

IL RILIEVO DIGITALE PER LA DOCUMENTAZIONE E LA FRUIZIONE DI NAVI ANTICHE

3D RECORDING OF ANCIENT WOODEN BOATS FOR SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL PURPOSES

Elisa Costa ^a, Francesco Guerra ^a

^a Laboratorio di Fotogrammetria, Università Iuav di Venezia, S. Croce 191, 30135 Venezia, Italy
ecosta@iuav.it, guerra2@iuav.it

PAROLE CHIAVE: Rilievo Digitale, Fotogrammetria, Laser Scanning, Imbarcazioni lignee, Fruizione museale

KEY WORDS: 3D Recording, Photogrammetry, Laser Scanning, Wooden Boats, Museum

RIASSUNTO

Le tecnologie digitali, ben consolidate nel rilievo del patrimonio archeologico e architettonico, vengono impiegate per la documentazione, lo studio e la fruizione di navi antiche e di imbarcazioni lignee. Questo bene culturale presenta caratteristiche peculiari per la natura del manufatto stesso, a causa, soprattutto, della necessità di mantenere l'imbarcazione in ambiente anaerobico per non comprometterne la stabilità strutturale e a causa delle problematiche legate al restauro e alla conservazione del legno bagnato. Tali questioni vengono affrontate attraverso l'impiego di tecniche di rilievo digitale, quali il laser scanning e la fotogrammetria multi-immagine, che permettono una documentazione veloce e precisa e la creazione di un modello tridimensionale virtuale. Quest'ultimo consente di studiare in maniera scrupolosa la costruzione navale antica da un punto di vista scientifico e consente una fruizione del bene da parte del pubblico, aumentando la ricezione e la divulgazione di questo importante patrimonio archeologico e storico. Queste tecniche digitali sono state applicate a casi studio con caratteristiche diverse: - la barca di Comacchio, imbarcazione di grandi dimensioni in un contesto di scavo archeologico. - la barca di Ercolano, restaurata ed esposta in un contesto museale. - il trabaccolo Nuovo Trionfo, imbarcazione navigante da carico di importanza storica per l'Alto Adriatico. - il modello ligneo in scala del brigantino Cygne, molto dettagliato.

ABSTRACT

Digital survey techniques are well-established in the fields of cultural and archaeological heritage and they have been used to document, study and promote knowledge of ancient ships and wooden boats. They represent a peculiar exercise, complicated by the specific nature of the material of the boats. As a matter of fact, the structural stability and the shape of the wood could be compromised in an aerobic environment, hence archaeologists have the responsibility to keep the boat in wet and anaerobic conditions until the restoration and the preservation of wood can take place. These problems are overcome through the use of digital imaging and survey techniques, such as video and photograph recording, multi-image photogrammetry and laser scanning, which allow a fast and accurate documentation, and the subsequent elaboration of a virtual three-dimensional model of the real artefact surveyed. This allows scrupulous study of ancient naval construction from both a scientific and a disseminative point of view, allowing to increase the knowledge and perception by the general public of this important archaeological and historical heritage. These digital techniques have been applied to four case studies with different peculiarity: - Comacchio sewn boat, discovered in a land excavation site. - Ercolano boat, restored and exposed in a museum. - Trabaccolo Nuovo Trionfo, historical cargo boat of Alto Adriatico. - Wooden scaled model of brick Cygne.

1. INTRODUZIONE

1.1 Introduzione e stato dell'arte

La fase di documentazione di un reperto archeologico assume una importanza rilevante soprattutto in un contesto di scavo, partendo dal presupposto che si deve considerare l'archeologia come una operazione distruttiva caratterizzata da una natura irreversibile, siccome, per raggiungere gli strati sottostanti, è necessario scavare ed eliminare quelli superiori. Le tecnologie di rilievo digitale e tridimensionale coadiuvano gli archeologi durante lo scavo, permettendo di documentare i livelli stratigrafici attraverso un modello virtuale completo e accurato dei reperti.

Nelle ultimi anni, molti ricercatori hanno utilizzato queste tecniche per la documentazione, lo studio e la fruizione dei beni, per promuovere la conoscenza del patrimonio culturale, archeologico, architettonico e ambientale, rilevando diverse tipologie di oggetti, da grandi contesti ambientali a siti archeologici, ad edifici e piccoli reperti.

