

Dal modello numerico alla reintegrazione della forma

di Caterina Balletti e Francesco Guerra

Negli ultimi anni gli aggettivi *numerico* o *digitale* che sempre più spesso accompagnano i termini rilievo e rappresentazione non fanno altro che sottolineare come l'evoluzione che si è avuta negli strumenti e nelle metodologie abbia inevitabilmente imposto un approccio diverso al settore della conoscenza e documentazione del patrimonio culturale. Tra le varie esperienze in atto, molte hanno lo scopo di studiare, approfondire e sviluppare l'integrazione di tecniche per il rilievo dimensionale e la ricostruzione 3D di luoghi e oggetti con particolare attenzione agli aspetti metrologici del problema, mediante il confronto tra metodi di rilievo tradizionale e quelli di recente applicazione.

In particolare recentemente si è assistito ad un rapido sviluppo di tecnologie di scansione 3D per la conoscenza di forme anche ad alta complessità morfologica, sviluppo che ne ha affermato l'efficacia come metodo per l'analisi e la conservazione dei Beni Culturali.

Il rilievo del sito di Grumentum (Basilicata), caso studio individuato nel progetto di ricerca "*Sistemi di rilievo e modellazione tridimensionali per l'architettura e l'archeologia. Integrazione di tecniche laser scanning e fotogrammetriche per la realizzazione di modelli 3D multiscala mappati*", si colloca all'interno di quelle attività sperimentali che hanno lo scopo principale di definire dei protocolli e delle specifiche di rilievo e di modellazione, sperimentando i più recenti strumenti nel campo della documentazione della forma e del colore e studiando delle forme di rappresentazione alternative o complementari a quelle tradizionali.

Le campagne di rilievo (agosto 2005-2006)

Per predisporre un apparato conoscitivo appropriato si ricorre attualmente all'uso integrato di laser scanner 3D, tecniche di fotogrammetria digitale e GPS, al fine di ottenere un modello numerico tridimensionale. Infatti la complessità e la ricchezza dei siti archeologici pone la necessità di rilevare la posizione dei manufatti all'interno di un'area urbana, di rilevare ogni singolo edificio (rilievo

dei manufatti architettonici emergenti) e di rilevare anche ogni frammento che viene ritrovato (rilievo dei particolari).

Il rilievo diventa dunque non solo studio della città e delle architetture ma anche un *contenitore* multiscala per la catalogazione delle emergenze, in un suo uso strumentale alle discipline archeologiche.



Fase di acquisizione dei fotogrammi aerei da pallone frenato nella zona del Foro

La città romana di Grumentum

La nascita di Grumentum viene fatta risalire alla prima metà del III sec. a.C. Viene menzionata dalle fonti dell'epoca della seconda guerra punica, quando i Romani si scontrarono con Annibale proprio nei pressi delle mura di Grumentum. Nel 133 a.C. diviene colonia romana grazie alla sua posizione strategica: era collegata a Venosa e alla via Appia, a Nord, e con la costa tirrenica e la via Popilia a Sud. L'insediamento, che si sviluppa su tre terrazze naturali, ospita: un teatro di età augustea, nelle cui adiacenze sono stati rinvenuti un tempietto di tipo italico (età Severiana) e una grande domus con pavimenti a mosaico; il foro, collocato nell'area centrale dell'insediamento, dove è tutt'ora possibile riconoscere il capitolium ed un tempio dedicato alla triade capitolina; infine la struttura più imponente del sito, l'anfiteatro, ubicato nell'angolo nord orientale dell'area, dalla forma ellittica che in parte sfrutta il naturale pendio collinare e, in parte, è costruito in muratura. La sua nascita è quasi contemporanea all'anfiteatro di Pompei (seconda metà del I sec a.C.).

Data la *dispersione* sul territorio e la varietà dimensionale che spesso caratterizza i siti archeologici e le architetture che su di essi insistono, il rilievo topografico ha un ruolo fondamentale per la georeferenziazione delle singole emergenze in un unico sistema di riferimento e per la determinazione dei punti di controllo invarianti in più scale di rappresentazione.

