porre il distinguo tra le due strumentazioni.

Ognuna di queste tipologie geometriche ha poi una propria ulteriore specializzazione in un settore di applicazione, se le *NURBS* sono essenzialmente orientate alla modellazione progettuale e alla rappresentazione in virtù delle loro superiori prerogative di rapporto qualità - volume dei dati, di contro le *mesh* sono molto più compatibili⁴ e facilmente accettate da programmi di modellazione, rendering, animazione, ed elaborazione dei dati. La struttura geometrica rigida rende inoltre le *Mesh* facilmente impiegabili per la definizione di un sistema ad "elementi finiti" dell'oggetto rilevato per la sua ulteriore elaborazione in software per il calcolo strutturale.

Per ovviare soprattutto al problema dell'esportabilità, tutti i programmi che permettono la creazione di elementi *NURBS* implementano la possibilità di convertire queste in *Mesh* in maniera automatica, ovviamente questo comporta una variazione rispetto all'oggetto iniziale ed un forte appesantimento del modello prodotto.

Alcuni programmi di modellazione permettono di eseguire anche il passaggio inverso, ovvero di sviluppare una *NURBS* da una *Mesh* esistente, ma questa procedura, o viene operata con l'associazione ad ogni vertice

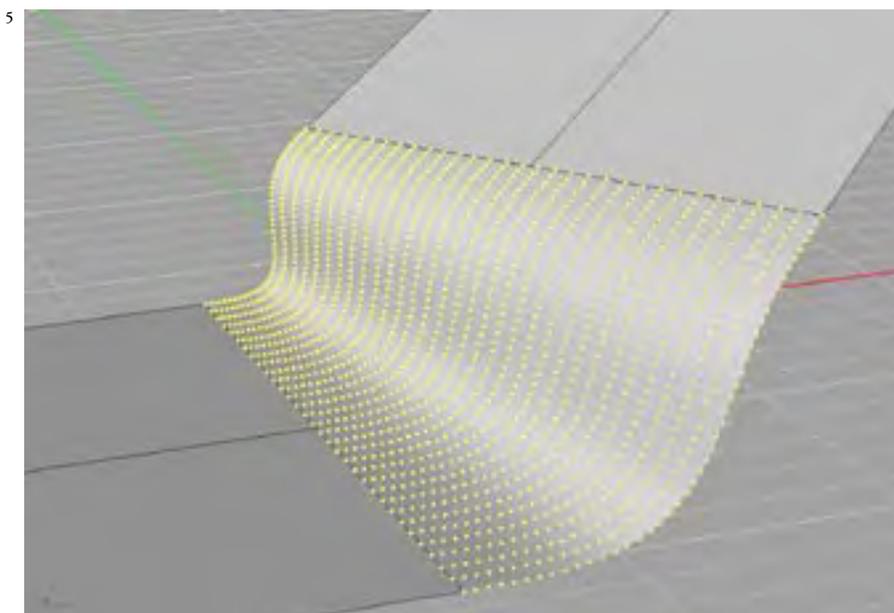


Fig. 4 - Una classica superficie *NURBS*, generata sulla base di un sistema di punti di controllo esterni. Si tratta di una geometria continua e priva di facce.

Fig. 5 - La stessa superficie convertita in *Mesh*, i vertici di definizione sono molto numerosi e sono parte delle facce piane che costituiscono l'oggetto.

della *Mesh* di un vertice di controllo con parametri tali da non variare le caratteristiche iniziali della mesh, con conseguente non variazione in termini di volume dei dati descrittivi dell'oggetto convertito, oppure avviene con la procedura detta *subdivision-surface*⁵ che però comporta una "smussatura" più o meno accentuata della *Mesh* di partenza, con conseguente riduzione della correttezza del modello tridimensionale digitale prodotto.

Sulla base di queste premesse tecniche era quindi evidente che il modello che si sarebbe andato creare avrebbe anche potuto avere parti sviluppate come *NURBS*, ma che in definitiva il modello conclusivo sarebbe stato completamente convertito in *Mesh* per garantirne la compatibilità con la maggior quantità di applicazioni possibile.

L'esigenza di sviluppare una sequenza di modelli di complessità calante e di elaborati equivalenti a quelli della produzione più tradizionale ha richiesto una pianificazione dello sviluppo geometrico della nuvola di punti, questa anche in virtù del fatto che se le cose fossero state prodotte sequenzialmente, ovvero prima il modello per superfici alla massima risoluzione e da questo piante, prospetti e sezioni, e quindi per riduzione, i modelli semplificati, il processo complessivo avrebbe richiesto

un tempo molto lungo, inoltre considerando l'opportunità e l'interesse di sperimentare dei processi mediati da altri campi applicativi, si è cercata una soluzione "diretta" per la produzione di elaborati bidimensionali classici, ovvero approntare una procedura realmente applicabile ad una architettura monumentale, che permettesse di ottenere in tempi rapidi piante e sezioni.

Di conseguenza lo sviluppo dei modelli ha assunto un andamento non seriale, ma parallelo, di pari passo sono stati sviluppati un modello tridimensionale ad alta risoluzione, piante e sezioni, ed è stato sperimentato un metodo di rappresentazione *quick and dirty*⁶ per la rappresentazione diretta di elaborati classici a partire dalla scansione, senza adottare elaborazioni intermedie.

In generale, quindi si può considerare la procedura con cui si è stata affrontata la restituzione del rilievo come divisa secondo due processi, quello basato essenzialmente su procedure automatiche o semi-automatiche di restituzione e quello basato su procedure manuali. Nel primo caso si è cercato di ottenere direttamente dalla nuvola di punti un risultato finito, nel secondo caso si è operata una vera e propria procedura integrata di *virtual survey* e ridisegno di quanto presente nei risultati del rilievo digitale.

Note

¹ Il sistema di adattamento prevede dei parametri di settaggio adeguati per permettere di far rientrare la selezione di punti della nuvola rispetto alle caratteristiche dell'oggetto che si vuole generare, l'elemento geometrico sarà quindi sviluppato adattandosi per interpolazione all'insieme dei punti di cui lo si vuole materializzare, di conseguenza, il gruppo di punti non rientranti nei margini di tolleranza accettati risulteranno esterni alle superfici generate. Se il fenomeno dovesse risultare eclatante si deve prendere in considerazione l'eventualità che quanto rilevato sia soggetto a deformazione.

² Letteralmente "rete" indica sempre una superficie definita da una rete di poligoni, la risoluzione della mesh indica la densità di questa maglia, che dovrà essere tanto più densa quanto più realistici si desiderano gli elementi curvi presenti nel modello.

³ *NURBS* è l'acronimo di *Non Uniform Rational B-Spline*, il sistema di rappresentazione geometrica che ha rivoluzionato il mondo della Computer Grafica dalla metà degli anni novanta in poi.

⁴ Il problema dell'esportabilità delle *NURBS* è molto grande, in pratica allo stato delle cose non esistono

sistemi che permettano in maniera semplice la transizione tra programmi di geometrie basate su queste entità, per poter eseguire l'operazione si deve comunque riconvertire la *NURBS* in una *Mesh*, con conseguente perdita di risoluzione e aumento del volume dei dati necessari a descrivere l'oggetto. Esistono tuttavia dei progetti, non ancora pienamente affermati, come *OPENNURBS* che cercano di proporre degli standard per la definizione dei criteri di costruzione di queste entità per permettere lo sviluppo di formati di scambio che non ne alterino le caratteristiche.

⁵ In alcuni software, in virtù del passaggio operato, questo strumento viene chiamato *HyperNURBS*.

⁶ Il termine *quick and dirty*, letteralmente "veloce e sporco" indica, nelle applicazioni software uno strumento capace di eseguire una determinata funzione rapidamente e con procedura essenzialmente automatica, suscettibile per sua natura di errori e imperfezioni (ovvero sporca) e quindi necessitante di una successiva revisione.

Ottimizzazione del modello, dalla nuvola di punti agli insiemi di superfici

La nuvola dei punti del battistero contiene oltre centosettanta milioni di punti, il sistema utilizzato per gestirla, nonostante le caratteristiche di performance estrema della parte hardware¹, e le caratteristiche eccezionali del software², è risultato sempre al limite della propria capacità operativa.

I vari tentativi di estrapolare significative porzioni della nuvola, come per esempio l'insieme di scansioni dei soli esterni, ha mostrato come questo tipo di dato non fosse comunque affrontabile da computer di fascia bassa, ponendo in difficoltà anche strumentazioni dalle discrete prestazioni, ma non ottimizzate per il settore applicativo della visualizzazione tridimensionale spinta.

La nuvola registrata, è stata quindi preparata in più soluzioni, tali da permettere di accelerare le operazioni di individuazione delle parti su cui si voleva intervenire, in sostanza, in quella versione del file *IMP* esistono un insieme delle scansioni degli esterni, un insieme delle scansioni degli interni, un insieme delle scansioni del sottovoito ed una composizione totale di ogni parte.

A partire da questa organizzazione

l'idea di iniziare ad estrarre superfici era un passo difficile da fare, in quanto il timore era quello di avviare una procedura che si sarebbe rivelata non efficace, o troppo impegnativa dal punto di vista delle risorse umane e strumentali.

Sulle procedure di lavoro, da questo punto in poi, non venivano certo in aiuto né la trattativa né l'esperienza degli altri, si potevano fare delle congetture, ma le intenzioni di realizzazione superavano quanto si poteva vedere nelle produzioni precedenti, come del resto il volume dei dati era difficilmente paragonabile, anche in relazione alla complessità dell'opera rilevata, con altre opere di rilievo digitale.

Per prima cosa, si è scelto di esplorare le procedure automatiche di restituzione, queste perché promettevano di poter essere una soluzione rapida a parti di modellazione altrimenti molto complesse, inoltre c'erano delle soluzioni che meritavano di essere verificate nella loro applicazione al rilievo digitale, e che promettevano di poter mostrare qualcosa di realmente innovativo.

In nessun momento si è creduto che la produzione automatica avrebbe portato una soluzione pronta ed immediatamente utilizzabile, ma le parti meglio riuscite hanno permesso di integrare validamente le fasi di resti-

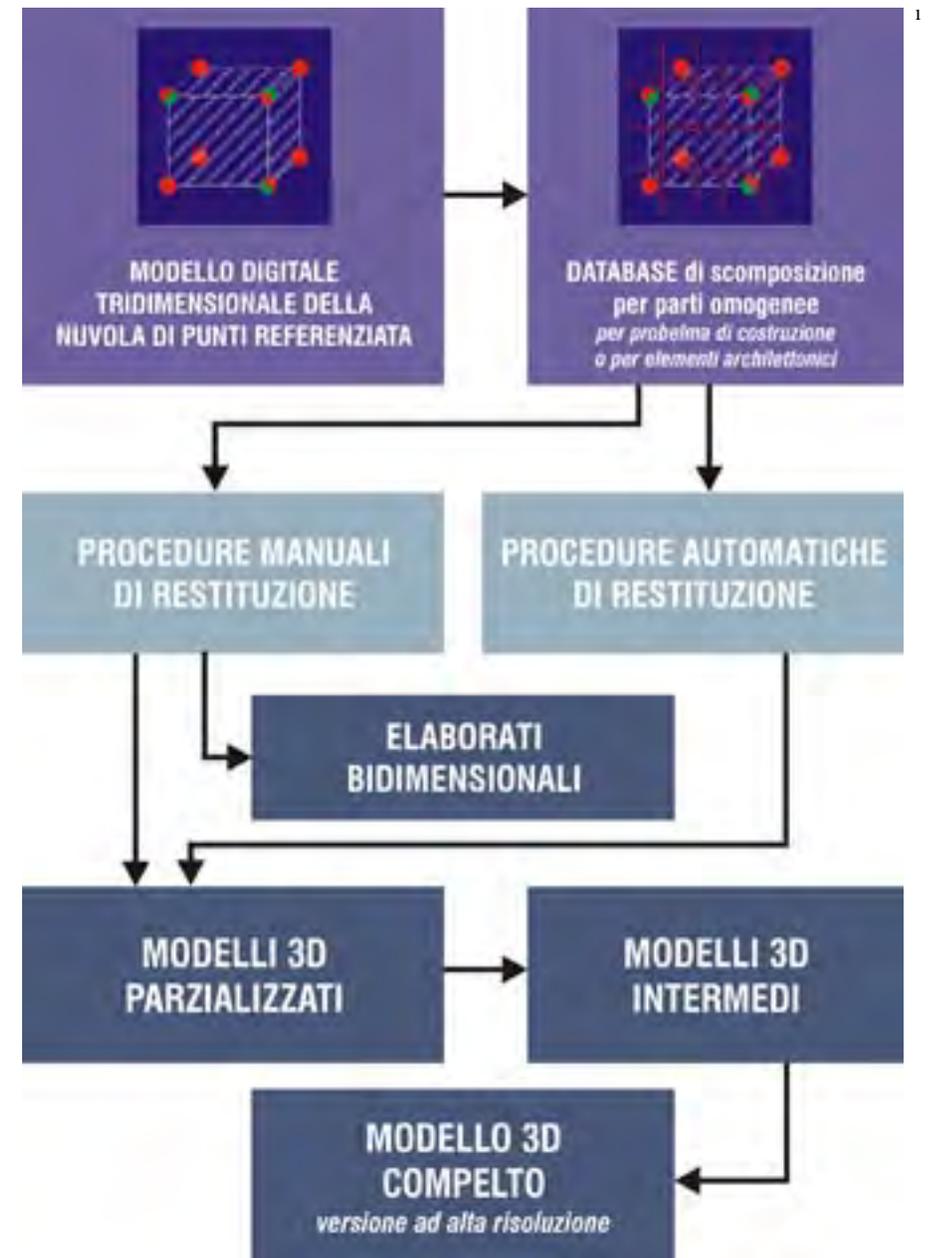
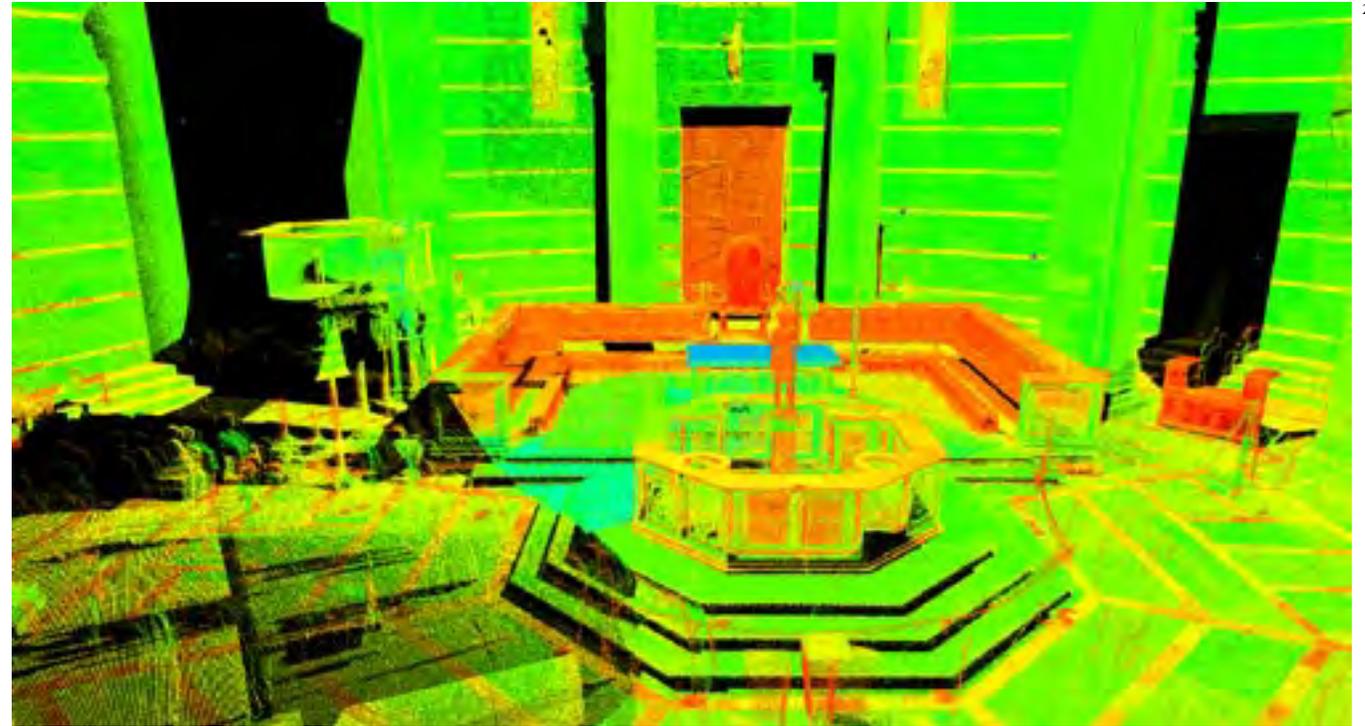


Fig. 1 - Organigramma della procedura adottata per il passaggio dalla nuvola di punti al modello tridimensionale digitale per superfici.

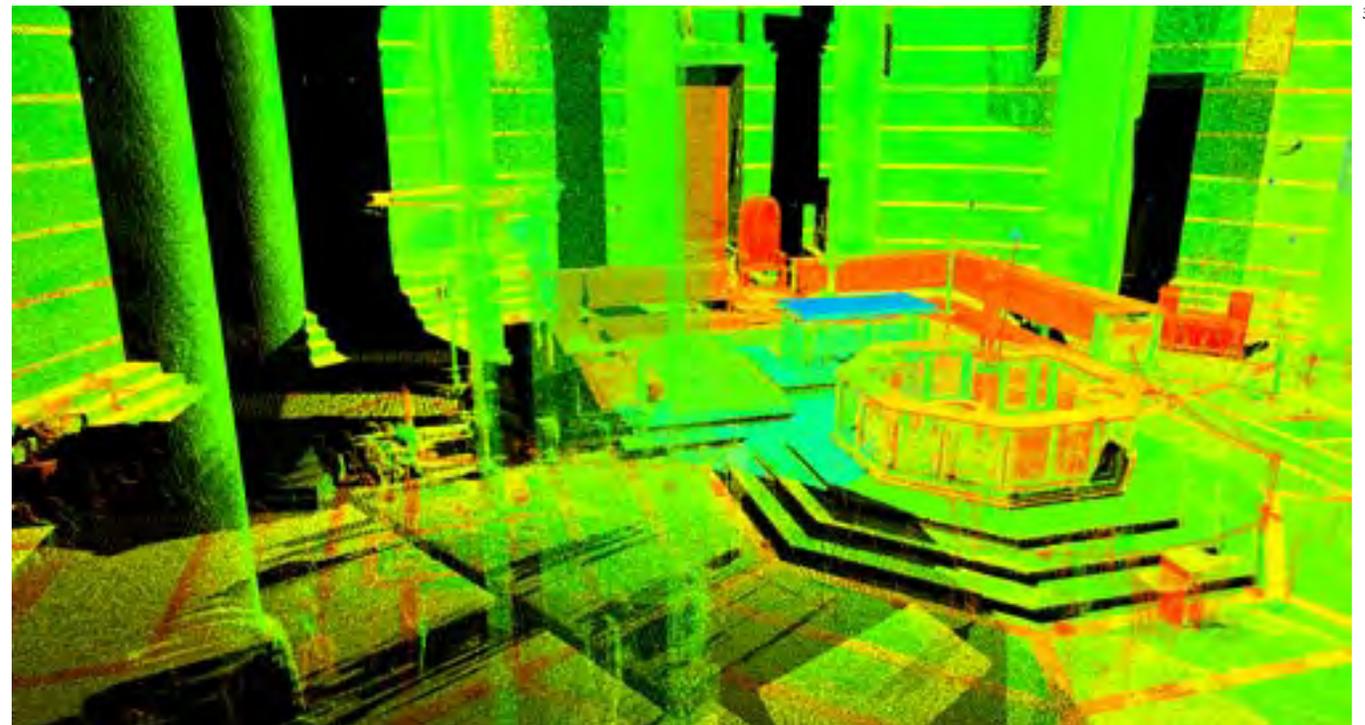
tuzione manuale che sono state avviate subito dopo.

Queste ultime sono state molto complesse, anche conducendo le procedure di elaborazione con il massimo impegno, per la redazione del modello tridimensionale digitale a massima risoluzione sono state necessarie oltre otto settimane di continuo disegno, senza sosta e senza pause significative. Una prima esperienza di modellazione a partire dalla nuvola di punti si era già fatta partendo dalle singole scansioni prima della loro registrazione, e subito dopo aver compiuto la registrazione di tutte le nuvole si erano eseguiti dei test sulle parti del fonte battesimale.

Queste operazioni avevano da subito messo in luce le grosse difficoltà che le procedure automatiche portavano alla ribalta, in primo luogo il problema del "rumore" ovvero del fatto che la scansione poteva presentare una struttura irregolare dovuta ora alla presenza di porzioni di scansione di qualità inferiore, ora ad una cattiva risposta del materiale rilevato, ora alle condizioni di ripresa, e che questa scansione avrebbe portato alla creazione di una superficie difficile da gestire non tanto per il fatto di mostrare come increspanti anche elementi perfettamente lisci, ma per la struttura complicatissima della *Mesh* risultante che avrebbe reso inefficaci le principali procedure di

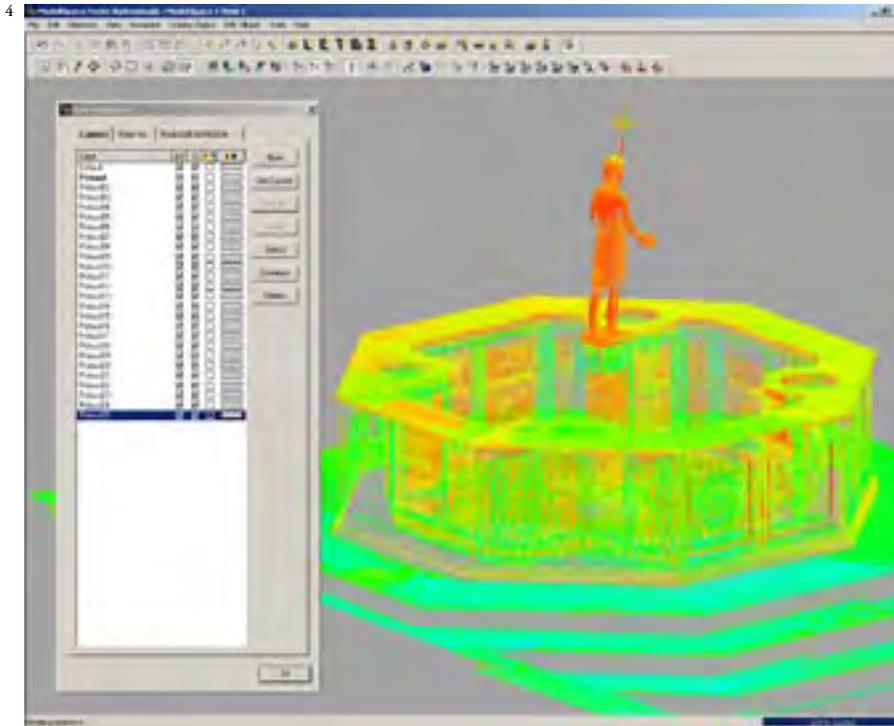


2



3

Figg. 2/3 - Vedute della nuvola di punti complessiva, con tutte le scansioni degli interni registrate. Piano terra, il fonte battesimale.



produzione automatica di un qualunque genere di elaborato. Tuttavia era evidente che certe parti del rilievo dovevano essere affrontate con le procedure automatiche di generazione delle superfici e che queste dovevano essere rese efficaci, infatti capitelli, gruppi statuari e ornati non potevano essere riprodotti per ricostruzione manuale, pena un aumento smisurato dei tempi di lavorazione (si pensi, semplicemente alla corona di cuspidi che cinge la facciata nel suo secondo ordine).

Per passare alla fase operativa vera e propria ed iniziare la procedura di costruzione del modello tridimensionale digitale per superfici, si è deciso di adottare una soluzione combinata per affrontare il rilievo, da un lato la generazione con procedure automatiche di tutte le parti troppo onerose per poter essere prese in considerazione nella modellazione manuale, e di pari passo, l'estrazione dalla nuvola dei punti di sezioni e profili da usarsi come base per la procedura di ricostruzione per superfici, prevalentemente *NURBS*,

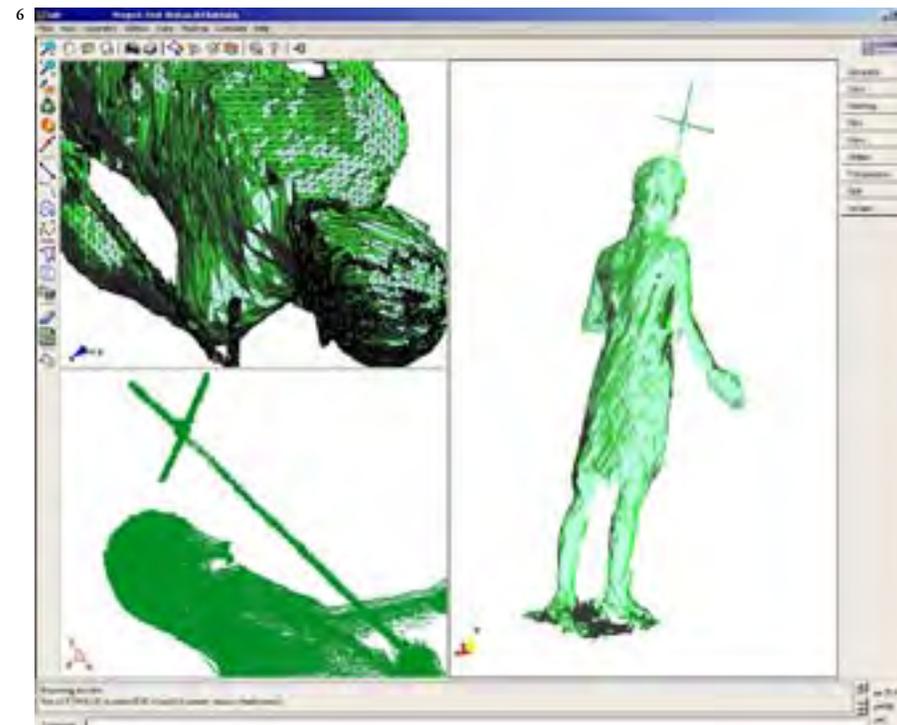


Fig. 4 - Estrazione dei dati del fonte battesimale dalla nuvola di punti registrata.

Figg. 5/6 - Generazione automatica in *Cyra Cyclone* della *Mesh* del fonte battesimale. I risultati sono assolutamente insoddisfacenti. Visualizzazione in *Descreet 3D Studio Max* e in *GID*, si notino le ampie aperture e la caoticità della superficie.

del modello in cui, successivamente, le parti sviluppate con procedura automatica sarebbero state ricollocate.

Il modello però non sarebbe stato sviluppato in un'unica soluzione, ma scomposto in singole componenti, omogenee per problematiche di modellazione e, nella maggior parte dei casi, corrispondenti ad elementi architettonici compiuti: la cornice della cupola di chiusura della volta centrale, l'intradosso della volta centrale, le vele delle volte a crociera, il basamento di uno dei pilastri, le gradinate lungo il perimetro interno, e così via per qualche centinaio di componenti.

Mano a mano che le porzioni venivano concluse, sono state raggruppate in file intermedi, che poi stati fatti concorrere in file di ricomposizione parziali, a cose compiute, tutte le parti sono state riunite in un unico modello, impressionante per la quantità di dati necessari per descriverlo e, come era inevitabile, quasi ingestibile anche dalle strumentazioni più potenti, ma completo e corretto.

La prima cosa da farsi però era avviare il processo di scomposizione dalla nuvola, in questa maniera il modello per vertici sarebbe stato meglio gestibile e le soluzioni di intervento, specie nel caso di applicazioni sperimentali si sarebbero potute replicare con maggior velocità e praticità. Scomporre la nuvola signi-

ficava avvalersi di alcuni strumenti di *Cyra Cyclone* molto efficaci, ovvero le funzioni legate alla definizioni di *fence* (delle aree di delimitazione rettangolari o poligonali) e alle conseguenti operazioni di *cut by fence* applicate alle parti della nuvola selezionate. In questa maniera si potevano estrarre da una o più scansioni gli insiemi di punti su cui si volevano compiere le operazioni di modellazione.

Questa procedura ha sostanzialmente richiesto di creare un duplicato del database *IMP* della registrazione com-

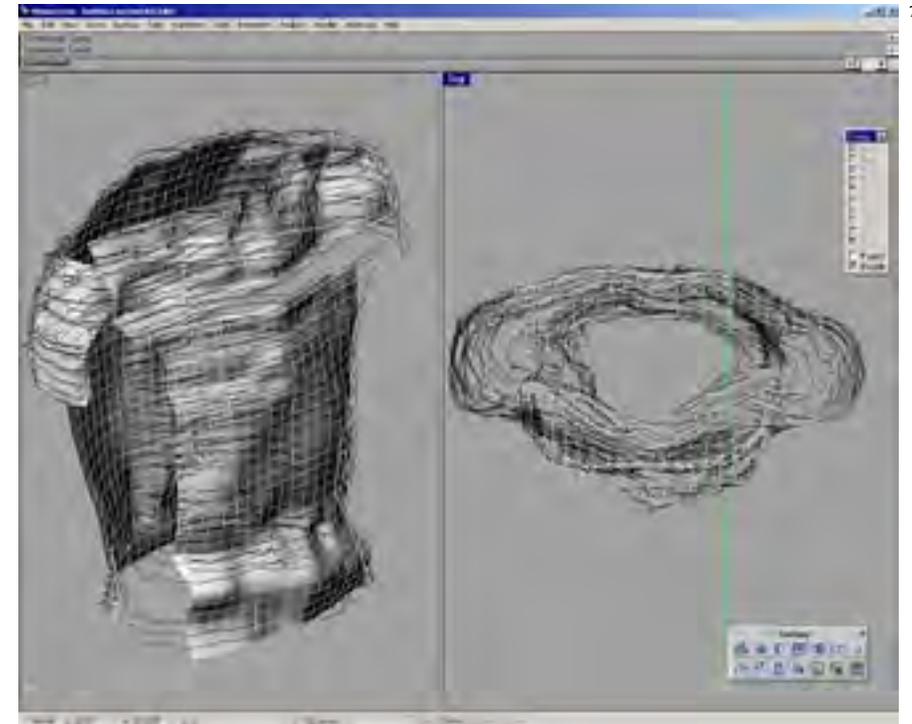
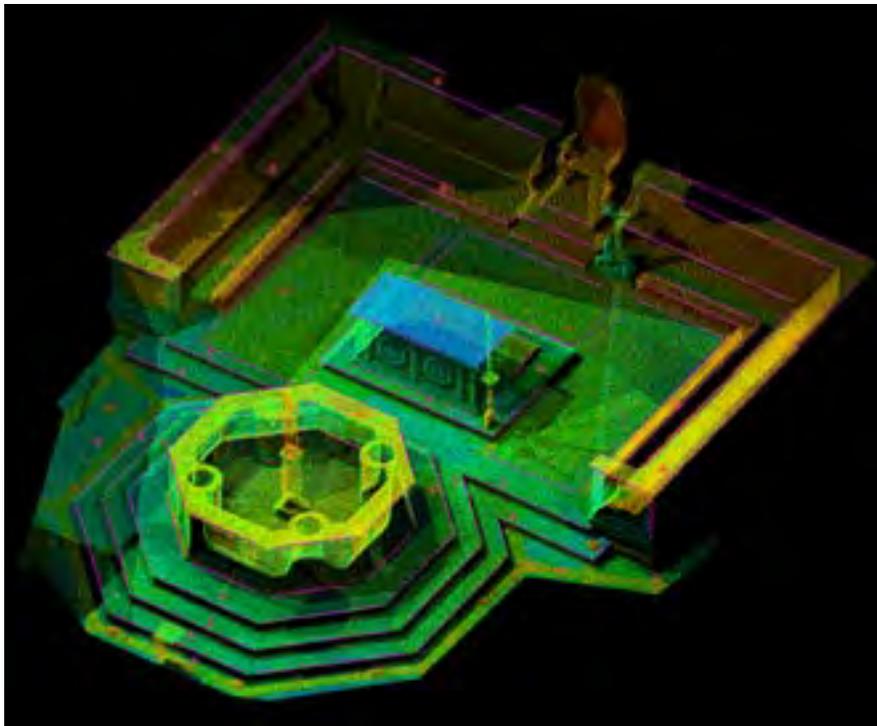


Fig. 7 - Rimodellazione del torso della statua del Battista con procedura manuale: una volta estratte le sezioni dalla *Mesh* si è proceduto in *MacNeel Rhinoceros* con la generazione di superfici *NURBS* di raccordo.

Fig. 8 - Test di applicazione di *texture* sulla *Mesh* del fonte battesimale ottenuta con procedimento automatico.

9



plexiva, per poi andare a moltiplicarvi e a suddividervi le parti della nuvola un innumerevole numero di volte. Una soluzione onerosa, dal punto di vista del volume di dati prodotto, ma efficace ed estremamente sicura rispetto alla preservazione dell'integrità dei dati della nuvola contenente il rilievo eseguito. Tuttavia questa procedura avrebbe permesso di produrre un modello di ottima qualità, versatile e completo, e che, venendo realizzato con la coscienza di doverlo riutilizzare per successive "riduzioni" ha potuto

essere reso tale da semplificare quest'ultimo passaggio.

Note

¹ Per la gestione del sistema *Cyra Cyclone* si è utilizzata una workstation *Compaq EVO 6000*, configurata con una doppia CPU *Pentium IV Xeon* a 2,2 Ghz, 1 *Gigabyte* di memoria *RAM* a 800 Mhz, doppio disco rigido da 18 *Gb Ultrawide SCSI 160* a 15.000 *RPM*, scheda video *ATI FireGL 2* con 64 *Mb* di *RAM*. In un secondo momento, è stato aggiunto un terzo disco rigido *Ultra-ATA* da 60 *Gb* a 7.200 *RPM*. Nella fase di modellazione, al computer principale è stata affiancata una workstation assemblata con CPU *AMD Athlon 2400 XP*, 1,5 *Gb* di memoria *RAM* a 333 Mhz, disco rigido *Serial-ATA* da 60 *Gb* a 7.200 *RPM*, scheda video *3D Labs Wildcat VP560* con 64 *Mb* di memoria *RAM*.

² Uno dei maggiori punti di forza del *Cyra Cyclone* è il sistema di gestione *L.O.D. (Level Of Details)* della nuvola di punti, che permette di visualizzare e operare sulla nuvola di punti senza che questa debba essere stata completamente caricata dall'applicazione, in questa maniera i tempi di attesa sono enormemente ridotti e le fasi esecutive accelerate.

10

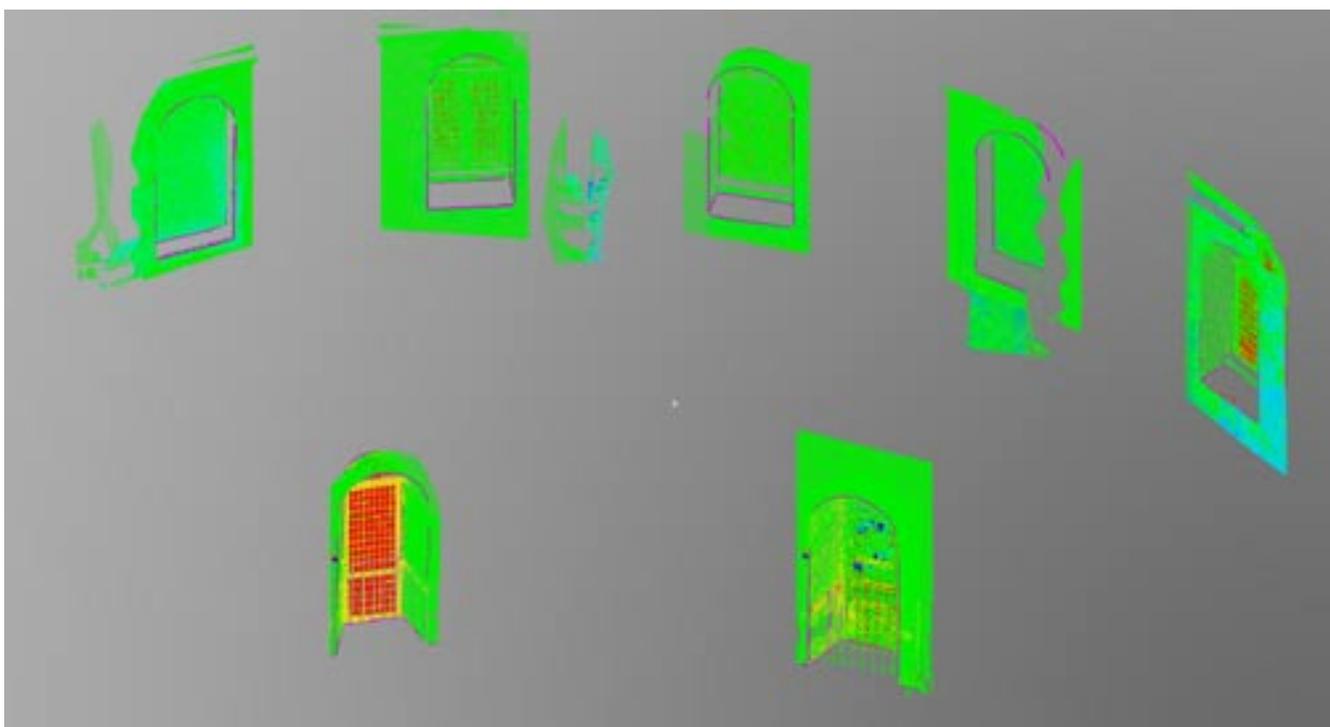


Fig. 9 - Nuvola dei punti del solo fonte battesimale, estrazione di linee guida per la modellazione delle superfici.

Fig. 10 - Stessa procedura di estrazione di linee di costruzione applicata ad un gruppo di aperture.

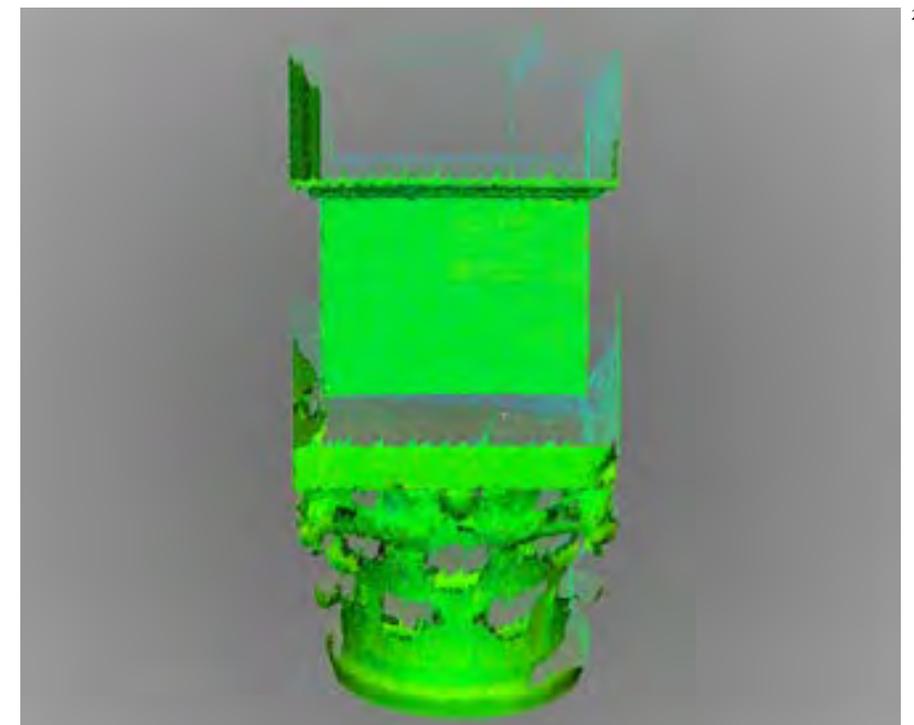
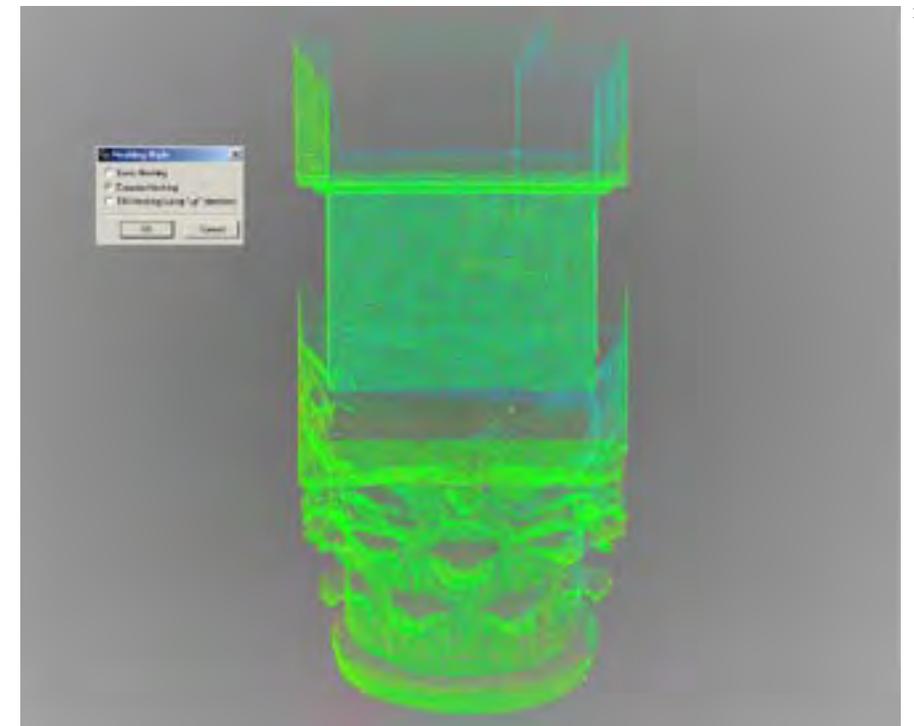
I sistemi automatici di restituzione

Il processo del rilievo digitale, con la fase di acquisizione dei dati, rapida nella celerità della raccolta e immane nel numero di misurazioni eseguite, porta come risultato un modello tridimensionale digitale composto da vertici posti nello spazio che in molti casi è desiderabile poter restituire con procedure automatiche; si pensi per esempio alla moltitudine di elementi scultorei che compongono un edificio monumentale come il battistero di Pisa, eseguire in pochi giorni il rilievo e poi non essere in grado di restituire in forma abbastanza rapida un modello definitivo composto da superfici era un paradosso non accettabile nella meccanica del processo di questo rilievo.