La presente ricerca si focalizza su di un tema complesso, dovuto alle caratteristiche intrinseche del materiale delle imbarcazioni lignee e dei relitti. Solitamente, i relitti vengono rinvenuti in ambiente subacqueo o in contesti umidi, poiché il legno necessita di un contesto anaerobico per potersi conservare e per preservare la struttura lignea intatta per secoli. Problemi che si riscontrano quando questa condizione stabile viene alterata nel momento in cui il legno viene esposto all'aria durante lo scavo. Il legno è sottoposto ora a due processi: le particelle d'acqua di cui è composto evaporano, facendo collassare su se stesse le fibre del legno se il materiale non viene costantemente mantenuto bagnato; inoltre, il legno viene aggredito da micro organismi e animali come la *teredo navalis*, il quale, mangiando le fibre del legno, crea dei canali nella struttura degli elementi lignei. Questo tipo di materiale, quindi, richiede una buona e accurata documentazione, che sia al contempo veloce, per permettere il repentino ricoprimento del legno e il ricollocamento in un contesto anaerobico o il recupero dello scafo per la fase di restauro. Il rilievo laser scanning e la fotogrammetria vengono

impiegati in un crescente numero di contesti di scavi archeologici. Sottacqua, l'utilizzo del laser scanner è ancora alle prime fasi di sperimentazione, mentre il rilievo fotogrammetrico è ampiamente utilizzato da molti studiosi poiché risulta essere veloce e preciso per ottenere un modello completo dell'oggetto in questione. Fino all'avvento di queste tecnologie digitali, venivano utilizzati il rilievo diretto, la trilaterazione e la fotogrammetria analogica, sebbene richiedessero lunghe procedure, sia nella fase di rilievo che nella fase di rielaborazione al computer dei dati acquisiti. Un modello tridimensionale può essere ottenuto anche attraverso la rielaborazione di piante o sezioni bidimensionali, come l'autore ha sperimentato durante lo studio di un relitto nel 2009 (Costa et al., 2015), ma la possibilità, con le nuove tecniche, di avere un modello tridimensionale direttamente nelle prime fasi del rilievo risulta essere vantaggioso. I relitti, al momento, non sono molto numerosi, a causa delle difficili caratteristiche di mantenimento del legno: alcuni dei relitti rinvenuti sottacqua che presentano una buona conservazione sono il relitto di Gnalić, in Croazia, il relitto di Phanagoria nel Mar Nero o il relitto di Lipe, in Slovenia. In questi siti gli archeologi hanno utilizzato il rilievo fotogrammetrico multi-immagine con buoni risultati (Cufar et al., 2014, Yamafune et al., 2016, Zhukovsky et al., 2013). I relitti di Yenikapi, a Istanbul, i relitti della Metro di Napoli sono alcuni degli esempi di imbarcazioni rinvenute a terra in cui sono state impiegate entrambe le tecniche di documentazione, laser scanning e rilievo fotogrammetrico (Boetto et al., 2009, Kocabas et al., 2012).

1.2 Premessa alla ricerca

La nostra ricerca è principalmente basata sull'applicazione e sullo sviluppo di tecniche digitali tridimensionali per la documentazione, lo studio e la fruizione di imbarcazioni lignee, essendo queste un importante patrimonio culturale marittimo non sufficientemente valutato poiché considerato molto settoriale. La ricerca è volta a conciliare le finalità scientifiche del rilievo archeologico e gli aspetti didattici e divulgativi di un modello virtuale. Il principale obiettivo è quello dell'impiego delle tecnologie di rilievo come base di partenza per lo studio tecnico-costruttivo e archeologico, ma anche per installazioni multimediali, al fine di promuovere la conoscenza e la fruibilità e l'accesso di questo bene. La connessione tra realtà virtuale e patrimonio culturale sta crescendo molto negli ultimi tempi, creando un dialogo interdisciplinare diretto e una sinergia completa tra i due mondi (Albertini et al., 2014). L'obiettivo del settore culturale è quello di trasformare i dati scientifici in un bene comune, con il presupposto essenziale di rendere le informazioni accessibili a tutti (Anichini et al., 2014). Termini come "interattività", "visualizzazione" e "realtà virtuale" rappresentano solo alcune delle principali parole chiave impiegate in questo ambito. La visualizzazione immersiva e le ricostruzioni tridimensionali di siti archeologici e reperti sono strumenti potenti per raggiungere una diversa conservazione e protezione del patrimonio, consentendo al pubblico un accesso diretto al passato (Bruno et al., 2010).