Per questo la rete di inquadramento dell'intero sito, composta in realtà in due schemi, uno di 12 vertici sviluppato nell'area del foro secondo la direzione del decumano e l'altro di 5 vertici distribuiti attorno e all'interno dell'anfiteatro, è stata realizzata con misure da terra (strumentazione Leica TCA 2003) e GPS (Leica GPS System 500 e GPS1200). La rete complessiva, compensata ai minimi quadrati, ha fornito la posizione dei vertici con SQM massimi di $\pm 3\text{mm}$.

Le procedure di rilevamento seguite sono state finalizzate all'integrazione dei dati laser-scanning e quelli fotogrammetrici in particolare per le parti orizzontali (a terra, scavate o corrispondenti ai crolli). Si sono inoltre ottimizzate le scansioni e le prese per il rilievo delle strutture in elevazione presenti, seguendo e integrando quanto normalmente in uso nei rilievi architettonici.

Nel caso di un sito archeologico diventa di particolare interesse la realizzazione di un modello digitale attraverso un DEM da terra mediante laser-scanner e delle prese aeree calibrate da pallone frenato.



Dal modello numerico laser scanning alla generazione dell'ortofoto dell'area del foro alla scala nominale 1:100

Le scansioni da terra devono garantire l'ottenimento di un modello denso e uniforme nella risoluzione di tutte le superfici.

Il laser-scanner in dotazione al laboratorio è il modello LMS-Z360i della Riegl integrato con camera digitale pre-calibrata Nikon D100 (con ottica 20mm). Si tratta di un sensore terrestre trasportabile, adatto all'acquisizione veloce di immagini tridimensionali di buona qualità anche in presenza di difficili condizioni ambientali. Il sistema, integrando fotogrammetria e laser scanning, rappresenta una delle migliori soluzioni tecniche oggi disponibili in grado di soddisfare tutte le esigenze di rilievi laser scanner terrestri.

Nelle aree di maggior interesse le scansioni sono state fatte cercando di assicurare la maggiore ortogonalità alla superficie, accorgimento necessario, assieme alla ridondanza dei dati, per la riduzione del *noise* nella nuvola, oltre che un'omogenea distribuzione dei punti. Le nuvole (corrispondenti a 30 scansioni con passo 0.05°) sono state allineate sulla base di punti di appoggio rilevati topograficamente e punti di legame distribuiti nell'area di scansione. La precisione sugli allineamenti è inferiore a 1cm.

Per garantire un'elevata risoluzione nelle immagini, per le parti a terra o a sviluppo orizzontale si è ricorso alla fotogrammetria da pallone.

E' noto come la fotogrammetria ha un ruolo fondamentale nel settore della tutela del patrimonio culturale come metodo di rilievo e di documentazione dettagliata della struttura degli oggetti.

In particolare l'utilizzo di ortofoto o di fotopiani è diventato comune, soprattutto in campo archeologico, proprio per la possibilità di offrire degli strumenti di analisi non solo metrica ma anche *materica*: la vista dall'alto con la qualità di un'immagine fotografica ad alta risoluzione permette di leggere ciò che da terra non si vede. Soprattutto nel caso di un rilievo archeologico siamo costretti ad abbandonare quei riferimenti preferenziali che normalmente usiamo in architettura (direzione verticale e piani orizzontali che corrispondono agli schemi costruttivi

architettonici): non ci sono più architetture ma frammenti di architettura che molto spesso risultano essere in parte nascosti da strati di terra. La lettura dall'alto aiuta la comprensione della composizione architettonica di un luogo.

Nel caso di Grumentum, la fotogrammetria ha avuto il compito di fornire gli elaborati su cui basare la lettura multiscala *sito-monumento-traccia*. La risoluzione delle immagini doveva quindi assicurare una precisione non solo metrica ma anche descrittiva a più livelli di dettaglio e per questo si è optato per eseguire delle riprese fotogrammetriche *non convenzionali*. Come si è visto

anche in altre esperienze di rilievo di luoghi archeologici, la ripresa da aereo è spesso sostituita da riprese fatte da elicottero, pallone, o altri dispositivi di elevazione, in considerazione delle dimensioni dell'area da ricoprire e delle condizioni ambientali. All'interno della ricerca si è pensato di studiare l'utilizzo di

palloni frenati per l'esecuzione di riprese fotogrammetriche con camere digitali calibrate ad alta risoluzione, in quanto risulta essere uno dei metodi

sicuramente meno

invasivi e più controllabili.