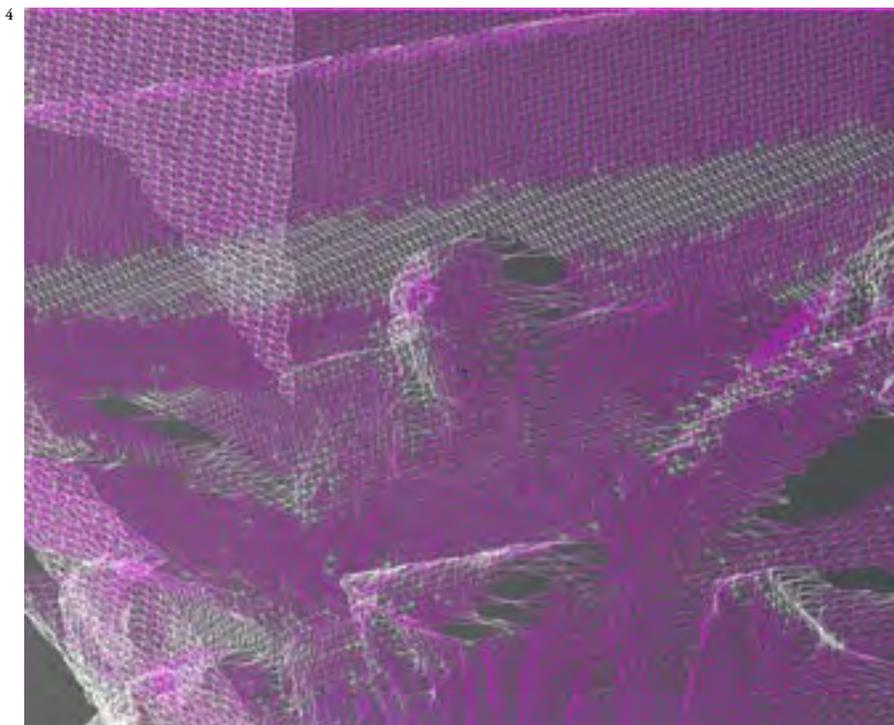
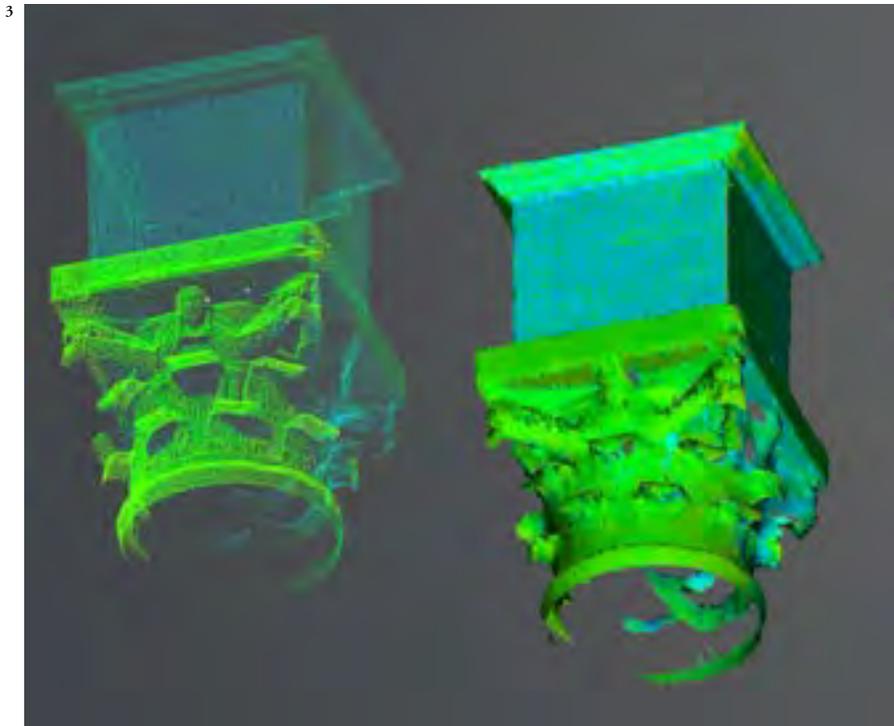
È stato allora concesso uno spazio significativo allo studio e alla ricerca di sistemi di restituzione automatica, non nella speranza che uno di questi metodi portasse miracolosamente alla creazione istantanea delle superfici pulite di tutto il monumento, ma nel tentativo di generare nel migliore dei modi quelle parti che erano talmente complesse da rendere quanto mai auspicabile una loro restituzione secondo procedure prive di fasi di elaborazione e costruzione ad opera di un disegnatore.

I termini del problema erano però duplici, in quanto se da un lato si volevano ottenere delle procedure automatiche di generazione delle superfici, tali da rendere migliore e più veloce il procedimento di creazione del modello complessivo, esisteva anche il problema del volume dei dati che queste procedure avrebbero creato, che non poteva essere tale da compromettere la possibilità di gestire il modello complessivo. In altre parole, il modello prodotto con procedura automatica doveva per prima cosa essere il più corretto e completo possibile e richiedere di conseguenza il minor numero di interventi possibili al fine della sua collocazione nel modello tridimensionale digitale complessivo e in secondo luogo, doveva permettere delle soluzioni di restituzione con livello di dettaglio variabile, doveva cioè ammettere delle semplificazioni tali da non compromettere eccessivamente la geometria delle superfici, ma al tempo stesso ridurre in modo significativo il volume dei dati necessari per la sua visualizzazione e gestione.

Quest'ultima necessità era fondamentale, le caratteristiche di questo rilievo portano, come è già stato detto più volte, qualunque strumentazione, sia hardware che software, al limite. Un'operazione di generazione di superfici che non avesse tenuto da



Figg. 1/2 - Due schermate operative tratte dal processo di generazione automatica di superfici *Mesh* in *Cyclone*.



subito conto del problema del “peso” delle singole parti realizzate rischiava di produrre un modello finale ingestibile o troppo difficile da utilizzare anche per computer con altissimi livelli di performance.

Di conseguenza ai software da impiegarsi per la generazione automatica delle superfici si chiedevano due cose: la possibilità di creare oggetti il più compiuti possibile, e la possibilità di elaborarne facilmente, in fase di costruzione o subito dopo la creazione della prima superficie, un elemento corretto nonostante la riduzione applicata.

La priorità doveva però essere data alla capacità di generare un oggetto corretto e completo, infatti l'operazione di riduzione poteva anche essere eseguita attraverso l'impiego di ulteriori software o attraverso specifiche funzioni presenti in applicazioni generaliste.

Con queste premesse la selezione degli strumenti da provare non era di certo semplice, in quanto l'offerta di strumenti in questo settore è quanto mai varia, e sempre più frequentemente programmi di modellazione e CAD presentano, al loro interno, come funzione specifica, la possibilità di editare e sviluppare elementi a partire da dati puntiformi. Per prima cosa si sono però voluti evitare tutti i programmi che orientavano la loro funzione di costruzione alle strutture a sviluppo

prevalentemente piano, questo genere di programmi, infatti, dedicati alla ricreazione di superfici a partire da rilievi di tipo topografico non permettono di restituire in maniera efficace elementi come colonne, capitelli ed elementi scultorei, creando superfici che risultano il più delle volte difficoltose alla ricongiunzione con le altre e richiedendo di scomporre la nuvola di punti per zone omogenee riconducibili, per l'appunto, alla superficie di un terreno. In queste condizioni, il processo operativo risultava troppo macchinoso ed elaborato per cui si è preferito iniziare i test da programmi che già prevedessero l'elaborazione di dati con una organizzazione spaziale articolata.

Prima di procedere alla selezione dei software da testare, si è proceduto anche ad una esclusione significativa, operata su tutte quelle applicazioni che, essendo pensate per la restituzione a partire da sistemi a triangolazione attiva o comunque operanti a livelli di precisione spinti, si sarebbero potuti male adattare alla generazione di superfici a partire da un dato che comunque era soggetto ad un livello di rumore piuttosto elevato rispetto alle strumentazioni per cui erano pensati quei software.

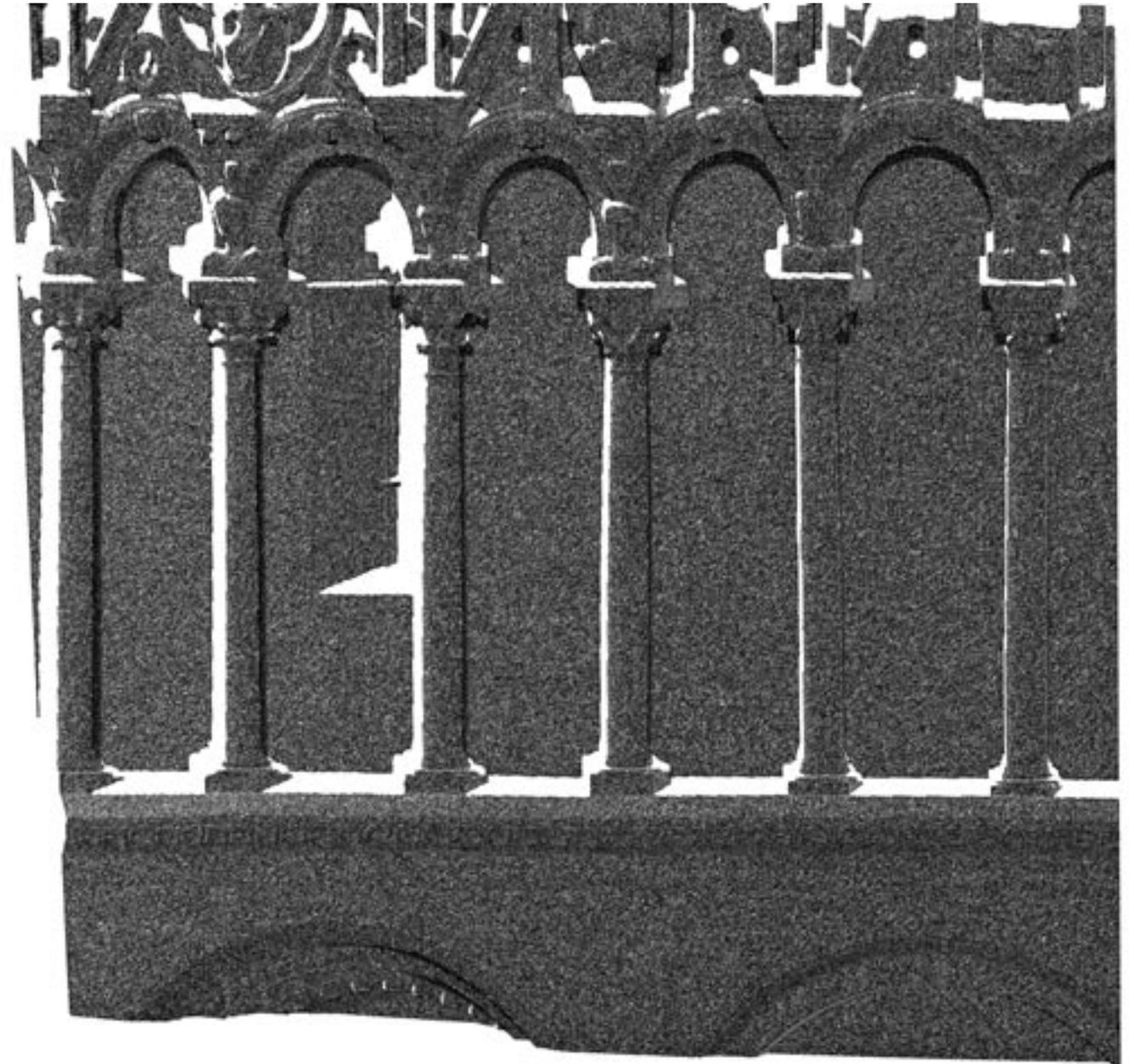
In questa sede verranno presentati solo le applicazioni che sono risultate più interessanti ed efficaci al fine

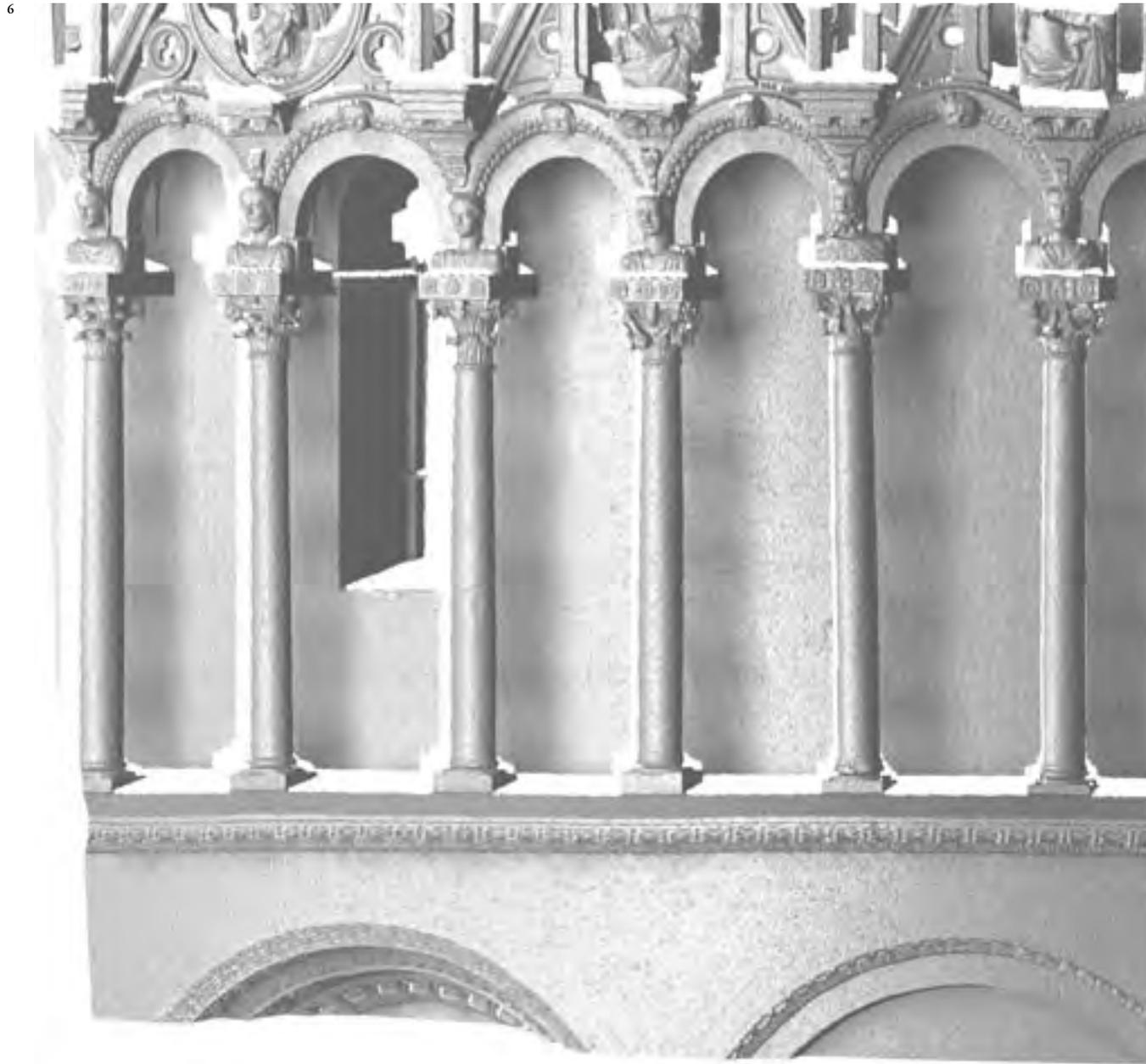
Figg. 3/4 - Passaggio dalla nuvola di punti ad una superficie *Mesh*, la procedura di *Cyclone* è molto rapida, i modelli prodotti però necessitano di numerose operazioni di ritocco e la maglia della superficie è spesso molto densa.

dell'elaborazione e che effettivamente sono state utilizzate per creare parti del modello¹.

La prima procedura adottata è stata quella offerta da *Cyra Cyclone 4.0.2*, che nel suo ambito di lavoro offre una soluzione molto solida ed efficiente di generazione delle superfici, questa è per altro, anche molto veloce, permettendo di creare molto rapidamente una *Mesh* a partire da una porzione della nuvola di punti, questa procedura però è applicabile ad una sola nuvola o porzione di essa per ogni creazione di superficie e questo rende meno efficiente la procedura, in quanto, se per esempio, un capitello deve la sua definizione a più di una scansione, queste devono essere prima suddivise in maniera da isolare la porzione corrispondente al capitello stesso e poi trasformate in superfici separate, una per ogni parte di scansione. Una volta definita, o resa definibile, la porzione di punti da cui si vuole creare la superficie si avvia la procedura di creazione della *Mesh*, il programma presenterà un semplice menù di scelta tra le tre opzioni disponibili per la creazione, ovvero: *BASIC*, *COMPLEX* e *TIN*, dove alle prime due voci corrisponde la stessa procedura con un livello di accuratezza differente, mentre nell'ultimo caso la *Mesh* presenterà solo facce triangolari dove i vertici contigui non hanno mai

Fig. 5 - *Mesh* generata in *Cyclone* di una porzione grande di nuvola di punti, la scansione di partenza è stata eseguita con una griglia di 1x1 centimetri. La densità della polirete della *Mesh* è impressionante.





le stese coordinate X ed Y e dove nessuna faccia si sovrappone ad un'altra secondo l'asse verticale. Una condizione utile per l'uscita verso alcuni programmi per cui questi requisiti possono risultare necessari, ma latrice di superfici talvolta molto divergenti dalle aspettative. Nulla vieta, certo, di eseguire un'operazione di *merge* tra le differenti porzioni della nuvola, ma in questo caso l'unica opzione disponibile per la creazione della *Mesh* sarà *TIN* e quindi difficilmente adatta a soddisfare le esigenze di modellazione e risulterà qualitativamente inferiore al risultato ottenibile con la procedura di creazione per parti separate.

La qualità della *Mesh* generata in modalità *COMPLEX* - ma anche in modalità *BASIC* - è il più delle volte discreta, un problema è invece rappresentato dal "peso" della *Mesh* che è molto elevato, anche nel caso di oggetti di dimensioni non ampie. In questa maniera una superficie derivata da una porzione di una singola scansione eseguita con un passo di un centimetro può produrre, a seconda della sua estensione anche un insieme di dati che supera il centinaio di *Megabyte*, e senza che questa copra una parte ampia del battistero. In *Cyclone* sono comunque presenti degli strumenti di decimazione, che possono operare sulla *Mesh* prodotto oppure direttamente sulla nuvola di

Fig. 6 - Rendering con applicazione di un materiale standard eseguito in *3D Studio Max*, il file con questa sola porzione ammonta a circa quaranta *Megabyte* in formato *MAX*.

punti prima della generazione della *Mesh*, sta di fatto che ambedue le soluzioni producono molto spesso dei risultati indesiderati e questo tipo di semplificazione, in relazione con le scansioni eseguite al battistero ha frequentemente prodotto superfici caotiche, a volte con l'apertura di fori nella superficie, con una forte divergenza dal dato rilevato e poco adatte ad entrare a far parte del modello tridimensionale digitale complessivo.

Ultima particolarità del modulo di generazione delle *Mesh* di *Cyclone* è la sua modalità operativa essenziale, ovvero: i bordi di limite della superficie generata corrisponderanno al limite massimo di estensione dei punti selezionati, non sono quindi previste funzioni di chiusura automatica o di saturazione di spazi aperti nella *Mesh*, cosa che di certo garantisce una maggior correttezza del risultato, ma che allunga i tempi di creazione del modello richiedendo un intervento di rielaborazione manuale.

L'unico formato di esportazione supportato da *Cyclone* è il *DXF* (nella versione 12), che di per suo è un buon formato, molto compatibile e assolutamente adeguato ad archiviare questo tipo di geometrie, ma che ha il difetto di essere costruito in forma testuale e di conseguenza produce file di dimensioni enormi². Ora questo



Fig. 7 - La *Mesh* generata risulta troppo complessa per essere gestita dai sistemi di semplificazione delle superfici, nell'immagine: *shading* della *Mesh* a cui è stata applicata la procedura di "decimazione" di *Cyclone*. L'effetto "calligrafico" è dovuto a delle fratturazioni della superficie.



problema in se stesso non è grave, ma resta il fatto che per archiviare la parte elaborata in forma accessibile, un archivio di file in formato *DXF* risulta indubbiamente ingombrante, per cui al passaggio di esportazione va il più delle volte aggiunto un passaggio di riconversione del file in formati più maneggevoli come l'*OBJ*, l'*STL* o, quando le caratteristiche della *Mesh* lo permettono, il *3DS*.

Oltre alla soluzione di esportazione in formato *DXF*, *Cyclone* permette anche di eseguire la così detta Autocad Connection, basata su un formato del file specifico, il *COE*, che viene appositamente generato e quindi fatto aprire in una sessione di *Autodesk Autocad* (se installato nel proprio sistema) tramite un *plug-in*. Tuttavia questa procedura, benché interessante risulta essere più lenta nella generazione del file dell'esportazione diretta.

Sulla base di quanto visto, eseguire direttamente in *Cyclone* la generazione della *Mesh* è ammissibile solo per quelle parti che non necessitano di forti interventi di rieditazione o dovendo andare a costituire un elemento autonomo, svincolato da insiemi complessi, non presentano problemi di ottimizzazione e possono quindi essere gestite alla loro massima risoluzione. Sulla base della considerazione che un modello completo del battistero

Fig. 8 - La superficie generata in *Cyclone* con procedura automatica: utilizzando un motore di rendering non fotorealistico, in questo caso *Digimation Illustrate*, l'identificazione dei bordi dell'oggetto produce dei risultati curiosi, ma poco utilizzabili.

sviluppati per parti di mesh direttamente generate con questa procedura non potrebbe essere gestito in alcun modo neanche dalle workstation di massimo livello di prestazioni, questo metodo non è stato impiegato se non per alcune porzioni minori di quanto realizzato.

Volendo quindi passare a sperimentare

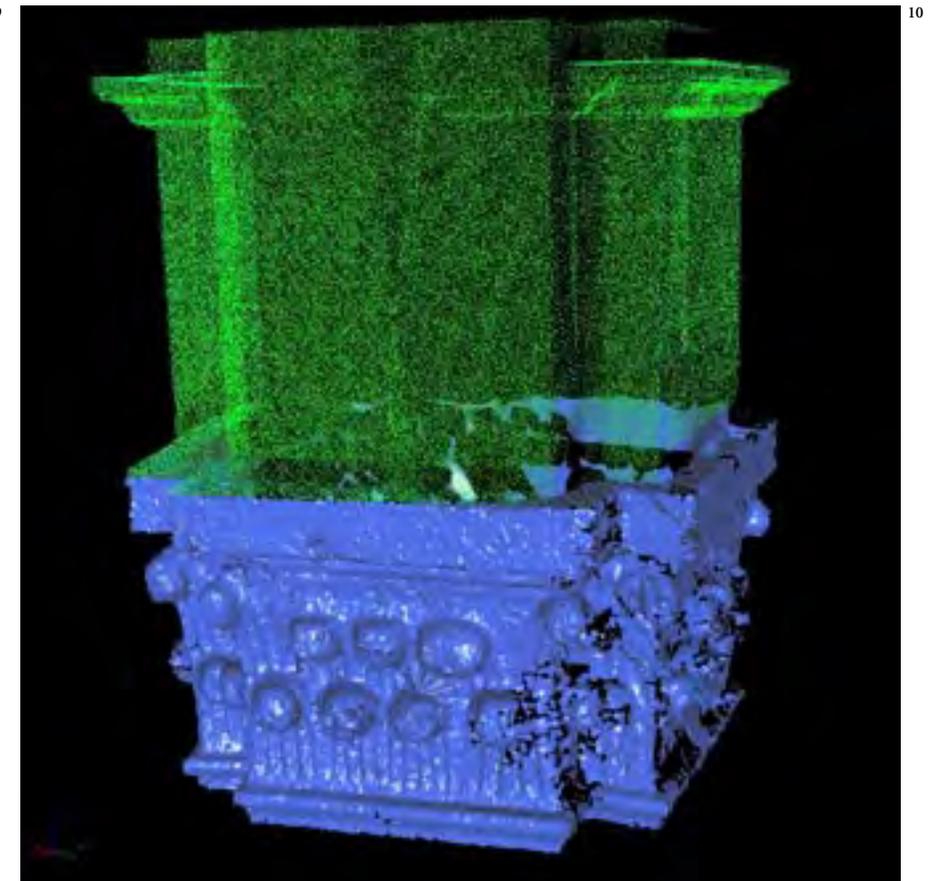
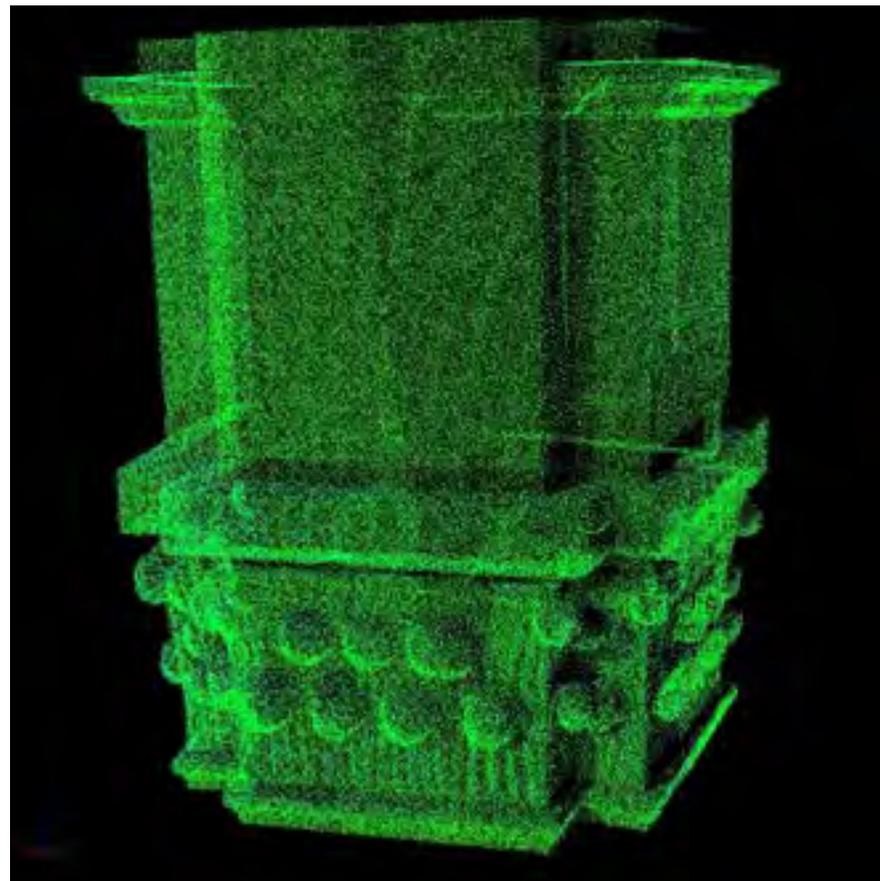
altre soluzioni per la generazione delle superfici, si è pensato di ricorrere ad un altro prodotto basato sulle *Mesh*, ovvero *Spider*⁴ della *Alias|Wavefront*, un software parte degli *Studio Tools* dedicato alla gestione di nuvole di punti, alla loro elaborazione e all'elaborazione delle superfici derivabili da queste.

Si tratta di uno strumento piuttosto

semplice e con una serie di comandi chiari e piuttosto logici, oltre alle funzioni di suddivisione e di semplificazione della nuvola e alle procedure per la creazione delle *Mesh*, sono presenti comandi per la semplificazione della *Mesh*, per la chiusura automatica o semiautomatica di fori della superficie e alcuni strumenti per la valutazione

visuale di quanto creato.

Oltre a permettere l'importazione di numerosi formati classici delle nuvole di punti, sia di tipo testuale che di tipo *CAD*, *Spider* permette di importare direttamente il formato *PTS* di *Cyclone*, ovvero un formato atto a preservare, per ogni singolo punto della nuvola, non solo le caratteristiche di posizione,



Figg. 9/10 - Nuvola di punti di uno dei capitelli dei pilastri del primo ordine, *Mesh* generata con *Alias|Wavefront Spider*.

ma anche i valori cromatici associati. La procedura delle operazioni è abbastanza semplice: si importa la nuvola dei punti, se lo si ritiene necessario la si suddivide in più parti, quindi si esegue la procedura automatica di generazione della *Mesh*. In Questo caso, la tipologia della *Mesh* è unica, ma sono invece direttamente editabili i parametri di

generazione delle facce costituenti la superficie, questi riguardano due fattori che regolano il valore massimo della distanza tra il vertice della faccia generata ed il punto della nuvola, ed il valore minimo entro cui considerare due punti appartenenti ad una stessa superficie. Inoltre è possibile impostare una misura massima per la lunghezza

di una faccia della *Mesh*.

A semplificare la selezione di questi valori è stata inoltre introdotta una funzione di stima automatica dei parametri, che sulla base di una rapida analisi della nuvola di punti imposta i valori ritenuti più opportuni per la creazione della superficie.

Questo insieme di valori permette di

produrre superfici molto diverse tra loro per correttezza e "peso", selezionando valori molto bassi o nulli per le tolleranze, si ottengono insiemi di superfici estremamente corretti ma il più delle volte discontinui, se invece si utilizzano dei valori medi di tolleranza, l'oggetto risultava completo e con parti aperte solo in corrispondenza di aree

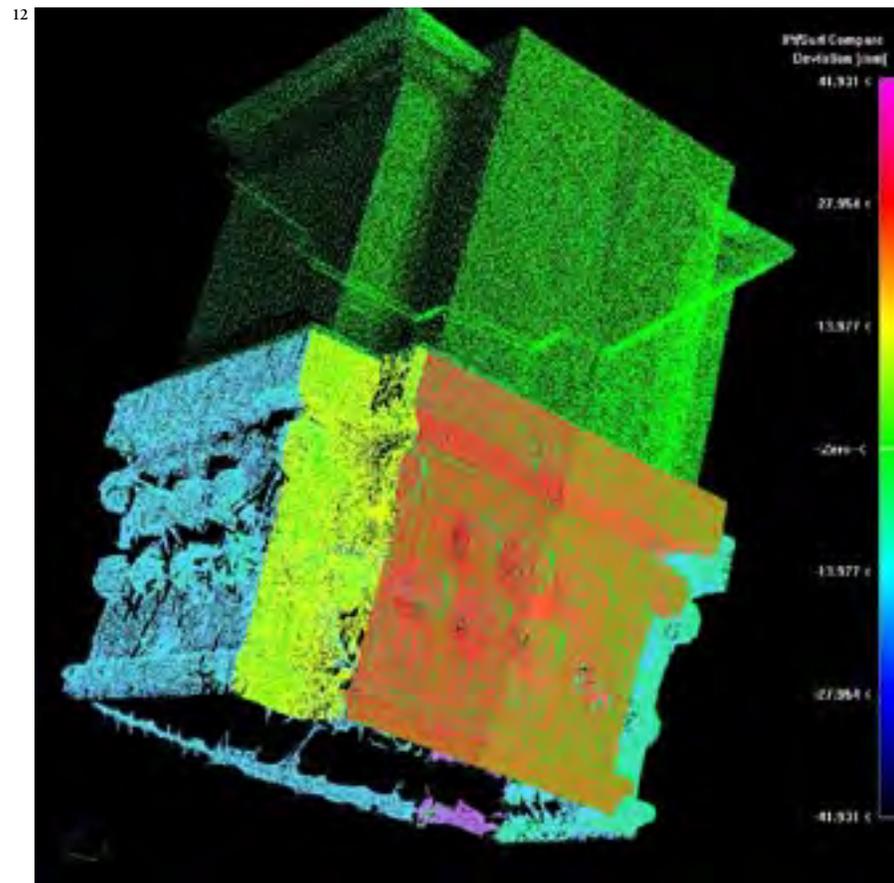
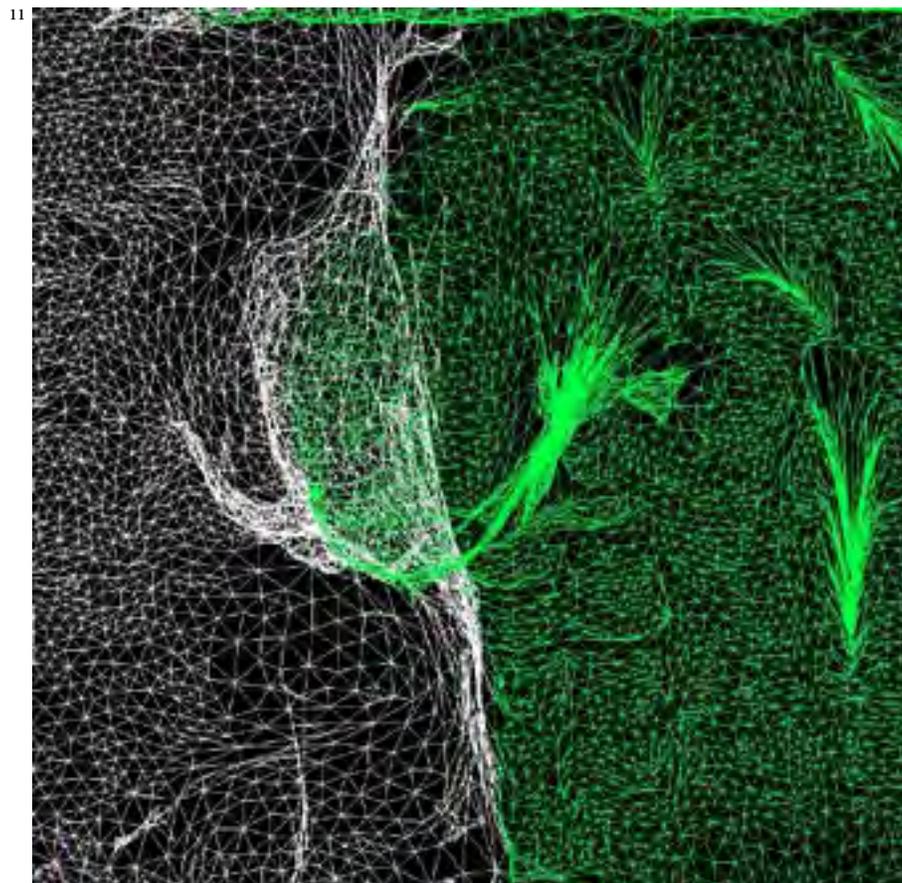
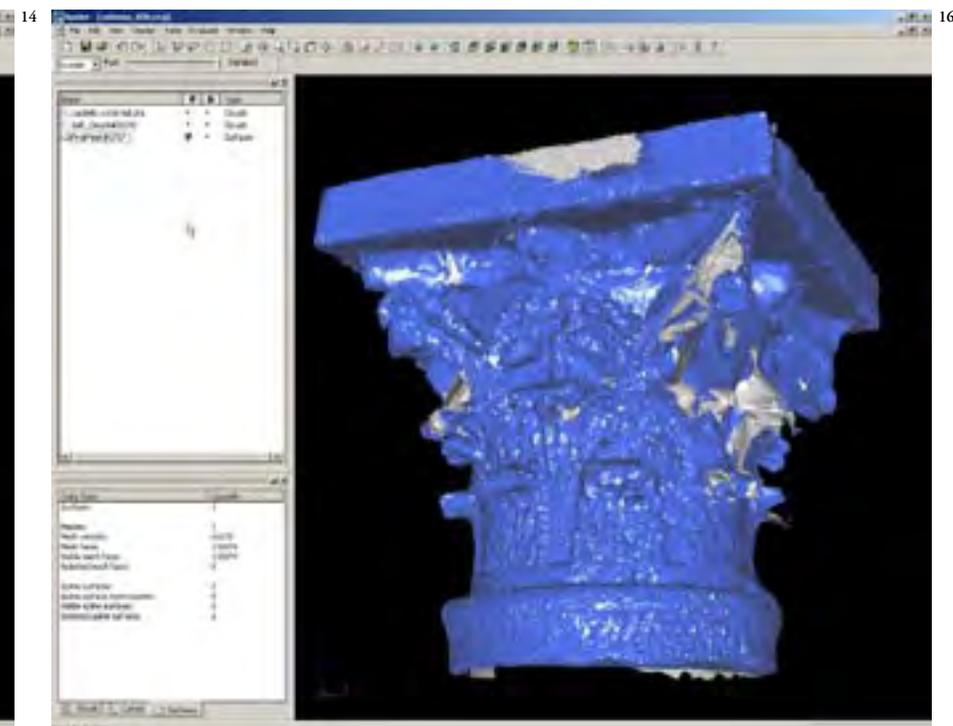
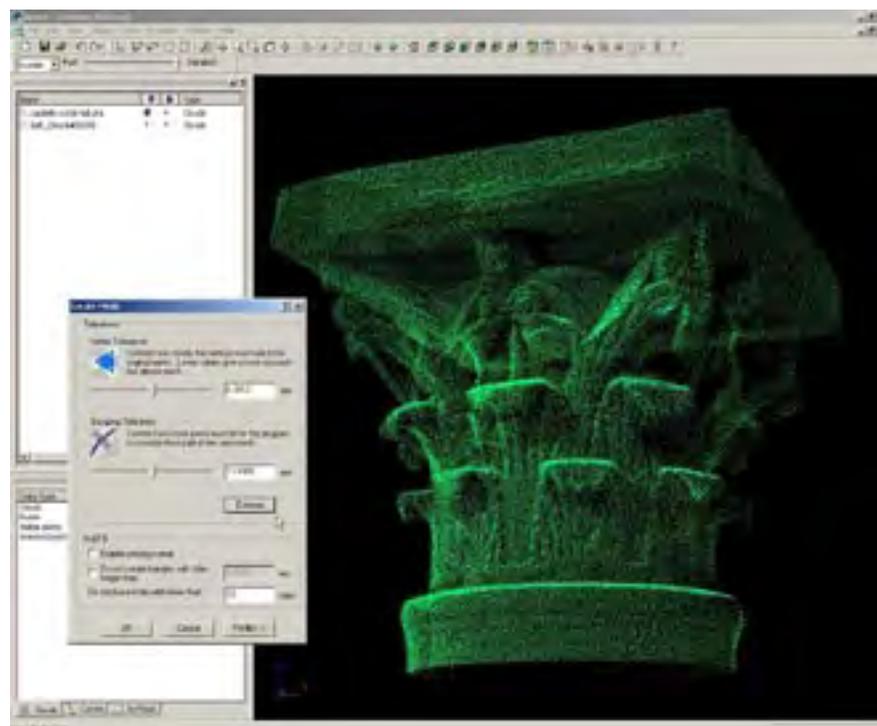
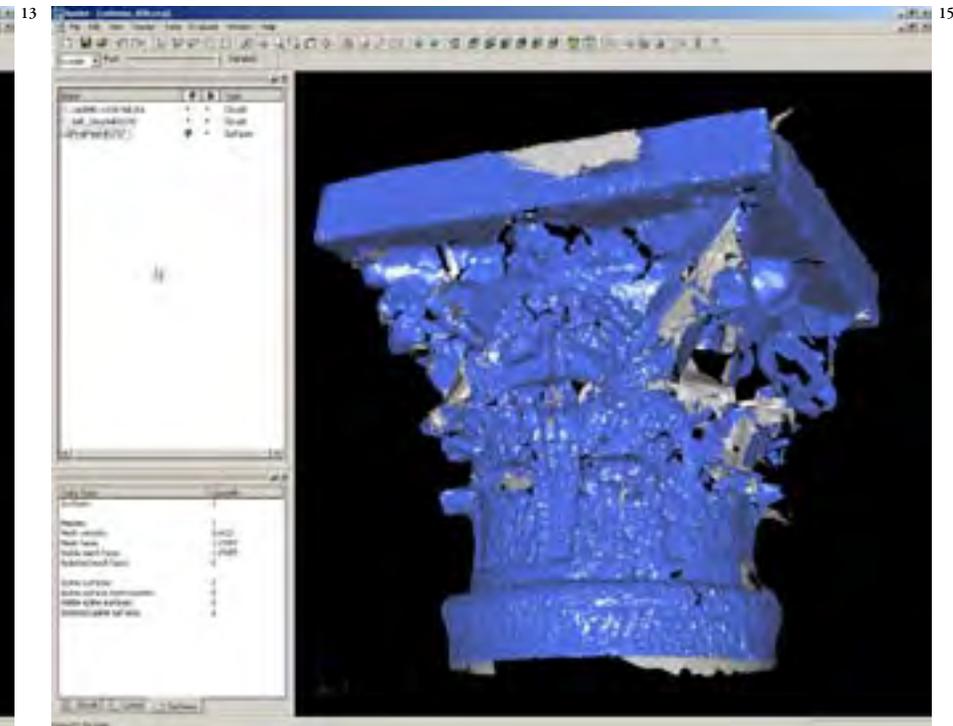
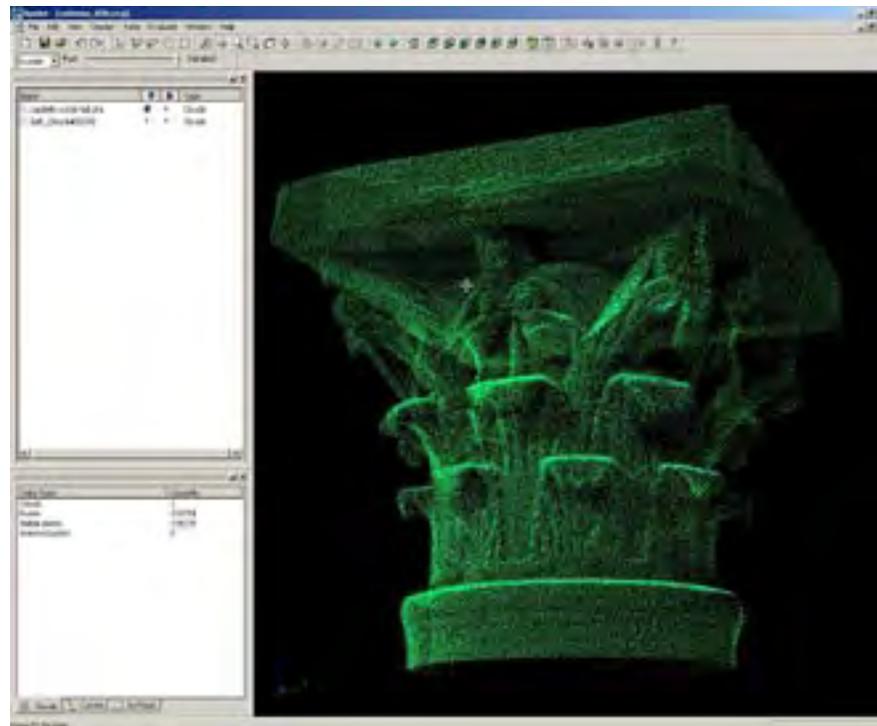


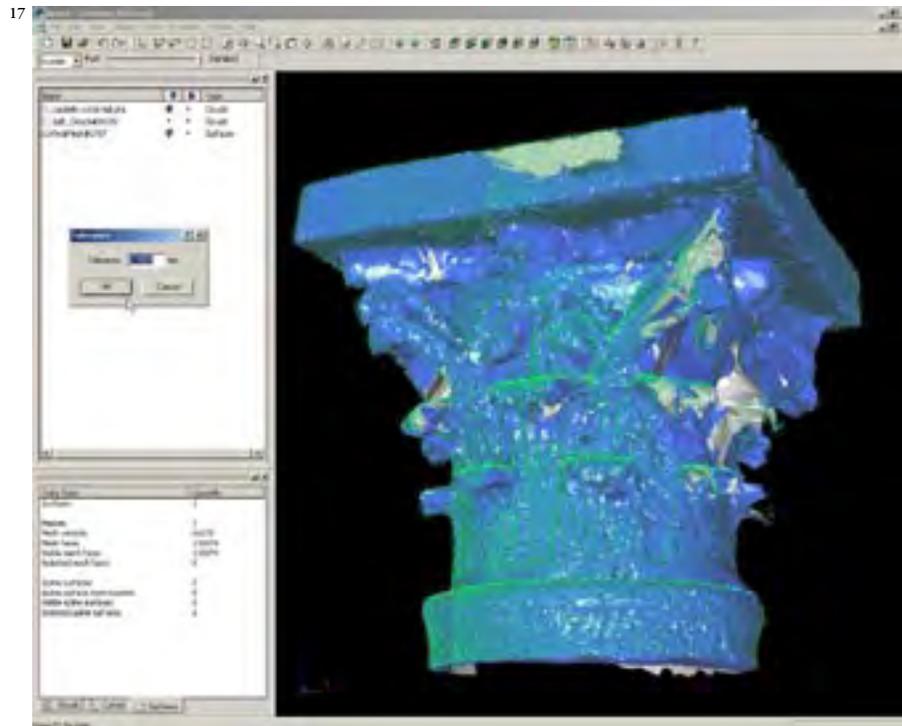
Fig. 11 - Dettaglio della *Mesh* generata da *Spider*, i valori attribuiti automaticamente dal programma per la generazione della superficie permettono una resa accurata, ma l'oggetto creato è molto "pesante".