2. LE TECNOLOGIE DIGITALI PER IL RILIEVO DI BARCHE IN LEGNO

Diverse tecniche sono state impiegate per la documentazione dei relitti antichi e delle barche lignee analizzate per questa ricerca, permettendo di ottenere modelli 3D fotorealistici di soggetti di dimensioni ridotte e di contesti di scavo completi. Ogni reperto - siti archeologici, monumenti o piccoli oggetti - richiede una specifica tecnica, in funzione del soggetto, delle finalità che si vogliono ottenere e delle possibilità economiche e di tempo che si hanno a disposizione per il progetto. Seguendo questo tipo di valutazioni è possibile capire quale tecnica digitale di

documentazione sia appropriata e quale formato o rappresentazione siano corretti per le finalità richieste (Gonizzi Barsanti et al., 2014). Imbarcazioni lignee possono essere rinvenute in scavi di terra o sottomarini e, quindi, possono essere connesse ad altre fasi archeologiche o essere considerate un contesto chiuso. Queste possono, inoltre, richiedere una documentazione posteriore, dopo la musealizzazione dello scafo proveniente da scavi archeologici svolti in anni precedenti. A seconda del contesto, gli autori hanno utilizzato diverse tecniche di documentazione digitale: rilievo topografico, laser scanning e rilievo fotogrammetrico. Queste, quando utilizzate sullo stesso scafo, sono integrate tra di loro tramite un rilievo topografico per orientare questi diversi dati nello stesso sistema di riferimento, in modo da confrontare soluzioni con varie precisioni e risoluzioni. Questo processo permette di comparare diverse tecniche, al fine di valutarne l'accuratezza e scegliere di utilizzare quella migliore per un determinato contesto di utilizzo, con la precisione del modello necessaria ad un determinato scopo.

In vari contesti, gli autori hanno usato il Laser Scanner Faro Focus 3D. Il laser ha un'accuratezza lineare di ± 2 mm e un range di acquisizione tra 60 cm e 120 m; acquisisce 1 milione di punti al secondo e ogni scansione ha una densità di un punto ogni 6 mm ad una distanza di 10 m. Conseguentemente, a seconda della distanza di utilizzo e del numero di scansioni per uno stesso elemento, è possibile ottenere, attraverso un processo di allineamento, una scansione totale con una densità media di un punto ogni 2-3 mm. Ogni scansione crea una nuvola di punti di circa 600 milioni di punti, che viene unita alle altre scansioni con una serie di GCP (*Ground Control Point*) rilevati topograficamente, i quali servono per stimare i parametri della rototraslazione delle nuvole di punti in un sistema di riferimento locale. I *target* dei GCP vengono posizionati sul sito durante tutte le fasi, dal rilievo topografico al laser scanning al rilievo fotogrammetrico, in modo da ottenere le coordinate tridimensionali degli stessi punti per ogni modello virtuale creatosi.

I rilievi fotogrammetrici sulle imbarcazioni sono stati realizzati con una Nikon *reflex* digitale con un sensore CMOS *full frame*, con una dimensione dell'immagine di 6016 x 4016 pixel, ottenendo così una dimensione del pixel di 5.9 micron; questa monta un obiettivo fisso con una focale 20 mm. Le prese delle immagini sono state realizzate attraverso strisciate ortogonali e strisciate radiali; i processi di allineamento delle immagini e di orientamento delle camere, la creazione della nuvola di punti e l'elaborazione della *mesh* texturizzata sono stati svolti tramite il *software Agisoft Photoscan Professional 1.3.0*. La procedura fotogrammetrica è stata ampiamente descritta in altri articoli (Costa et al., 2016), ai quali si rimanda per una completa spiegazione e analisi del procedimento applicativo.

2.1 Casi studio

2.1.1 Il relitto di Comacchio

Il primo caso studio è il relitto di Valle Pega, imbarcazione del IV-VI secolo d.C. rinvenuta nella valle di Comacchio in uno scavo archeologico tardo antico. Le dimensioni della porzione di barca rinvenuta, 20 m di lunghezza per 5 di larghezza totali, e il contesto di inserimento in uno scavo più ampio, hanno determinato l'impiego sia del rilievo laser scanning sia di quello fotogrammetrico, inserendo i due modelli ottenuti all'interno dello stesso sistema di riferimento attraverso il rilievo topografico realizzato con la stazione totale Leica TCR (Fig. 1) (Beltrame et al., 2016). È stato scelto l'utilizzo del laser scanner per il rilievo e lo studio del contesto di scavo e di rinvenimento del relitto, mentre è stato scelto il rilievo fotogrammetrico per la documentazione degli elementi lignei dello scafo ad una più alta risoluzione. Come mostrato in figura 1, il sito archeologico