Il sistema era composto da un aerostato a fuso sostenuto

a elio, vincolato con dei cavi per il controllo

da terra e un sistema radiocontrollato per

l'acquisizione delle

immagini.

Al pallone è stata

collegata una piattaforma

orientabile per la camera digitale,

una Fuji S3 (12 Mpixel) con ottiche

50 e 20mm calibrate, su cui è stata

installata anche una telecamera per la

trasmissione a terra delle immagini

corrispondenti agli scatti eseguiti.

Vista l'estensione delle aree (foro e

anfiteatro) il volo è stato progettato

per ottenere delle immagini in scala 1:50-1:100. I limiti del sistema sono legati fortemente alle condizioni di vento in cui ci si trova ad operare, non tanto per la definizione della traiettoria da seguire per ottenere delle strisciate quanto per la quota di volo: si era pensato di effettuare le riprese da quote variabili da 50m a 20m per avere delle risoluzioni diverse, ma la quota massima di volo è stata attorno ai 30m per una maggiore stabilità e controllo del pallone.

Nella seconda campagna di misure (agosto 2006) sono state eseguite delle integrazioni con delle riprese dell'area



Schema delle strisciate da pallone in corrispondenza dell'Anfiteatro

archeologica fatte da piccolo aereo da turismo biposto da una quota di 200m. Nonostante l'aereo non fosse specificatamente attrezzato per la fotogrammetria (in quanto si trattava di un superleggero) è stato comunque possibile realizzare delle strisciate quasi nadirali che hanno proposto il consueto schema di rilievo fotogrammetrico.

La realizzazione delle ortofoto del sito si è basata sull'utilizzo del DEM denso ottenuto da dati laser scanner e fotogrammi acquisiti da pallone. Le scale nominali

vanno dalla rappresentazione 1:200-1:100 per l'intera area fino ad arrivare alla scala 1:50 per i singoli monumenti.

I problemi principali incontrati sono quelli noti: errori in corrispondenza delle discontinuità (*break-lines*) e delle zone defilate (aree nascoste). Il primo problema è risolvibile lavorando sul DEM, integrando alcune zone d'ombra delle scansioni con punti rilevati topograficamente, mentre il secondo usando più immagini orientate per garantire una copertura fotografica il più completa possibile.

Geometria e forma

I dati ricavati dal rilievo laser scanning sono stati il punto di partenza nell'affrontare la ricostruzione dell'anfiteatro di Grumentum, fornendo una descrizione completa ed esaustiva dell'intero sito e di tutti gli elementi in esso presenti.

Il lavoro si è in particolare concentrato sullo studio dell'Anfiteatro, struttura che si presenta allo stato di rudere, ma del quale è possibile riconoscere chiaramente l'intero impianto planimetrico.

Restituita la planimetria dello stato di fatto dal modello numerico (nuvole laser scanner allineate e registrate) è stata condotta una doppia analisi:

- ◆ l'analisi geometrica, utile a rintracciare nell'anfiteatro quei rapporti geometrici-proporzionali usati dagli antichi per la realizzazione delle opere monumentali;
- ◆ l'analisi tipologica e compositiva, effettuata confrontando le caratteristiche ancora visibili dell'arena di Grumentum con alcuni anfiteatri italiani simili per impianto tipologico e vicini sia spazialmente che temporalmente a Grumentum;

L'analisi geometrica

L'analisi critica della planimetria ha permesso di individuare un insieme di punti che, opportunamente trattati, definiscono le curve che delimitano l'intera struttura. Queste curve, appartenenti ad elementi architettonici non manomessi nel tempo, sono i dati di partenza per rintracciare lo schema geometrico alla base di questa architettura romana.