Fig. 12 - In *Spider*, la *Mesh* può essere confrontata con la nuvola di punti di origine per poter valutare la divergenza che ha assunto rispetto a questa (risultato alterato per indurre una maggior variazione cromatica).



Figg. 13/16 - Generazione della Mesh di un capitello in Alias|Wavefront Spider:

13) Nuvola di punti caricata nel programma attraverso l'importazione di un file testuale *Cyrax PTS*. 14) Settaggio dei parametri per la creazione automatica della superficie. 15) La Mesh creata presenta numerosi fori e discontinuità. 16) La Mesh dopo l'applicazione di due procedure automatiche: quella per la saturazione automatica dei fori (*Fill All Holes*) e per la smussatura della superficie (*Smooth surface*).



particolarmente rade della nuvola. Successivamente si può intervenire su una superficie che dovesse risultare incompleta, in virtù di spazi di occlusione o di errori nella pianificazione della scansione tramite un sistema automatico, o semiautomatico che permette di saturare le aree aperte della superficie con delle serie di facce triangolari interpolate a partire dai bordi della parte lasciata aperta. Questo sistema, anche se in sostanza “inventa” parti dell’oggetto risulta comunque particolarmente utile per risolvere quelle aree non rilevate, il più delle volte molto piccole, che specie nelle parti scultoree molto ricche sono sempre presenti.

A superficie completata è quindi possibile applicare delle funzioni di semplificazione e alleggerimento della Mesh, questi passaggi, a seconda del valore impostato possono anche essere molto aggressivi, ma permettono, se utilizzati con fattori modesti di semplificazione, di ridurre notevolmente le irregolarità delle parti soggette a rumore e con fattori intermedi di snellire notevolmente il numero di facce necessarie a descrivere efficacemente l’oggetto rilevato.

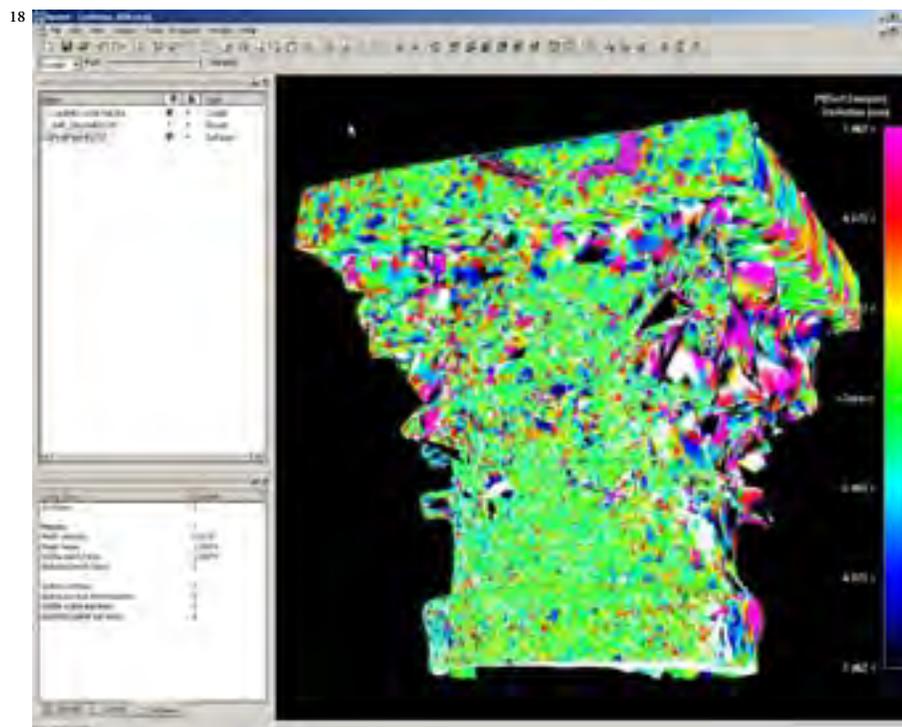
In virtù delle ampie possibilità di alterazione rispetto alla nuvola di punti, il programma prevede delle funzioni di analisi e valutazione della corrispon-

denza tra superficie generata e vertici sorgente, con una graficizzazione cromatica molto efficace per valutare la correttezza di quanto realizzato.

Da ultimo, *Spider* permette l’exportazione in una numerosa serie di formati, tra cui *DXF*, *STL*, *OBJ* e *IGS*, con conseguente riduzione del numero di passaggi di conversione tra applicazioni.

Spider è stato ampiamente sperimentato su capitelli ed elementi statuari, producendo superfici il più delle volte ben risolte, non leggere⁵, ma abbastanza razionali anche nelle parti maggiormente soggette al fenomeno del *rumore*.

Una ulteriore sperimentazione è stata condotta con alcuni software per l’estrazione delle superfici da insiemi di punti sviluppati come *plug-in* dell’applicazione *McNeel Rhinoceros 3D*, questo programma di modellazione, molto versatile e prevalentemente basato sulla geometria di tipo *NURBS*, permette infatti di integrare nuove funzioni per mezzo di componenti aggiuntive, tra queste *Pointcloud for Rhino* e *Copious* presentavano delle specifiche piuttosto interessanti, la verifica di questi due strumenti, pur non producendo elementi per ora effettivamente impiegati per la costruzione del modello tridimensionale digitale definitivo, ha comunque mostrato una



Figg. 17/18 - Generazione della Mesh di un capitello in *Alias|Wavefront Spider*.

17) Attivazione della nuvola di punti in sovrapposizione alla superficie e settaggio del valore di divergenza ammesso.

18) Generazione del rapporto grafico sulle discrepanze tra nuvola e superficie.

soluzione interessante soprattutto per la generazione dei modelli a minore risoluzione.

Queste applicazioni funzionano in maniera simile, differenziandosi essenzialmente nella struttura dei menù, più schematici ed essenziali per *Pointcloud* e maggiormente ricchi di opzioni in *Copious*. Per tutte e due le applicazioni, il procedimento prevede per prima cosa l'importazione delle porzioni di nuvola dei punti in *Rhinoceros*⁶, successivamente avviando il comando per la creazione delle superficie, il programma chiederà di selezionare l'insieme di punti su cui basare l'elaborazione. A differenza di *Spider*, che opera per superfici *Mesh*, in questo caso si dovrà semplicemente indicare il numero di vertici di controllo da impiegarsi per la generazione della *NURBS*. La superficie generata in questo modo presenterà due vantaggi rispetto al suo equivalente *Mesh*: la maggior leggerezza e la mancanza di fori dovuti alla mancata risoluzione della triangolazione della porzione di nuvola.

Il primo elemento è dovuto alla struttura propria della *NURBS*, mentre il secondo deriva dalla metodologia applicata che prevede di considerare la superficie a partire da un equivalente piano che per passaggi successivi verrà adattato secondo l'insieme dei vertici.

Unico problema può essere la creazione di cuspidi sulla superficie generata nel caso di fori particolarmente grandi o con particolari condizioni geometriche al contorno della discontinuità. In questo caso il problema è in genere modesto, in quanto l'editazione dei vertici di controllo della nuvola permette in maniera semplice di riparare la deformazione.

La particolare struttura della *NURBS*, è comunque fortemente suscettibile di alterazioni della geometria originale della nuvola di punti, questo deve essere sempre soggetto a controllo, ma al tempo stesso, la struttura basata su vertici vi controllo rende possibile ridurre in maniera significativa le problematiche di rappresentazione legate al fenomeno del "rumore".

Trattandosi di un *plug-in* di *Rhinoceros* è quindi possibile salvare in un formato affidabile come il *3DM*, o convertire la superficie *NURBS* in *Mesh* (con conseguente aumento di "peso" del modello) e salvare il tutto in uno dei tanti formati di esportazione supportati da questo programma.

Gli strumenti fin qui visti sono però tali che per loro natura producono sì delle componenti finite e valide, ma al tempo stesso non permettono di affrontare globalmente un rilievo digitale, o meglio, non permettono vere

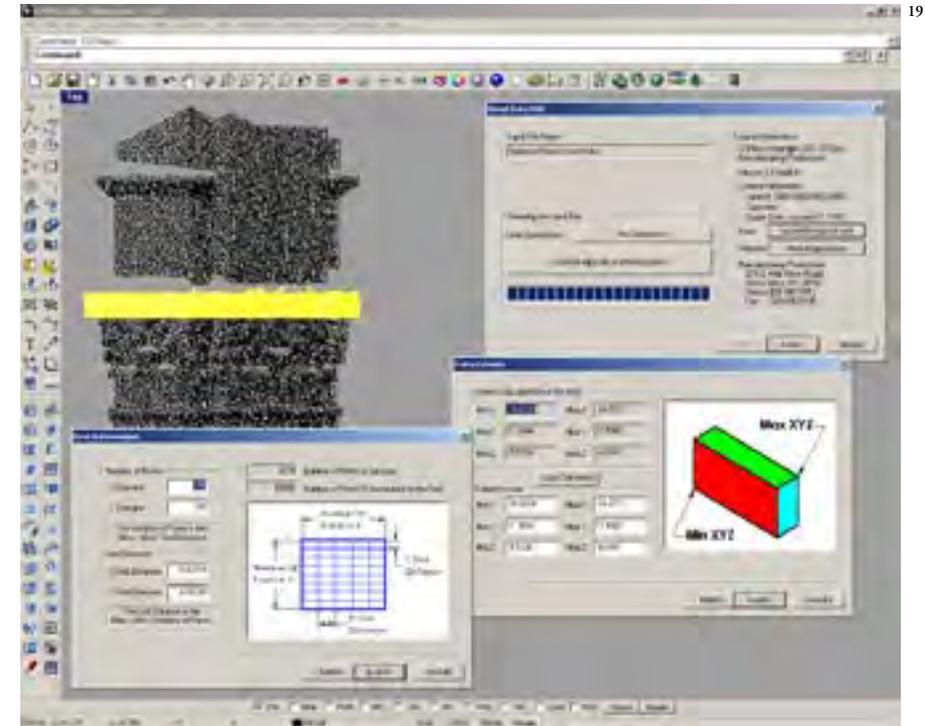
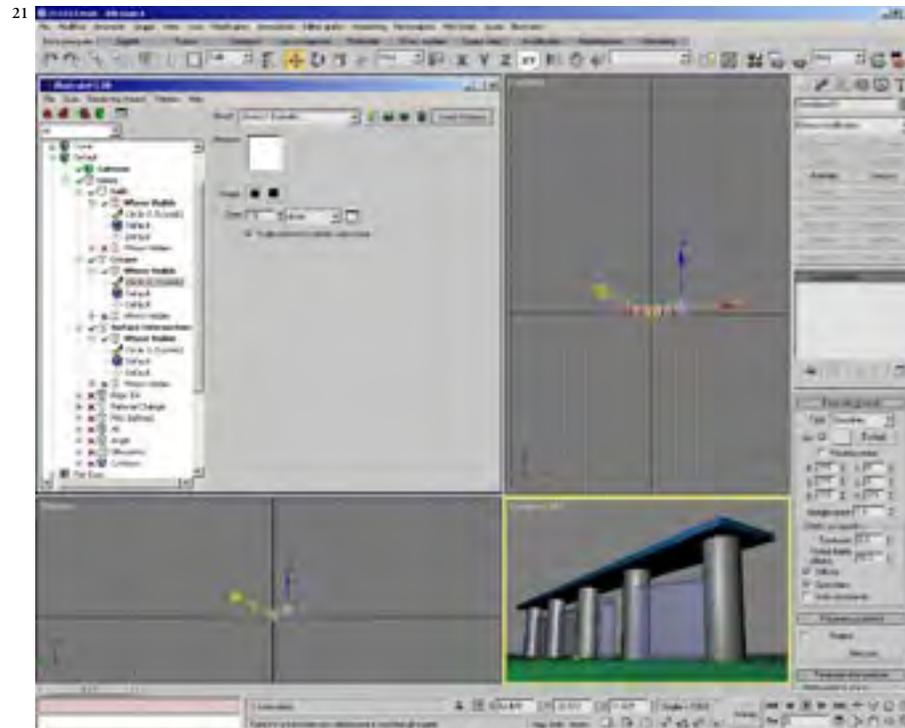


Fig. 19 - Generazione di una superficie *NURBS* a partire da una nuvola di punti in *Copious*, un *plug-in* per *McNeel Rhinoceros*.

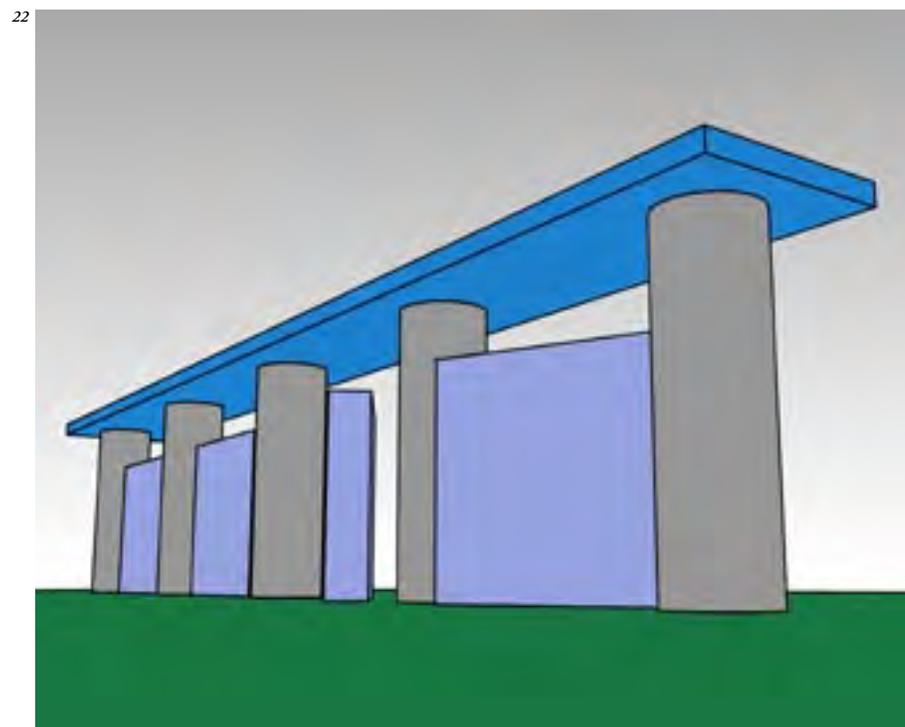
Fig. 20 - Risultati dell'operazione di *Copious*, a sinistra *NURBS* con 500x600 *Control Vertex*; a destra *NURBS* con 50x60 *Control Vertex*.



restituzioni istantanee dell'intera architettura, neanche se questa è un edificio dalle caratteristiche meno impegnative del battistero, nella sperimentazione degli strumenti di rappresentazione digitale, si è quindi voluto eseguire il test con dei software mediati da un altro ambito applicativo, ma che secondo logica potevano permettere di ottenere dei risultati interessanti. La tipologia del software di cui si parla è quello per la resa grafica di tipo *cartoon*, definito in tempi recenti anche come *"non-photorealistic render"*, il campo applicativo è soprattutto quello della computer grafica per l'animazione a disegni animati, per la creazione di immagini di effetto o pubblicitarie. Varie soluzioni di applicazione di questo tipo di procedimento, che ammette numerose sfaccettature nelle caratteristiche dei risultati, possono essere viste in numerosi film di animazione, ma in questo caso la condizione d'uso in cui si voleva riportare questo tipo di strumento erano le restituzioni in forma classica delle rappresentazioni di prospetti (ed eventualmente di piante e sezioni) del battistero. Infatti la procedura che il sistema adotta permette di identificare i principali bordi degli elementi tridimensionali e metterli in evidenza con tratti più o meno marcati, mentre al tempo stesso il trattamento a tinte piatte di tutte le superfici conferi-

sce un aspetto "disegnato" al *rendering*. Inoltre molte versioni recenti di questo tipo di applicazione supportano un'uscita non solo di tipo bitmap, ma anche vettoriale, con la produzione di veri e propri disegni bidimensionali composti da linee di spessore e stile differente.

Si è quindi eseguito un test generale sulle principali applicazioni esistenti per questo tipo di produzione e, va detto, la selezione non è stata facile in quanto in virtù del grande successo della così detta *"grafica in stile flash"*⁷ e al sempre crescente impiego della modellazione anche nei filmati di animazione di tipo tradizionale. I programmi adatti a questa applicazione sono circa una mezza dozzina, tutti funzionanti come plug-in di altre applicazioni, e tutti con prerogative apparentemente equivalenti. Dopo l'esecuzione di un primo, semplice, test conoscitivo⁸, si è deciso di affrontare un coppia di mesh significativamente impegnative concentrando la sperimentazione su *Illustrate 5.1* un *plug-in* per *3D Studio Max* sviluppato dalla *Digimation*. La base del test è stata decisa in due *Mesh* estratte dalle campagne eseguite in esterni: una scansione complessiva di inquadramento dell'intero fronte eseguita con passo cinque centimetri ed una porzione della corona delle cuspidi eseguita invece con passo un



Figg. 21/22 - *Digimation Illustrate* è un *plug-in* per *3D Studio Max* che permette di eseguire dei *rendering* non fotorealistici. La funzione di identificazione dei contorni e la possibilità di generare *rendering* in formato vettoriale oltre che *bitmap* lo rendono molto interessante per la produzione di immagini bidimensionali a partire da superfici *Mesh* e *Nurbs*.

centimetro.

In tutti e due i casi la *Mesh* è stata generata in un'unica soluzione con la procedura di *Cyclone* ed è stata importata in *3D Studio Max* per l'elaborazione.

La procedura di *Illustrate* è basata su un processo di autocomposizione, dove l'operatore viene guidato a scegliere le varie opzioni di restituzione in maniera semplice, successivamente si potranno variare i parametri impostati in questa fase manualmente per perfezionare il risultato.

Da questo punto in poi qualunque rendering eseguito con queste impostazioni produrrà un'immagine con uno stile grafico simile ad un disegno. O almeno così dovrebbe, visto che in ambedue i casi il risultato ottenuto è un groviglio di linee intricate e poco distinguibili. Il che ha richiesto di comprendere le ragioni di questo processo.

Dopo numerose prove, le motivazioni sono state chiare, il programma, nella sua operazione di riconoscimento dei bordi, viene ingannato dalla irregolarità e dalla grande quantità delle facce componenti la *Mesh* che di conseguenza non permettono di definire bordi chiari prevalenti, tanto più è densa la nuvola di punti di partenza tanto peggiore sarà il risultato del procedimento. Con nuvole rade il processo porta a ri-

sultati leggermente migliori, ma non si va al di là di una rappresentazione che al limite si può considerare originale e comunque fortemente graficizzata.

Tuttavia, non si vuole considerare fallimentare né da abbandonare questa strada, in quanto il procedimento adottato è basato su uno strumento tutto sommato improprio per il tipo di oggetto impiegato, mentre i risultati ottenuti da applicazioni su forme molto meno complesse risultano efficaci. Quindi si tratta di dedicare una certa attenzione allo sviluppo di questa famiglia di software, testando le nuove versioni ed eventualmente facendosi promotori dello sviluppo di queste applicazioni, il che non vuol dire mettere in opera la diretta programmazione di un software, ma far presente alle case di sviluppo le proprie esigenze e rendendosi partecipi dei programmi di sviluppo che molto spesso necessitano di forme qualificate di *feedback*.

Si tenga comunque presente che la maggior difficoltà nella restituzione con procedura di tipo *non-photorealistic render*, sulla base di una nuvola di punti acquisita con scanner *Time of Flight*, è costituita dal suo doversi basare su una *Mesh* che presenta comunque una certa irregolarità e che rende difficile definire dei bordi chiari nella costruzione delle strutture che devono definire la resa grafica finale. A queste

Figg. 23/24 - Dettaglio di una restituzione di *Illustrate* a partire da una *Mesh* generata da *Cyclone*, il *rendering*, benché originale non è certo utilizzabile per l'inserimento in un disegno con grafica di tipo "tecnico".

Le ragioni di questo fenomeno sono riconducibili alla conformazione della *Mesh*. Essendo stata generata con una forte variazione di inclinazione tra le facce, a causa del "rumore" della nuvola di punti, il risultato del processo applicato da *Illustrate* non riesce ad individuarvi con chiarezza i limiti principali dell'oggetto rispetto al reticolo secondario.

Applicando un materiale per il *rendering* che risponde con colore diverso in virtù della diversa inclinazione della faccia il problema viene visualizzato in maniera chiara.



condizioni può risultare interessante l'applicazione di procedure di semplificazione non basate sulla decimazione, ma sul processo delle *subdivision surface*, o su altre procedure evolute di riduzione del "rumore".

In questa sede non si è ancora approfondita una soluzione basata su questa combinazione, ma sarà uno sviluppo che sicuramente verrà verificato molto presto per concludere questa parte di ricerca.

È comunque probabile che una procedura combinata non porti ad un rivolgimento del risultato, ma semplicemente mostri dei sensibili miglioramenti che se però da un lato introducono maggior qualità nella restituzione, dall'altro sacrificano l'accuratezza del modello di partenza, cosa che comunque potrebbe essere presa in considerazione visto l'ambito applicativo che un elaborato del genere, che qui è stato sempre considerato in una scala mai inferiore al cento per un edificio delle dimensioni e della complessità del battistero.

Il tutto per poter ipotizzare che in tempi non lunghissimi, un pacchetto di gestione dei dati del rilievo digitale potrebbe implementare anche delle funzioni realmente utilizzabili per la produzione istantanea ed automatica di elaborati utili alla rappresentazione e alla valutazione dell'oggetto rilevato,

e riconducibili a degli elaborati bidimensionali classici. Questi strumenti magari potrebbero comunque trovare difficoltà nel misurarsi con il battistero di Pisa, per via della sua eccezionale complessità, ma che comunque potrebbero dare, anche in quel caso, delle utili basi di partenza per lo sviluppo di elaborazioni o addirittura, nel caso di porzioni dell'oggetto, elaborati qualitativamente ben riusciti.

Note

¹ Tutti i test sono stati eseguiti su versioni di prova, accademiche o con licenza temporanea dei prodotti, non sono stati presi in esame prodotti che non prevedendo soluzioni di prova non permettevano la valutazione del prodotto preliminarmente all'acquisto.

² Per esempio la generazione della superficie dell'insieme di scansioni a passo un centimetro di una delle volte a crociera della galleria al piano terra ha prodotto un file *DXF* di oltre cinquecento megabyte.

³ Il formato *3DS* ha un limite massimo per il numero di facce e di vertici che possono comporre ogni elemento compiuto presente nel file, con l'utilizzo di *Mesh* generate da scansione laser è facile aver prodotto delle superfici che eccedono questo limite.

⁴ Il software viene distribuito con il nome di *Spider* per le piattaforme *Windows*, per i sistemi *Irix* il nome del programma è invece *Eval-Viewer*.

⁵ Utilizzando valori di approssimazione sensibilmente più alti di quelli proposti dalla valutazione automatica, il file contenente i dodici capitelli del primo ordine di colonne e pilastri interni richiede oltre settanta megabyte di spazio su disco se archiviato in formato *3DM*.

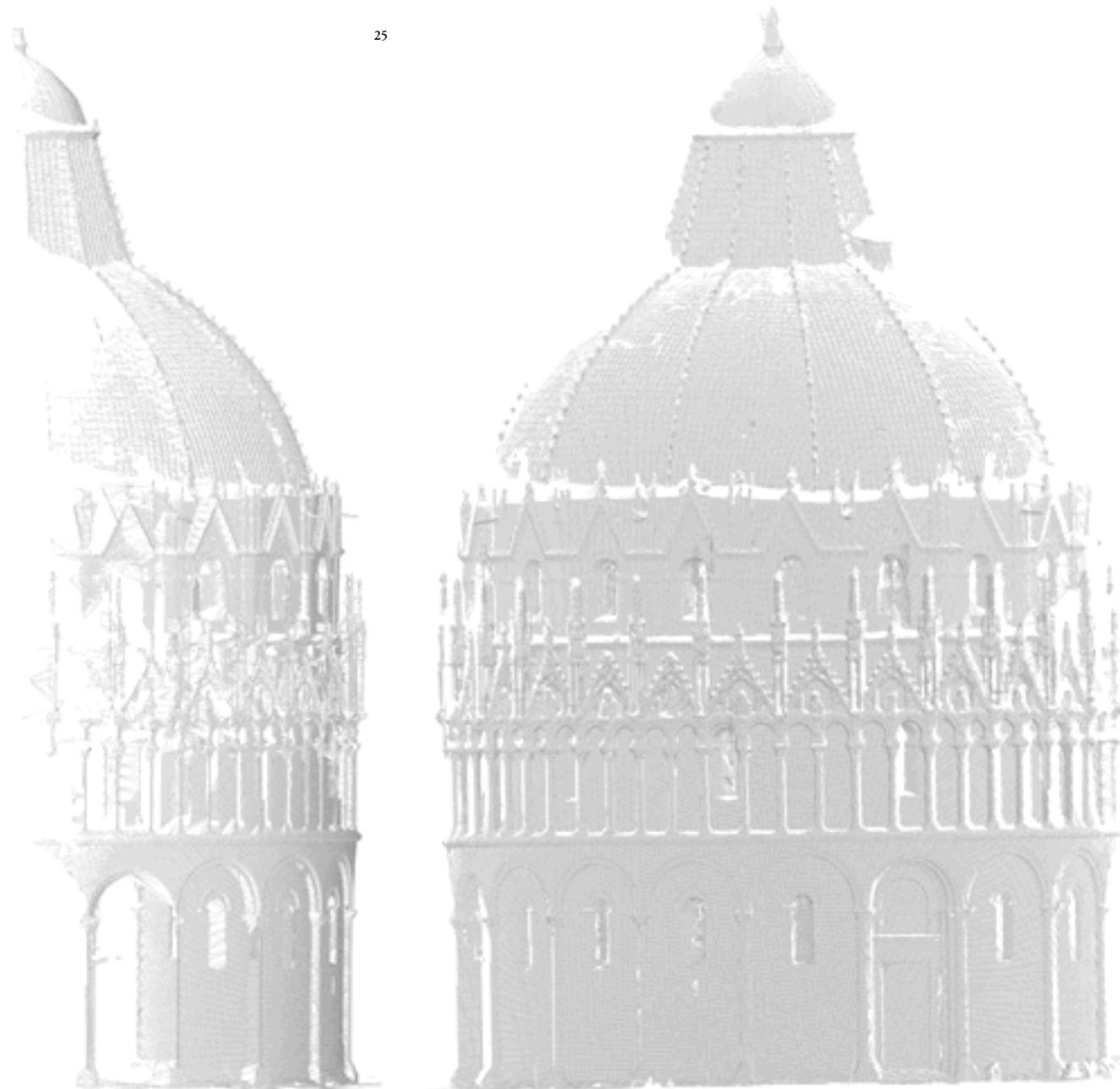
⁶ Il passaggio da *Cyclone* a *Rhinoceros* può avvenire in maniera piuttosto efficace utilizzando l'esportazione testuale delle nuvole dei punti, in formato *CSV* o *XYZ*. Il processo si deve però condurre per piccole porzioni alla volta, benché dalla versione 3.0 *Rhinoceros* supporti pointcloud come oggetto proprio, una importazione di

grandissimi volumi di vertici potrebbe rendere ingestibile il file.

⁷ In riferimento al classico tipo di grafica prodotta dall'utenza che opera con *Macromedia Flash* un programma per la costruzione di prodotti multimediali orientati all'uso in Internet.

⁸ I software presi in esame in prima istanza sono stati *Penguin* per *Rhinoceros*, lo *shader CELL* di *Lightwave*, *Final Toon* per *3D Studio Max 4*, *Vecta 3D* per *3D Studio Max 3*, è stato anche sperimentata la funzione *Extract 2D drawing* di *Cyclone* che si basa su un principio analogo di individuazione dei bordi.

⁹ Come per esempio il già citato *RBF* (*Radial Basis Function*) in fase di studio presso il centro di ricerche applicate dell'Università neozelandese di Canterbury.



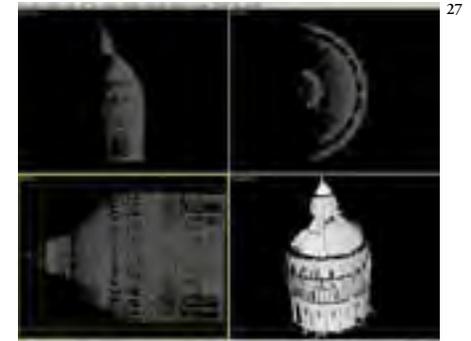
25

26

Figg. 25/26 - *Mesh* di una intera scansione del battistero, generata in forma completamente automatica in *Cyclone* a partire da una delle scansioni di inquadramento eseguite con maglia 5x5 centimetri. Veduta frontale e laterale della *Mesh*, *rendering* in modalità *wireframe*. Questa superficie è stata usata come base per il test di applicazione di *Digimation Illustrate*.

Figg. 27/28 - La *Mesh*, portata in *3D Studio Max* e trattata con il modulo *Illustrate*.

Fig. 29 - *Shading* con materiale generico della superficie.



27

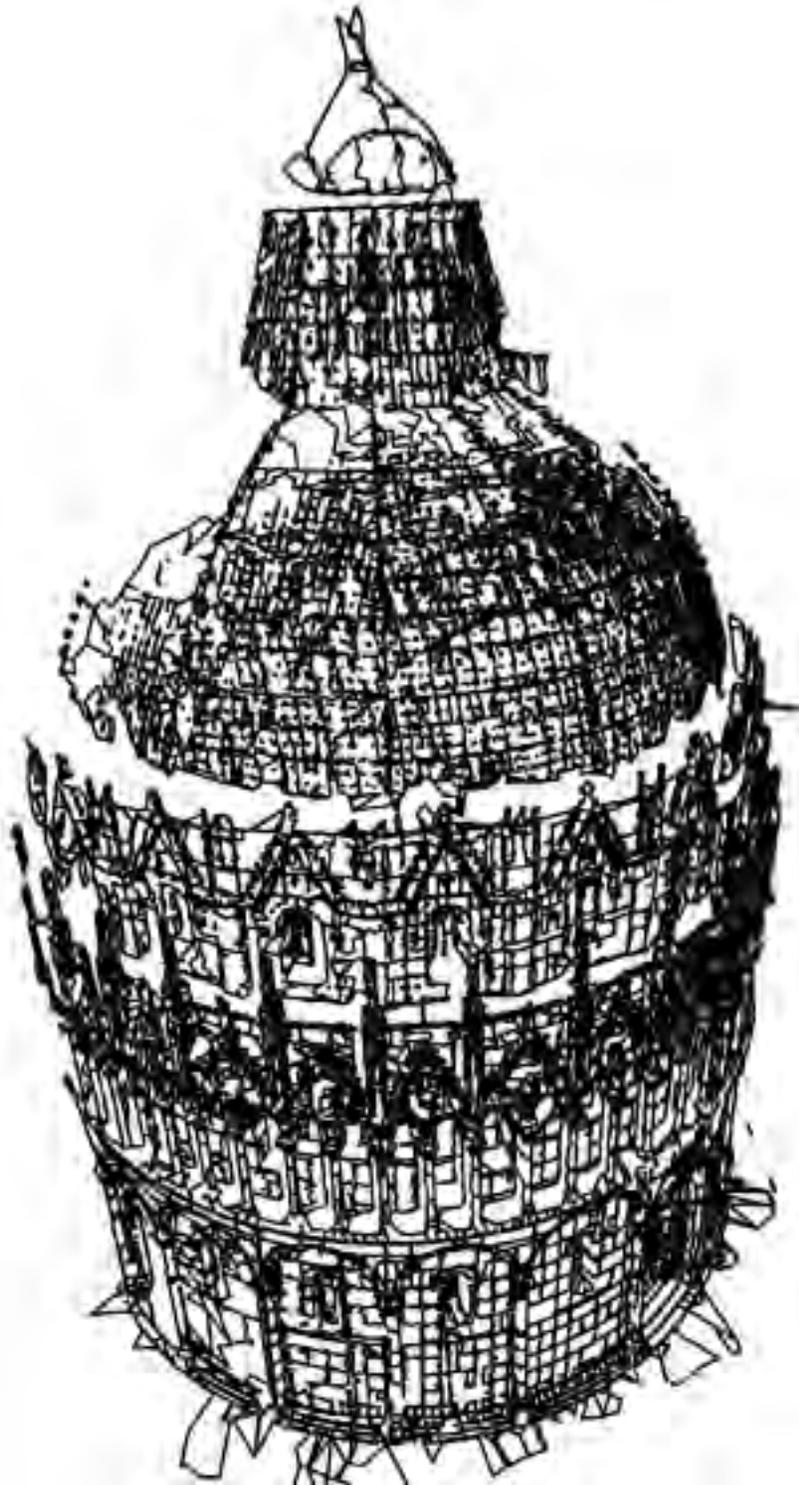


28

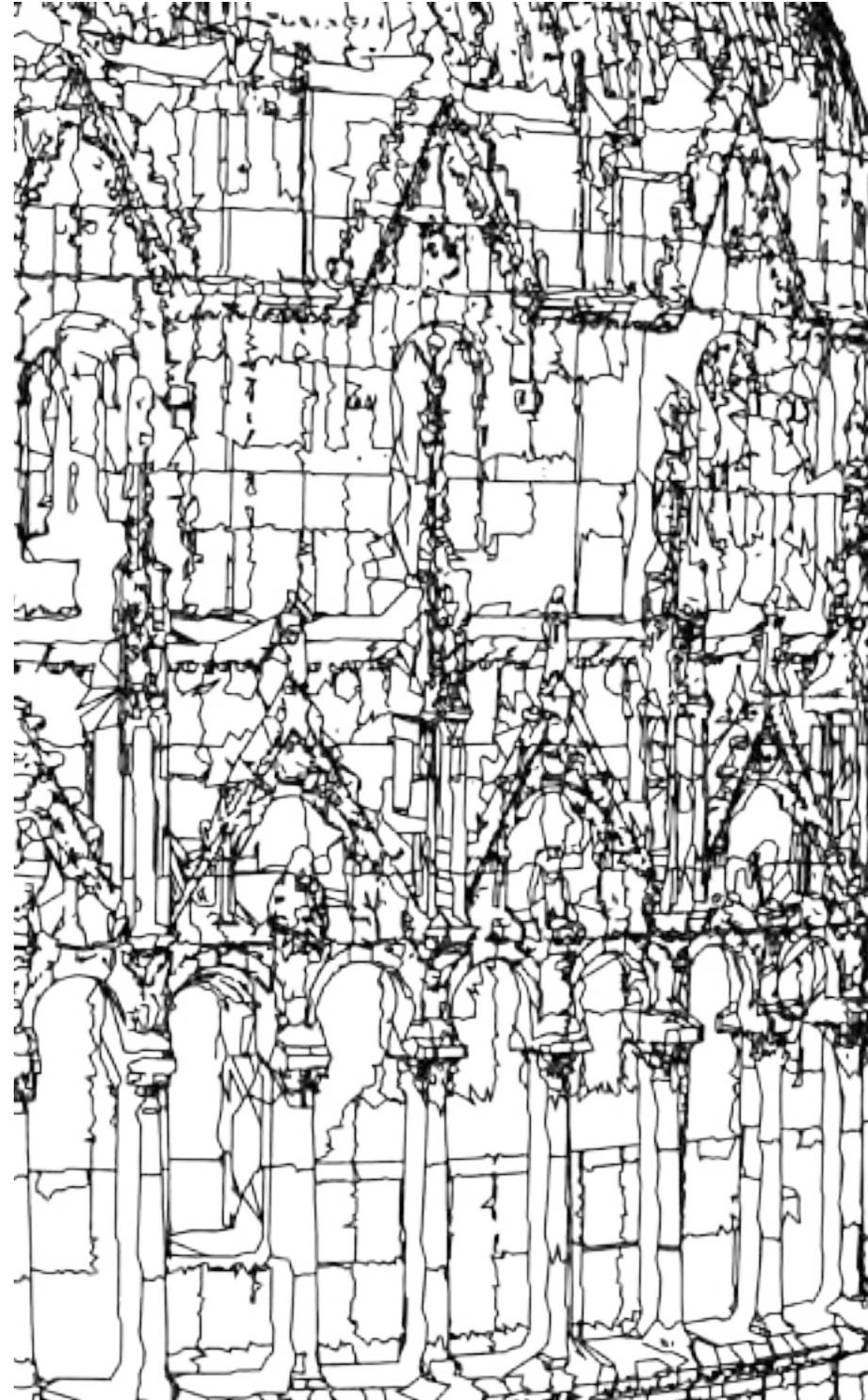


29

30



31



Figg. 30/31 - Il risultato ottenuto con il rendering non fotorealistico di *Illustrate*. Non è quello che si voleva ottenere, ma è servito a sperimentare una strada, che in futuro potrebbe portare a dei sistemi di rilievo e restituzione completamente automatici.