scavato nel 2015 viene restituito attraverso una nuvola di punti, risultato dell'unione di 12 scansioni da stazioni diverse, riconoscibili dai cerchi più scuri dove lo strumento non ha acquisito punti. L'imbarcazione, invece, è formata da un numero di punti maggiore, poiché risultato di un processo fotogrammetrico ad alta risoluzione. Le fasi di orientamento interno ed esterno sono state svolte su circa 300 immagini, per la parte relativa allo scavo finale del 2015; l'anno precedente era stato realizzato un rilievo fotogrammetrico della porzione di barca scavata attraverso 200 immagini.



Figura 1. Nuvola di punti dello scavo della barca di Comacchio, realizzato sia con rilievo laser scanning che fotogrammetrico

Più che in altri contesti, in questo caso abbiamo deciso di impiegare una documentazione digitale tridimensionale a causa della fragilità del materiale, il quale necessitava di essere tenuto costantemente bagnato per evitare il collasso e la deformazione della struttura lignea. Queste tecniche hanno permesso una acquisizione veloce completa e precisa dei dati, i quali sono stati processati ed elaborati in modo da poter effettuare diverse analisi e misurazioni, anche dopo il risepellimento dello scafo sotto uno strato protettivo di sabbia al termine dello scavo (Costa et al., 2016).

2.1.2 La barca di Ercolano

Le stesse tecniche di rilievo sono state realizzate sulla barca di Ercolano. L'imbarcazione, di 9 m di lunghezza, è stata rinvenuta e scavata negli anni '80 ed è stata restaurata nel corso di un decennio. La conclusione delle fasi di restauro ha permesso la musealizzazione in una moderna e ampia sala espositiva (19 x 8 m) nel sito archeologico della città di Ercolano. Il contesto museale permette di documentare lo scafo senza alcun vincolo temporale, concedendo di svolgere diverse tipologie di analisi e studio sul reperto restaurato. Come per la barca di Comacchio, il rilievo include anche il contesto museale in cui è contenuta l'imbarcazione, il rilievo del quale è utile per le analisi dello spazio espositivo e per la realizzazione di video e installazioni inerenti la barca e la vita di bordo in età romana, impiegando i reperti presenti nella sala. I rilievi laser scanning sono stati effettuati con differenti risoluzioni, in modo da ottenere due nuvole di punti con numerosità diverse, a seconda della precisione necessaria per un determinato scopo. Per la parte relativa alla stanza e agli elementi circostanti l'imbarcazione, si è deciso di utilizzare delle impostazioni di risoluzione a $\frac{1}{4}$ e di qualità a 3x, in modo da svolgere una scansione veloce ($4' 35''$ per l'acquisizione della nuvola di punti e altri 3' per l'acquisizione delle immagini) con una dimensione massima di scansione di 10272 x 4267 punti. Per la parte relativa allo scafo, date le caratteristiche del soggetto, il quale necessita di alta precisione, si è deciso di impiegare una risoluzione maggiore a $\frac{1}{2}$

e una qualità di 4x; questo determina una minor velocità di scansione ($29' 38''$ solo per la parte relativa all'ottenimento della nuvola di punti), ma determina una dimensione massima di scansione quasi doppia rispetto il caso precedente (20580 x 8534 punti). (Fig. 2).



Figura 2. Nuvola di punti della sala espositiva in cui è contenuta la barca di Ercolano

Inoltre, nuvole di punti sono state ottenute anche attraverso la tecnica fotogrammetrica, sia della barca, che degli oggetti inerenti la navigazione e collegabili all'imbarcazione. Per questa tecnica di rilievo, le immagini sono state scattate con una Nikon 3200 full frame e un obiettivo da 18 mm ad una distanza di circa 2 m dal soggetto, consentendo la creazione di un modello ad una scala nominale 1:10 e una precisione di ± 2 mm. Per il rilievo fotogrammetrico, è stata testata anche una GoPro HERO4 Silver per comparare i due modelli ottenuti e valutarne la qualità per un ipotetico impiego di camere amatoriali qualora le necessità ne richiedessero l'utilizzo. Alcuni degli oggetti pertinenti alla navigazione sono posizionati all'interno di teche di vetro; questo non ha permesso la documentazione con la fotocamera Nikon a causa dei riflessi sul vetro visibili all'interno dell'obiettivo. Attraverso uno Smartphone con una fotocamera da 10MP (4160 x 2336 pixel), con il quale era possibile ottenere immagini senza riflessi e con una corretta messa a fuoco, si sono effettuate le strisciate fotogrammetriche lungo il vetro e si è ottenuto un buon risultato, nonostante la precisione metrica non sia la stessa raggiungibile con la fotocamera reflex, per l'impossibilità di conoscere le caratteristiche interne della camera e le distorsioni dell'obiettivo.