Lo studio si è quindi sviluppato secondo il seguente schema:

- ◆ i punti di ogni singola curva sono stati interpolati con ellissi ed ovali a 4 e 8 centri di rotazione¹, andando a valutare l'SQM per ogni singola figura;
- ◆ dai dati precedentemente ricavati è stata nuovamente effettuata un'interpolazione dei punti con ovali a 4 e 8 centri di rotazione mantenendo però fissi i centri di rotazione, i triangoli generatori e la rotazione degli assi, per poter valutare la posizione dei centri di rotazione per il tracciamento della figura in fase di cantiere;
- ◆ individuazione del più probabile coefficiente di conversione metro/piede romano;
- ◆ esame delle convergenze radiali dei setti dell'edificio rispetto ai centri di rotazione degli ovali;
- ◆ controllo dei rapporti geometrici sulla base della costruzione precedentemente verificata;
- ◆ confronto in situ tra i dati ottenuti e l'edificio;

Seguendo questo processo di analisi è stato possibile, alla fine, rintracciare nell'Anfiteatro di Grumentum uno schema modulare tripartito, valido sia per la pianta (3 moduli da 30 piedi ciascuno) che per l'alzato (3 moduli da 15 piedi ciascuno), generato sul modello del triangolo pitagorico².

Una volta in sito (campagna di rilievi agosto 2006), sono stati materializzati a terra i centri di rotazione precedentemente calcolati, operazione che è stata possibile effettuare avendo condotto tutte le verifiche geometriche nello stesso sistema di riferimento del rilievo. Con tale operazione abbiamo potuto verificare le ipotesi fatte sulla base dell'analisi in laboratorio dei dati ottenuti dal rilievo.

L'analisi tipologica e compositiva

Una volta effettuate tutte le considerazioni sulla geometria dell'edificio, è stato quindi possibile integrare le analisi geometriche confrontando ogni singola parte che costituisce l'anfiteatro con l'impianto di alcuni anfiteatri italiani spazialmente e tipologicamente vicini al nostro. Tra tutti gli esempi visitati e studiati sono risultati di particolare interesse gli anfiteatri di Pompei (da noi rilevato sempre con tecnologia laser scanner), Cassino, Paestum, Sutri, Castra Albana.

L'Anfiteatro di Grumentum, benché sia una struttura della provincia romana, presenta la maggior parte degli elementi che caratterizzano quelli di Roma, a partire dall'arena cinta da un corridoio anulare coperto con volta a botte, priva di ambienti ipogei per finire con la cavea, caratterizzata da un solo meandro, della quale è possibile tutt'ora riconoscere un podio continuo, composto da tre gradini, separato dalle gradinate destinate al pubblico da un balteus (parapetto in muratura).

L'anfiteatro ha due sistemi che caratterizzano la struttura portante: un sistema autoportante costituito da vani compartimentati accessibili dall'esterno coperti con delle pseudo volte a botte ad est, mentre ad ovest ritroviamo dei vani riempiti di rinterro a sostegno delle gradinate. Edifici che presentano questo particolare sistema portante sono l'Anfiteatro di Cassino e di Castra Albana.

Attenzione viene poi rivolta all'apparato distributivo, riconoscibile negli ingressi all'arena, al podio da scale interne e alle gradinate. L'accesso a quest'ultime presenta la caratteristica di avere entrate poste a quote differenti rispetto alla quota dell'arena, sia nei sistemi di risalita ad est che dagli ingressi nella parte appoggiata al declivio naturale. Tra gli esempi analizzati, oltre a Pompei, il quale presenta maggiori similitudini con il nostro edificio, ritroviamo anche l'Anfiteatro di Cassino.

Sono proprio i sistemi di risalita orientati una delle caratteristiche di particolare interesse di questo edificio. Troviamo infatti tre scale adiacenti il muro perimetrale esterno orientale, poste rispettivamente una in corrispondenza dell'asse minore e due poste simmetricamente rispetto a questo. Visibili oggi solo in parte, esse si compongono di due rampe convergenti su un pianerottolo posto al di sopra delle arcate d'ingresso. Un tipo simile di accesso lo ritroviamo nell'anfiteatro di Pompei, dove esistono sei scale aderenti alla facciata.