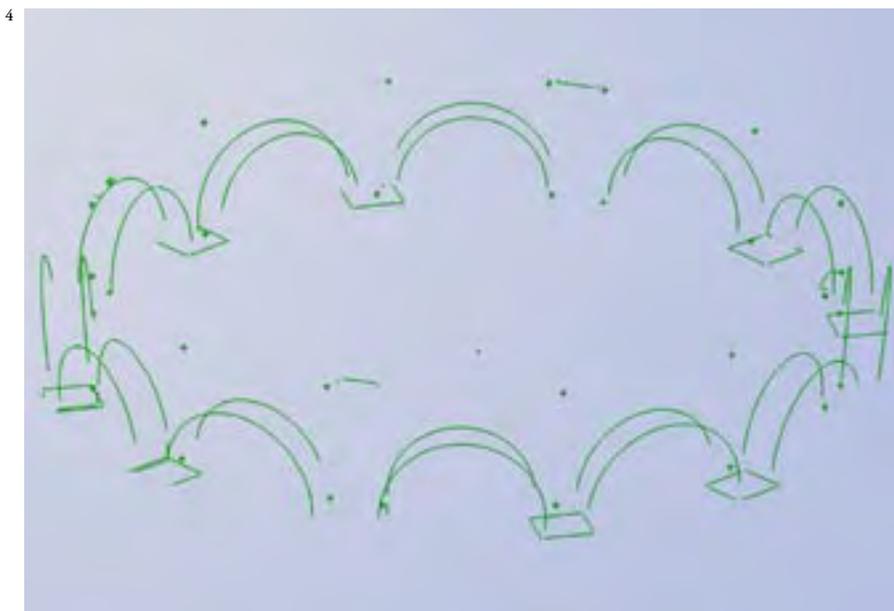
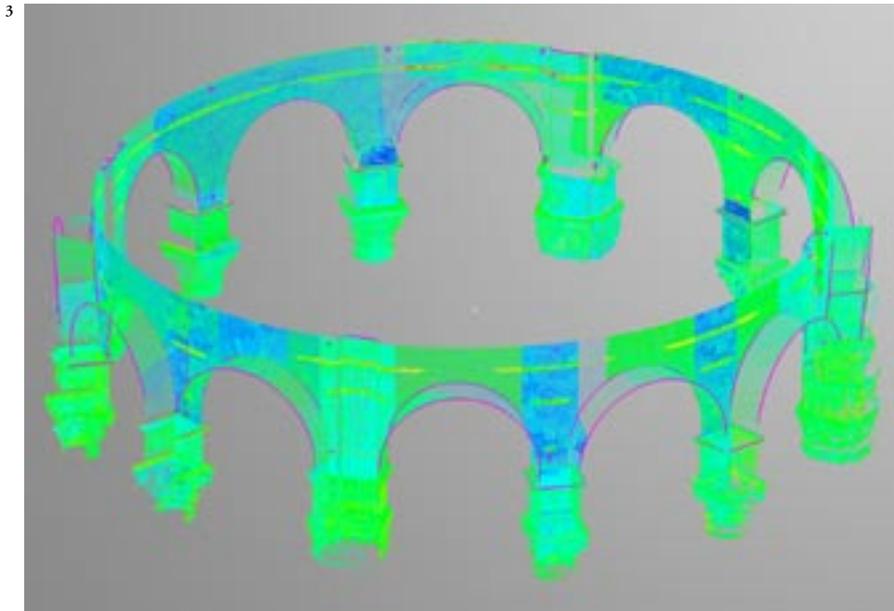
I Sistemi manuali di restituzione

Con la dizione sistemi manuali si intendono tutte quelle procedure che sono attuate attraverso gli strumenti del disegno automatico, ma che non si basano su un processo di restituzione automatizzata, ovvero tutte quelle procedure di disegno che richiedono una costruzione progressiva della rappresentazione, definendola per elementi e primitive geometriche, unendo talvolta componenti della geometria digitale di tipo diverso al fine di costituire un insieme coerente raffigurante la parte dell'architettura di cui si vuole ottenere un modello tridimensionale digitale.

Questo tipo di processo, nell'applicazione alla restituzione del rilievo del battistero è stato fondamentale, in quanto da un lato permette la produzione di elementi "leggeri", ovvero definibili con un compromesso tra il livello di dettaglio, l'accuratezza della restituzione e la quantità di dati necessari per definire l'oggetto definibile dal disegnatore, e dall'altra permette di raffinare tutte le parti per le quali si desidera un livello di dettaglio maggiore. Inoltre per sua peculiarità questa procedura porta alla costruzione del disegno per parti omogenee, in genere corrispondenti ad elementi architettonici compiuti, come volte, fusti di colonna, balaustre, parapetti,



Figg. 1/2 - Fasi iniziali della procedura di modellazione manuale: per prima cosa si isolano le parti da cui si vuole ottenere il modello; successivamente se ne estraggono un numero di linee guida per la modellazione in un numero tale da soddisfare i requisiti preposti alla generazione dell'oggetto (leggerezza o complessità, messa in evidenza di determinate caratteristiche, ecc..).



cornici, ecc... modalità che ben si presta a produrre un modello complessivo razionale e con una suddivisione ad oggetti che rende particolarmente agevole il successivo impiego del modello, tanto che questo venga impiegato per applicazioni di rappresentazione, come rendering o estrazione di elaborati bidimensionali classici, o che debba essere impiegato per lo sviluppo di sistemi informativi.

L'elaborazione è stata condotta attraverso quattro *software* principali, utilizzati a seconda delle loro prerogative per produrre una parte o l'altra del processo o per fare da contenitori per il modello mano a mano che questo veniva completato. Le fasi fondamentali di definizione degli assi di costruzione e delle linee guida sono sempre stati redatti in *Cyra Cyclone*, dove, nelle situazioni che lo hanno richiesto, sono state fatte costruire delle *Mesh* di passaggio da usarsi come elemento di appoggio per la costruzione. Gli elementi definiti in *Cyclone* sono stati portati a seconda dei casi in *Autodesk Autocad*, in *Descreet 3D Studio Max* o in *Mcneel Rhinoceros* con un impiego molto ampio di quest'ultimo e con cui sono stati definiti quasi tutti gli elementi della scena.

Per il modello del battistero si trattava di operare secondo due fasi distinte, una prima elaborazione veniva attua-

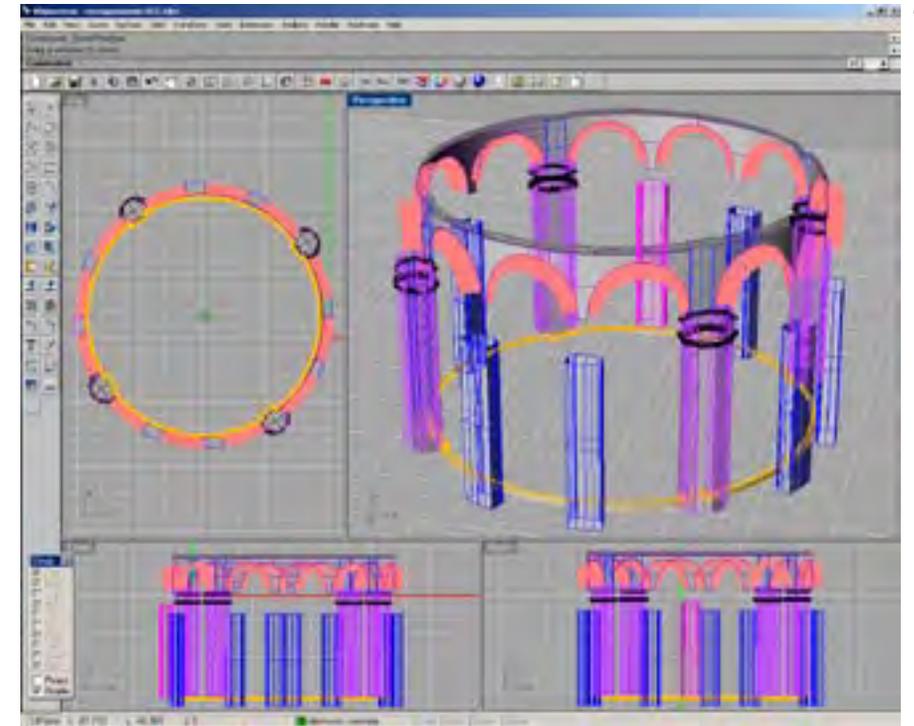
ta direttamente sulla nuvola dei punti dove si isolava un singolo elemento con problematiche di modellazione uniformi oppure una componente architettonica compiuta, la si estraeva dall'insieme delle varie scansioni eseguendo tutti i necessari passaggi di "taglio" delle nuvole di punti ed eventualmente la si collocava in uno specifico *layer*, in modo da poterla isolare anche visualmente dal resto della nuvola. Sempre in questa fase la porzione su cui si stava operando riceveva alcuni trattamenti elementari per valutarne le caratteristiche e definire le procedure per la sua successiva definizione come insieme di superfici, essenzialmente si trattava di capire come eseguirne la modellazione, infatti in alcuni casi l'elemento si prestava ad essere ricostruito tracciando a partire da una serie di linee e curve tracciate attraverso la nuvola di punti, mentre se la struttura geometrica dell'elemento si mostrava troppo impegnativa o presentava un livello di rumore eccessivo per riuscire a distinguere i punti di riferimento su cui appoggiarsi per il disegno, allora si è ricorsi alla generazione temporanea di una superficie di tipo *Mesh* e alla sua successiva elaborazione con la creazione di linee di sezione e contorni generati con procedura automatica dal programma.

In questa maniera si è potuto procedere

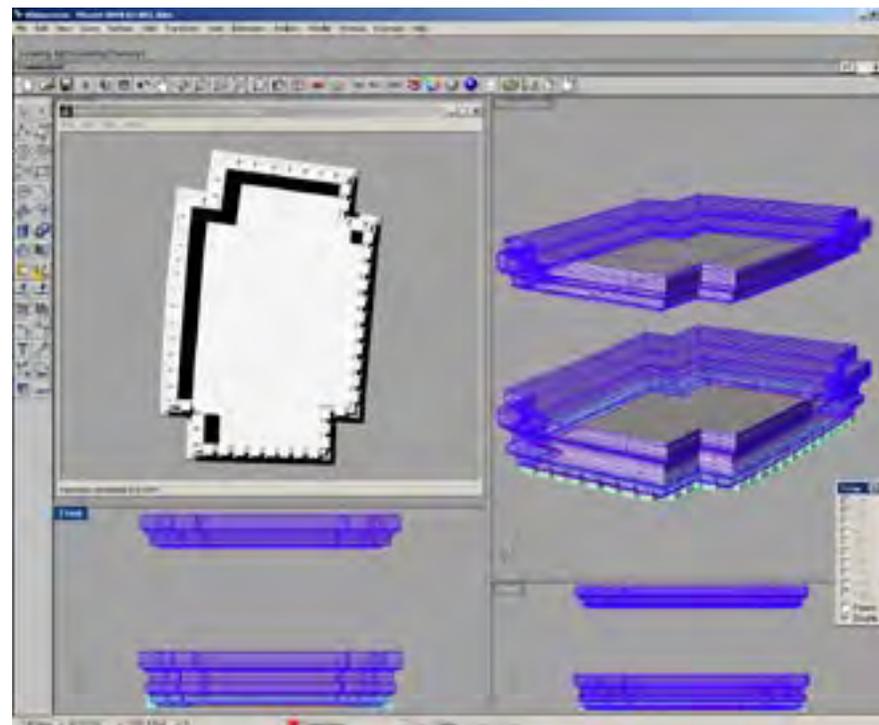
Figg. 3/4 - Procedura di modellazione manuale per estrazione di linee di costruzione applicata alla serie di archi del primo ordine del battistero.

efficacemente alla definizione di tutto il modello, il metodo adottato, per altro permette di integrare perfettamente le procedure di restituzione automatica, infatti le parti che non vengono restituite perché vengono ricollocate successivamente alla loro generazione in *Cyclone*, *Spider*, *Copious* o altra applicazione eventualmente adottata. Il procedimento eseguito richiede la ricollocazione dei singoli elementi completi, questo non è, ovviamente un problema, in quanto tutti gli oggetti creati fanno riferimento ad un unico

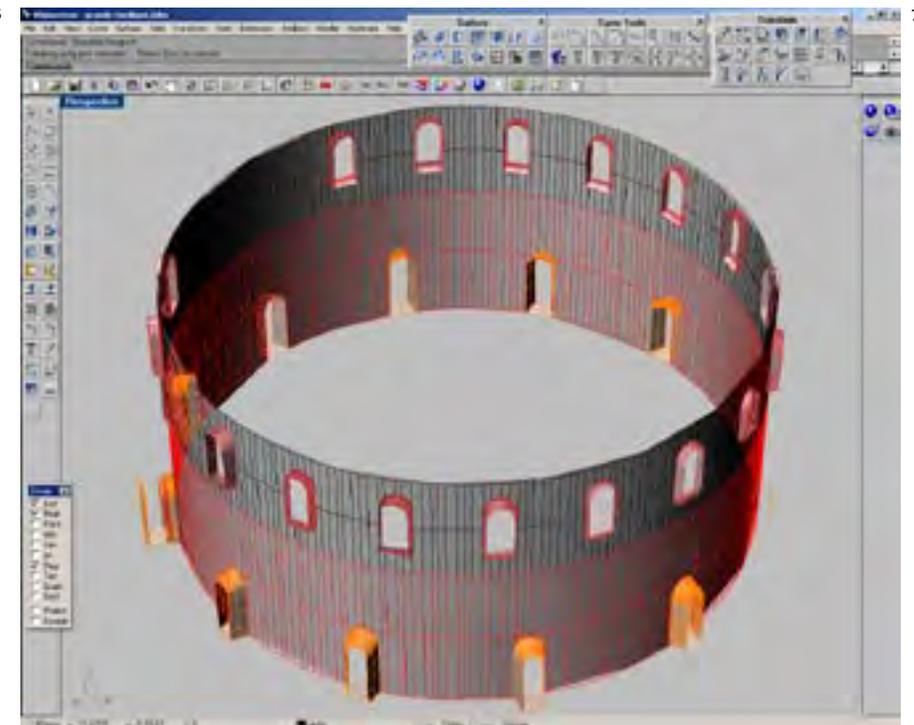
sistema cartesiano di riferimento con un'unica origine, il che comporta che al momento dell'importazione l'oggetto aggiunto viene automaticamente collocato nella sua corretta posizione, inalterato rispetto alla posizione originale nella nuvola di punti. Possono manifestarsi delle variazioni, questo è sempre possibile, in virtù di una svista dell'operatore che, non verificando le impostazioni di un determinato software per quanto riguarda il riconoscimento delle unità di misura o la valutazione dell'asse verticale² possono



6

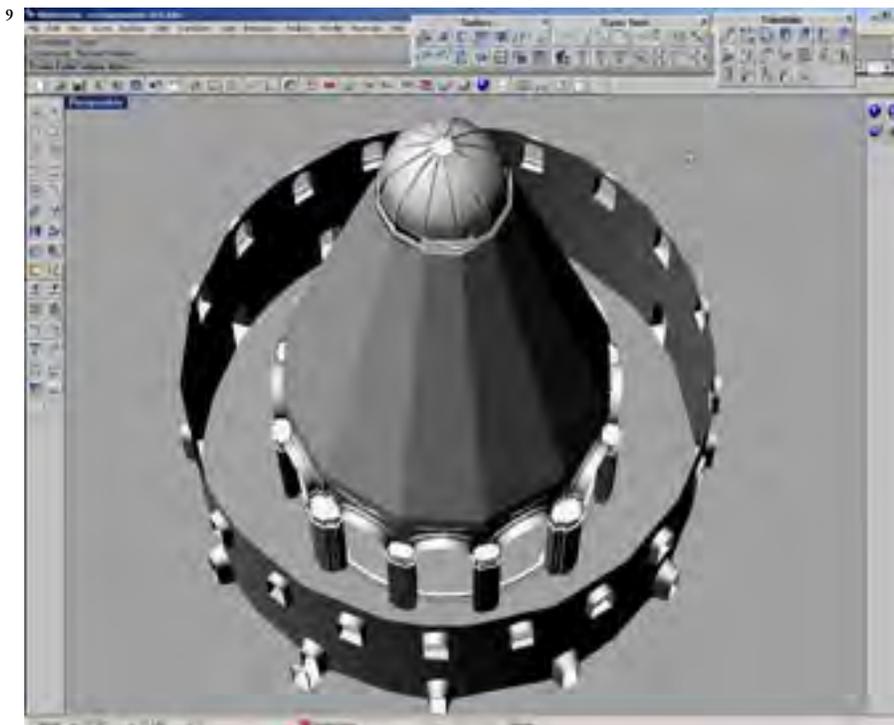
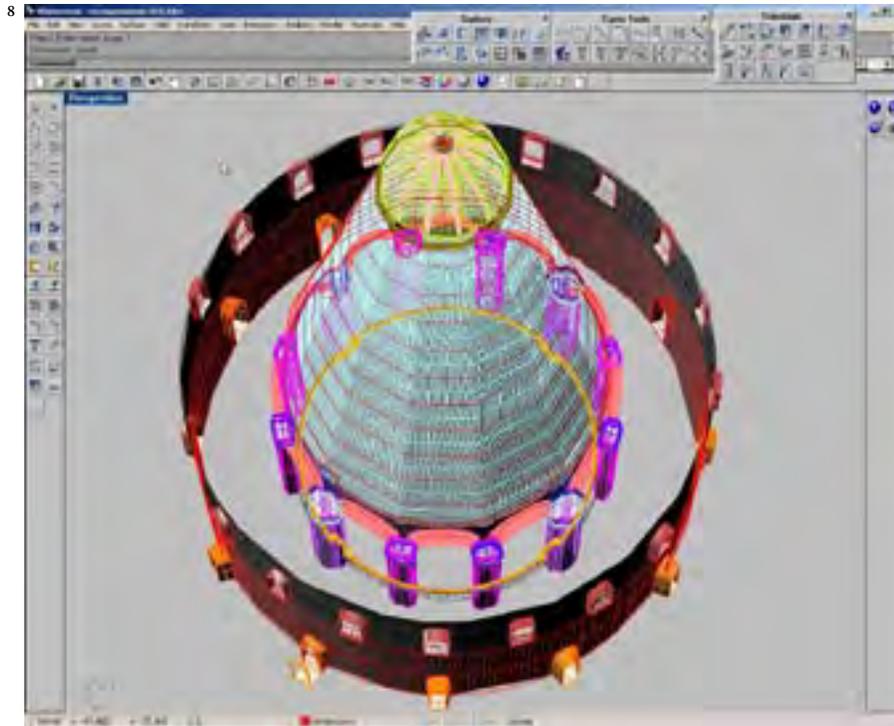


5



7

Figg. 5/7 - Procedure manuali di restituzione: le linee di costruzione e gli elementi guida, portati in *McNeel Rhinoceros 3D* vengono usati come base per la modellazione delle singole parti in cui il battistero è stato scomposto.



comportare l'inserimento dell'oggetto completato con visibili effetti di specchiatura, traslazione, rotazione e scalatura, non sono però problemi di grande entità in quanto, trattandosi di trasformazioni rigide, è abbastanza facile, una volta riconosciuto il problema, eseguire delle operazioni di trasformazione inversa, da compiersi nel programma di destinazione o nel programma che esegue l'operazione di esportazione, che riportino alle condizioni desiderate la componente.

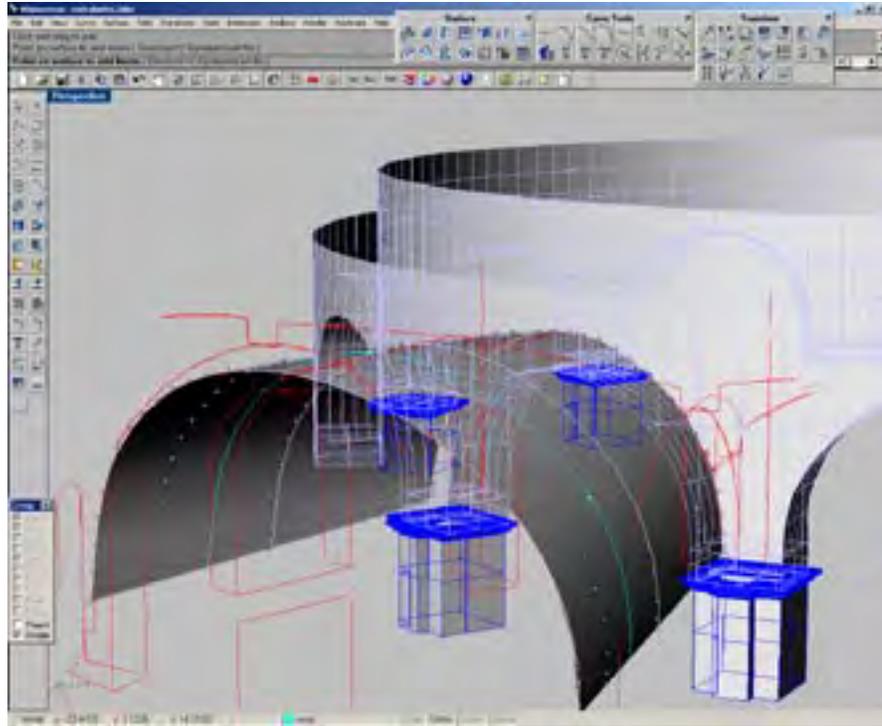
Costruire in questa maniera il modello di un'architettura complessa come il battistero richiede una certa perizia grafica ed un buon livello di conoscenza dell'applicazione che si sta utilizzando, infatti, per ogni singolo oggetto costruito si devono fare delle scelte e definire delle forme specifiche di intervento che devono essere al tempo stesso versatili per la rappresentazione, rispettose del dato di partenza, e tali da non indurre la produzione di elementi descritti da un volume di dati eccessivo. In tutti questi passaggi *McNeel Rhinoceros 3D* si è rivelato lo strumento più adeguato, permettendo di costruire forme molto complesse secondo molteplici soluzioni di creazione e permettendo, anche nelle fasi successive alla generazione della parte di poter tornare ad intervenire sulle superfici per ridefinirne le

caratteristiche³.

Il modello ad oggi sviluppato presenta la trasposizione della nuvola di punti, parte per parte, delle parti "interne" del monumento, la costruzione è avvenuta a partire dalla cupola di chiusura della volta centrale, e si è proceduto, scendendo, costruendo le cornici, l'intradosso della volta, le arcate e le muratura, i pilastri, le volte delle gallerie e i piani di calpestio, le colonne, e il complesso del fonte battesimale. Il tutto ha richiesto la costruzione di un numero elevatissimo di componenti, che in alcuni casi potevano nella loro stessa struttura rappresentare l'elemento architettonico completo a cui corrispondevano, in altri casi dovevano essere accorpate ad altri elementi per definire il modello di ciò che dovevano rappresentare.

Generare tutte le parti è stata un'operazione notevolmente impegnativa, soprattutto per la significativa irregolarità di molti elementi, infatti le volte, i capitelli e le cornici dei pilastri, le colonne, presentano rilevanti differenze che venendo estratte da un insieme di misurazioni risultano quanto mai evidenti. A queste condizioni non era pensabile di poter velocizzare il lavoro di restituzione creando parti per duplicazione, in quanto solo in rari casi un elemento poteva essere riutilizzato come base per un suo analogo. Le co-

Figg. 8/9 - Procedure manuali di restituzione: una volta completata la modellazione delle singole parti, queste vengono assemblate in modelli intermedi.



lonne hanno altezze diverse, in virtù della diversa dimensione dei capitelli, nessun pilastro è realmente uguale all'altro, le volte a crociera non sono lo stesso tipo ripetuto, ma si differenziano in due tipi principali, quelle appoggianti sui pilastri e sulle colonne e quelle poggianti solo sulle colonne, le aperture possono presentare delle similitudini, ma devono essere raccordate al muro ad impianto all'incirca circolare e quindi richiedono valutazioni specifiche a seconda della loro posizione, altre problematiche le presentano le cornici, le soglie, alcune parti degli elementi scultorei, le balaustre, i gradoni.

Le differenze sono riconducibili a due principali ordini di trasformazione, le trasformazioni proprie dell'elemento, dovute alla maniera in cui è

stato costruito, alle sue peculiarità, che qui sono spesso variabili, come, per esempio, la forma dei capitelli, e le trasformazioni legati alla morfologia complessiva dell'edificio, il fatto che il suo andamento e la sua composizione sono in generale regolari, ma al tempo stesso la stratificazione degli interventi e le caratteristiche dell'esecuzione di alcune parti hanno ruotato e traslato numerose parti, inducendo trasformazioni in tutte le parti minori per compensare le alterazioni attraverso un sistema di simmetrie variabili ed elementi apparentemente ripetuti, ma ognuno con peculiarità uniche.

Il processo di costruzione in *Rhinoceros*, è stato basato su geometria *NURBS*, quindi il modello compiuto non presentava certo la grande compatibilità che invece si voleva ottenere da quanto si stava producendo; di conseguenza si è proceduto alla conversione, parte per parte, di tutto il modello in geometria *Mesh*⁴.

Questo passaggio era motivato anche da un altro fattore, il modello composto, derivante dal riposizionamento di tutte le parti singolarmente modellate, con l'aggiunta delle *Mesh* prodotte con procedura automatica aveva caratteristiche di complessità tali da rendere per *Rhinoceros 3D* molto difficile la gestione del tutto, a meno di mantenere continuamente spenti la maggior par-

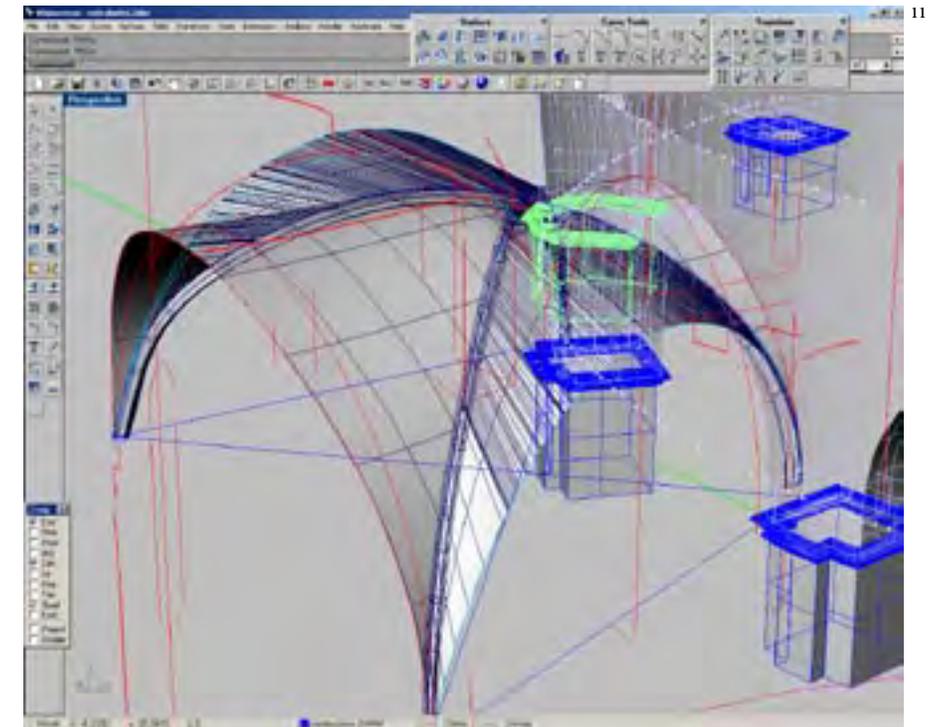
te dei *layer* "pesanti" (perlopiù quelli composti da *Mesh* importate da *Spider* e da *Cyclone*), in altra maniera continui errori del software nella gestione del file aperto rallentavano significativamente il processo di elaborazione.

Eseguita la conversione e salvato il nuovo modello privo di elementi *NURBS* in un archivio separato, il tutto è stato portato, in occasione del montaggio dell'insieme delle volte a crociera del piano terra, in *3D Studio Max*, utilizzando direttamente l'importazione del formato *3DM* sulla base dell'apposito

plug-in distribuito dalla *McNeel*.

La scelta di passare il modello in *3D Studio Max* era essenzialmente dovuta alla capacità del programma di gestire modelli anche molto pesanti e questo di certo era il caso, con un file di superfici *Mesh* corrispondente a circa trecentosettanta *Megabyte* non si poteva certo pensare di riportare il tutto in una applicazione meno solida, inoltre l'esistenza di un modulo di importazione specifico rendeva molto agevole il passaggio.

Il modello complessivo di tutte le parti



Figg. 10/11 - Modellazione di una delle volte a crociera del peristilio inferiore del battistero. In questo caso le linee di costruzione sono stati estratti eseguendo una serie di sezioni su una *Mesh* generata automaticamente.

12

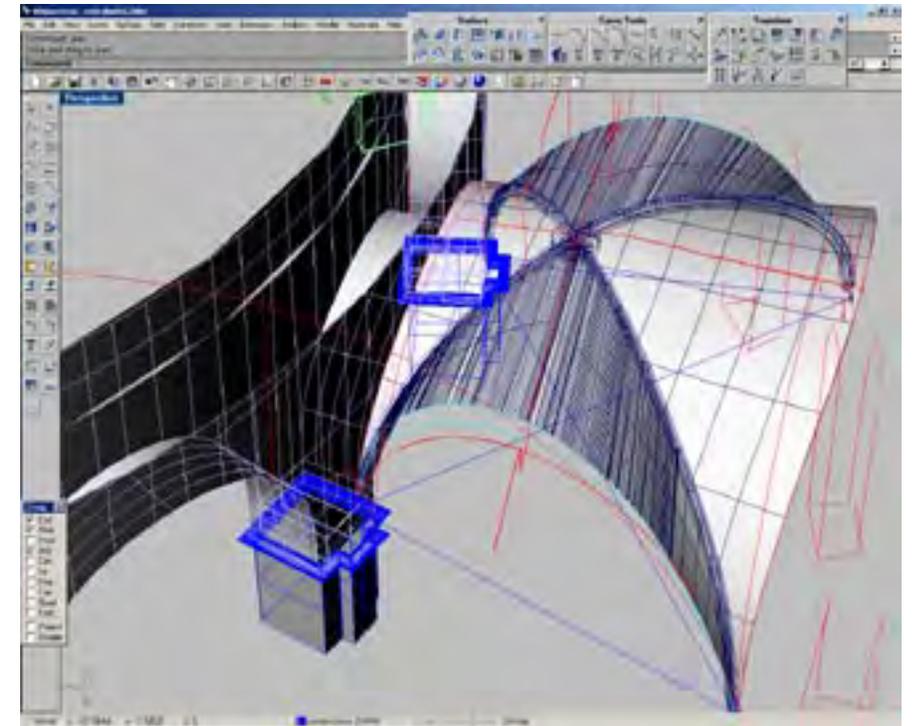
derivate dalla modellazione manuale è stato quindi composto assieme alle parti provenienti dai processi eseguiti per generazione automatica, un insieme di componenti molto ricco, molto pesante e che ha portato al definitivo passaggio alla categoria "pesi massimi" il modello redatto. A questo punto, riportato tutto in un unico programma, con la possibilità di eseguire ulteriori esportazioni nei più diffusi formati della grafica digitale tridimensionale, si è ritenute fondamentale un'immediata operazione di riorganizzazione

del file.

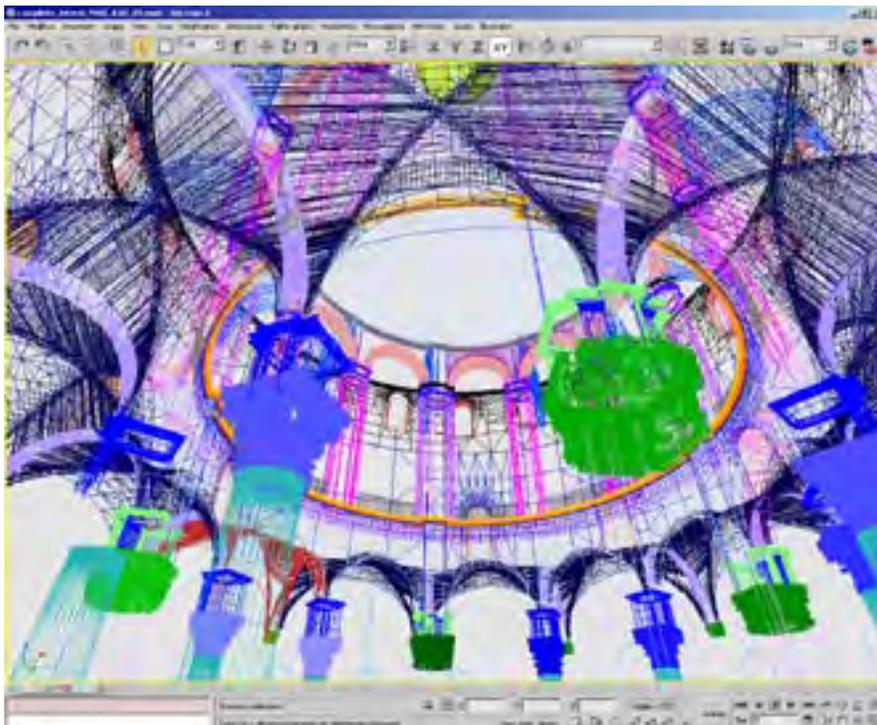
Questo ha significato tornare ad individuare le parti costituenti singoli elementi architettonici e riorganizzarle in gruppi o oggetti unici e quindi riconducibili ad un nome, che rendesse le singole parti facilmente individuabili e associabili a loro, proprie, caratteristiche, quali colore, materiale per il rendering fotorealistico e così via... Secondo questa esigenza il modello è stato riorganizzato. In questa maniera i modelli esportati verso altre applicazioni potranno mantenere le

caratteristiche di denominazione e quindi risulteranno facilmente gestibili attraverso i principali sistemi di elaborazione dei modelli.

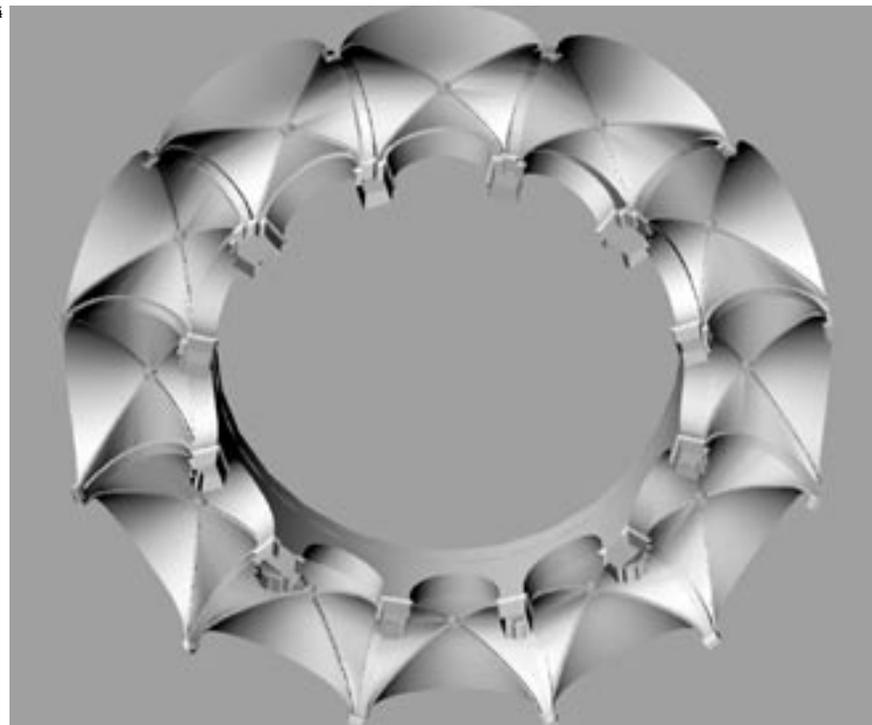
In occasione di questa fase della ricostruzione del modello, si è anche sentita l'esigenza di definire un metodo per soddisfare l'esigenza di produrre elaborati tradizionali, bidimensionali, quali piante, prospetti e sezioni, che fossero facilmente restituibili e rapidi da realizzare. La metodologia adottata è stata basata sul concetto di produzione di un doppio elaborato



13



14



Figg. 12/14 - La modellazione della corona di volte a crociera del peristilio nel primo ordine del battistero: completamento della modellazione, conversione da NURBS a Mesh eseguita in Rhinoceros e importazione del file 3DM in Descreet 3D Studio Max; infine rendering con applicazione di un materiale generico.

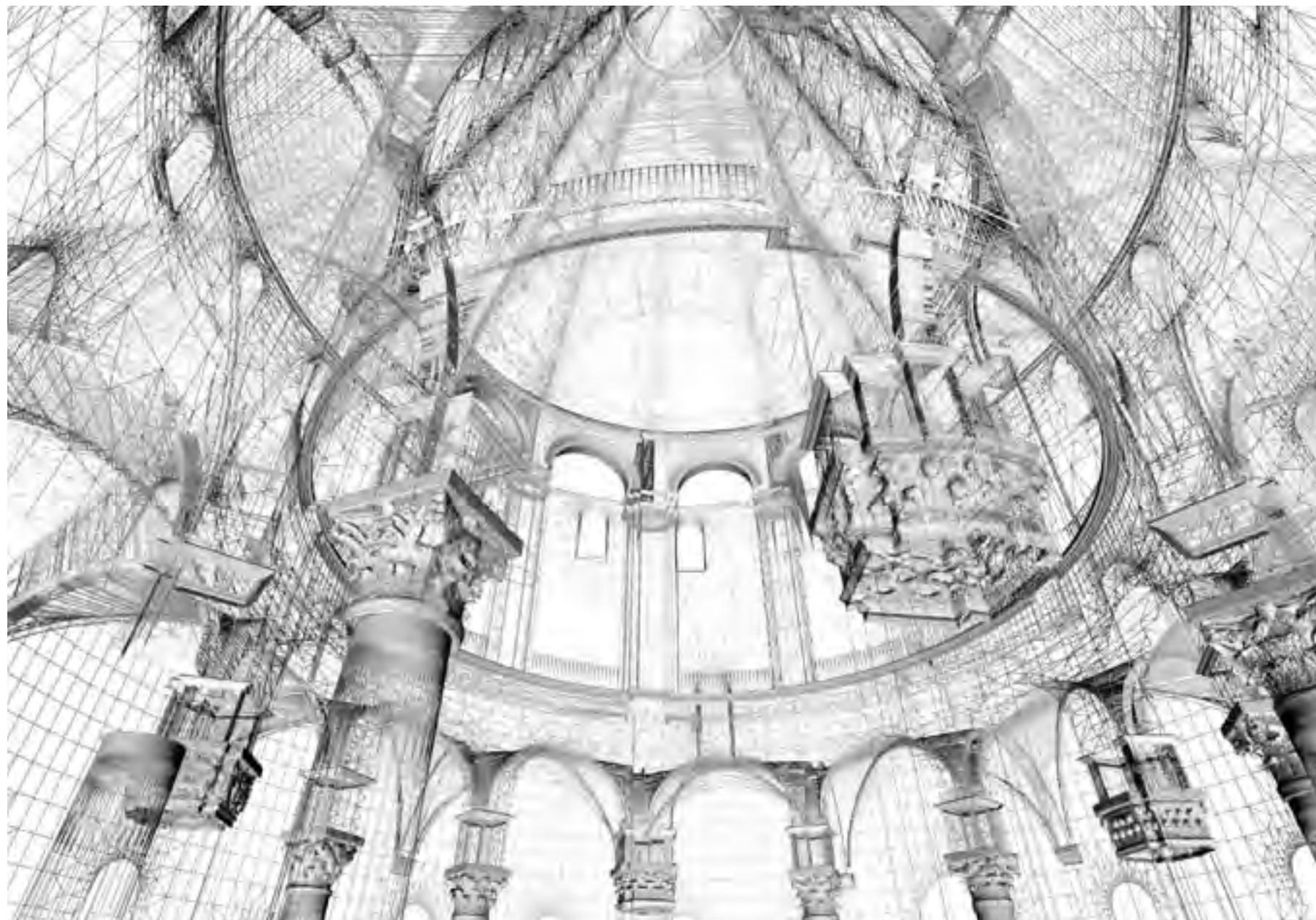


Fig. 15 - Veduta del modello complessivo degli interni, tutti gli elementi sono resi in wireframe,

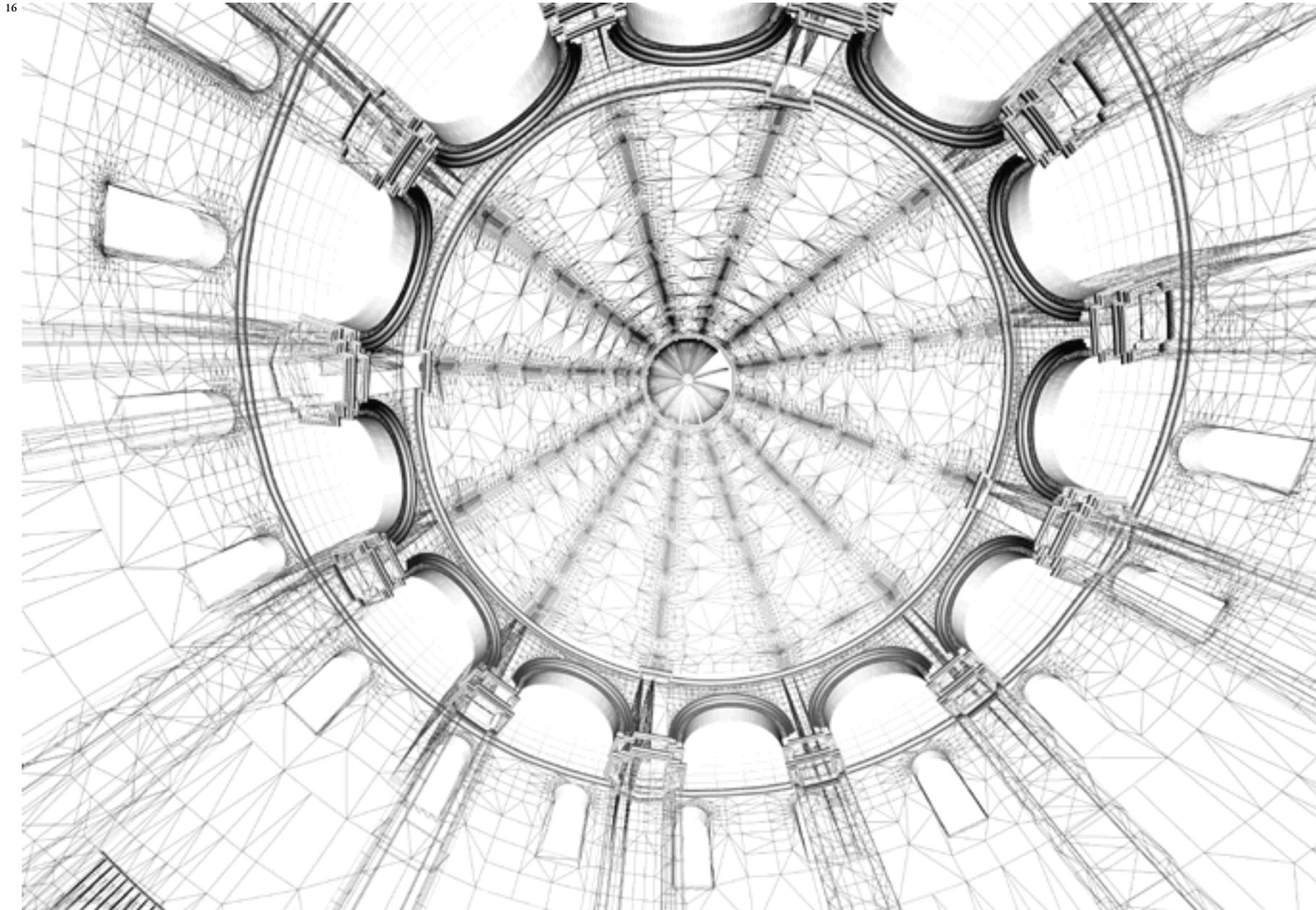
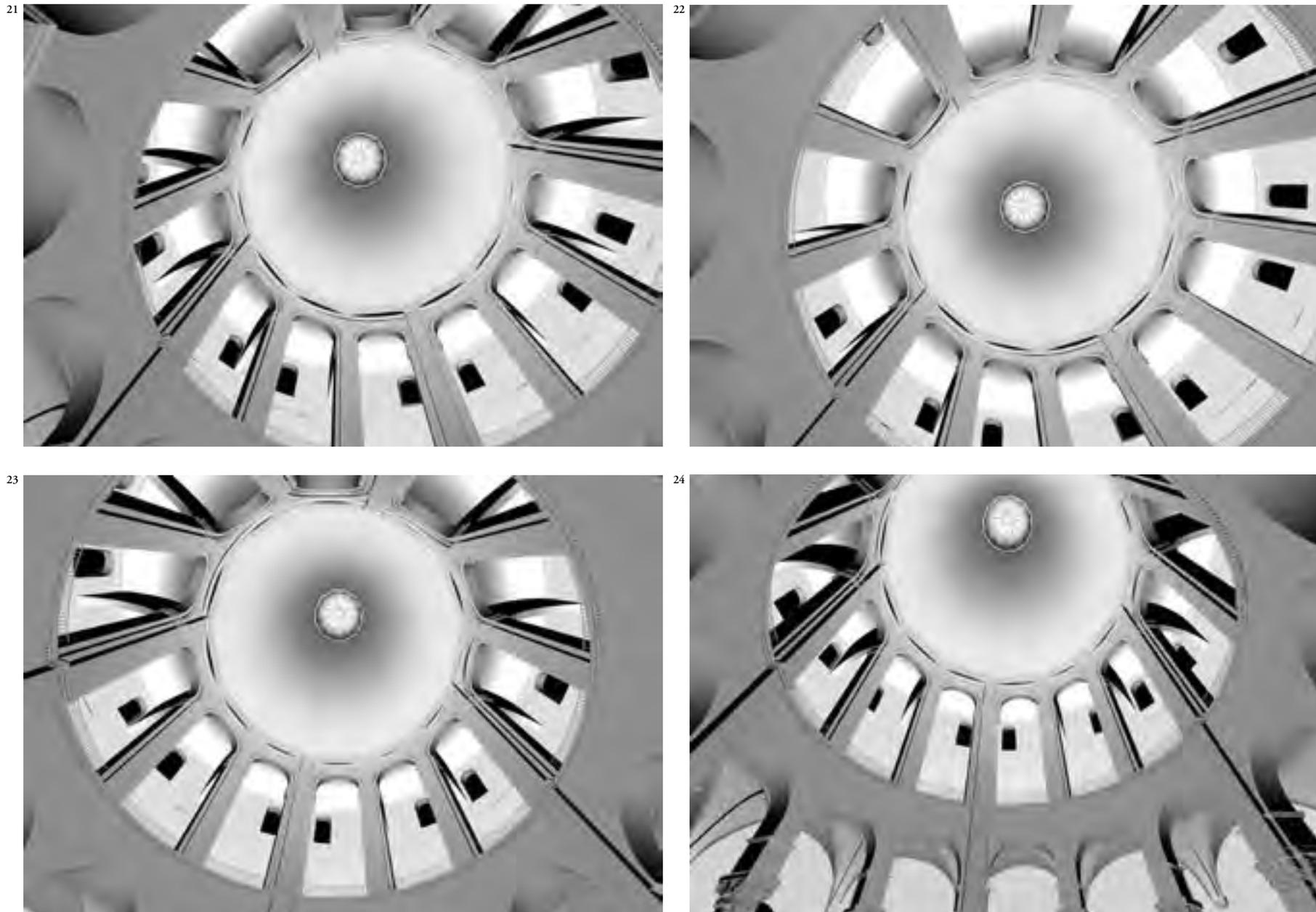


Fig. 16 - Veduta del modello complessivo degli interni, tutti gli elementi sono resi in wireframe,



Figg. 17/20 - Sequenze di *rendering* degli interni, il modello è definito dalle sole superfici *Mesh*, nessuna *texture* è stata applicata.