¹ In riferimento agli studi fatti dal prof C. Trevisan contenuti in *Disegnare, "Colosseo: Studi e Ricerche"*, n° 18-19, Gangemini Editore, Roma, 1999;

² Mark Wilson Jones in "Designing Amphitheatres", Bollettino dell'Istituto Archeologico Germanico, sezione romana, Vol.100, 2003, pag. 344-391;

(a cura di Micol Pillon e Luisa Sartorelli)

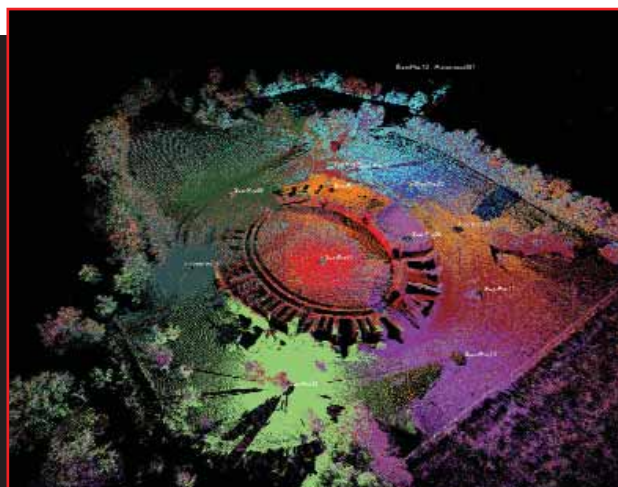
La ricostruzione digitale

La modellazione 3D ed il conseguente rendering fotorealistico, occupano un settore decisamente ampio per ciò che riguarda l'applicazione della tecnologia informatica alla risorsa archeologico-storica con la funzione principale di facilitare la comprensione di un luogo e evidenziare le relazioni tra i singoli elementi che lo compongono. Tra le possibili rappresentazioni, i modelli tridimensionali con superfici mappate con texture fotorealistiche ad alta risoluzione sono sicuramente di grande versatilità, nell'ottica di fornire una banca dati che documenti lo stato attuale del sito e fornisca la possibilità di interpretare lo stato originario e le successive trasformazioni dei monumenti ancora visitabili. Le mappature possono essere semplice integrazione del modello geometrico, nel caso di texture fotorealistiche, o il risultato di analisi specifiche.

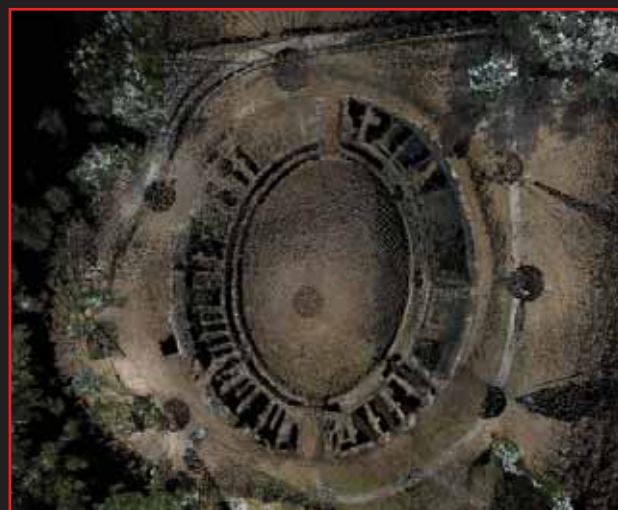
Dati i legami sempre più stretti tra *computer graphic* e rappresentazione dell'architettura e visti gli esempi spesso pubblicati, di fronte a modelli 3D spesso ci si domanda a cosa servano, se sono veramente utili, se diverranno indispensabili.

La risposta a questa domanda deve quindi guidare le fasi necessarie alla costruzione della rappresentazione finale. La modalità con cui approcciare l'acquisizione tridimensionale varia a seconda dei casi: deve essere sempre chiara la finalità del modello che si vuole acquisire. Nel caso di un rilievo per la verifica geometrica è indispensabile che ci sia una corrispondenza metrica puntuale tra oggetto fisico e modello numerico, mentre nel caso di modelli realizzati per la *ricostruzione virtuale* di luoghi o oggetti non più visibili, si predilige la componente geometrico-descrittiva sulla base di analisi tipologiche più che la corrispondenza tra reale e virtuale.

Nel caso di Grumentum, si sono volute fornire delle rappresentazioni tridimensionali dello stato attuale del luogo, principalmente attraverso superfici 3D (*mesh*) ricavate dai dati lidar texturizzati con le immagini calibrate ad alta risoluzione dove la qualità descrittiva e metrica del modello è data dalla somma della componente geometrica e dalla componente raster applicata (nei modelli multirisoluzione mappati quindi, si deve bilanciare la componente geometrica e quella raster in ragione del mantenimento delle caratteristiche metriche e semantico-percettive dettate dalla scala nominale della



Unione delle scansioni nell'area dell'anfiteatro

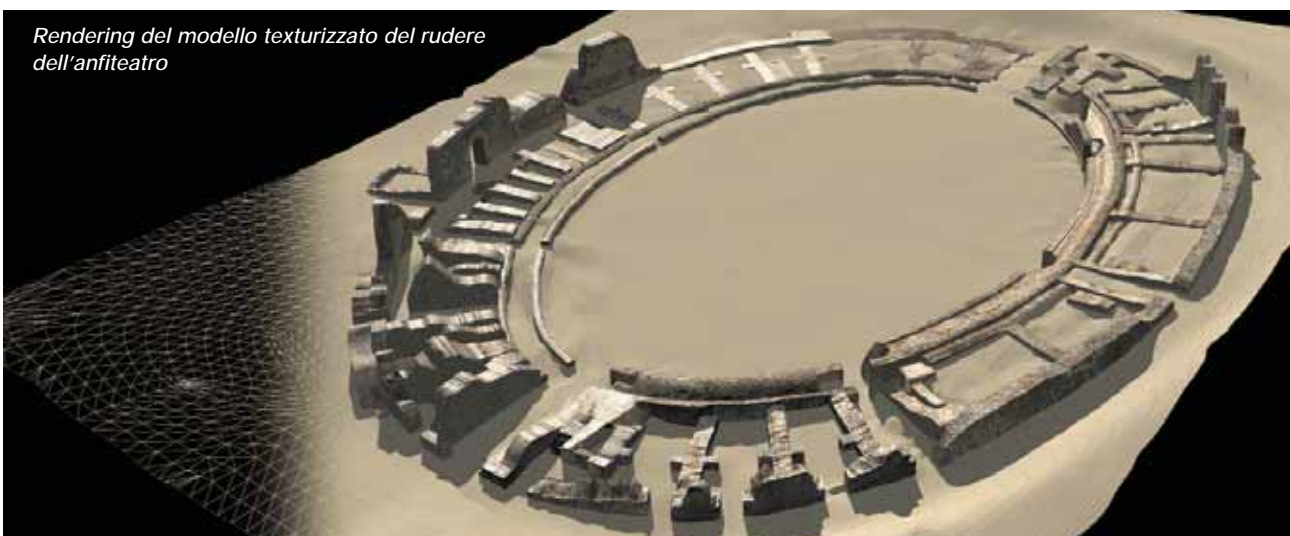


Vista delle nuvole allineate e registrate colorate con i valori RGB delle immagini orientate

rappresentazione) ma anche una ricostruzione 3D dell'immagine originaria (Balletti et al. 2006).

In particolare il lavoro di modellazione si è concentrato sull'anfiteatro, monumento che da un punto di vista architettonico permette di affrontare delle analisi geometrico-spaziale più interessanti, basandosi su un approccio tipologico comparativo con altri esempi.

Rendering del modello texturizzato del rudere dell'anfiteatro





La riprogettazione virtuale dell'anfiteatro attraverso i dati di rilievo, l'analisi geometrica e tipologica

La difficoltà principale è quella di modellare la realtà rilevata con tutte le sue *deviazioni* da una geometria rigida, per mantenere la precisione dei dati di partenza, e su questa *ri-progettare*, studiando tutti gli elementi costruttivi e distributivi che caratterizzano questa tipologia architettonica, la forma dell'anfiteatro.