Figg. 21/24 - Sequenze di *rendering* degli interni, il modello è definito dalle sole superfici *Mesh*, nessuna *texture* è stata applicata.



Figg. 25/28 - Sequenze di *rendering* degli interni, il modello è definito dalle sole superfici *Mesh*, nessuna *texture* è stata applicata.



Figg. 28/31 - Sequenze di *rendering* degli interni, il modello è definito dalle sole superfici *Mesh*, nessuna texture è stata applicata.

grafico, ovvero qualcosa che potesse essere impiegato rapidamente, compreso e colto nella sua complessità con un solo colpo d'occhio, cosa che i sistemi di restituzione automatica per l'estrazione di elementi bidimensionale non fanno. Per maggior chiarezza, si tenga presente che il procedimento di generazione delle sezioni, in *Cyclone*, può operare, all'atto pratico, solo per una singola nuvola di punti per volta, considerando, per esempio, una pianta al piano terra, questa è composta da un grandissimo numero di scansioni o di porzioni di queste, alcune delle quali tali (per livello di rumore o per effetti denominabili "di marginalità") da dover essere rimosse per aumentare l'affidabilità del modello prodotto. Al tempo stesso, la creazione di polilinee secondo l'andamento della nuvola di punti (*edge*) richiede l'utilizzo di una sorta di modulo aggiuntivo del programma, che oltre a risultare non molto comodo nella meccanica delle procedure di creazione delle sezioni o dei profili, è risultato applicabile in maniera efficace solo per parti relativamente piccole della nuvola di punti.

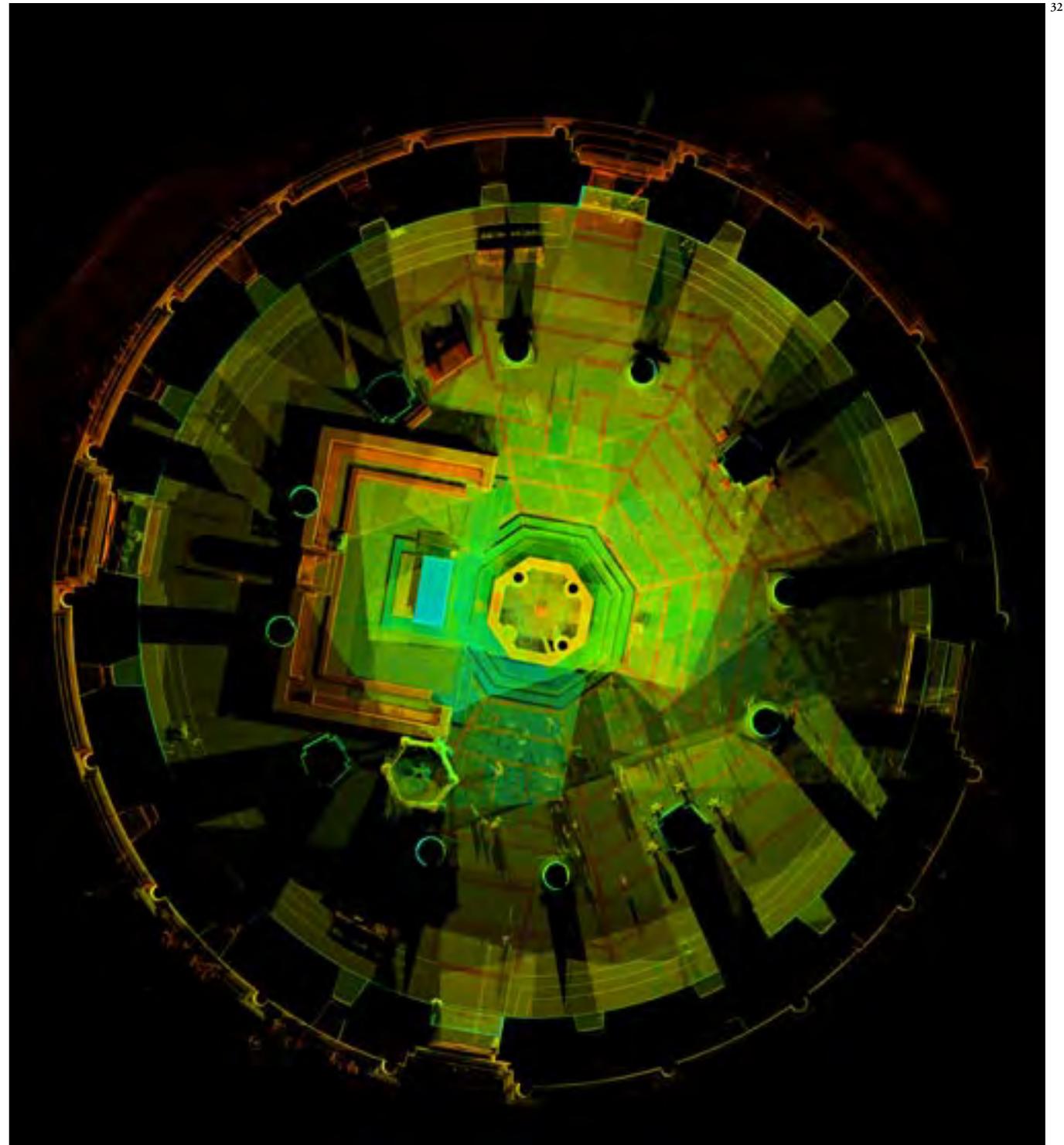
Questa concorrenza di condizioni ha portato ad elaborare una procedura basata non sul dato vettoriale, ma su quello bitmap, in sostanza, si è creato un duplicato della nuvola di punti complessiva e la si è spezzata e tagliata

Fig. 32 - La nuvola di punti completa di tutte le scansioni, registrata sul rilievo topografico. Dopo averla sezionata secondo un piano orizzontale, se ne è eseguito uno *screenshot* ad altissima risoluzione.

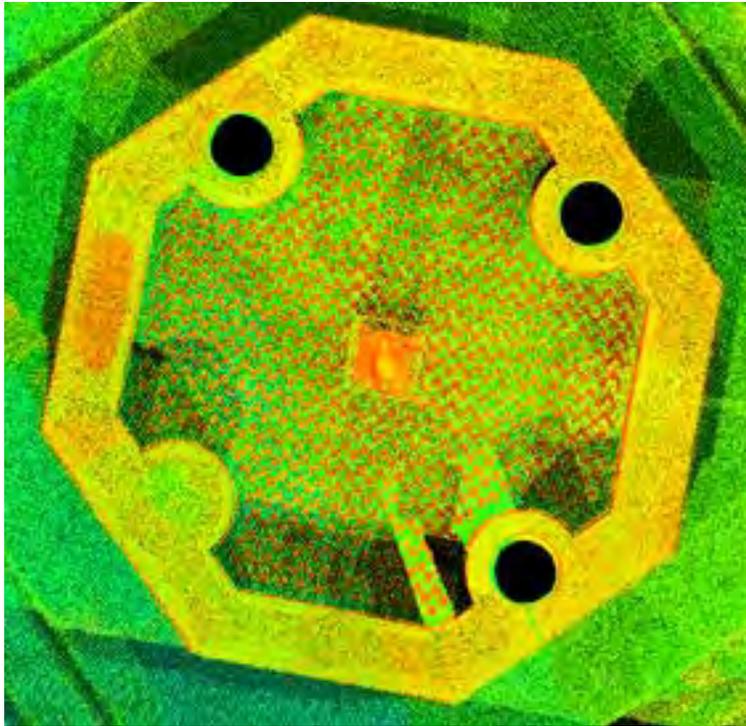
L'immagine è stata quindi utilizzata come base per la preparazione della prima pianta in scala 1:100 del battistero.

Fig. 33/34 - Particolari dell'immagine usata come base per la redazione della pianta.

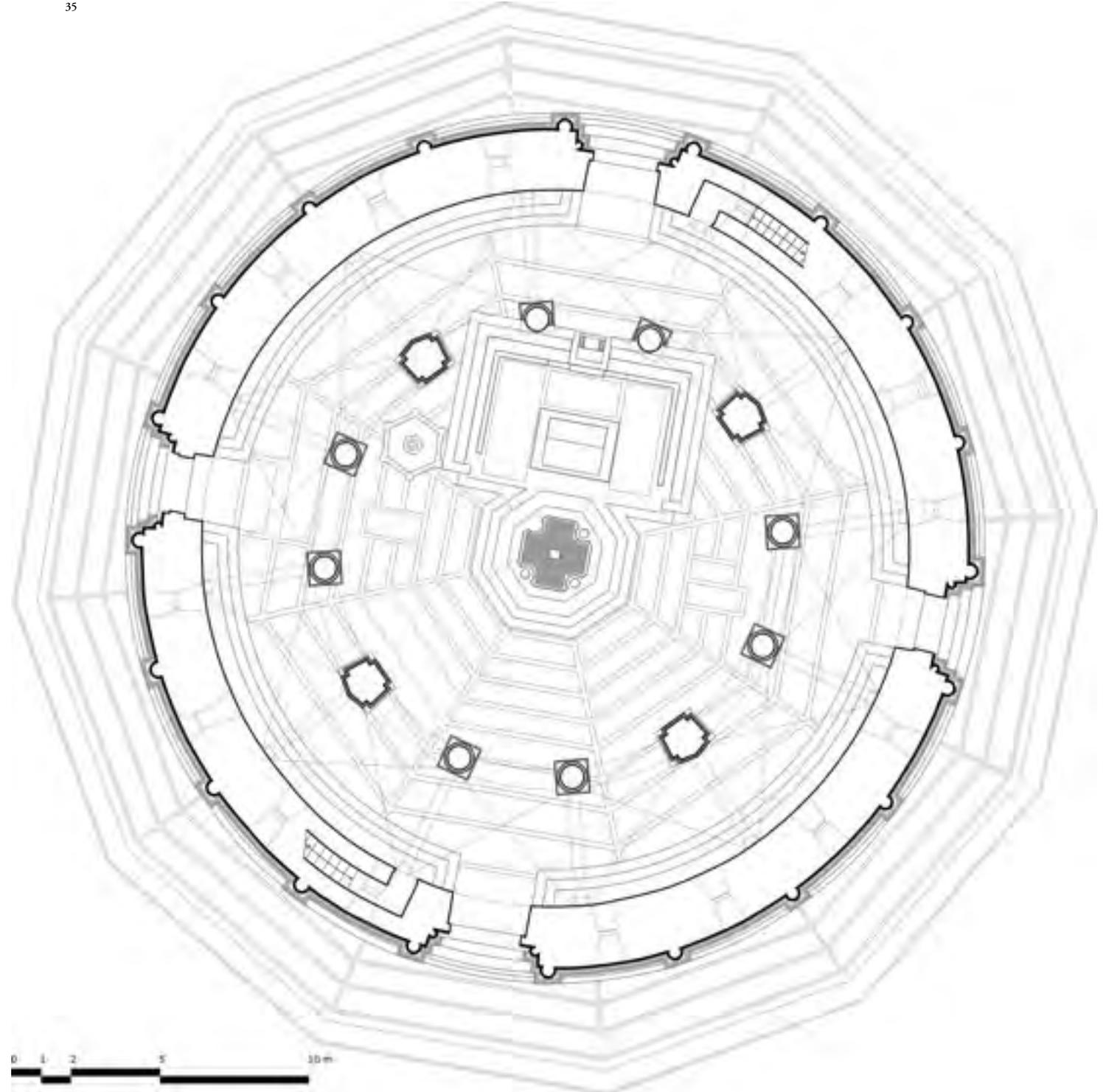
Fig. 35 - La pianta del battistero, scala grafica, per la definizione delle proiezioni delle volte è stato utilizzato uno *screenshot* separato realizzato appositamente.



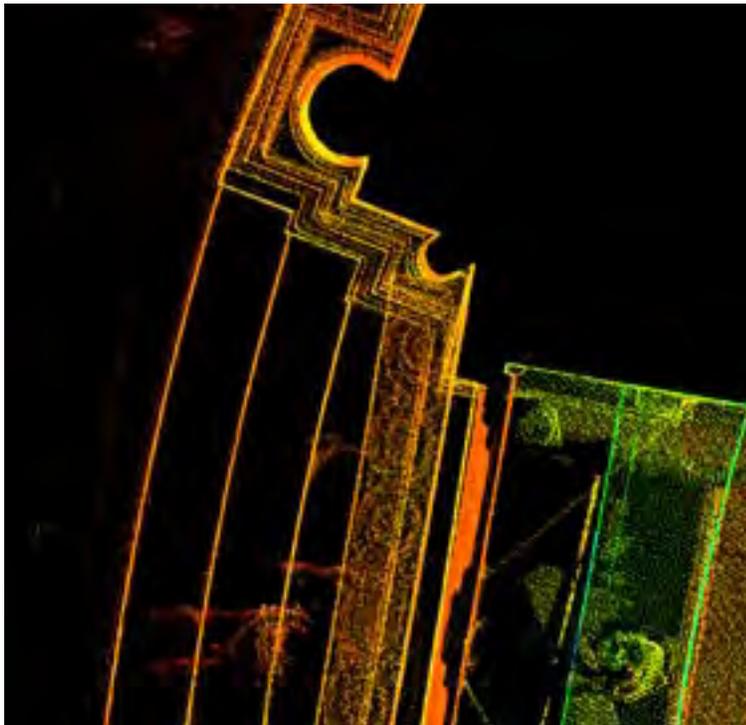
33



35



34



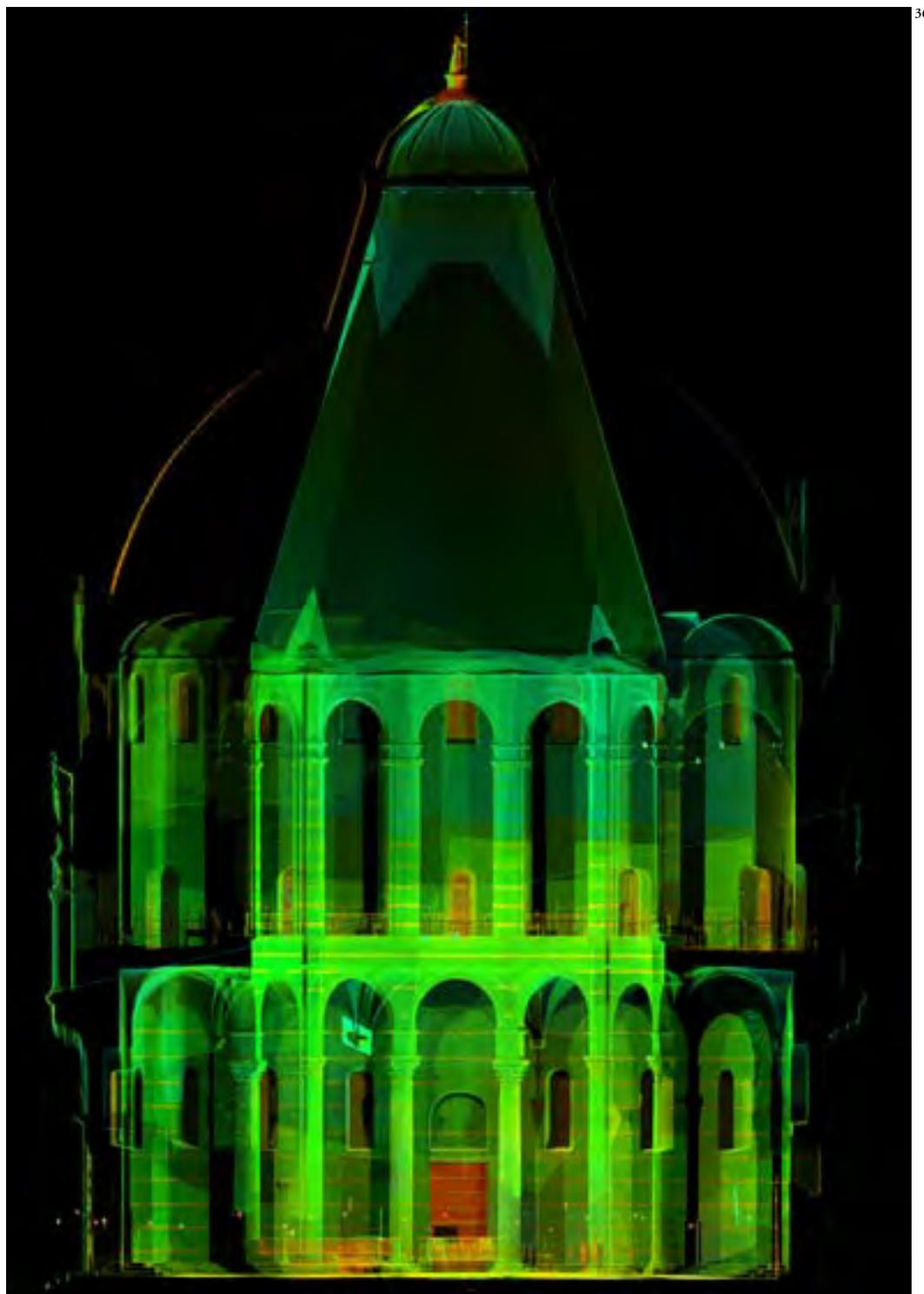
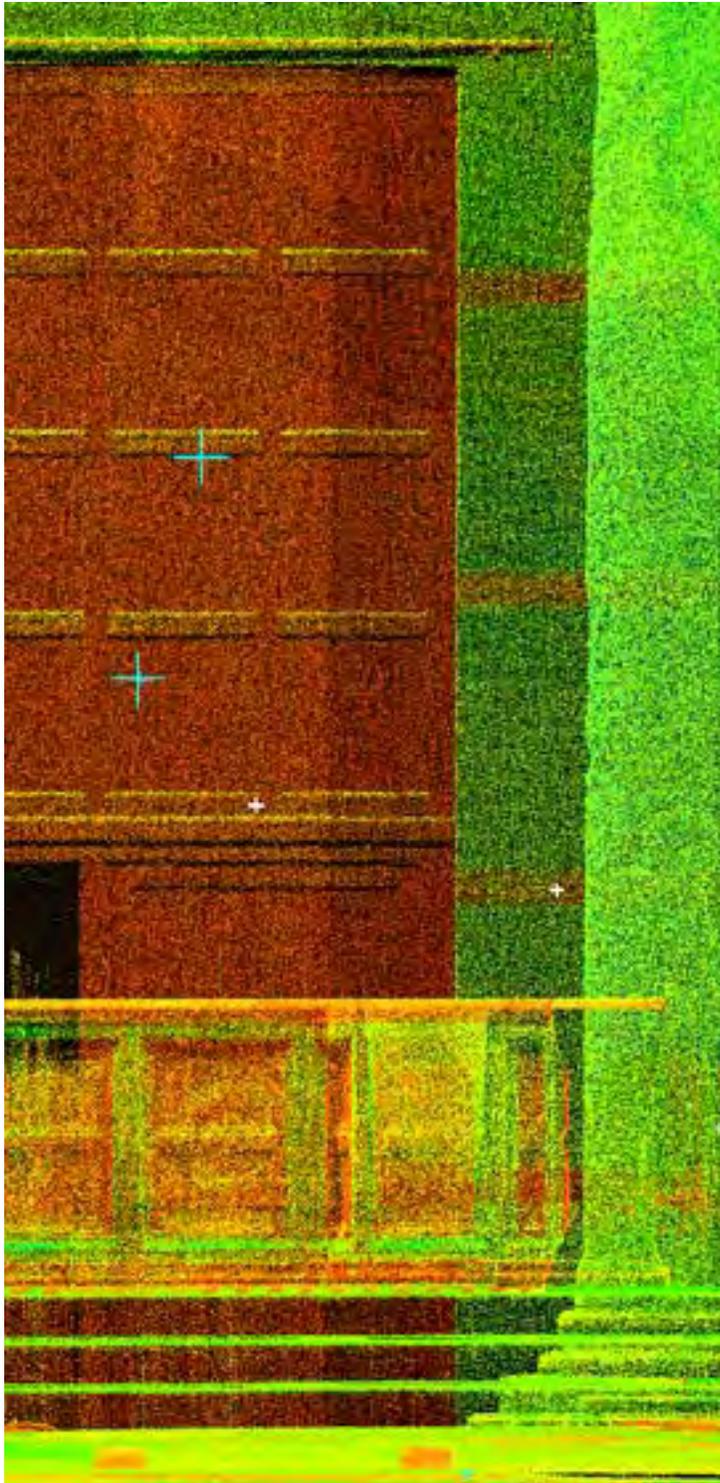


Fig. 36 - La nuvola di punti completa di tutte le scansioni, registrata sul rilievo topografico. Dopo averla sezionata secondo un piano trasversale, se ne è eseguito uno *screenshot* ad altissima risoluzione. L'immagine è stata quindi utilizzata come base per la redazione della prima sezione in scala 1:100 del battistero.

Fig. 37 - Dettaglio dell'immagine utilizzata come base per la redazione della sezione.



38



39

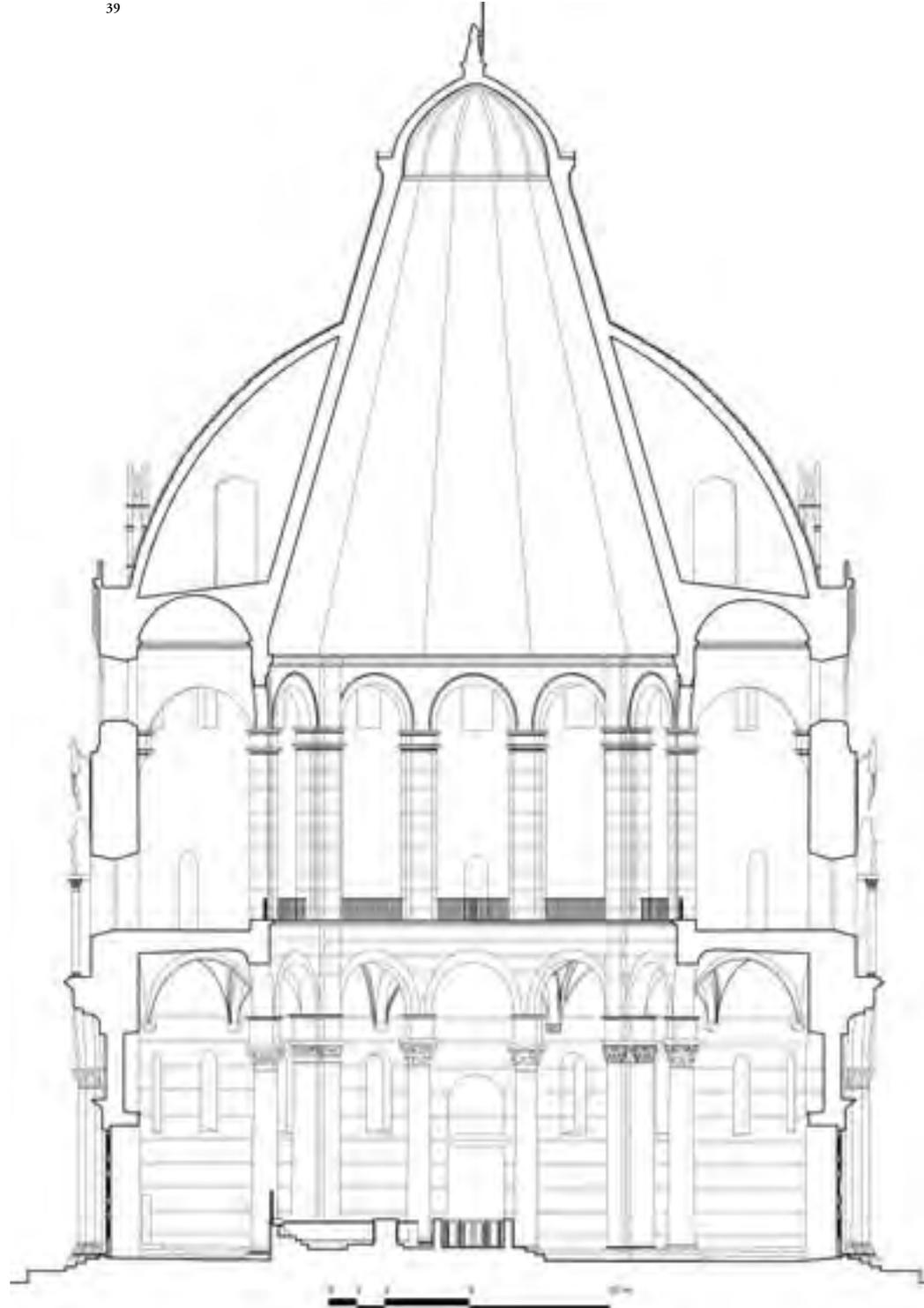


Fig. 38 - Dettaglio dell'immagine utilizzata come base per la redazione della sezione.

Fig. 39 - La sezione del battistero, piano di taglio disposto secondo l'asse est-ovest, scala grafica.

secondo un piano corrispondente alla sezione orizzontale che si voleva ottenere.

Questa particolare veduta è stata quindi visualizzata in maniera zenitale in maniera che fosse in tutto e per tutto equivalente ad una veduta della pianta del battistero, solo che in questo caso il piano di sezione aveva effettivamente tagliato via la porzione sovrastante il piano di sezione stabilito.

Da questa veduta è stata prodotta una immagine bitmap ad altissima risoluzione⁵, l'immagine visto l'altissimo grado di dettaglio è stata quindi portata in una applicazione CAD⁶ dove è stata ribattuta completamente con procedura manuale.

Al fine di completarne tutte le parti, comprese le proiezioni a terra degli elementi sovrastanti, con particolare riguardo per le volte a crociera, si è preparato anche una mosaicatura di schermate aggiuntive, dedicate alla veduta del solo insieme delle volte sovrastanti la galleria del piano terreno. Il procedimento qui presentato può apparire improprio ed in effetti adottare una procedura basata su bitmap può sembrare alquanto inusuale viste le maggiori eventualità di errore da parte del disegnatore, tuttavia, si tenga conto che la generazione della pianta in questione è pensata per una restituzione in scala uno a cinquanta

o uno a cento, e che la risoluzione che si è scelto di adottare corrisponde, all'incirca, ad una rappresentazione a monitor in scala uno a venti⁷. Inoltre eseguire una redazione dell'elaborato bidimensionale secondo queste procedure permette di iniziare questa fase quasi immediatamente, in maniera svincolata dal programma di gestione della nuvola di punti, utilizzando un qualunque CAD capace di supportare l'importazione di bitmap ad alta risoluzione e da parte di un operatore che in base all'altissimo livello di dettaglio della base che ha a disposizione non deve presentare altre caratteristiche se non quelle di essere un buon disegnatore capace di rappresentare correttamente l'architettura.

Il passaggio da *bitmap* a vettore in forma manuale è stato adottato per la preparazione delle piante del piano terreno, del primo piano, del sistema delle volte e della sezione trasversale secondo l'asse Est-Ovest.

Note

¹ La generazione della *Mesh* può essere attuata solo per singole nuvole, tuttavia, in alternativa alla creazione di questo genere di superficie, il programma offre la possibilità di "visualizzare" l'insieme dei punti come se si trattasse di una *Mesh*, in questo caso l'oggetto in elaborazione potrà essere trattato come se si trattasse effettivamente di una *Mesh*, specialmente per quanto riguarda il suo utilizzo per l'estrazione di profili e sezioni. La funzione di visualizzazione in modalità *Mesh* è comunque applicabile solo per una nuvola di punti per volta.

² Molte applicazioni per la modellazione tridimensionale digitale adottano una terna cartesiana dove l'asse delle y è verticale (*Maya*, *Cyclone* e *Realworks Survey* per esempio), mentre molte applicazioni CAD adottano l'asse z come asse verticale (*Autocad* e, *Rhinoceros 3D*, per esempio).

³ La funzione *Rebuild Surface*, applicabile solo a singole superfici *NURBS* permette di ridefinire la superficie con una struttura di maggiore o minore densità, in questo modo, il modello può essere alleggerito oppure reso più adatto ad eventuali operazioni di trasformazione.

⁴ La funzione di conversione specifica può essere efficacemente eseguita in *Rhinoceros* utilizzando il comando *Mesh from NURBS objects*, oppure eseguendo l'esportazione del file in un formato privo del supporto della geometria *NURBS* (come il *DXF*, il *DWG* o il *VRML*) in quest'ultimo caso, però, l'accuratezza non può essere settata per ogni singolo elemento in maniera ottimale, ma solamente in forma complessiva per l'intero modello, da questo consegue una facile produzione di file dal peso molto elevato.

⁵ L'immagine generata per parti attraverso la funzione screen capture di *Cyra Cyclone* è stata eseguita per porzioni di 1900 per 1400 *pixel*, le immagini complete così prodotte hanno risoluzioni intorno ai 12.000 per 12.000 *pixel*.

⁶ In questo caso si è utilizzato *Autodesk Autocad*, ma qualunque CAD capace di gestire le immagini bitmap può risultare efficace per questo impiego.

⁷ Ovvero considerando una risoluzione di 72 *dpi*, e con l'immagine visualizzata con rapporto 1:1 tra i *pixel* dell'immagine e i *pixel* del monitor.

UN CONFRONTO NON CERCATO

Nella prima parte di questo testo è stata presentata una tavola, un prospetto del battistero realizzato da James Carter sulla base dei rilievi di Cresy & Taylor; a loro è dovuto un incredibile rilievo del complesso monumentale pisano pubblicato a Londra nel 1829.

La qualità del rilievo eseguito da Cresy & Taylor è altissima, non tanto per il livello grafico delle incisioni realizzate da Carter, ma per la precisione e l'accuratezza del risultato, cosa che oggi, centosettantaquattro anni dopo, può essere verificata, sovrapponendo il dato tridimensionale, al disegno del XIX secolo.

Non è un confronto voluto o forzato, ed è conseguenza di alcuni confronti tra i rilievi di Cresy & Taylor e le restituzioni di Rupp e di Grassi, mentre si stavano eseguendo queste prove si è pensato di tentare la sovrapposizione del prospetto della nuvola di punti dovuta al rilievo laser.

Nella prova eseguita si è utilizzata un'immagine della nuvola di punti del prospetto corrispondente al fronte della Natività, il lato che affaccia verso la cattedrale, e la stessa rappresentazione tratta dal rilievo inglese nella rappresentazione di Carter. L'operazione è stata compiuta

estraendo un'immagine *bitmap* ad alta risoluzione di una versione delle nuvola registrata, parzialmente scomposta per evitare che l'effetto di trasparenza, dovuto alla natura stessa della nuvola, producesse un prospetto troppo denso e poco sovrapponibile. La base del rilievo inglese proviene invece da una riproduzione presente in una pubblicazione, di questa è stata eseguita una scansione ad alta risoluzione; trattandosi di una riproduzione e non di un originale, la sua attendibilità può essere alterata dal processo tipografico e quindi l'operazione meriterebbe di essere ripetuta su una base di maggior

accuratezza.

Il risultato è comunque sorprendente, portando entrambe le immagini in un programma di fotoritocco e componendole insieme, inducendo un modesto livello di trasparenza in quella realizzata a partire dalla nuvola di punti, l'immagine risultante mostra una quasi perfetta corrispondenza di tutte le parti principali, con modesta variazione solo nelle parti alte della cupola, dove è evidente una trasformazione della cupoletta e una variazione di altezza per la statua del Battista. Altre differenze sono state riscontrate nelle parti terminali del paramento e nella parte alta delle



Fig. 1 - Il prospetto Est del battistero di Pisa, incisione di James Carter, su rilievo di Cresy & Taylor, Londra, 1829.



Fig. 2 - Il prospetto Ovet del battistero, immagine del prospetto della nuvola di punti rappresentante il battistero, Firenze, 2003.

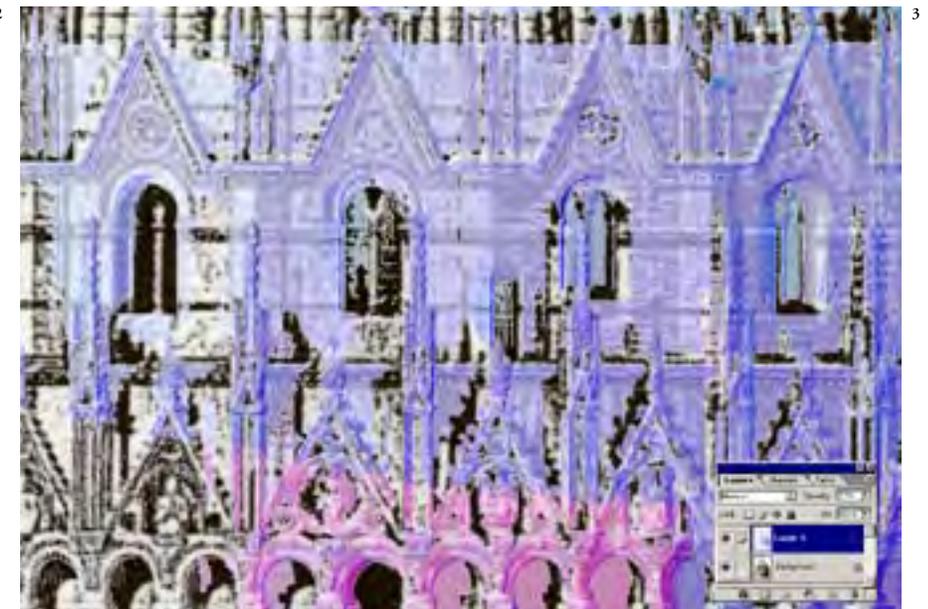


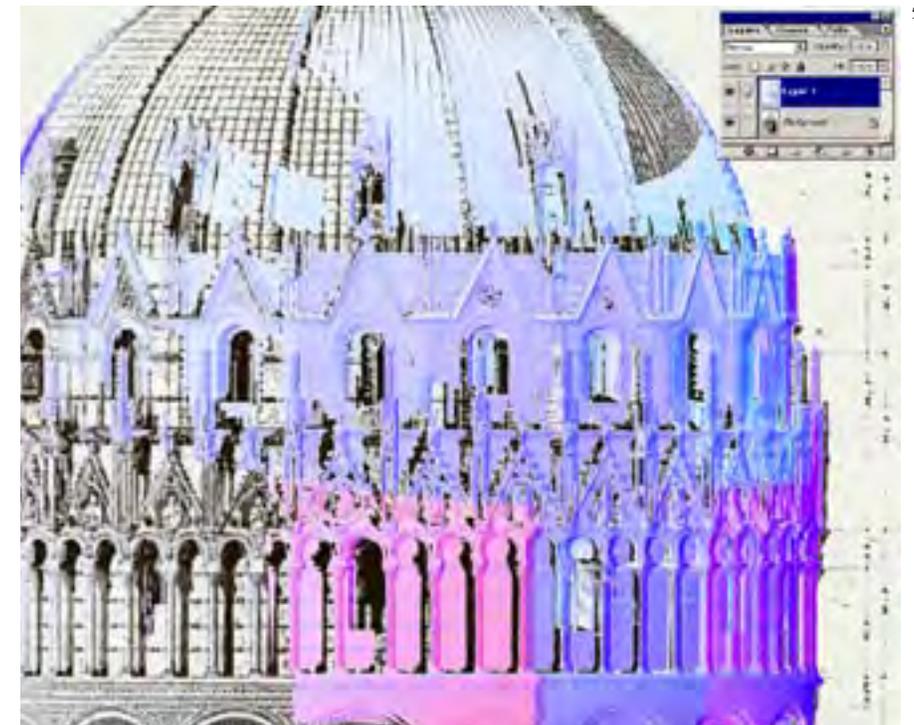
Fig. 3 - Sovrapposizione della porzione di nuvola di punti corrispondente al prospetto Est (in ciano, blu e magenta) al disegno di Carter (in toni di grigio), particolare della corona di cuspidi.



Fig. 4/5 - Sovrapposizione della porzione di nuvola di punti corrispondente al prospetto Est (in ciano, blu e magenta) al disegno di Carter (in toni di grigio): prospetto e particolare del prospetto.

⁴ cuspidi dovute a Nicola e Giovanni Pisano, trattandosi sempre di parti non facilmente accessibili, è probabile che le maggiori difficoltà di rilievo devono aver influenzato il risultato. Il rilievo, eroico, del 1817... il filo a piombo non era neanche di nylon... Inutile cercare di dire nient'altro... Questo eseguito nel 2002 non è paragonabile per quantità di informazioni raccolte per unità di tempo, per Cresy, Taylor e Carter il tempo era un'altra cosa, avevano iniziato le misurazioni di Torre,

Cattedrale e Battistero nel 1817 e per la loro pubblicazione sono trascorsi 12 anni... Il confronto è stato emozionante, una differenza significativa non avrebbe comunque permesso di liquidare il rilievo storico, la coincidenza fa ascendere il rilievo inglese e conferma la correttezza di quanto qui compiuto.



APPLICAZIONI E POSSIBILI SVILUPPI

Tipologie di risultato

La ricerca condotta è stata fino ad ora presentata secondo le procedure e i metodi adottati, indicando le principali caratteristiche dei risultati conseguiti nelle numerose parti e nelle varie diramazioni, a cui gli sviluppi delle problematiche hanno portato questo studio; al fine di dare un quadro maggiormente chiaro delle caratteristiche di quanto ad oggi completato e dei termini entro i quali le caratteristiche del lavoro compiuto possono essere replicate in altre situazioni operative, si possono suddividere i risultati conseguiti in gruppi: operazioni di rilievo, restituzione del rilievo, restituzione dei modelli.

Per ogni gruppo verrà presentata un'analisi critica delle procedure, riferita a come queste sono state applicate, con delle ipotesi per il perfezionamento delle operazioni e delle considerazioni sui possibili sviluppi del tipo di elaborato o del tipo di metodologia che lo ha prodotto.

Operazioni di rilievo

Le prerogative dell'intervento al battistero di Pisa comprendevano varie esigenze. Tra queste la velocità di esecuzione, ne doveva essere prerogativa sia da un punto di vista della

pianificazione, in virtù dell'eterogeneo gruppo degli operatori, e sia dal punto di vista dell'efficacia della sperimentazione; certo non si trattava di eseguire una prova di velocità, ma nel contesto di un'operazione celere si sono potuti valutare i limiti e le condizioni specifiche del rilievo digitale.

Da questo punto di vista, l'intervento operato è stato un esperimento decisamente riuscito, a fronte di un tempo assolutamente contenuto delle operazioni, il dato rilevato è tale da permettere mesi, volendo anni, di elaborazione e un tipo di elaborazione molteplice, volendo dimensionale o diagnostica, ma la stessa restituzione del modello tridimensionale digitale offre delle prerogative interessantissime di sperimentazione ed impiego di applicazioni che possono trovare, in una situazione estrema come questa, un eccellente banco di prova. Il dato registrato nella nuvola di punti è tale che gli ambiti di verifica e sperimentazione sono assolutamente aperti.

Al tempo stesso, però le operazioni condotte mostrano come la pianificazione delle operazioni non possa essere esclusivamente demandata agli operatori del rilievo, e che il processo di acquisizione debba essere soggetto a continua verifica, secondo un processo giornaliero di controllo delle acquisizioni effettuate e sulla base di un piano

di rilievo da cui smarcare le parti coperte mano a mano che per queste è stata eseguita la scansione.

Anche secondo un'esigenza di celerità, l'eventualità di tralasciare delle parti non è da preferirsi ad una sommaria conclusione delle operazioni.

Di conseguenza deve essere chiaro che nuove operazioni di questo tipo dovrebbero richiedere la predisposizione di un laboratorio di controllo dei dati nei pressi dell'area delle riprese, eventualmente non finalizzato alle operazioni di registrazione del rilievo, ma dedicato all'acquisizione di una copia di tutti i dati provenienti dalle operazioni della giornata - oppure di un periodo di scansioni fissato - alla loro verifica e al controllo del processo in modo da essere certi del suo reale completamento prima di considerare conclusa la campagna degli interventi.

Il progetto di rilievo digitale deve inoltre ammettere dei tempi per la replica delle scansioni, se una stazione riporta dati troppo soggetti al fenomeno del rumore o se una stazione non registra correttamente i punti target, oppure ancora se le operazioni di scansione per una determinata stazione devono essere interrotte bruscamente (pioggia, interruzione dell'alimentazione elettrica, cause esterne che provocano lo spostamento del treppiede), il dato



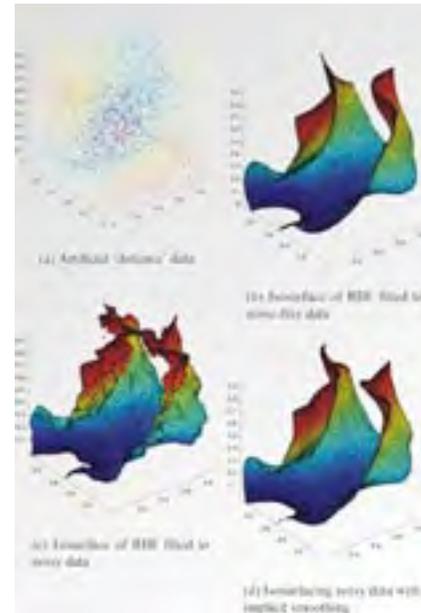
Fig. 1 - Organigramma per la pianificazione delle fasi operative di un intervento di rilievo digitale avanzato.

fino a quel punto raccolto può essere archiviato con il beneficio dell'inventario, ma non può essere considerato compiuto il rilievo da quella postazione, che invece dovrà essere ripetuto. Il punto cruciale del processo è però un altro, ovvero il riuscire a rendere sufficientemente articolato il programma di rilievo digitale rispetto alla complessità dell'edificio che si sta affrontando. Nel rilievo del battistero di Pisa si è utilizzata un'unica tecnologia per il rilievo digitale, si sono usati scanner *Time of Flight* fissi e panoramici, ma le problematiche di restituzione e di sviluppo dei modelli sono rimaste invariate per ambedue le soluzioni.

Il maggior problema riscontrato è stato la tipica alterazione dovuta al "rumore", questa, se poco incidente sul rilievo complessivo di un edificio, può essere problematica per gli elementi scultorei e per gli elementi con dettagli minuti; il fenomeno si può manifestare a più livelli, da uno stato dove è semplicemente fastidioso, producendo superfici leggermente "vibrate", fino ad essere talmente manifesto da rendere inutilizzabile una scansione.

Tenere sempre sotto controllo questo problema non è cosa semplice, l'utilizzo delle apparecchiature entro la massima distanza operativa può aiutare, ma può non essere sufficiente.

Inoltre, nell'idea di un rilievo "totale", ovvero condotto con un livello di



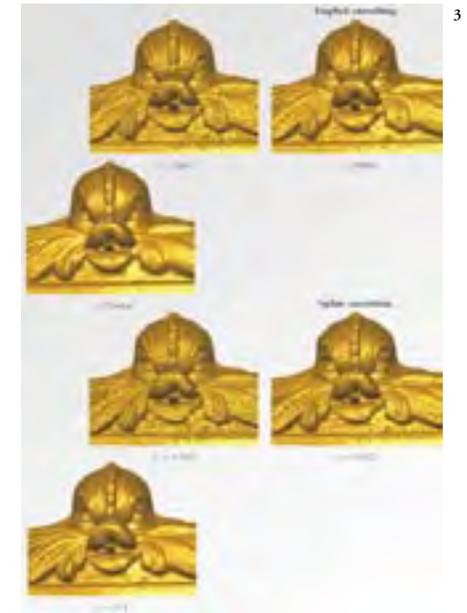
d dettaglio tale da essere utilizzabile per la rappresentazione in scale inferiori a quelle di uno a cinquanta, l'accuratezza non può essere quella offerta dalle tecnologie *Time of Flight*, non con i sistemi attualmente disponibili.

Di conseguenza, se si vuole ottenere questo tipo di elaborato l'intervento da attuarsi deve essere condotto o con strumentazioni di livello superiore, come, per esempio con i laser a *Modulazione di Frequenza*, che però hanno dei costi per ora elevatissimi e degli ingombri tali da non renderli versatili per ogni utilizzo, oppure progettando interventi integrati che

comprendendo fasi di rilievo eseguite con scanner a livelli di accuratezza differenti, permetta la copertura di interi edifici monumentali con un livello di dettaglio variabile¹. In questa maniera il coordinamento degli interventi diventa una fase ancora più importante, e la riunione dei dati raccolti deve essere condotta con estrema capacità da chi opera le fasi di restituzione, queste ultime infatti, se tutte le fasi parziali sono state condotte con correttezza, possono essere la sede per la riunione delle varie componenti provenienti anche da applicazioni differenti.

Restituzione del rilievo

La fase di restituzione ha messo in evidenza una grande efficienza dei software che a questo compito sono delegati, sia *Cyra Cyclone* che *Mensi Realworks Survey* sono riusciti a condurre a compimento l'elaborazione dei dati in maniera efficace, e le prospettive di sviluppo di queste strumentazioni promettono soluzioni sempre più efficienti e rapide per la messa in relazione delle varie parti in cui si trova scomposto un rilievo digitale alla fine della campagna di misurazione. In questo passaggio l'aver a disposizione il riferimento di un rilievo topografico ben eseguito ha risolto efficacemente molti problemi di correlazione dei



target, che altrimenti, nel caso d'uso di strumentazioni anche basate su una stessa tecnologia, ma diverse per strutturazione del software di gestione dei dati, potrebbero comportare non poche difficoltà.

L'aspetto che si è voluto potenziare è stato quello della capacità di trasmettere le informazioni ad altri, ovvero, il processo di post-elaborazione delle informazioni raccolte attuato per il battistero di Pisa ed eseguito tramite un sistema di database.

L'operazione, di per suo non molto onerosa nel senso dei tempi di realizzazione, ha permesso di creare uno strumento efficace per la catalo-

gazione del lavoro svolto, e per la sua comprensione. Benché si pensi che quest'operazione sia valida, si ritiene che per dare ancora più efficacia all'intervento di rilievo digitale, questa procedura dovrebbe essere eseguita non nelle fasi successive alla conclusione della campagna di rilievo, ma incorporata nelle operazioni di controllo durante la campagna stessa. In questo modo è ipotizzabile lo sviluppo di un sistema di database che possa essere impiegato non solo per la pianificazione del progetto di rilievo, ma anche per attuare la verifica dello stato di avanzamento delle operazioni e per condurre a compimento tutti i passaggi con la massima efficacia.

In questo senso si vuole proporre nello stesso momento una soluzione per il perfezionamento del dato già raccolto del rilievo digitale sia una possibile strada da percorrere per il potenziamento delle procedure.

Restituzione dei Modelli

La modellazione è sempre una procedura di interpretazione, dipendente da chi esegue il disegno e inevitabilmente porta una alterazione rispetto al dato rilevato e fissato in un rilievo digitale, che comunque è a sua volta soggetto ad una approssimazione del reale.

In questo senso sue operazioni di ri-

lievo laser, anche eseguite con la stessa strumentazione non restituiranno al medesima nuvola di punti, fosse, se non altro, per via del fenomeno del rumore che anche ammettendo una perfetta corrispondenza della griglia, non potrà mai ripresentarsi due volte nella stessa forma.

La restituzione non opera invece per probabilità o per leggi fisiche, è preceduta da un atto intellettuale, una nuova pianificazione delle operazioni, che fa decidere a chi deve eseguire la rappresentazione a cosa dare importanza e cosa non adottare.

La rappresentazione che segue questa procedura è però anche, in un certo senso, un ripiego, lo è perché se esistessero delle procedure più robuste e complete per la restituzione automatica queste verrebbero di certo adottate come percorso primario della costruzione del modello e degli elaborati correlati alla creazione dell'insieme dei disegni descrittivi dell'architettura rilevata. Si tratta, certo di un ripiego ricco di occasioni creative e di personalizzazione che per chi sa operare adeguatamente con gli strumenti del disegno digitale corrisponde alla produzione di elaborati di grande qualità grafica. Tuttavia si ritiene che la strada della generazione completamente automatica sarà una forma sempre più frequente delle procedure che con il progressivo

potenziamento della parte hardware delegata alla gestione dei software per la grafica permetterà la gestione delle complessissime superfici che oggi pongono un limite di gestibilità ai modelli tridimensionali digitali generati con sistemi completamente automatici. Al tempo stesso il miglioramento dei software con l'integrazione di nuovi o perfezionati metodi di restituzione automatica e di sistemi per la riduzione degli effetti lesivi nella qualità dei modelli porterà le procedure ad essere sempre più efficienti, veloci e capaci di generare superfici di eccellente fattura per la descrizione di elementi anche non standardizzati.

Ad oggi però la procedura non può fare a meno di adottare una combinazione delle procedure manuali unite a quelle automatiche, e secondo questo metodo si continuerà ad operare per un periodo non breve, l'evoluzione tecnologica necessaria che deve ancora avvenire è piuttosto consistente, ed è plausibile che all'accrescimento delle caratteristiche delle procedure automatiche corrisponderà una loro sempre maggior presenza nelle operazioni combinate.

La procedura combinata - con una presenza più o meno rilevante di procedure automatizzate - richiede comunque un'operazione di scomposizione dell'oggetto rilevato in

parti, parti che diventeranno modelli costituiti da superfici e che assemblati insieme costituiranno un modello digitale completo atto alle più svariate applicazioni.

Secondo questa procedura il modello così definito e comunque scomposto per parti, parti che possono essere riprese, modificate o sostituite con componenti derivanti da uno stesso rilievo, ma generate con procedure diverse o derivanti da nuovi rilievi. Questa opzione pone però la necessità di conoscere con chiarezza il modello che si sta utilizzando. Si tratta di un fattore non secondario e, soprattutto, si deve considerare che il modello, come nel caso del battistero di Pisa, dovrà essere trasferito tra diversi operatori ed essendo oggetto della consegna finale di una convenzione, dovrà essere tale da poter essere impiegato da operatori che di certo non hanno partecipato alla sua creazione.

Quindi il nodo della questione è come trasferire la conoscenza delle peculiarità del modello realizzato ad altri che lo devono utilizzare, eventualmente perfezionare. La soluzione qui proposta è quella di basarsi sulla necessaria scomposizione per parti del modello completo per svilupparne una schedatura orientata alla descrizione della componente specifica, un database costituito in una forma autonoma dal

modello, con campi per la raccolta di informazioni generiche, come il “peso” della parte, la tipologia geometrica, il numero di vertici, di facce, il programma con cui è stato generato, il formato in cui è stato archiviato singolarmente e tutte quelle voci che possono permettere la comprensione da parte di un nuovo operatore di quali sono le parti a cui dare priorità nell’eventuale applicazione di nuove procedure per l’ottimizzazione del modello o per la sostituzione nel caso si decida di impiegare qualche nuovo strumento con nuove o migliorate prerogative per la generazione di superfici a partire dalla nuvola di punti.

Molti CAD e molti programmi di Modellazione, *Rendering* e Animazione oggi supportano delle funzionalità di *database* che possono essere interfacciate con software di gestione ed editazione del *database* stesso, inoltre essi stessi permettono di attribuire agli elementi dei parametri identificativi ricchi di informazioni, tuttavia la definizione di un database completamente esterno permette di gestire e accedere alle informazioni in maniera svincolata dal modello, che contenendo oggetti ad altissima risoluzione risulta molto impegnativo, in termini di risorse, per il computer che lo deve gestire. Invece, il singolo archivio contenente tutte le informazioni sul modello permette di

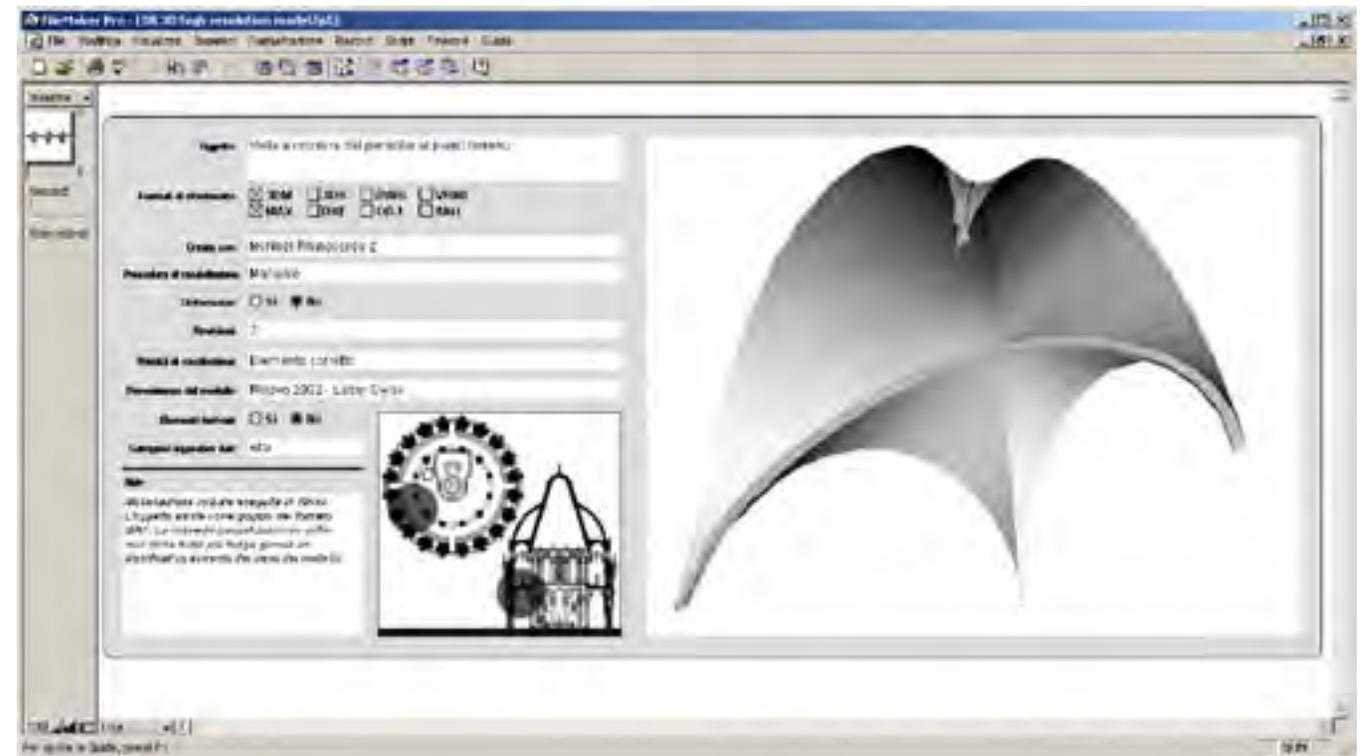


Fig. 4 - Database per la schedatura delle componenti del modello digitale tridimensionale del battistero di Pisa. Interfaccia per la consultazione e l’inserimento dati.

accedere a tutti i dati relativi alle parti che compongono il “battistero digitale” anche da computer con un livello di prestazioni modesto.

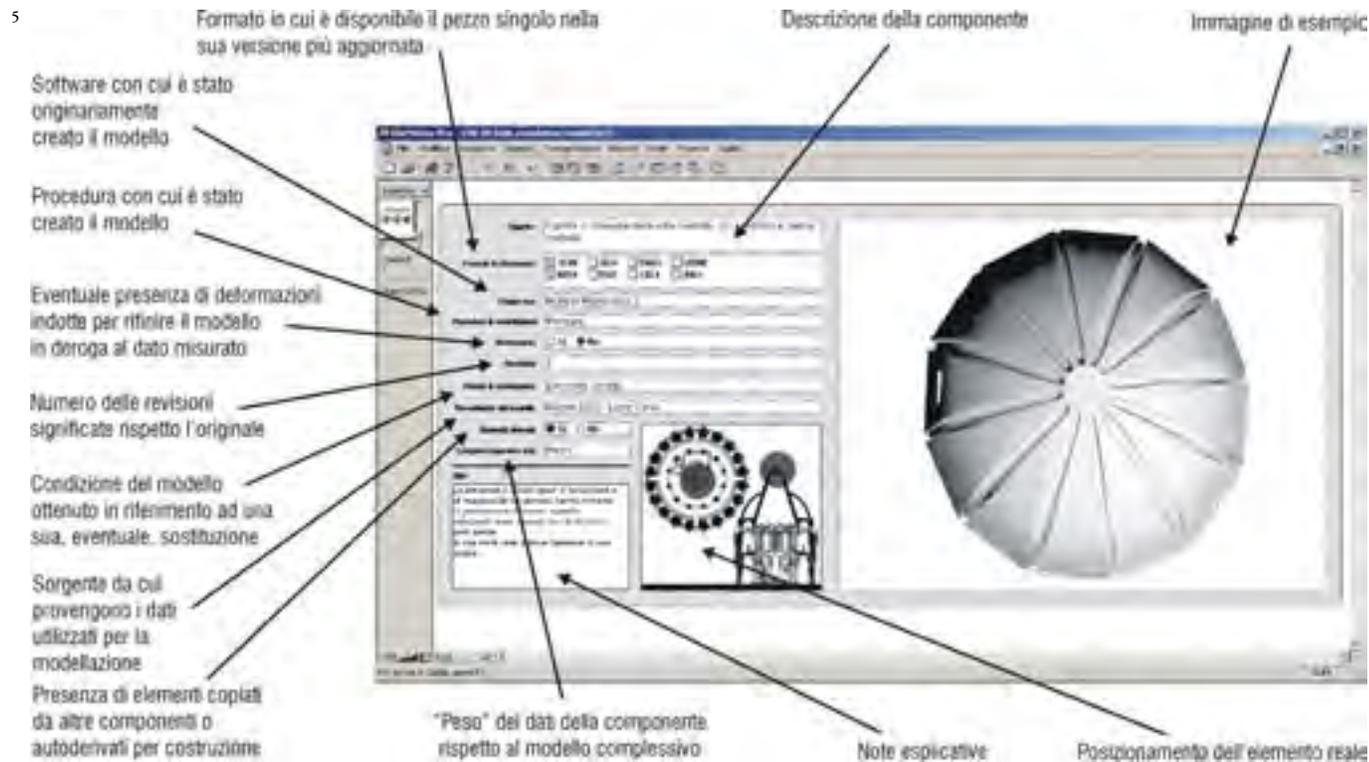
Possibili sviluppi

Il rilievo digitale è oggi un campo di applicazione estremo, è tale in misura della quantità di dati che devono essere gestiti e delle procedure estenuanti con cui questi dati devono essere elaborati, l’esperienza del battistero di Pisa è un

caso limite, sia per volume totale dei dati raccolti che per la complessità dell’oggetto rilevato, e in questo senso lo sforzo necessario per il suo controllo e per lo sviluppo di soluzioni adeguate è inconsueto rispetto a situazioni di minore ricchezza.

La cosa più evidente nell’impiego delle strumentazioni necessarie per l’esecuzione di un rilievo di questa complessità e per la gestione dei dati raccolti e per la loro elaborazione, è la necessità di sviluppo di strumenti

e il bisogno di nuove funzionalità che è avvertito da chi opera in questo ambito. Del resto chi si occupa dello sviluppo di questi strumenti e di questi applicativi molto spesso è anche molto attento alle richieste e al feedback dei propri utilizzatori, specie se questi operano su temi tali da costituire una seria prova. Di conseguenza si ritiene che lo sforzo da parte di chi si impegna nel campo del rilievo digitale debba anche essere quello di chiedere e di stimolare i cambiamenti degli strumenti che si



trova ad utilizzare in forma attiva, non solo come mero collaudatore di strumentazioni altamente tecnologiche. Le richieste e gli stimoli possono essere anche di modesta entità, ma qualunque idea o suggerimento potrebbero comportare un perfezionamento nell'hardware o nel software che sarebbe successivamente condiviso da tutti coloro che operano in questo settore d'attività.

Una direzione che potrebbe essere intrapresa, nello sviluppo futuro delle

applicazioni per la gestione dei rilievi digitali potrebbe essere il loro potenziamento con l'aggiunta di funzioni adatte a permettere l'associazione tra punti del rilievo e dati articolati e di varia tipologia (immagini, filmati, archivi digitali in genere).

Questa procedura potrebbe essere sviluppata in due forme distinte, una basata sul collegamento di elementi esterni sotto forma di riferimenti "esterni", l'altra, più complessa di gestire tutte le informazioni aggiuntive

direttamente entro il programma che manipola la nuvola di punti; tutte e due le soluzioni sarebbero sufficienti a potenziare enormemente il settore applicativo di questi strumenti.

Prendiamo l'esempio di *Cyra Cyclone*. E' un programma con un incredibile livello di prestazioni nella gestione delle nuvole di punti, nell'attuale versione permette di controllare con una buona efficienza anche le nuvole di punti complete e riassemblate dell'intero battistero, il processo avviene

in maniera efficace, e quando l'intera nuvola viene caricata il sistema si trova a gestire, contemporaneamente, oltre centosettantamiliardi di punti. In questo senso la gestione del modello digitale tridimensionale definito dalla nuvola di punti è una soluzione di visualizzazione e consultazione del monumento senza uguali, nessun modello generato per superfici con un livello di dettaglio prossimo a quello della nuvola che lo ha generato, può essere manipolato in tempo reale in una maniera neanche lontanamente paragonabile a quello che può essere operata da *Cyclone* per la propria nuvola di punti e questo è vero per il battistero, ma lo è anche per modelli molto meno complessi.

Di conseguenza l'ipotesi di associare informazioni articolate direttamente ai singoli vertici della nuvola o ad insiemi di questi, potrebbe risultare molto interessante, soprattutto in virtù dell'estrema velocità di visualizzazione, e in base alla considerazione che, anche se la nuvola non mostra una visione fotorealistica – per alcuni, volendo, sgradevole – dell'oggetto rilevato, è anche vero che ai fini di una gestione di sistemi informativi orientati all'architettura non è detto che la visualizzazione debba essere innanzitutto accattivante, deve essere innanzitutto pratica ed efficiente, e qui

Fig. 5 - Database per la schedatura delle componenti del modello digitale tridimensionale del battistero di Pisa. Indicazione di tutti i campi approntati per l'interfaccia di consultazione ed editazione.

le condizioni ci sono tutte. Ciò che potrebbe essere fatto potrebbe allora essere l'implementazione della possibilità di associare un collegamento ad un punto della nuvola oppure ad un insieme di questi, quando l'utente seleziona il punto, gli viene data la possibilità di visualizzare i contenuti collegati, questi potrebbero essere un qualunque file semplice o coordinato che in base all'associazione attuata dal sistema operativo potrebbe essere istantaneamente aperto. In questa maniera, per costruire un archivio anche complesso

di informazioni si potrebbe organizzare tutte le informazioni, sia grafiche che testuali secondo un insieme di pagine *HTML*, nello stesso standard che costituisce la parte navigabile della così detta *World Wide Web*, secondo questa idea, eseguendo un click del mouse su un punto di un capitello, per esempio, se ne potrebbe visualizzare una scheda anche molto ricca di informazioni, comprensiva di fotografie, dati sulla conservazione, documentazione di ogni genere ed eventuali collegamenti a parti del modello per superfici. Le

funzioni di ricerca delle informazioni di questo particolare sistema informativo potrebbero essere attuate attraverso un motore di ricerca integrato nella parte *HTML*.

In alternativa a questa soluzione, il programma stesso potrebbe presentare un modulo per la creazione di schede tipo interne al database della nuvola di punti, con la possibilità di importare elementi grafici di vario genere e presentarli inclusi nelle proprie schede. In questo caso il motore di ricerca delle informazioni dovrebbe essere incluso

nel programma principale, ma il vantaggio potrebbe essere quello di poter eseguire delle operazioni filtro sulla nuvola di punti stessa, visualizzando, per esempio, solo le parti di un certo periodo o solamente le aree affette da una certa patologia. Queste eventuali nuove funzionalità renderebbero il programma non solo un buon software per la gestione e l'elaborazione dei dati del rilievo, ma potenzialmente uno strumento impiegabile per la gestione dell'edificio stesso, o di più edifici, sulla base delle scansioni effettuate.

Note

¹ Il recente rilievo dell'Arco di Traiano a Benevento, condotto dall'equipe del NubLab di Ferrara è stato condotto con scanner Cyrax 2500 per l'aspetto architettonico generale, e con scanner Minolta Vivid 700 per le fasce con bassorilievi, l'accesso alle parti poste a maggior distanza è stato ottenuto utilizzando un ponteggio mobile motorizzato.

CONCLUSIONI

Il modello tridimensionale digitale ottenuto dal rilievo del battistero è un fenotipo. È il fenotipo dovuto a un'idea che ha una grande fiducia nelle tecnologie e nelle soluzioni complesse. È anche un'opera incompleta, non perché ad oggi ne manchi una porzione o perché qualche *Mesh* richieda di essere rivista, ma perché è stato costruito per essere un elaborato di partenza per altre ricerche e sviluppi e in questo senso è una digitalizzazione innovativa dell'architettura. Non finisce con una bella immagine di *render*, altri la faranno, non finisce con un sistema informativo dello stato di degrado, altri però potranno farlo.

Lo sforzo fatto è stato quello di creare un modello che fosse la concretizzazione di un metodo, complesso ed articolato, che portasse alla produzione di qualcosa realmente utilizzabile da altri, che fosse una soluzione per avviare il processo di costruzione di altre meccaniche della fruizione e della rappresentazione visuale.

Questo non è il rilievo definitivo del battistero, c'è stato un momento in cui questa tesi è stata riempita con questa frase, ma non è così, questo rilievo è ripetibile, con maggior qualità, con metodo perfezionato, con maggior suddivisione degli interventi.

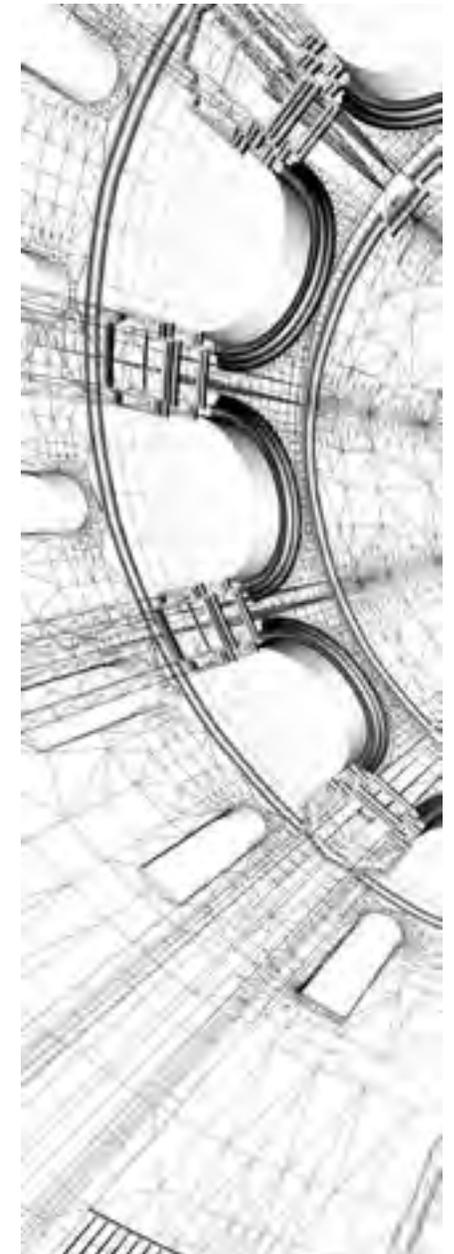
Però sarà il secondo rilievo digitale del battistero, tutto qui.

Né il modello prodotto è l'unico sviluppabile a partire dalla nuvola di punti, le semplificazioni che si sono dovute operare pur non essendo stocastiche sono tra le tante applicabili e questo significa che si possono produrre altri modelli più attenti a determinati aspetti della costruzione, modelli parziali e ulteriori schematizzazioni.

Affrontare questo rilievo ha richiesto un impegno particolare, quello di ripensare delle procedure, o meglio quello di mediare soluzioni dalla propria esperienza e riutilizzarle in applicazioni diverse, di non farsi scrupolo di sperimentare metodi non specifici, allo scopo di valutarne il ritorno sul progetto complessivo. Si sono intraviste delle soluzioni e si è cercato di renderle presenti. Le condizioni operative erano cambiate, il rilievo e la restituzione mutati nei loro tempi, un rilievo, quello digitale che porta la sua manifestazione ad esistere in forma indipendente dalle procedure di restituzione e di conseguenza rappresentata secondo le possibilità offerte dal software di gestione dei dati. Un'entità su cui lavorare per mesi, per anni, volendo, non per la lentezza dei procedimenti, ma per il volume delle informazioni,

meccanicamente raccolte, senza interruzione, in quantità immani, ma comunque un'entità che richiede di essere compresa in maniera non superficiale. Il tempo necessario alla comprensione fa la differenza. Un milione di punti non può essere restituito senza che si sia assimilata l'entità dell'oggetto che rappresenta. Le scelte valide possono essere solo due allora: la comprensione o la totale automazione, non ci sono passaggi intermedi.

L'impresa che si è tentata affrontando un'architettura così impegnativa non ha portato con sé solo un grande lavoro e una grande elaborazione di informazioni, ha portato con sé una ricerca, che si è ampliata, ramificata, e ha portato alla luce un problema minimo, ma poco sondato, quello di una possibile visione dello sviluppo del rilievo architettonico che non sia solo fruizione e organizzazione di strumenti esistenti, ma propositivo, efficiente, innovativo non perché usa strumenti vecchi che altri ignorano, ma perché cerca soluzioni e quando queste non funzionano chiede che siano rese tali da superare l'ostacolo. Che vede combinazioni di strumenti e le mette in atto, cercando un'alchimia che produca una soluzione efficiente e applicabile. Non si tratta di testare quello che già esiste e dire se funziona



più o meno bene, ma di capire come potrebbe funzionare meglio, come potrebbe essere integrato con altri meccanismi, è una strada che potrebbe meritare di essere percorsa. Al di là di ciò che è stato realizzato materialmente, questa ricerca ha permesso di individuare alcuni nodi interessanti che presi anche singolarmente potrebbero significare dei mutamenti non irrilevanti nelle procedure del rilievo digitale, riassumendo:

Procedure per l'organizzazione delle fasi immediatamente successive alle campagne di rilievo. La definizione di schedature da condurre parallelamente alla realizzazione delle scansioni laser permette di potenziare il livello operativo del gruppo di lavoro che partecipa alla restituzione del rilievo.

Ipotesi di procedure per la restituzione automatica di elaborati tradizionali direttamente dalle scansioni. Si tratta di un processo in parte già disponibile, ma non ancora del tutto perfezionato, integrando procedure di semplificazione e migliorando gli algoritmi in maniera da aumentare la loro tolleranza al rumore si potrebbe arrivare a delle procedure quasi completamente

automatiche di rilievo e disegno.

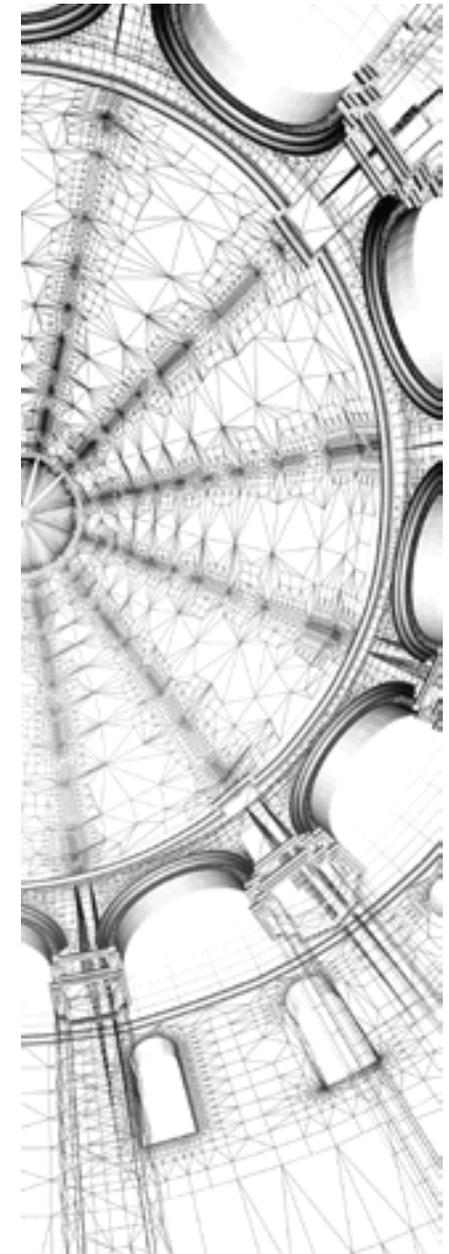
Procedure per la restituzione manuale di elaborati tradizionali direttamente dalle scansioni. Il processo proposto è piuttosto macchinoso, ma molto efficace. All'atto pratico permette di far restituire con una certa velocità piante ed altri elaborati tradizionali utilizzando CAD generici e operatori con una conoscenza anche sommaria dell'architettura rilevata.

Procedure per la definizione di un database correlato al modello tridimensionale digitale prodotto. È un'operazione che aumenta significativamente i tempi di chiusura del modello, ma lo rende molto più accessibile alle operazioni di terzi che con questo dovessero realizzare le proprie ricerche e i propri progetti, inoltre permette di conoscere a fondo la struttura e le caratteristiche del modello senza dover accedervi direttamente.

Ipotesi di ampliare le funzionalità delle applicazioni di gestione del rilievo digitale per poter implementare funzioni per i sistemi informativi, anche in forme autonome. È un'idea che può nascere spontaneamente a tutti coloro che operano con queste strumentazioni, il passo in avanti

sarebbe significativamente grande. Per lo più ad oggi si sono ipotizzate soluzioni di integrazione con sistemi GIS, ma forse si potrebbe arrivare ad un'efficacia ancora maggiore con l'inclusione direttamente in queste applicazioni della possibilità di aggiungere maggior varietà di dati in associazione ai punti rilevati.

Lo sviluppo di queste possibilità ci sarà comunque, in una maniera o nell'altra, ciò che risulta fondamentale è essere presenti per poter indirizzare la trasformazione dei sistemi di rilievo secondo le finalità e non secondo le quantità in modo che il rilievo digitale aumenti la propria qualità in base ad un impiego intelligente delle risorse, portando il massimo beneficio rispetto alle finalità secondo le quali il rilievo è stato avviato e in maniera che quando parlare di un rilievo da centosettantamiliardi di punti non sarà più cosa da sottolineare con enfasi, resterà, comunque sorprendente, la qualità di quanto fatto.



GLOSSARIO

3D – Sigla generica utilizzata con il significato di tridimensionale, abbinata al nome di un software indica la presenza di funzioni orientate alla gestione di uno spazio digitale tridimensionale, abbinata al nome di una componente hardware indica che la periferica è ottimizzata o offre particolari performance per il controllo degli spazi digitali tridimensionali.

3D Studio Max – Programma sviluppato originariamente da *Autodesk* e successivamente dalle divisioni *Kinetix* e *Descreet*, è un applicativo molto complesso per la modellazione, il *rendering* e l'animazione.

3DM – Estensione corrispondente al formato dei file di *McNeel Rhinoceros 3D*, su questo è basata la *suite Open NURBS*.

3DS – Estensione corrispondente al formato dei file della prima generazione del software *Autodesk 3D Studio*, e principale formato di salvataggio per gli oggetti generati da quel programma fino alla versione 4 (DOS), nelle successive versioni di *3D Studio*, denominate *MAX* è stata abbandonata, divenendo un formato di esportazione. Molto diffuso, è un formato supportato da numerose applicazioni 3D

A

ACCELERATORE GRAFICO

- Chip presente su tutte le schede video che permette di velocizzare le prestazioni grafiche. Poiché è in grado di aggiornare la visualizzazione del video molto più velocemente del processore del sistema (CPU), risulta particolarmente utile nel caso di sistemi operativi basati su interfaccia grafica (GUI) come *Windows*. Nelle applicazioni grafiche le prestazioni dell'acceleratore grafico incidono maggiormente che non qualunque altra parte del sistema.

ACROBAT - Programma sviluppato da *Adobe Systems* per realizzare e distribuire documenti che contengono testo, grafica e immagini nel formato elettronico *PDF (Portable Document Format)* a partire da qualunque applicazione capace di eseguire una stampa del documento elaborato. Il file *PDF* prodotto può, successivamente, essere visualizzato su numerose piattaforme (*Windows, Macintosh, Linux, Solaris, IRIX, BeOS, e MS-DOS*) utilizzando il programma *Acrobat Reader* distribuito gratuitamente e facilmente recuperabile in Internet.

AGP – Acronimo di *Accelerated Graphics Port* – Insieme di specifiche

sviluppate da Intel per la realizzazione di una connessione che migliori le prestazioni grafiche di un computer in collaborazione con un acceleratore sulla scheda video conforme a questa architettura. Fondamentalmente questi tipi di bus prevedono una connessione veloce alla *CPU* ed una diretta alla memoria centrale per non coinvolgere la *CPU* stessa nel trasferimento delle immagini. *L'AGP 2X* riesce a trasferire fino a 533 *MB* al secondo, mentre il *4X* raggiunge i 1.066 *MB/s*.

ALBERO - È una struttura che contiene più elementi, detti nodi, collegati fra loro da regole gerarchiche. Il nodo che si trova al livello più alto viene detto radice, tutti gli altri sono figli di un unico nodo e possono avere a loro volta nodi figli. Una struttura di questo tipo ricorda la rappresentazione grafica degli alberi genealogici e si adatta alla rappresentazione delle strutture di programmazione e degli oggetti contenuti in computer.

ALFANUMERICICO - Insieme di caratteri costituito da lettere, numeri, segni di interpunzione e simboli speciali, normalmente usato per la rappresentazione di immagini digitali.

ALGEBRA BOOLEANA - Sistema logico matematico fondamentale per il

funzionamento dei computer: utilizza gli operatori AND, NOT e OR per determinare che le proposizioni logiche siano vere o false. Sviluppata nella prima metà del 1800 dal matematico inglese George Boole, è ideale per l'elaborazione elettronica dei dati. Le condizioni di vero e falso sono espresse dai numeri 1 e 0 e possono rappresentare in modo semplice due differenti stati fisici di un circuito. Nei computer gli operatori, o porte logiche, sono particolari circuiti digitali che vengono combinate in modo opportuno per assicurare che il risultato finale rappresenti un dato significativo.

ALGORITMO - Procedura costituita da un insieme finito di operazioni semplici ordinate in sequenza per raggiungere un risultato determinato. Termine di uso comune nel campo dell'informatica (algoritmo di classificazione automatica, algoritmi di trasformazione di una immagine, ecc.).

ALIASING - Effetto di scalettatura visibile nelle linee curve delle immagini digitalizzate, dovuto al fatto che esse sono composte di pixel quadrati o rettangolari.

ALPHA CHANNEL – Il canale alfa occupa 8 bit aggiuntivi di un'immagi-

ne digitale a 24 *bit* (che di conseguenza verrà memorizzata con 32 *bit* complessivi per ogni *pixel*). Questi bit sono utilizzati da alcuni programmi di grafica per manipolare i 24 *bit* rimanenti che rappresentano le informazioni sui colori (8 bit per il rosso, 8 per il blu e 8 per il verde). In questo modo si possono modificare i colori o mascherare i pixel che compongono l'immagine, nella maggior parte degli impieghi grafici permette di salvare una mascheratura corrispondente alla parte intesa come sfondo della scena.

ANALOGICO - Termine riferito alla rappresentazione di un fenomeno fisico, o modello, fatta attraverso una funzione di tipo continuo. Normalmente si usa in contrapposizione a discreto o digitale.

ANTI-ALIAS - Effetto di sfumatura del contorno di una figura rispetto allo sfondo. Si ottiene attenuando le differenze di colore tra i pixel, in modo da eliminare eventuali contorni scalettati.