A partire dai dati laser (circa 3 milioni di punti) si è ottenuto un modello triangolato (circa 1.85milioni di facce) utilizzato come base geometrica per l'estrazione di profili fitti da utilizzare nella modellazione solida (la difficoltà maggiore è modellare i crolli della struttura). Il modello solido dello stato attuale è stato quindi texturizzato con le immagini raddrizzate dei fronti verticali e con l'ortofoto per i piani pseudo-orizzontali (le immagini presentano una dimensione del pixel al reale di 1cm). Dato che l'anfiteatro poggia parte della cavea su un declivio, il modello del terreno è stato ottenuto per triangolazione dei dati laser. La mesh, opportunamente processata, è stata poi trasformata in una superficie *nurbs* modificabile per assicurare un livello di smussatezza e continuità tra le patch che in un DTM a maglia non si può avere. La geometria *nurbs* permette inoltre di garantire una continuità e congruenza geometrica con il modello della parte architettonica.

In base al rilievo, agli studi svolti sugli anfiteatri appartenenti allo stesso periodo (come controllo degli elementi costruttivi) e all'analisi geometrica (non va dimenticato che nell'architettura romana le dimensioni erano determinate da proporzioni), si è fatta una ricostruzione filologica dell'anfiteatro che rappresenta sia il recupero della memoria di un luogo (i siti archeologici sono luoghi a molti invisibili!) sia uno strumento di conoscenza e di comunicazione che può essere impiegato in diversi settori scientifici. Inoltre la rappresentazione tridimensionale, intesa come applicazione della computer graphic, risponde fortemente ad una richiesta sempre più pressante da chi si occupa di archeologia.

Spesso la cosiddetta *virtual archeology* non sempre si basa su dati di rilievo e processi metodologici resi noti e per tale ragione l'utente meno esperto può convincersi del fatto che ciò che sta vedendo corrisponde alla verità.

Assumendo quindi il punto di vista dell'architetto di fronte ad una azione di ricostruzione (ri-progettazione) di un'architettura antica, sono stati esplicitati alcuni fondamentali punti secondo i quali doveva essere realizzato il modello dell'arena di Grumentum:

- ◆ la congruenza geometrica del modello alle informazioni oggettive derivanti dal rilievo strumentale;

- ◆ la congruenza *costruttiva* del modello in riferimento alle tecnologie degli antichi, ovvero derivare la forma dell'oggetto studiato da un'effettiva possibilità costruttiva sulla base della lettura strutturale dello stato attuale;

- ◆ la congruenza formale rispetto alle indicazioni di confronto tipologico.

Quello che si è voluto restituire con il modello finale digitale non è tanto l'immagine dell'architettura che un tempo esisteva, quanto piuttosto una trasposizione in tre dimensioni delle informazioni dirette e indirette ottenute dalle varie forme di analisi che passo dopo passo hanno supportato le scelte operate.

Bibliografia

F. Guerra, C. Balletti, A. Adami, *3D multiresolution representations in archaeological sites*, in *Proceeding of CIPA 2005 XX International Symposium "International cooperation to save the world's cultural heritage"*, Torino, 26 settembre – 01 ottobre 2005.

L. Peretti, C. Porporato, F. Rinaudo, *La tecnica Lidar e la modellazione 3D di ambienti complessi. Considerazioni operative*, in *atti del Convegno Nazionale Sifet "le nuove frontiere della rappresentazione 3D"*, Taranto, 14-16 giugno 2006.

C. Balletti, F. Guerra, *Il rilievo per la rappresentazione 3D: la città romana di Grumentum*, in *Atti del convegno nazionale Sifet "le nuove frontiere della rappresentazione 3D"*, Castellana Marina, Taranto, 14-16 giugno 2006.

C. Balletti, F. Guerra, J. Riegl, N. Studnicka, *Practical comparative evaluation of an integrated hybrid sensor based on photogrammetry and laser scanning for architectural representation*, in *ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Commission V, *ISPRS XX Congress, Istanbul, Turchia*, 12-23 luglio 2004.

G. Guidi, J.A. Beraldin, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Edizioni Poli.Design, Milano, 2004.

Autori

CATERINA BALLETTI, FRANCESCO GUERRA
 balletti@iuav.it, guerra2@iuav.it
 Università IUAV di Venezia
 Laboratorio di fotogrammetria
 Circe S. Croce 1624, 30125 Venezia