API – Acronimo per *Application Program Interface*, è costituita da una set di routine, istruzioni, protocolli e strumenti per costruire applicazioni software. Una *API* ben realizzata facilita lo sviluppo dei programmi in

quanto fornisce tutti i “blocchi” per la costruzione. La maggior parte degli ambienti operativi, come *Microsoft Windows* per esempio, forniscono una *API* così che i programmatori possano scrivere applicazioni coerenti con l'ambiente operativo. Sebbene sia rivolta e studiata per lo più per i programmatori, una *API* in realtà è vantaggiosa anche per l'utente finale in quanto garantisce che i diversi programmi che utilizzino una stessa *API* avranno interfacce simili; e questo facilita all'utente l'apprendimento di nuovi programmi.

ASCII - Set standard di caratteri adottati nei computer per i software. All'interno della codifica *ASCII* estesa sono compresi, poi, i simboli propri di ogni lingua.

ASSORBIVITÀ - Proprietà caratteristica di un materiale di assorbire tutta l'energia incidente non riflessa e non trasmessa. L'assorbività è il fattore di assorbimento di un mezzo che ha una superficie speculare (otticamente liscia, piana) e che è sufficientemente spesso da essere opaco e permettere quindi che l'assorbimento sia completo. Il simbolo comunemente utilizzato per indicarla è α .

ATTENUAZIONE - Diminuzione

della densità di flusso di un fascio di raggi paralleli di energia raggiante all'aumentare della distanza dalla sorgente. Tale fenomeno può dipendere dalla diffusione o dalla rifrazione, nel passaggio da un mezzo ad un altro, oppure dall'assorbimento nell'attraversamento di uno stesso mezzo.

AUTOCAD – Uno dei CAD più diffusi. E' stato sviluppato da sempre dalla Autodesk, si tratta di un CAD per la rappresentazione 2D e 3D, permette l'aggiunta di nuove funzioni attraverso moduli aggiuntivi e un proprio linguaggio di programmazione.

AVI - Acronimo per *Audio Video Interface*. Indica un filmato strutturato nel formato video di *Windows*, sviluppato dalla *Microsoft Corporation*.

B

BANDA - Intervallo di lunghezza d'onda e di frequenza delle radiazioni elettromagnetiche definito da un valore inferiore e da uno superiore. In genere le radiazioni contenute in una banda hanno o producono effetti tipici di quelle lunghezze d'onda.

BANDA DI ASSORBIMENTO - Intervallo di lunghezze d'onda (o frequenze) dello spettro elettroma-

gnetrico nel quale l'energia raggiante è assorbita dal mezzo attraversato. La radiazione solare nel suo tragitto dal sole alla superficie terrestre, attraversando l'atmosfera, viene attenuata dalla presenza dei diversi componenti dell'atmosfera stessa. In particolare si hanno le bande di assorbimento caratteristiche dell'anidride carbonica e del vapor d'acqua, dell'ozono, ecc.

BANDA PASSANTE - Intervallo di lunghezza d'onda all'interno del quale un sensore è in grado di misurare l'energia elettromagnetica incidente su di esso. In fotografia è determinata dalla combinazione tra filtro ed emulsione, mentre in uno scanner è determinata dalla combinazione di filtri e rivelatori.

BANDA SPETTRALE - Intervallo, nello spettro elettromagnetico, definito da due diverse lunghezze d'onda, o frequenze.

Vedi: Spettro elettromagnetico.

BANDA TERMICA - Particolare banda spettrale che si riferisce all'intervallo di lunghezza d'onda tra 7 e 15 micron, detta anche banda dell'infrarosso termico.

BACKUP – Copia di sicurezza dei dati, realizzata su un supporto che

è possibile conservare in un luogo diverso dalla postazione abituale del computer da cui questi stessi dati provengono. Normalmente, si esegue usando mezzi più economici rispetto al sistema di memorizzazione centrale, in modo da poter aggiornare con frequenza il backup senza costi eccessivi. Per piccole quantità di dati possono essere utilizzati anche i semplici *floppy disk*, benché non si tratti di un sistema affidabile nel tempo; oppure supporti come i *Compact Disc*, che se gestiti con cura, possono preservare i dati per molti anni.

BILANCIAMENTO DEL BIANCO

- Operazione di taratura della temperatura-colore da parte di un apparecchio digitale di ripresa; permette di effettuare riprese in ambienti illuminati da qualunque fonte luminosa senza che vi siano dominanti cromatiche.

BIOS – Acronimo per *Basic Input Output System*, si tratta di un di software con le istruzioni per interagire a basso livello con l'hardware di un computer o di un *PC* o di una periferica. Normalmente viene memorizzato all'interno di un apposito *chip* che nel caso del *BIOS* di un *PC* è installato sulla scheda madre.

BIT - Unità elementare di informazio-

ne, abbreviazione dall'inglese "binary digit" (cifra binaria). In un alfabeto che si serve solo di due simboli - per esempio 0 e 1 - il bit indica l'uno o l'altro di tali simboli. Ciò equivale ad esempio all'apertura e chiusura di un circuito elettrico, all'esistenza o meno di una tensione al colore bianco oppure nero.

BIT-RATE - Numero di bit utilizzati in un secondo per trasmettere un'informazione digitale o una parte di essa. Un tipico bit-rate di 128 Kilobit al secondo equivale a 16 Kilobyte al secondo (un byte corrisponde ad otto bit e di conseguenza: $128/8=16$).

BMP – Estensione delle immagini di un particolare formato bitmap sviluppato da *Microsoft* e *IBM*, si tratta di uno standard molto compatibile e facilmente accettato da molte applicazioni, le profondità colore supportate vanno da 1 bit a 24 *bit*, si tratta tuttavia di un formato privo di compressione per l'archiviazione dei dati o, al limite, comprimibile secondo il protocollo *RLE* (a scapito della compatibilità del formato).

BOOT – Termine con cui si identifica tutte le procedure che hanno a che fare con l'avvio del *PC*. Durante queste fasi il *PC* esegue una serie di test per

controllare il corretto funzionamento di alcune componenti hardware fondamentali, caricare il software di sistema e passare, alla fine, il controllo all'utente.

BPS (BIT AL SECONDO) – Indica il numero di bit che può essere trasmesso in un secondo. All'aumentare del numero di bit corrisponde un aumento di velocità della trasmissione della informazione. Viene chiamato anche BAUD.

BROWSER - Programma per la visualizzazione delle pagine informative immesse in rete. *Netscape Navigator* e *Internet Explorer* sono dei *browser*.

BUFFER - Parte della memoria di un computer usata per un compito specifico, in genere per trattenere temporaneamente dei dati. Usato anche con il significato di "memoria tampone", utile per compensare le differenze di velocità di trasmissione fra due dispositivi (ad esempio fra due computer).

BUG - Letteralmente insetto, da cui il termine colloquiale italiano "baco". Si tratta di un'istruzione o di una sequenza di istruzioni che in un programma causa risultati indesiderati o inaspettati. È abbastanza frequente il

verificarsi di *bug* nei software di recente rilascio: se il problema è già noto o se risulta particolarmente eclatante negli effetti, la casa produttrice del software provvede al più presto a diffondere una un aggiornamento correttivo del problema.

BUNDLE – Letteralmente: compreso; in dotazione. Con questo si intende un prodotto che viene incluso nell'acquisto di un altro, per esempio: un programma di fotoritocco incluso nel pacchetto di acquisto di uno scanner.

BUS – È l'insieme di collegamenti elettrici che trasportano i dati internamente alla scheda madre e alle altre schede installate nel *PC*. Il *bus* ha una velocità operativa misurata in *Megahertz*. Ne esistono differenti tipi, per esempio *ISA*, *EISA*, *MCA* (*Microchannel*), *Local bus* (*PCI* e *VESA*) e *AGP*.

BYTE - Nella terminologia del computer indica l'unità elementare di memoria costituita da un gruppo di otto bit. Un byte può rappresentare uno dei 256 possibili stati ottenibili dalle combinazioni fra gli otto bit elementari che lo compongono. A ognuno di questi stati è associata un'informazione. L'insieme di due o quattro byte forma un insieme di

dati detto *parola*.

C

CAD – Acronimo di *Computer Aided Design* (Progettazione con l'Ausilio del Calcolatore), con questa sigla vengono indicati tutti i programmi di disegno con una struttura comandi orientata all'utilizzo nei settori della rappresentazione architettonica, meccanica, ingegneristica e tecnica in genere. A seconda del software i *CAD* possono permettere di disegnare solo bidimensionalmente oppure sia bidimensionalmente che tridimensionalmente.

CAM – Acronimo di *Computer Aided Manufacturing* (Creazione con l'ausilio del computer), con questa sigla vengono indicati tutti i programmi di genere *CAD* con funzioni specifiche dedicate all'interfacciamento di macchine a processo numerico.

CCD - Sigla che sta per *Charge Couple Device* (dispositivo ad accoppiamento di carica). Indica un sensore in grado di leggere la luce e di trasformarla in corrente elettrica analogica. Sono *CCD* i sensori utilizzati, per esempio, nelle fotocamere digitali e nelle videocamere per generare un'immagine del campo ripreso.

CG – Computer Grafica (*Computer Graphic*)

CMYK - Acronimo di *Cyan Magenta Yellow black*. Le immagini a colori vengono stampate in

quadricromia con pigmenti nei colori base: Cyan (ciano), Magenta (magenta), Yellow (giallo), Black (nero). I vari colori sono resi visivamente dalla somma dei pigmenti dei tre colori primari, in varie proporzioni, più il nero, che teoricamente sarebbe dato da una uguale quantità per ciascuno dei tre primari. In pratica il nero perfetto è impossibile da ottenere in stampa con questo metodo, e così si aggiunge un pigmento nero.

CODEC – Termine composto (CODifica DECodifica) che indica una componente software, nella maggior parte dei casi vista dal sistema operativo come un vero e proprio driver che serve per permettere la visualizzazione, l'ascolto e la compilazione di documenti audio e video. Se si crea un filmato o un suono utilizzando un determinato *CODEC*, gli utenti che vorranno fruirne su altri computer dovranno utilizzare quello stesso *CODEC* sul computer di destinazione.

CONTROL VETEX – vertice di controllo indicato nella geometria

NURBS. Si tratta di un punto esterno ad una superficie che ne definisce la curvatura sulla base di tangenti passanti per il punto stesso. Viene spesso indicato con la sigla *CV*.

COMPATIBILITÀ - Completa capacità di interscambio tra due dispositivi per realizzare le stesse funzioni o accettare gli stessi programmi.

COMPRESSIONE DATI - Operazione di riduzione del volume dei dati operata attraverso uno specifico algoritmo, questa può avvenire in forma di conversione del formato, ovvero uno o più file vengono archiviati entro un nuovo archivio compresso, da cui verranno estratti al momento del loro utilizzo, oppure può avvenire internamente al tipo stesso di file, permettendone la continua editazione. In quest'ultimo caso la compressione è detta standard se avviene senza perdita di informazioni, è invece detta distruttiva, se per migliorare l'efficacia della riduzione indotta dalla compressione si sacrificano delle informazioni in una misura definita dall'algoritmo. Quest'ultimo genere di compressione è prevalentemente applicato a dati di tipo Bitmap.

COMPUTER VISION – Termine generico, traducibile come “modo di

vedere del Computer” con cui si indica una vasta casistica di tematiche inerenti i sistemi che permettono di “leggere” la realtà attraverso un calcolatore e trasportarla in un sistema digitale gestibile dal computer stesso.

CPU - Acronimo inglese di “*Central Processing Unit*”. Parte di un calcolatore dove vengono processate le informazioni, e' il “cuore” di un calcolatore. *CPU* viene spesso usato come sinonimo di “microprocessore”, ovvero il *CHIP* dedicato all'elaborazione dei dati. Componente principale di un computer. Esegue le operazioni logiche e aritmetiche e dirige il flusso delle informazioni.

CRT - Acronimo di “*Cathode Ray Tube*”, tubo a raggi catodici. Viene impiegato per indicare un monitor a con visualizzazione attraverso tubo catodico.

CSV – Acronimo per *Comma Separated Values*, ovvero: Valori separati da virgole, con questa sigla si indicano file testuali contenenti una serie di valori numerici (in genere coordinate) oppure testuali (in genere i valori corrispondenti ai campi di un database). I singoli valori sono divisi da virgole, questo tipo di documento può essere letto e convertito in tabelle

da numerosi applicativi di tipo foglio elettronico, come *Microsoft Excel* ed è molto utilizzato per l'output di misurazione eseguite con stazione topografica o laser.

CYRA - Azienda americana sviluppatrice e produttrice degli scanner *TOF* Cyrax il sito internet è www.cyra.com.

D

DATABASE - Base di dati. Aggregato strutturato di dati. File composto da un certo numero di *RECORD*, ciascuno dei quali è composto da campi associati a un insieme di operazioni che facilita la ricerca, l'ordinamento, la ricombinazione e attività simili.

DECIMAZIONE – Termine utilizzato in relazione alle superfici Mesh e ai modelli tridimensionali digitali in genere, con cui si intende un'operazione che attraverso la semplificazione della geometria dell'oggetto riduce il volume di dati necessari per descriverlo, rendendolo più approssimato, ma al tempo stesso più “leggero” e gestibile.

DIGITALIZZAZIONE - Processo di conversione di una informazione analogica in un insieme di valori numerici, quindi discreti, caratterizzato da una dimensione di campionamento

spaziale o temporale.

DIGITALIZZAZIONE DI UNA

IMMAGINE - Operazione che consiste nella conversione di una immagine, originariamente registrata su supporto cartaceo, in un formato numerico interpretabile da un software. Con questo processo l'immagine risulta suddivisa in celle di risoluzione o *pixel*, a ognuno dei quali è associato un numero. La quantità di *bit* dedicata alla definizione di questo numero è tanto più grande quanto maggiore è il numero dei colori che si vuole ottenere. Questa immagine prende il nome di immagine numerica o immagine digitale e consiste di un insieme di numeri organizzati per righe e colonne: cioè è una matrice di numeri adatta per essere analizzata ed elaborata da un computer. Questa procedura può anche essere detta scansione, per via dello strumento comunemente utilizzato per eseguire la digitalizzazione, lo *scanner*.

DIRECT 3D – Insieme di librerie grafiche sviluppate dalla *Microsoft* per la visualizzazione di modelli digitali tridimensionali per il sistema operativo *Windows*, proposta come alternativa alle librerie *OpenGL* della *Silicon Graphics*. Pur avendo avuto un impiego inizialmente orientato ai videogiochi è comunque ampiamente utilizzata

anche da molte applicazioni *CAD* e di modellazione tridimensionale.

DIRECT X – Pacchetto software di driver e librerie multimediali della *Microsoft* per i sistemi operativi *Windows*, periodicamente ne vengono rilasciate nuove versioni che presentano nuove funzioni e aggiornamenti delle precedenti.

DISCO FISSO - Supporto di memoria di massa del computer dove vengono archiviati dati e programmi destinati a rimanere sul *PC*. In genere è costituito da un disco ricoperto da materiale magnetizzabile, tenuto in rapida rotazione e controllato da testine e sensori.

DITHERING - Sistema per migliorare la resa visiva di immagini digitali create con una profondità colore molto limitata, in genere basata su tavolozze a 4 o 8 bit (rispettivamente 16 o 256 colori). Tramite una disposizione opportunamente casuale dei pixel componenti l'immagine vengono simulate delle sfumature più morbide mentre colori non presenti nella tavolozza vengono simulati con delle combinazioni "a scacchiera" usando il colore più prossimo in combinazione ad altri utili a far percepire la zona campita come più vicina al colore originale.

DPI - Acronimo di *Dots Per Inch*. Punti per pollice, unità di misura della risoluzione di una immagine digitale. Più la misura è grande, migliore è la resa grafica. Una risoluzione di 72 *DPI* significa che per ogni pollice lineare ci sono 72 punti. Nel caso di una superficie quadrata con il lato di un pollice ci saranno 72x72 punti per un totale, quindi di 5184.

DRIVER – Il termine, traducibile con "pilota", indica una componente software, integrata con il sistema operativo, che permette la gestione di una componente hardware o di una periferica, come per esempio una scheda video, una stampante o uno scanner, ogni computer richiede numerosi driver per il corretto funzionamento di tutte le parti del sistema, un certo numero di questi sono già presenti nel sistema operativo (per le componenti standardizzate o per quelle più vecchie e diffuse), ma in molti casi il programma di controllo deve essere appositamente installato per permettere il funzionamento della nuova parte aggiunta.

DVD - Acronimo di *Digital Versatile Disc*. Nuovo tipo di CD-ROM in grado di memorizzare almeno 4.7 GB (e fino a 17 GB), più che sufficienti per memorizzare un intero film compresso

in formato *MPEG-2*.

DXF – Estensione del diffusissimo formato di scambio sviluppato da *Autodesk*, l'acronimo sta per *Drawing eXchange Format*, esiste in varie versioni (le più recenti sono le 12, 13, 14, e 2000) e in compilazioni testuali o binarie. Può contenere dati sia tridimensionali che bidimensionali.

DWG – Estensione del formato di archiviazione di *Autodesk Autocad*, la sigla è la contrazione del termine *drawing* (disegno), esiste in varie versioni (le più recenti sono le 12, 13, 14, 2000 e 2004). Può contenere dati sia tridimensionali che bidimensionali.

E

EMISSIONE - Fenomeno fisico per il quale si ha produzione di radiazione elettromagnetica da parte della superficie di un corpo in funzione della sua temperatura assoluta e dello stato della superficie.

EMISSIVITÀ - Proprietà caratteristica di un mezzo materiale di emettere una radiazione elettromagnetica. Si definisce come il rapporto tra la radiazione emessa da una superficie e quella emessa da una pari superficie di corpo nero alla stessa temperatura. L'emissività

del corpo nero e uguale a 1; per tutte le altre superfici è compresa tra 0 e 1. Il simbolo usato è \square . Si parla di emissività spettrale quando ci si riferisce a un determinato intervallo di lunghezza d'onda dell'energia emessa.

EMISSIVITÀ SPETTRALE - Emissività quando ci si riferisce a un determinato intervallo di lunghezza d'onda dell'energia elettromagnetica.

ESTENSIONE – In *Microsoft DOS* e *Microsoft Windows* (ma anche in altri sistemi operativi) è un gruppo di tre lettere poste alla fine del nome del file e precedute dal carattere “.” (punto). Questa sigla indica il tipo di file e lo standard con cui i dati all'interno sono stati archiviati.

F

FREEWARE – Software con soluzione di licenza d'uso completamente gratuita.

FILE - Il termine inglese significa letteralmente “archivio”, “schedario”. Termine specifico utilizzato nel campo dell'informatica. E' una struttura di dati di lunghezza variabile, generalmente in sequenza nella memoria di lavoro o di massa di un calcolatore. In questa forma vengono organizzate

le informazioni per l'archiviazione, il trasferimento e l'elaborazione.

FIREWIRE (IEEE1394) – Porta di comunicazione veloce per la trasmissione dati tra PC e periferiche esterne, permette di collegare fotocamere digitali professionali, scanner, masterizzatori esterni e altre strumentazioni.

FIRMWARE - Termine recente che indica l'insieme di elementi hardware e di elementi software necessari per gestire quei circuiti integrati micro-programmati capaci di eseguire un insieme di istruzioni via hardware. In molti casi a Firmware può essere fatto corrispondere il termine *BIOS*.

FORMATO - Disposizione dei dati registrati su un supporto secondo regole prescelte. La conoscenza del formato dei dati registrati su un nastro magnetico permette all'utente la lettura e l'utilizzo corretto delle informazioni.

G

GID – *CAD 3D* orientato alla gestione e alla elaborazione della geometria *Mesh* con particolare riferimento al loro utilizzo per le applicazioni di sistemi ad elementi finiti. Sviluppato dalla *CIMNE* è utilizzabile in forma *freeware* (con alcune limitazioni) per

uso accademico.

GIGABYTE (GB) - Unità di misura dell'informazione digitale, corrisponde ad un miliardo di byte.

GIF – Acronimo di *Graphics Interchange Format*, standard per la memorizzazione delle immagini bitmap prodotto da *CompuServe* (1987), per file grafici; consente di archiviare immagini con al massimo 256 colori. È un formato diffuso, supporta qualsiasi tipo di immagine comprese quelle con trasparenze e possiede un algoritmo di compressione (*LZW*) senza perdita di qualità. Il formato *GIF*, riconosciuto da numerosi browser, è stato sviluppato soprattutto per trasmettere immagini su Internet, l'estensione del file è *GIF*.

GIS (GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM) - Un insieme complesso di componenti hardware, software, umane ed intellettive per acquisire, processare, analizzare, immagazzinare e restituire in forma grafica ed alfanumerica dati riferiti ad un territorio.

GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM) – È un sistema che consente, per mezzo di un ricevitore, un

software dedicato e un insieme di satelliti, di determinare la posizione al suolo e l'altimetria di un punto con una precisione che varia da pochi millimetri ad alcuni metri in funzione del tipo di apparecchiatura e delle procedure operative di rilievo.

I

IEEE – Acronimo di *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, istituto degli ingegneri elettrici ed elettronici. Organismo statunitense, senza fini di lucro, che emette le specifiche *IEEE*. -802.3: standard noto come *Ethernet*. - 1394: conosciuto anche come *FireWire* o *iLINK*, si tratta di un bus di connessione, nato per applicazioni audio/video, che trasferisce dati in tempo reale tra le periferiche e il computer alla velocità di 100, 200 o 400 *Mbit/sec*. Al pari dell'*USB*, l'*IEEE 1394* supporta il *Plug and Play* e l'*Hot Plug*, quindi, si possono connettere e sconnettere le periferiche anche con il PC in funzione. *IEEE 1394* supporta fino a 63 dispositivi connessi sullo stesso *BUS* e può utilizzare collegamenti (cavo) lunghi al massimo quattro metri.

IMP – Estensione che identifica i file data-base delle nuvole di punti acquisiti dagli scanner *cyra* e gestiti

dal software cyclone.

INFRAROSSO - Termine che si riferisce alla radiazione elettromagnetica che appartiene alla regione dello spettro elettromagnetico posta oltre il rosso e la cui lunghezza d'onda è compresa da 0.7 a 1000 micron. Nel telerilevamento si distingue in: infrarosso vicino con lunghezza d'onda da 0.7 a 1.3 micron circa; infrarosso medio con lunghezza d'onda da 1.3 a 6 micron circa; infrarosso lontano con lunghezza d'onda da 7 a 15 micron circa. Fino alla lunghezza d'onda di 3 micron la radiazione è sostanzialmente dovuta alla riflessione della radiazione solare e non contiene quindi informazioni circa le proprietà termiche delle superfici; viene quindi anche chiamata infrarosso riflesso. La radiazione con lunghezza d'onda da 7 micron a 15 micron circa viene chiamata infrarosso termico o infrarosso emesso poiché deriva dalla emissione delle superfici a causa della loro temperatura assoluta. Gli intervalli spettrali da 3 a 5 micron e da 8 a 15 micron circa corrispondono, con il visibile, alle finestre atmosferiche più comuni. Nell'intervallo fra 5 e 7 micron circa si ha un forte fenomeno di assorbimento della radiazione da parte del vapore d'acqua: per tale motivo questa regione viene utilizzata dai satelliti meteorologici per gli studi climatici.

INFRAROSSO FOTOGRAFICO

- Particolare intervallo dell'infrarosso che va da 0.7 a 0.9 micron; è detto fotografico perché le pellicole sono sensibili fino a queste lunghezze d'onda.

INTERALLACCIATURA - Termine riferito ad un filmato digitale o ad una immagine digitale tratta da un filmato (o prodotta per essere parte di un filmato) che indica un processo particolare atto a ridurre il peso complessivo del filmato stesso, con l'interallacciatura per ogni fotogramma vengono memorizzate in maniera alternata le linee pari e poi le dispari di pixel, in questa maniera il filmato apparirà comunque omogeneo all'osservatore in virtù della velocità con cui i fotogrammi scorrono (normalmente 25 al secondo), ma la quantità dei dati necessari a descrivere tutto il filmato sarà praticamente dimezzata.

Questo sistema è comunemente adottato anche per le trasmissioni video secondo lo standard europeo PAL e nei sistemi di registrazione video analogici su nastro magnetico (videoregistratori e telecamere).

J

JPEG - Acronimo di Joint Professional (Photographic) Expert Group.

Definisce il più diffuso standard per creare immagini compresse. Viene usato specialmente in ambito grafico (per archiviare immagini fotografiche) perché permette di creare file di dimensioni molto contenute. Non adatto all'archiviazione di immagini che richiedono un alto livello di dettaglio in quanto la compressione applicata è distruttiva.

L

LAN - Acronimo di *Local Area Network* rete locale di computer, ossia limitata ad una zona circoscritta, come ad esempio un ufficio o un edificio. Tra le LAN più diffuse *AppleTalk*, *Ethernet*, *Token-ring*.

LARGHEZZA DI BANDA - Termine che ha più di un significato, per le radiazioni elettromagnetiche è l'intervallo compreso tra le 2 lunghezze d'onda estreme di una banda spettrale. In un'antenna è l'intervallo di frequenze entro cui vengono rispettati alcuni standard specifici per lo scopo per cui è usata l'antenna. Per un segnale è l'intervallo di frequenze al di fuori del quale il segnale risulta attenuato di una qualche specifica frazione del suo valore alla frequenza di riferimento, o frequenza di centro banda. Normalmente negli amplificatori que-

sta frazione è di 3 decibel [db].

LASER - Acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Ormai usato nell'uso comune come parola a sé stante. Dispositivo che genera radiazione elettromagnetica coerente nella parte visibile dello spettro (o nelle immediate vicinanze).

LAYER (LIVELLO) - In CG con il termine *layer* (in alcuni CAD tradotto anche con *Lucido*) si intende una proprietà applicabile ad uno o più elementi disegnati, bidimensionali o tridimensionali, tale da stabilirne una unitarietà di caratteristiche rispetto al resto dello spazio o del disegno. In uno stesso disegno o in uno stesso modello tridimensionale digitale, è possibile definire un numero elevato o anche illimitato (a seconda del software in uso) di *layer*. Con questo sistema è di conseguenza possibile scomporre il disegno in maniera da poterne visualizzare, editare e stampare solo alcune parti, con un significativo aumento della razionalità di quanto prodotto. Il termine è utilizzato sia in programmi di grafica bidimensionale che tridimensionale, sia vettoriale che bitmap. In alcuni programmi la struttura dei layer può essere gerarchica, con la possibilità di definire quali livelli devono essere visualizzati per primi e quali

per ultimi, con conseguente ordine di sovrapposizione.

LEICA GEOSYSTEM - Divisione parte della Leica che si occupa della produzione e distribuzione di strumentazioni per il rilievo, recentemente ha acquistato la Cyra e ne distribuisce gli scanner.

LOGIN - La procedura di ingresso con cui un utente accede ad una rete o ad un computer configurato per la gestione degli accessi, l'operazione inversa, che permette al sistema di documentare l'avvenuta disconnessione dell'utente è detto *LOGOFF*.

LUMINANZA - In un punto di una superficie e in una direzione, è il rapporto fra l'intensità luminosa nella direzione data di un elemento infinitesimo di superficie che circonda il punto considerato, è l'area della proiezione ortogonale di questo elemento infinitesimo su un piano perpendicolare a questa direzione. Per la radiazione visibile è l'equivalente della radianza.

LUMINOSITÀ - Una delle tre grandezze caratteristiche necessarie alla descrizione di un colore insieme alla tinta e alla saturazione.

LUNGHEZZA D'ONDA - Distanza media fra due massimi o due minimi di un'onda che rappresenta un fenomeno periodico Per la radiazione elettromagnetica è il rapporto tra la velocità e la frequenza: $\lambda = v/f[m]$

Spesso, come unità di misura, si usano dei sottomultipli del metro: millimetri per le onde radar o microonde, micron per il visibile e l'infrarosso.

J

JUMPSTATION - Letteralmente "stazione di salto", con questo termine si indica una pagina Internet che raccoglie una collezione (più o meno settoriale o organizzata) di collegamenti ad altre risorse presenti sulla rete.

M

MACCHINA A PROCESSO NUMERICO - Con questa dizione si indicano quelle periferiche in grado di elaborare un dato metrico spaziale digitale e convertirlo in operazioni da eseguire con un insieme di utensili automatizzati. Le macchine a processo numerico possono modellare, per sottrazione di materia o per colaggio, una varietà di materiali, sia per produrre modelli finali sia per produrre prototipi di quanto elaborato attraverso un software *CAD-CAM*.

MESH - Letteralmente "rete", in grafica digitale il termine indica la famiglia delle forme basate sulla geometria poligonale, ovvero superfici definite da entità lineari e da punti tra cui vengono sottese delle facce triangolari. Le *mesh* sono perfette per la descrizione di elementi geometrici composti da superfici piane, di qualunque complessità e varietà, ma ai fini della definizione di elementi curvi, richiedono la scomposizione delle linee curve in segmenti, che a meno di un infittimento particolarmente spinto, risulteranno manifeste nei punti di vista ravvicinati, presentando quindi la curva come una spezzata poligonale. La soluzione a questo problema di visualizzazione comporta la suddivisione della curva in un'infinità di segmenti, con un grande aumento del volume dei dati necessario per la descrizione dell'elemento, e suo conseguente aumento di "peso" ai fini della gestione. Tuttavia, la grande diffusione e l'elementarità della costituzione del tipo di file rende molto diffusi e compatibili i formati che utilizzano le *mesh* per la descrizione degli elementi geometrici.

MONOCROMATICO - Termine che si riferisce a una radiazione costituita da una sola lunghezza d'onda o, più precisamente, da un intervallo molto ristretto di lunghezza d'onda.

MOTORE DI RICERCA (SEARCH ENGINE) - Archivio database con interfaccia di accesso dall'esterno che permette la ricerca di risorse catalogate al suo interno sulla base di parole chiave liberamente espresse dall'utente. I database archiviano per la maggior parte il contenuto delle pagine dei siti Internet e ne verificano periodicamente la sussistenza. In questo modo l'utente può individuare rapidamente dove si trovano informazioni utili alle proprie necessità.

MPEG - Acronimo per *Motion Photo Export Group*, con cui si indica un sistema di compressione distruttiva ottimizzata per le applicazioni video digitali, si tratta di un sistema molto efficiente che permette di mantenere elevata la qualità delle immagini senza richiedere la memorizzazione di grandi quantità di dati. MPEG esiste in molte versioni, le due maggiormente diffuse sono MPEG-2 utilizzato per la memorizzazione dei filmati distribuiti su DVD Video e MPEG-4, impiegato in alcuni CODEC molto diffusi per la produzione di filmati digitali in CG come il DivX e XviD.

N

NETWORK (RETE) - Un sistema di comunicazioni che unisce due o più

computer. Questo può essere semplice, come un cavo di pochi metri steso tra i due computer, o complesso, come centinaia di migliaia di computer in tutto il mondo collegati attraverso cavi a fibre ottiche, linee telefoniche e satelliti.

NURBS – Acronimo per *Non Rational B-Spline*, con cui si indica la famiglia delle forme geometriche digitali definite sulla base delle tangenti relative agli elementi a questi sottese, gli elementi di controllo delle tangenti sono definiti *Vertici di Controllo* (CV, *Control Vertex*). L'impiego di questi generi geometrici ha rivoluzionato la grafica digitale tridimensionale nell'arco degli anni '90 e a tutt'oggi è utilizzata in sempre più ampi e complessi campi di applicazione. La struttura delle NURBS permette di descrivere curve complesse, siano queste applicate a linee o superfici con una quantità di dati estremamente esigua rispetto alla geometria poligonale, infatti, il controllo basato sulle tangenti di controllo della curvatura rende possibile l'ottenimento di elementi curvi perfettamente continui sulla base di anche due soli punti di controllo, liberandosi quindi dalla necessità di descrivere la posizione di numerosi segmenti e punti in cui la curva deve essere suddivisa nella geometria poligonale. In questo modo,

inoltre gli elementi rappresentati hanno un livello qualitativo svincolato dalla scala di rappresentazione.

O

OBJ - Estensione corrispondente al formato di file tridimensionali *Object*, sviluppato da *Alias|Wavefront*, e attualmente impiegato soprattutto come formato di scambio tra applicazioni 3D.

OpenGL – Si tratta di un insieme di librerie software per la creazione di un'interfaccia con l'hardware grafico, che consiste di circa duecentocinquanta funzioni, che permettono di produrre grafica tridimensionale in tempo reale. Questo componente software è stato rilasciato come standard per la grafica 3D da Silicon Graphics alla fine degli anni ottanta. Il nome della libreria (*Open Graphic Language, Linguaggio Grafico Aperto*) fa prefigurare gli scopi dei suoi creatori: una libreria grafica aperta: infatti è disponibile per l'impiego su moltissime piattaforme, dai super computer di *Silicon Graphics* ai PC sia con Windows che con Linux, e su Macintosh. OpenGL è stata realizzata in modo da poter essere hardware indipendente; per raggiungere questo obiettivo non esistono comandi per la gestione delle finestre e degli eventi

di input, che dovranno essere gestiti nel particolare sistema operativo e nel particolare hardware in cui si lavora. Le applicazioni che fanno uso delle procedure OpenGL sono particolarmente impiegate in ambiente CAD, per visualizzare i modelli digitali tridimensionali.

OS – Operative System (Sistema Operativo).

P

PARALLASSE - Cambiamento apparente nella posizione di un oggetto rispetto a un altro quando è visto da due posizioni diverse di osservazione o di ripresa. Si misura in gradi. Un esempio di parallasse si ha quando si osserva lo stesso oggetto prima con un occhio poi con l'altro.

PIXEL - Termine derivato dalla fusione dei termini inglesi "picture element". Data un'immagine digitale si dice pixel ognuna delle superfici elementari che la costituiscono. Ogni pixel è caratterizzato da tre valori: due coordinate che individuano la posizione del pixel all'interno dell'immagine (numero di riga e numero di colonna quando l'immagine è considerata come matrice) e il numero indice che lo correla ad un valore cromatico. L'insieme

dei pixel costituisce un'immagine così come l'insieme delle celle di risoluzione costituisce una scena. Ogni pixel corrisponde a una cella di risoluzione sull'oggetto le cui dimensioni sono delimitate dalle caratteristiche dello strumento che riprende la scena, mentre il numero indice del pixel rappresenta la radianza media nel particolare intervallo spettrale in cui il sensore vede la cella di risoluzione a terra corrispondente a quel pixel. Rappresentare o misurare una scena con un insieme di pixel - immagine digitale - costituisce una forzatura poiché si sostituisce una visione discreta a una visione analogica della realtà. Tanto più piccola è la cella di risoluzione corrispondente al pixel sull'oggetto ripreso, maggiori sono i dettagli conservati nella rappresentazione digitale, ma tanto più grande sarà il numero di pixel necessari a questa rappresentazione. Ai vantaggi della grande quantità di informazioni si oppongono gli svantaggi per dover elaborare una grande massa di dati.

PLUG-IN - Accessori software che integrano le funzioni di un programma esistente. Ad esempio, il plug-in *Cosmo Player* consente al browser Netscape Navigator e Internet Explorer la visualizzazione di file *VRML*, mentre il plug-in *Andromeda Doc Lens* per

Photoshop permette al programma di correggere la deformazione a barilotto nelle foto digitalizzate.

PROFONDITÀ DI CAMPO -

Distanza misurata lungo l'asse ottico del sistema di ripresa, nella quale gli oggetti della scena risultano nitidamente definiti.

PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE -

Lunghezza del percorso che può compiere una radiazione elettromagnetica attraverso il mezzo nel quale si propaga prima di essere totalmente assorbita.

Q

Q-Splat – Software di visualizzazione di modelli tridimensionali digitali definiti da superfici o nuvole di punti sviluppato da Szymon Rusinkewicz e Gary King della Leland Stanford Junior University.

QUICK TIME - Formato di registrazione di dati realizzato dalla Apple e utilizzato, da diversi software, per la memorizzazione e riproduzione di riprese audio e video.

R

RENDERING – Termine generico,

traducibile con “immagine di resa grafica” che in CG tende ad indicare per lo più immagini fotorealistiche ottenute a partire da modelli tridimensionali digitali.

RADIAZIONE - Energia emessa o propagata attraverso un mezzo materiale o attraverso lo spazio vuoto sotto forma di onde. Si hanno, per esempio, le onde elettromagnetiche o fotoni, le onde corpuscolari o raggi α e β , le onde sonore ed elastiche.

RADIAZIONE ASSORBITA -

Radiazione che non viene né trasmessa né riflessa quando incide su materiali trasparenti od opachi. Tale radiazione viene trasformata, all'interno del materiale, in un altro tipo di energia, spesso energia termica.

RADIAZIONE ELETTRO-

MAGNETICA - Energia che si propaga alla velocità della luce sotto forma d'onde vettoriali trasversali attraverso lo spazio o mezzi materiali con i quali interagisce, eventualmente trasformandosi in altra forma di energia. Il vettore campo elettrico e il vettore campo magnetico che la costituiscono vibrano perpendicolarmente tra loro e in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione della radiazione stessa. La radiazione elet-

tromagnetica può essere descritta in forma ondulatoria o in forma corpuscolare secondo la lunghezza d'onda e secondo il tipo di interazione con cui si rivela. Caratteristiche della radiazione elettromagnetica sono: la direzione di propagazione, le diverse bande spettrali, l'intensità in ogni banda, la polarizzazione, la fase, la frequenza, l'ampiezza.

RAM – Acronimo di Random Access Memory. Memoria per computer di tipo volatile ad accesso casuale. È un'area di memoria temporanea nella quale i dati e i programmi risiedono fino a quando non vengono salvati su memoria di massa. Come RAM comunemente si indica la memoria interna principale del computer, formata da microchip e misurata in megabyte.

RAPPORTO D'ASPETTO -

Rapporto tra la larghezza e l'altezza di una immagine, varia a seconda della natura dell'immagine e del tipo di display in uso. L'*aspect ratio* dei display è solitamente di 4:3 (per esempio, una tipica risoluzione, è di 800 per 600 punti), ma sta sempre più prendendo piede il 16:9 che è già piuttosto diffuso nei televisori.

RIFLETTANZA - La riflettanza definisce la proprietà di una superficie

di riflettere una maggiore o minore quantità di luce.

Quindi, se prendiamo due superfici di grigi diversi ma colpite dalla stessa quantità di luce, la variazione che si constata è dovuta solo alla riflettanza. L'equivalente fenomenico della riflettanza è la bianchezza e si riferisce all'impressione che l'osservatore ha del diverso colore degli oggetti, a parità di illuminazione.

RHINOCEROS 3D – È il modellatore *NURBS* sviluppato dalla *software house McNeel*, si tratta di un programma molto efficiente e affidabile, dal costo contenuto, al momento è arrivato alla versione 3.0. Il suo formato di archiviazione dei dati è il *3DM*.

S

SATURAZIONE - Una delle tre grandezze caratteristiche necessarie alla descrizione di un colore insieme alla tinta e alla luminosità. Nel diagramma tridimensionale di Munsell la saturazione è quella dimensione del colore che va dal valore zero al valore 100 partendo, dalla scala dei grigi (asse del diagramma) fino al colore puro (situato sul bordo del diagramma). È un indice dell'assenza di luce bianca: infatti la luce bianca fa diminuire la saturazione, cioè schiarisce il colore.

Rappresenta la condizione in cui un segnale va al di fuori dell'intervallo di risposta di uno strumento.

SCALA DI GRIGI - Serie calibrata, discreta o continua, di toni grigi che vanno dal bianco al nero. Può servire a controllare la riproduzione di un cliché fotografico oppure a valutare la quantità di radiazione raccolta su una immagine.

SCANNER – Genericamente: sistema hardware di digitalizzazione di un oggetto reale, l'operazione viene comunemente compiuta attraverso la sua scomposizione in elementi più piccoli (pixel oppure punti vettoriali). La scansione di un oggetto può produrre un documento bidimensionale (prevalentemente un'immagine bitmap) oppure un file tridimensionale (una nuvola di punti identificati da coordinate e da valori cromatici, eventualmente associati ad una presa di tipo bitmap).

SCANNER 2D A RULLO – Scanner analogo per caratteristiche allo scanner piano, ma predisposto per acquisire da supporti flessibili di grande formato, comunemente dal formato UNI A2 in poi, la scansione avviene trascinando il foglio attraverso dei rulli e mettendolo quindi in movimento rispetto al

sensore di acquisizione.

SCANNER 2D PIANO – Scanner che permette l'acquisizione da un piano di formato determinato, producendo documenti bidimensionali in formato bitmap; i formati di acquisizione sono in genere l'UNI A4 o l'UNI A3. La risoluzione dello scanner determina la densità dei punti con cui l'immagine viene scomposta, questo valore è misurato in DPI. La gamma cromatica percepibile dallo scanner dipende invece dalla sensibilità del sensore che viene misurata in Bit (8 Bit indica un campionamento di 256 colori, 24 Bit di oltre 16 milioni).

SCANNER 2D PER DIAPOSITIVE – Scanner analogo per caratteristiche allo scanner piano, ma predisposto per acquisire da supporti trasparenti come diapositive, negative e lastre radiografiche, di vario formato. Data la ridotta dimensione degli elementi che si devono acquisire il sensore tende ad avere una risoluzione molto alta rispetto ai modelli piani.

SCANNER 3D OLOGRAFICO – Sistema analogo allo Scanner a triangolazione per quel che riguarda il tipo di dati raccolti, ma differente per la tecnologia di misurazione.

Il fascio laser impiegato è infatti

coassiale e non inclinato rispetto a quello di ritorno, il vantaggio principale è quello di poter analizzare fori di diametro molto piccolo e superfici fortemente inclinate. Il principio di funzionamento è basato sulla olografia conoscopica, ovvero sulle differenze di cammino fra il raggio ordinario e quello straordinario generati in un cristallo monoassiale.

SCANNER 3D TOF – L'acronimo TOF sta per Time Of Flight (Tempo di Volo), Il funzionamento della tecnologia TOF è relativamente semplice: la testa ottica del Laser Scanner emette un segnale laser che raggiunge l'elemento che si vuole rilevare, una certa quantità di energia del raggio originale viene riflessa verso lo strumento che è predisposto per poter avvertire il segnale. La distanza del punto dallo strumento viene determinata sulla base del tempo impiegato nello svolgimento dell'azione appena descritta. Il sistema di misurazione dello scanner si basa quindi sulla conoscenza della distanza del punto e degli angoli zenitali ed azimutali del raggio emesso per determinare l'esatta collocazione spaziale del punto raggiunto che viene rappresentato in uno spazio tridimensionale digitale. Le attuali tecnologie permettono di registrare punti con questo metodo con una velocità di

alcune centinaia di acquisizioni al secondo, inoltre la distanza tra due punti battuti uno dei seguito all'altro può essere anche inferiore al centimetro, sia in orizzontale che in verticale. Il sistema di acquisizione produce quindi una "nuvola di punti" dove per ogni punto battuto si conoscono i valori delle coordinate spaziali (secondo un sistema di coordinate con centro posto nelle sorgente del laser) e il valore di riflettanza del punto stesso.

SCANNER 3D A TRIANGOLOLAZIONE – Sistema analogo allo Scanner TOF per quel che riguarda il tipo di dati raccolti, ma differente per la tecnologia di misurazione. In questo caso infatti la misurazione avviene sfruttando un algoritmo basato sul metodo dei minimi quadrati, dove vengono colti punti omologhi su coppie di immagini rappresentanti viste del medesimo oggetto.

La maggior parte di questi scanner utilizzano una striscia di luce orizzontale attraverso una lente cilindrica che raggiunge l'oggetto e il cui riflesso, percepito da un sensore CCD e quindi permette il calcolo della posizione del punto per triangolazione. Il processo viene quindi ripetuto inviando una seconda striscia di luce, questa volta verticale. La risoluzione varia a seconda della distanza dello scanner dall'ogget-

to e/o dall'inclinazione dell'oggetto rispetto alla sorgente.

SCANNERIZZAZIONE – Termine improprio e cacofonico per “*eseguire una scansione*”. Con questa espressione in genere si indica un processo di digitalizzazione di un'immagine o di un disegno.

SEGNALE - Impulso di energia elettromagnetica che trasporta informazioni e che viaggia in un sistema di comunicazione.

Nei sensori i segnali vengono ricevuti dalla scena e convertiti in altra forma per essere trasmessi al sistema di trattamento.

SENSORE - Qualsiasi dispositivo che raccoglie l'energia elettromagnetica proveniente dalla scena e la converte in un segnale elettrico che porta informazioni relative alla scena stessa. Sotto questo termine, per assimilazione, viene anche designata la camera fotografica.

SERVER - Tipicamente, in una rete locale o Internet, *client* è il programma dell'utente che chiede informazioni, mentre server è il programma remoto che le fornisce, un server FTP ad esempio è un programma che ospita i file resi disponibili perché possano essere

prelevati in qualunque momento da utenti al lavoro su computer posti in altre locazioni). In senso generale, con il termine server si indica un computer dove, per via software è stata concretizzata una situazione che rende quel computer fornitore di un servizio o di accesso a delle risorse.

SHAREWARE - Software che può essere prelevato dalla rete, copiato e distribuito senza oneri aggiuntivi al fine di essere provato gratuitamente ma che prevede, dopo un certo periodo d'uso in prova (normalmente quindici o trenta giorni), l'acquisto del prodotto per poterne continuare l'impiego.

SINTESI ADDITIVA - Metodo per la riproduzione di un qualsiasi colore mediante la somma, in proporzione conveniente, dei tre colori primari additivi, blu, verde e rosso, utilizzando tre sorgenti di luce.

In pratica si realizza con tre proiettori davanti ai quali viene posto rispettivamente un filtro blu, uno verde e uno rosso; ognuno di essi assorbe le altre due luci primarie e trasmette circa 1/3 dell'energia luminosa della sorgente. Nel punto in cui i tre fasci di luce si sovrappongono l'effetto visivo è la percezione del bianco, poiché tutti e tre i sistemi ricettori dell'occhio umano sono stimolati in uguale misura.

La luce bianca quindi può essere pensata come mescolanza di blu, verde e rosso: Bianco = blu + verde + rosso ~ Ciano = blu + verde ~ Magenta = blu + rosso ~ Giallo = verde + rosso

SINTESI DEI COLORI - Procedimento di costruzione dei colori mediante la mescolanza in opportune proporzioni dei colori primari e/o colori complementari.

SINTESI SOTTRATTIVA - Metodo per la riproduzione di un qualsiasi colore mediante la sottrazione alla luce bianca dei tre colori primari sottrattivi - ciano, magenta e giallo - in proporzione conveniente e utilizzando una sola sorgente di luce. La fotografia a colori è basata sulla sintesi sottrattiva mediante filtri ciano, magenta e giallo sovrapposti. Per esempio se poniamo davanti a una sorgente di luce bianca due filtri sovrapposti, uno magenta e uno giallo entrambi al 100 %, si ottiene il rosso poiché il filtro Magenta assorbe la luce verde e trasmette quella blu e rossa, mentre il filtro giallo assorbe la luce blu e trasmette quella verde e rossa. Ciano, magenta e giallo sono detti primari sottrattivi poiché sono complementari dei colori primari additivi: Ciano = rosso ~ Magenta = verde ~ Giallo = blu

SISTEMA OPERATIVO – Software

complesso che permette il funzionamento di un calcolatore secondo una determinata interfaccia, che permette di conciliare le procedure operative dell'operatore con le procedure di calcolo del computer.

I sistemi operativi più recenti utilizzano tutti delle interfacce grafiche, ovvero delle forme grafiche che rappresentano con simboli e immagini i dati che vengono gestiti ed elaborati e permettono di operare in forma grafica la creazione di documenti di ogni genere. I sistemi operativi maggiormente diffusi sono quelli della casa produttrice americana Microsoft (varie versioni del DOS e dal 1995 in poi di Windows), sono comunque molto diffusi anche i sistemi *Linux*, e *MacOS*, mentre hanno una diffusione minore, soprattutto legata a specifici tipi di computer i sistemi operativi *AIX*, *Irix*, *Solaris*, *OS2*, *BeOS*, *QNX*.

SPETTRO - Distribuzione dell'energia elettromagnetica in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda quando un fascio di radiazione, proveniente da una sorgente, viene sottoposto ad una dispersione. Per esempio, i colori dell'arcobaleno che si formano oltre il prisma di vetro sono lo spettro della luce bianca che ha attraversato il prisma. Ciò mette in evidenza le componenti elementari di una radia-

zione. Si può quindi aggiungere che lo spettro di una sorgente di energia è la scomposizione della radiazione nelle sue componenti elementari secondo la frequenza o la lunghezza d'onda. Più in generale in fisica, qualsiasi serie di energie ordinate secondo la lunghezza d'onda o la frequenza.

SPETTRO DI ASSORBIMENTO

- Insieme delle bande di assorbimento che si ottengono facendo passare la radiazione proveniente da una sorgente a spettro continuo attraverso un mezzo che assorbe selettivamente avendo una temperatura inferiore rispetto a quella della sorgente.

SPETTRO CONTINUO - Uno spettro per il quale le lunghezze d'onda e le frequenze sono rappresentate dall'insieme continuo dei numeri reali o da una parte di esso, invece che da una successione discreta di numeri. Per quanto riguarda l'energia elettromagnetica, che mostra una variazione graduale di intensità al variare della lunghezza d'onda da un estremo all'altro, come per esempio lo spettro di un materiale solido incandescente.

SPETTRO

ELETTROMAGNETICO - L'insieme ordinato, di solito secondo la lunghezza d'onda o l'infrequenza,

delle radiazioni.

SUBDIVISION SURFACE - Con il termine *Subdivision Surface*, si indicano delle forme geometriche digitali prodotte secondo un metodo di generazione di superfici curve generate a partire da una *mesh* poligonale, ed elaborandola attraverso la sostituzione dei poligoni che la compongono con elementi più piccoli generati sulla base di una formula estrapolata a partire dalle facce che precedentemente costituivano la *mesh*.

La nuova superficie così generata avrà una forma più morbida e se l'operazione di generazione viene compiuta più volte il risultato si approssimerà sempre di più ad una curva. L'operazione di trasformazione della *mesh* può generare una nuova *mesh* oppure delle superfici *NURBS*, in quest'ultimo caso, in alcuni software per la modellazione questo tipo di superfici è anche detto *HyperNURBS*.

STL - Estensione per i file in formato *STereoLito*, un formato di archiviazione molto diffuso per lo scambio di dati tra applicazioni CAD-CAM e sistemi a processo numerico.

T

TELERILEVAMENTO - Insieme di

tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono l'acquisizione a distanza di informazioni qualitative e quantitative su fenomeni o oggetti, senza entrare in contatto con essi.

TERMOGRAFIA - Tecnica che, utilizzando la radiazione elettromagnetica proveniente dalla scena nella banda dell'infrarosso termico o nella banda delle microonde, permette di costruire una immagine relativa alla distribuzione delle temperature superficiali di un oggetto. Con tale termine si indica spesso anche l'immagine ottenuta con questa tecnica, invece di usare più correttamente il termine termogramma.

U

URL - Acronimo di *Universal Resource Locator*. Rappresenta il percorso di memorizzazione degli oggetti all'interno del WWW. Tipicamente è costituito da tre parti: il nome del servizio, il nome del server o del sito e il nome del documento o del file. La prima parte può essere, per esempio, "*http://*" che rappresenta il servizio *Hyper Text Transfert Protocol* usato per leggere le pagine e navigare attraverso i collegamenti ipertestuali delle pagine stesse. Spesso viene usato anche il servizio "*FTP://*" (*File Transfert Protocol*) per trasferire file o documenti da un server

a un'altra destinazione. La seconda parte, che inizia normalmente con *WWW* contiene il nome del server o del sito e finisce con un suffisso che ne indica il tipo (es. ".com" se commerciale, ".edu" se scolastico/universitario, ".it" se italiano, ecc.). Infine la terza parte, quando è presente, indica dove si trova la pagina all'interno del server o sito.

USB - acronimo per *Universal Serial Bus*, si tratta di uno standard hardware che facilita la connessione di periferiche quali *mouse*, *modem*, tastiera, *joystick* ecc. A questi "ingressi" si possono collegare, in cascata, fino a 64 elementi. Lo standard *USB 1.1* raggiunge la velocità di comunicazione di 1,5 *MByte/s* mentre, *USB 2.0*, raggiunge velocità di 60 *MByte/s*.

V

VRML - Acronimo per *Virtual Reality Markup Language* (successivamente evoluto in *Virtual Reality Modelling Language*), con questo termine si tende ad indicare un modello tridimensionale digitale con proprietà di consultazione interattiva, i modelli *VRML* permettono la visualizzazione in tempo reale del modello, con qualità prossima a quella fotorealistica, con la possibilità di accedere a informazioni testuali, grafiche o ad altri modelli

VRML attraverso dei collegamenti contenuti nel modello stesso.

W

WORLD WIDE WEB - “grande ragnatela mondiale”. Servizio Internet che permette di stabilire collegamenti ipertestuali tra documenti memorizzati su computer connessi ad Internet, detti *Web Server*.

In questo modo un utente durante la consultazione può saltare da un documento all'altro, con un clic del mouse, senza curarsi di dove si trovino fisicamente i relativi Server. I documenti *WWW* sono chiamati pagine e possono contenere sia testo che grafica. Il programma di lettura è detto *Browser*.

WORKSTATION – Con questo nome viene comunemente indicata una postazione di lavoro informatizzata per estensione identifica un computer. Con la dizione *Workstation* grafica si identifica un computer configurato in maniera specifica per le applicazioni *CAD* e *DTP*.

WRL – Estensione tipicamente associata a file con contenuti *VRML*.

WYSIWYG - Acronimo di “*What You See Is What You Get*”, ovvero: “*quello che*

vedi è quello che ottieni”. Si riferisce a tutti quegli editor (di testo, di grafica, di pagine HTML) che mostrano il documento così come verrà visualizzato nella sua forma compiuta via via che questa viene definita (stampata o pubblicata in Internet).

Y

YUV - È il formato base del segnale video analogico usato nei sistemi *NTSC*; descrive le immagini impostando la luminosità ed il colore per tutti i punti di cui sono composte. Le due informazioni vengono tenute distinte perché l'occhio umano è più sensibile alle variazioni di luminosità anziché alle variazioni di colore.

Quest'ultimo parametro viene codificato in forma compressa ed occupa meno spazio che se fosse in *RGB*.

Il nome *YUV* deriva dai nomi convenzionali assegnati ai due parametri: *Y* e *UV*.

Z

Z-BUFFER - Memoria della scheda grafica che si occupa dell'elaborazione dei dati relativi all'asse *Z*, o comunque della distanza del pixel preso in considerazione dalla posizione del punto di osservazione, delle immagini digitali prodotte con un processo di rende-

ring a partire da un modello digitale tridimensionale.

ZIPPATO - Termine in uso, dagli utilizzatori, per indicare un archivio o un file compresso.

Tale termine deriva dalla caratteristica estensione *.ZIP* generata da una delle più diffuse *utility* di compressione il *PKZIP* originariamente *WINZIP* in seguito.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia per l'architettura del Battistero e per il Battistero di Pisa

- AA.VV. *L'architettura religiosa in Toscana*, Amilcare Pizzi per Banca Toscana, Milano 1995
- AA.VV. *Lineamenti di storia dell'Architettura*, Carucci Editore, Roma, 1988
- AA.VV. a cura di Enzo Carli, *Il Duomo di Pisa. Il Battistero. Il Campanile*, Edizioni Nardini, Firenze, 1989
- AA.VV. a cura di B. Gravagnuolo, *Le Corbusier e l'antico. Viaggi nel Mediterraneo*, Electa, Bari 1997
- AA.VV. a cura di A. Fliche e V. Martin, *Dalla pace costantiniana alla morte di Teodosio (313-395)*, collana Storia della Chiesa, volume 3, San Paolo Edizioni, 1995
- AA.VV. a cura di Ruggero Iorio, *Battesimo e battisteri*, collana Biblioteca patristica, EDB, Firenze, 1993
- Eugenio Alliata, *Battesimo e battisteri in Gerusalemme e nei luoghi santi della Palestina*, in *Tierra Santa*, Custodia Franciscana della Terra Santa, 2000
- Guido Carlo Argan, *L'architettura protocristiana, preromanica e romanica*, Firenze, 1936
- Peleo Bacci, *Per la istoria del Battistero di Pisa, Maestro Zibellino da Bologna e il coronamento marmoreo della cupola*, Pisa, 1919
- Ottavio Banti, *Breve storia di Pisa*, Pacini editore, Pisa, 1989
- G. Bardy, *La conversione al Cristianesimo nei primi secoli*, Edizioni Città del Vaticano, Milano, 1975.
- Antonio Caleca e Aurelio Amendola, *La dotta mano – Il Battistero di Pisa*, Edizioni Bolis, Bergamo, 1991
- Erica Carotenuto, *Tradizione e innovazione nella Historia ecclesiastica di Eusebio di Cesarea*, Il Mulino, 2001
- Pietro Cavallo, *I battisteri del periodo paleocristiano: forme e tipologie - Il modello fiorentino di S. Giovanni e il battistero paleocristiano di Pisa*. Tesi di Laurea in Architettura, relatore professor Marco Cardini. Firenze, 1997
- Monica Chiellini Nari, *Le sculture nel Battistero di Pisa*, Pacini editore, Pisa, 1989
- Carlo Cresti e Luigi Zangheri, *Architetti e ingegneri nella Toscana dell'Ottocento*, Uniedit, Firenze, 1978
- Edward Cresy, G.L. Taylor, *Architecture of the Middle Ages in Italy: illustrated by views, plans, elevations, sections, and details, of the Cathedral, Baptistry, Leaning Tower or Campanile, and Campo Santo, at Pisa: from drawings and measurements taken in the year 1817*, London, 1829
- Oscar Cullmann, *Les sacrements dans l'évangile johannique*, Parigi 1951
- Jean Daniélou, *I simboli cristiani primitivi*, Edizioni Arkeios Roma, 1997
- Piero Degl'Innocenti, *Le origini del Bel San Giovanni – da tempio di Marte a battistero di Firenze*, Edizioni CUSL, Firenze, 1994
- Gabriella Garzella, *Pisa com'era: Topografia e insediamento dall'impianto tardoantico alla città murata del secolo XII*, presentazione di Gabriella Rossetti, Liguori Editore, Napoli 1990
- Annarosa Garzelli, *Il Fonte del Battistero di Pisa – cavalli, arieti e grifi alle soglie di Nicola Pisano*, Pacini editore, Pisa, 2002
- G. Giovannoni, *Proposta di un Corpus dei battisteri dai bassi tempi al secolo XIII*, Biblioteca Civica di Milano, N-Var 1941
- Giuliano Gresleri, *Le Corbusier, Viaggio in Oriente*, Marsilio, Venezia 1984
- Giuliano Gresleri, *Le Corbusier, Viaggio in Toscana*, Marsilio, Venezia 1987
- H.E. Kubach, *Architettura Romanica*, Electa, Venezia 1978
- Giampiero Lucchesi, *Trasformazioni ottocentesche degli edifici non monumentali nella zona orientale della piazza del Duomo*, Opera Primaziale Pisana, Pisa, 1987
- Franca Manenti Valli, *Il Battistero di Pisa, Un percorso matematico per la restituzione del progetto originario*, in Bollettino degli Ingegneri n. 3 marzo 2003.
- Giuseppe Martini, *Theatrum Basilicae Pisanae*, De Rossi, Roma, 1705
- Antonio Monelli, *I Cinquanta magnifici battisteri d'Italia*, Nuove Edizioni Duomo, Milano, 2000

- M. Navoni, *La concezione liturgico-rituale del battesimo in epoca medievale*, in *Il Battistero di Parma. Iconografia, iconologia, fonti letterarie*, a cura di G. Scianchi, Casa editrice Vita e Pensiero, Milano, 1999
- A. Niccolai, A. Manghi, F. Severini, *Gli scavi nel Camposanto monumentale nel 1939*, Pisa, 1942
- Letizia Pani Ermini e Daniele Stiaffini, *Il battistero e la zona episcopale di Pisa nell'alto medioevo*, Pacini editore, Pisa, 1985
- Pio Pecchiai, *L'opera della Primaziale Pisana. Notizie storiche e documenti. Elenco degli operai. Regesto dei diplomi a tutto il dodicesimo secolo*, Edizioni Mariotti, Pisa, 1905.
- Piero Pierotti e Laura Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001
- Fabio Redi, *Pisa. Il Duomo e la Piazza*, Silvana Editoriale, Milano 1996
- Emanuele Repetti, *Dizionario geografico fisico storico della Toscana contenente la descrizione di tutti i luoghi del Granducato ducato di Lucca Garfagnana e Lunigiana*, presso l'autore, Firenze, 1833- 46, 5 vol. e suppl.
- Georges Rohault De Fleury, *Edifices de Pise, relevés, dessinés et décrits*, Bance, Paris, 1862
- Georges Rohault De Fleury, *Les Monuments De Pise Au Moyen Age*, Morel, Paris, 1866
- Paolo Sanpaolesi, *Il Duomo di Pisa e l'architettura romanica toscana delle origini*, Pisa, 1975
- Leonello Tarabella, *Controllo gestuale di musica informatica e pensiero geometrico, in atti del convegno "Capire e creare la musica, algoritmi geometrici e frattali, modelli fisici e strutture percettive"*, Caserta, 21-22 giugno 2001, Seconda Università degli Studi di Napoli.
- Francesco Tentori e Rosario de Simone, *Le Corbusier*, Editori Laterza, Bari 1993.
- Maria Laura Testi Cristiani, *Nicola Pisano architetto scultore. Dalle origini al pulpito del Battistero di Pisa*, Pacini editore, Pisa, 1987
- Emilio Tolaini, *Forma Pisarum. Storia urbanistica della città di Pisa. Problemi e ricerche*, Edizioni Nistri Lischi, Pisa, 1979
- Monica Vannucci, *La firma dell'artista nel medioevo: testimonianze significative dei monumenti religiosi toscani dei secoli XI-XIII*, in *"Bollettino storico pisano"*, LVI, 1987, Pacini editore, Pisa, 1987
- Eugène Viollet le Duc, *Encyclopédie Médiévale*, Bibliothèque de l'Image, ristampa anastatica, 1978
- Stephen Williams e Gerard Friell, *Teodosio. L'ultima sfida*, collana Dimensione Europa ECIG 1999
- Laura Zampieri, *Pisa nell'Ottocento, testimonianze iconografiche a stampa del mutamento di una città*, Bandecchi & Vivaldi Editori, Pontedera, 1994
- Bruno Zevi, *Controstoria dell'Architettura in Italia - Preistoria e Medioevo*, Tascabili Economici Newton, Roma 1995

Bibliografia per il gli strumenti impiegati

- AA.VV. a cura di Marcello Balzani, *Dossier Informatica per il progetto, Ufficio Tecnico 9*, Maggioli Editore, Rimini, 2002
- AA.VV. a cura di Paolo Brandinelli, *Note di supporto al corso, Architettura Digitale, numero 2*, edito in proprio, Firenze, 2002
- AA.VV. a cura di Riccardo Migliari, *Frontiere del Rilievo. Dalla Matita alle scansioni 3D, collana Strumenti del Dottorato di Ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente*, Gangemi Editore, Roma, 2001
- AA.VV., *LEARNING MAYA 4*, Alias Wavefront, Canada, 2001
- Martin D. Adams, *LIDAR Design, Use and Calibration Concepts for Correct Environmental Detection*, in *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. XX, 1999
- Jain Anil K., *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall, 1988
- C. L. Bajaj, F. Bernardini e G. Xu, *Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans*, in *SIGGRAPH '95 PROCEEDINGS*, pp. 109-118, 1995
- J.A. Beraldin, F. Blais, *Active 3D sensing*. Scuola Normale Superiore Pisa, Centro di Ricerche Informatiche per I Beni Culturali, *Quaderni*, pp. 10- 21, Pisa 2000
- J. A. Beraldin, F. Blais, L. Cournoyer, G. Godin e M. Rioux, *Unione di Ambienti Virtuali con il nostro Mondo Reale attraverso immagini 3D digitali ad alta risoluzione di oggetti e strutture*, in *Supplemento a Paesaggio urbano n° 4*, luglio-agosto, pp. 14-19, 1998
- F. Bernardini, H. Rushmeier, *The 3D Model Acquisition Pipeline*, in *Computer Graphics Forum*, pp. 149-172, NCC Black-well, Vol. 21(2), 2002
- Martin Bertram, Mark A. Duchaineau, Bernd Hamann and Kenneth I. Joy, *Bicubic Subdivision-Surface Wavelets for Large-Scale Isosurface Representation and Visualization*, in *Proceedings of IEEE Visualization 2000*, T. Ertl, B. Hamann and A. Varshney, pp. 389-396, Computer Society Press, Los Alamitos, California, Salt Lake City, Utah, 2000
- Gabriella Caroti, Giovanni Fangi, Walter Ferri, *L'autolaser scanning nel rilievo della cupola interna del Battistero di San Giovanni a Firenze e confronti con altri eseguiti con metodi topografici e fotogrammetrici*, in *Rivista Bollettino Sifet Numero 2*, 2001
- J. C. Carr, R. K. Beatson, B. C. McCallum, W. R. Fright, T. J. McLennan, T. J. Mitchell, *Smooth surface reconstruction from noisy range data*, Applied Research Associates, Christchurch, New Zealand e Dept. Mathematics and Statistics, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003
- A. Cattaneo, A. Manservigi, *Topografia*, Edizioni Patron, Bologna 1969.
- P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, *External memory management and simplification of huge meshes. Technical Report B4-01, I.E.I. - C.N.R.*, Pisa, Gennaio 2001
- P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno. *A comparison of mesh simplification algorithms. Computers And Graphics*, numero 22(1):37-54,1998.
- Mario Docchi, *Il futuro del disegno*, in *DDD - Rivista trimestrale di Disegno Digitale e Design*, Anno 2, numero

- 5, Edita dal Politecnico di Milano, Gennaio/Marzo 2003
- Mario Docci, Marco Gaiani, Riccardo Migliari, *Una nuova cultura per il rilevamento*, in *Disegnare idee immagini*, Anno XII, numero 23, dicembre, pp. 37-45, Roma 2001
- Gerald E. Farin, *Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design: A Practical Guide*, Computer Science and Scientific Computing Series, Morgan Kaufmann Editor, 1997
- M. Friedman, A. Kandel, *Introduction to Pattern Recognition, statistical, structural, neural and fuzzy logic approaches*, World Scientific, Singapore, 1999
- Andrew S. Glassner, *3D Computer Graphics*, The Lyons Press, 1994
- Giuliano Golfieri, *I beni culturali conservati in computergrafica*, in *Computer Gazzette* 9, settembre 2002, IHT Gruppo Editoriale, Milano 2002.
- Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Pub Co., 2002
- Adam Hoover, *The Space Envelope Representation for 3D Scenes*, PhD dissertation, University of South Florida, 1998
- Horowitz and Hill, *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2nd edition, 1993
- Anil K. Jain, *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall, 1988
- Jim Lammers, Lee Gooding, *Maya 4 Fundamentals*, New Riders Publishing, United States of America, 2002
- M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, D. Fulk, *The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues*, in *Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (SIGGRAPH '00)*, pp. 131-144. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July 24-28 2000
- Riccardo Migliari, Massimiliano Ciammaichella, Michele Curuli, Tullia De Majo, Priscilla Paolini, *Recenti linee di ricerca*, in *Disegnare idee immagini*, ANNO XII, NUMERO 23, dicembre, pp. 71-83, Roma 2001
- Edward M. Mikhail, James S. Bethel, J. Chris McGlone, Chris McGlone, *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons, 2001
- Satoshi Nagasaka, Takeshi Fujimura, Kensuke Segoshi, *Development of a non-radiographic cephalometric system*, in *European Journal of Orthodontics*, numero 25 pp. 77-85, European Orthodontic Society, 2003
- Les A. Piegl, Wayne Tiller, *The NURBS Book (Monographs in Visual Communications)*, Springer Verlag, 1997
- E. Puppo, R. Scopigno, *Simplification, LOD, and Multiresolution - Principles and Applications*, in *Eurographics '97 Tutorial Notes* (ISSN 1017-4656). Eurographics Association, Aire-la-Ville (CH), 1997
- Fabio Remondino, *From point cloud to surface: The modelling and visualization problem*, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10
- C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pinci, R. Scopigno, *A suite of tools for the management of 3d scanned data*.
- M. I. Schlesinger, V. Hlavác, *Ten Lectures on Statistical and Structural Pattern Recognition*, Kluwer Academic Publishers, 2002
- Roberto Scopigno, *3D scanning: potenzialità e limiti delle tecnologie di acquisizione automatica*, in *DDD - Rivista trimestrale di Disegno Digitale e Design*, Anno 2, numero 5, Edita dal Politecnico di Milano, Gennaio/Marzo 2003
- Brian Sharp, *Subdivision Surface Theory*, Gamasutra website, 2000
- Jussi Suomela, AS-84.145 *Intelligent Machines and Special Robotics, Time of Flight sensors*, TTK/Aut, Presentazione PowerPoint reperibile in Internet, 2001
- Emanuele Trucco, Alessandro Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998
- David N. Zorin, *Stationary Subdivision and Multiresolution Surface Representations*, Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, 1997. Reperibile in Internet all'indirizzo: <ftp://ftp.cs.caltech.edu/tr/cs-tr-97-32.ps.Z>

FONTI

Siti Internet

www.3dlinks.com - Sito di informazione e documentazione sulla grafica 3D, jumpstation per le principali risorse gratuite e commerciali presenti su Internet.

www.centrolaser.it - Sito del Centro Laser di Valenzano (BA) si tratta di un centro di ricerca e trasferimento tecnologico incentrato sull'utilizzo di sistemi basati su laser.

www.rhino3d.com - Sito ufficiale del software Rhinoceros per la modellazione NURBS della Macneel, collegamenti a numerose risorse gratuite e commerciali per CAD, rendering e modellazione.

www.adobe.com - Sito della Adobe, casa produttrice di numerosi software per la computer grafica, tra cui Photoshop, Illustrator, Page Maker e Indesign.

www.aliaswavefront.com - Sito della Alias|Wavefront, casa produttrice di numerosi software per le applicazioni CAD e di rendering, tra cui Alias Studio Tools, Maya, Spider.

<http://museo.alfa.it/> - Sito che raccoglie una buona selezione di notizie storiche ed artistiche circa i principali luoghi

monumentali italiani.

www.autodesk.com - Sito della Autodesk, casa produttrice di numerosi software per le applicazioni CAD e di rendering, tra cui Autocad, Revit e 3D Studio max.

www.bentley.com - Sito della Bentley, casa produttrice di numerosi software per le applicazioni CAD e di rendering, tra cui Microstation.

www.cad3d.it - Sito italiano dedicato alla computer grafica di genere CAD e rendering, possibilità di accedere a numerosi gruppi di discussione tra utenti sulle problematiche dei principali software.

www.corel.com - Sito della Corel Corporation, casa produttrice di numerosi software per la computer grafica, tra cui Coreldraw e Picture Publisher.

<http://www-2.cs.cmu.edu/~cil/vision.html> - Sito del laboratorio *Computer Vision* della *Carnegie Mellon School of Computer Science*, USA.

www.cyra.com - Sito della ditta produttrice degli scanner laser e dei software Cyclone e Cloudworks impiegati per il rilievo e l'elaborazione del modello

del Battistero di Pisa nel 2002.

www.discreet.com - Sito della Discreet, la divisione della Autodesk che si occupa dello sviluppo di 3D Studio Max e di Autodesk VIZ.

<http://endo.sandia.gov/cubit/> - Sito dedicato al software di modellazione per superfici mesh Cubit.

<http://www.find-3d.com/> - Motore di ricerca per l'individuazione di risorse software e librerie di modelli disponibili su Internet.

www.gamasutra.com - Sito di risorse per sviluppatori di videogame, presenta un ampio settore di documentazione sulla teoria della CG.

www.geotop.it - Sito del distributore italiano degli scanner Mensi.

www.highend3d.com - Sito di risorse per la grafica tridimensionale e le applicazioni CAD.

<http://home.hiwaay.net/~crispen/vrmlworks/tools.html> - Sito che raccoglie numerosi link a strumenti gratuiti e commerciali per l'editazione e la creazione di modelli tridimensionali digitali basati sul linguaggio VRML.

www.leica.com - Sito del distributore italiano dei prodotti Leica e Cyra.

www.mensi.com - Sito della ditta francese Mensi, produttrice dello scanner laser TOF GS-100 utilizzato per il rilievo del sistema delle volte nel Battistero di Pisa nel 2002 e degli scanner a triangolazione SOISIC.

www.moochers.com - Sito con un'ampia raccolta di software con licenza freeware.

www.okino.com - Sito della Okino, casa produttrice dei software Polytrans e Nugraf per la conversione tra formati di file per modelli digitali tridimensionali.

www.opengl.org - Sito ufficiale per il reperimento di informazioni e aggiornamenti sulle librerie per la visualizzazione di modelli digitali tridimensionali OpenGL.

www.opennurbs.org - Sito ufficiale per il progetto Open NURBS, per lo sviluppo di applicazioni CAD capaci di esportare ed importare geometria NURBS senza alterarne le caratteristiche.

www.ph.tn.tudelft.nl/PRInfo/index.html - *Pattern Recognition Information*, Sito

contenente un motore di ricerca dedicato all'individuazione di informazioni su Range Camera, Laser Scanning e Digital Imaging.

www.rappresentazione.it - sito curato da Livio Sacchi e Maurizio Unali dedicato alla ricerca e alla didattica nel settore della comunicazione visiva dell'architettura.

www.renderosity.com - Sito di informazione e documentazione sulla grafica 3D, risorse per le principali applicazioni software di CAD e Rendering.

<http://www.repairfaq.org/sam/laserlia.htm> - *Sam's Laser FAQ - Laser Instruments and Applications*, sito contenente un'ampia raccolta di informazioni tecniche ed amatoriali sulle misurazioni eseguite con laser, tra i contenuti più curiosi: *Using a CD or DVD Optical Pickup for Distance Measurements*.

<http://scanning.fh-mainz.de> - *3D Scanning in Cultural Heritage*, sito realizzato dall'*i3mainz*, L'Istituto per la documentazione dimensionale e le tecnologie per il rilievo, parte dell'Università degli Studi in Scienze Applicate di Magonza, Germania. Si tratta di un'ampia jumpstation dedicata a tutti i sistemi di scansione tridimensionale.

www.souceforge.net - Sito che raccoglie un'enorme quantità di strumenti in fase di sviluppo sulla base di progetti amatoriali, accademici e professionali, prevalentemente disponibili in forma gratuita. Ampi settori dedicati alla CG e alle applicazioni scientifiche.

www.web3d.org/vrml/browpi.htm - Sito che raccoglie un archivio di strumenti per l'editazione e la creazione di modelli tridimensionali digitali con funzioni interattive.

www.unife.it - Il sito dell'Università degli Studi di Ferrara, da qui si possono raggiungere le pagine del NubLab.

www.unifi.it - Il sito dell'Università degli Studi di Firenze, da qui si possono raggiungere le pagine del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura

Fonti delle immagini

IL BATTISTERO DI PISA

Fig. 1, 37 – Elena Fossi, scatto eseguito durante la campagna di rilievo 2002

Fig. 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10/28, 31/36, 39, 40/46 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Fig. 3, 39 – Federico Uccelli, scatto eseguito durante la campagna di rilievo 2002. Elaborazione di Giorgio Verdiani.

Fig. 9 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Fig. 29 – Le Corbusier, da *Giuliano Gresleri, Le Corbusier, Viaggio in Toscana, Marsilio, Venezia 1987*.

Fig. 30 – Le Corbusier, da *Francesco Tentori e Rosario de Simone, Le Corbusier, Editori Laterza, Bari 1993*.

Il battistero, il rito e la forma

Fig. 1 – Elaborazione grafica tratta da *Antonio Monelli, I Cinquanta magnifici battisteri d'Italia, Nuove Edizioni Duomo, Milano, 2000*

Fig. 2 – Bassorilievo della facciata del Duomo di Milano.

Fig. 3 – Il battesimo di Gesù, Icona cristiano-orientale, da www.augustea.it/dgabriele.

Fig. 4 – Il battesimo di Clovis, affresco.

Fig. 5 – Il battesimo di Clovis, raffigurato in un bassorilievo della facciata della Cattedrale di Reims, da www.unf.edu.

Fig. 6 – Nicolò di Pietro, Battesimo di S. Agostino, XVI secolo, Città del Vaticano, Pinacoteca Musei Vaticani.

Fig. 7 – Immagine da www.uicparma.it.

Fig. 8 – Immagine da www.comune.parma.it.

Figg. 9, 11 – Archivio Alinari, Firenze.

Fig. 10 – Il battistero di Pistoia, da www.comune.pistoia.it.

Fig. 12 – Giorgio Verdiani, archivio dell'autore.

Fig. 13 – Il fonte battesimale della basilica di San Frediano a Lucca, da www.thais.it.

Quadro storico

Fig. 1/3 – da *A. Niccolai, A. Manghi, F. Severini, Gli scavi nel Camposanto monumentale nel 1939, Pisa, 1942*

Figg. 4/7, 9/10 – da *Piero Pierotti e Laura Benassi, Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro, Pacini editore, Pisa, 2001*

Fig. 8 – Giorgio Verdiani, archivio dell'autore.

Evoluzione dell'organismo architettonico

Fig. 1 – da *G. Robault De Fleury, Les*

Monuments De Pise Au Moyen Age, Morel, Paris, 1866

Fig. 2 – da AA.VV. a cura di E. Carli, *Il Duomo di Pisa. Il Battistero. Il Campanile*, Edizioni Nardini, Firenze, 1989

Fig. 3 – da Pisa- Guida Touring Club, *le stesse basi grafiche della guida sono reperibili su www.tosconline.it*.

Fig. 4/10 – Elaborazioni grafiche di C. Giancaterino e P. Giacomelli, realizzate nell'ambito del seminario "3D e multimedia" del corso di Disegno Automatico del V anno del corso di Laurea in Architettura, prof. Giorgio Verdiani, Anno Accademico 2002-2003.

Fig. 11, 23 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Fig. 12/21 – da A. Garzelli, *Il Fonte del Battistero di Pisa – cavalli, arieti e grifi alle soglie di Nicola Pisano*, Pacini editore, Pisa, 2002

Fig. 22 – Immagine tratta dal sito <http://museo.alfea.it/>

Il modello geometrico del Battistero

Fig. 1, 3/6 – da P. Pierotti e L. Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001

Fig. 2 – Immagine da <http://www.eleves.ens.fr/aumonerie/TerreSainte/photos/jerusalem2.html>

Lo stato del rilievo

Fig. 1/2, 5 – da L. Zampieri, *Pisa nell'Ottocento, testimonianze iconografiche a stampa del mutamento di una città*, Bandecchi & Vivaldi Editori, Pontedera, 1994

Fig. 3, 4 – da Piero Pierotti e Laura Benassi, *Deotisalvi L'architetto del secolo d'oro*, Pacini editore, Pisa, 2001

Fig. 6 – da AA.VV. a cura di Paolo Brandinelli, *Note di supporto al corso, Architettura Digitale, numero 2, edito in proprio*, Firenze, 2002

Il rilievo del battistero ~ Il quadro operativo

Fig. 1/12 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

I sistemi digitali di acquisizione

Fig. 1/2, 11/12, 14, 15/16, 26, 39, 42/45, 48, 49/52, 56/64 – Elaborazioni grafiche di Giorgio Verdiani.

Fig. 3/5 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica Microscribe, da www.microscribe.com.

Fig. 6, 8/10 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica Faro Arms, da www.faro.com.

Fig. 7 – da Satoshi Nagasaka, Takeshi Fujimura, Kensuke Segoshi, *Development of a non-radiographic cephalometric system*, in *European Journal of Orthodontics*, numero 25 pp. 77-85, *European Orthodontic*

Society, 2003.

Fig. 13 – Immagine tratta dal catalogo prodotti di Elettrografica, Pisa, www.elettrografica.it.

Fig. 17 – Immagine tratta dalla documentazione tecnica Roland, da www.roland.com.

Fig. 18/19 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica Minolta, da www.minolta.com.

Fig. 20/21, 23 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica Cyberware, da www.cyberware.com.

Fig. 22 – da R. Borgo, P. Cignoni, R. Scopigno *An Easy-to-use Visualization System for Huge Cultural Heritage Meshes*.

Fig. 24 – da C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, R. Scopigno, *A suite of tools for the management of 3d scanned data*.

Fig. 25 – Giorgio Verdiani, archivio dell'autore.

Fig. 27-35, 46/47 – Immagini tratte dalla documentazione delle attività di ricerca del Nublalab del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara.

Fig. 36 – Immagine tratta dalla documentazione tecnica Cylan, da www.intecu.de.

Fig. 37 – Immagine tratta dalla documentazione tecnica RIEGL, da www.riegl.com.

Fig. 38 – Immagine tratta dalla

documentazione tecnica IQsun, da www.iqsun.com.

Fig. 40/41 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica Leica Geosystem, da www.leica-geosystems.com.

Fig. 53 – Immagine da www.automation.hut.fi/edu/as84145/Sensors%20and%20actuators.ppt (Helsinki University of Technology).

Fig. 54/55 – Immagini tratte dalla documentazione tecnica GOM, da www.gom.com.

Il sistema di rilievo adottato

Fig. 1/2, 5 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Fig. 3 – Federico Uccelli, scatto eseguito durante la campagna di rilievo 2002.

Fig. 4/10 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Rilievi strumentali con scanner laser

Fig. 1, 18 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

Fig. 2/17, 19/34, 44, 47 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Fig. 36, 38, 40, 42 – Realizzazione grafica di Federico Uccelli

Fig. 37, 39, 41, 43 – Prese della telecamera dello scanner Cyrax, archivio del rilievo presso il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di

Firenze.

Figg. 45/46 – Realizzazione grafica a cura di Geotop Italia.

Rilievo strumentale con stazione totale

Figg. 1/4 , 7/8 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Figg. 5/6, 9/10 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Rilievo diretto

Figg. 1, 3/4 , 31/32 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli e Rocio Serrano Alonso, elaborazione di Giorgio Verdiani.

Figg. 2, 5, 30 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 6/29 – Giorgio Verdiani, scatti eseguiti durante la campagna di rilievo 2002

Le procedure di elaborazione dei dati

Figg. 1, 5, 10/11 - Realizzazione grafica di Francesco Tioli

Figg. 2/3, 6/9, 12/15 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 16/21– Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani e Francesco Tioli

Diario del rilievo

Figg. 1/2 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Fig. 3 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

La restituzione del rilievo ~ La nuvola di punti

Figg. 1/29, – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 30/35 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

I modelli 3D

Figg. 1/2, 4/5, – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Fig. 3 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

Ottimizzazione del modello, dalla nuvola di punti agli insiemi di superfici

Figg. 1/8 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 9/10, – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

I sistemi automatici di restituzione

Figg. 1/2, 4 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

Figg. 3, 5/31 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

I Sistemi manuali di restituzione

Figg. 1/4 – Realizzazione grafica di Francesco Tioli

Figg. 5/31 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 32/39 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani, Francesco Tioli, Rocio Serrano Alonso

Un confronto non cercato

Figg. 1/5 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Applicazioni e possibili Sviluppi

Figg. 1, 4/5 – Realizzazione grafica di Giorgio Verdiani

Figg. 2/3 – da *J. C. Carr, R. K. Beatson, B. C. McCallum, W. R. Fright, T. J. McLennan, T. J. Mitchell, Smooth surface reconstruction from noisy range data, Applied Research Associates, Christchurch, New Zealand e Dept. Mathematics and Statistics, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003.*

Giorgio Verdiani

Dottorato in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente
XV Ciclo
IL BATTISTERO DI PISA, rilievo e rappresentazione digitale tra ricerca e innovazione
Giugno 2003

E-mail della ricerca sul battistero di Pisa
rilievo.battistero@infinito.it