2.1.3 Il trabaccolo Nuovo Trionfo

Stessa tecnica fotogrammetrica è stata impiegata sul trabaccolo Nuovo Trionfo, imbarcazione da carico di 18 m di lunghezza costruita nel 1937, di proprietà dell'Associazione Il Nuovo Trionfo di Venezia. Nonostante non abbia un'importanza prettamente archeologica, questa imbarcazione ha un grande valore dal punto di vista della tradizione marinaiasca dell'Alto Adriatico, poiché è uno degli ultimi esemplari di trabaccoli naviganti. Nell'inverno del 2016, si è resa necessaria una ristrutturazione che ha portato alla sostituzione di molti elementi lignei. La messa in cantiere di questa imbarcazione, l'eliminazione degli arredamenti e del fasciame hanno permesso la messa in luce di quella porzione di scafo comunemente non visibile; in questo modo, si è avuta occasione di documentare la struttura interna dello scafo ed effettuare uno studio scientifico sulla tecnica costruttiva impiegata. Per la realizzazione di questo rilievo, per motivi logistici ed economici, non è stato possibile svolgere il rilievo tramite il laser scanner, ma l'impiego della tecnica fotogrammetrica e del rilievo diretto per trilaterazione, ha permesso la realizzazione di pianta, prospetto e sezione dello scafo in un sistema di riferimento orientato in asse con la posizione di galleggiamento del trabaccolo (Fig. 3 e 4).



Figura 3. Modello virtuale della struttura interna del trabaccolo Nuovo Trionfo realizzato con la tecnica fotogrammetrica

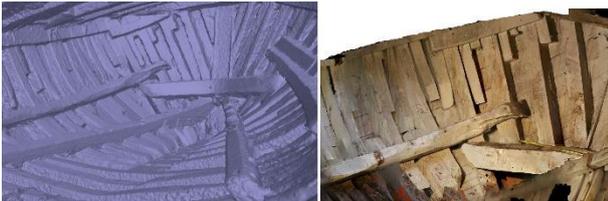


Figura 4. Dettaglio della *mesh* e della *texture* della prua del Nuovo Trionfo

2.1.4 Il brigantino Cygne

Per un progetto di musealizzazione di un relitto di brigantino ottocentesco affondato nel 1812 era richiesto il modello del suo scafo completo; essendo in possesso di solo una piccola porzione lignea, si è deciso di rilevare il modello in scala della sua nave gemella, esposto al *Musée national de la Marine* a Parigi. Il modello ligneo misura 0.92 m, riproducendo il brigantino di 32 m ad una scala 1:35. Le tecniche digitali per la documentazione sono le stesse impiegate per le imbarcazioni di grandi dimensioni, rilievo fotogrammetrico e laser scanning. La Camera reflex Nikon 3200 è stata impiegata per il rilievo fotogrammetrico del modello ligneo (Fig. 5), mentre per il rilievo laser si è utilizzato uno scanner differente da quelli impiegati per il rilievo a più piccola scala. Il triangolatore Konica Minolta Vivid 9-i, con un obiettivo con una distanza focale da 14 mm, consente di rilevare oggetti di piccole dimensioni con una precisione metrica attorno al millimetro. Questo acquisisce direttamente una *mesh* tridimensionale di un oggetto con una scansione di 2.5 secondi. Data la grande quantità di dettagli, per questo modellino ligneo sono state impiegate 40 scansioni, muovendo il laser triangolatore attorno all'oggetto, posto a circa 50 cm dal laser, ad una distanza omogenea di 20 cm tra una scansione e l'altra. Un primo allineamento delle scansioni viene realizzato direttamente durante il processamento della scansione stessa, mentre un controllo metrico più preciso viene svolto a posteriori, durante il quale la *mesh* viene ripulita e aggiustata attraverso il *software Geomagic* (Fig. 6).



Figura 5. Ortofoto del modello ligneo ottenuto con tecnica fotogrammetrica (elaborazione: Massimiliano Secci)

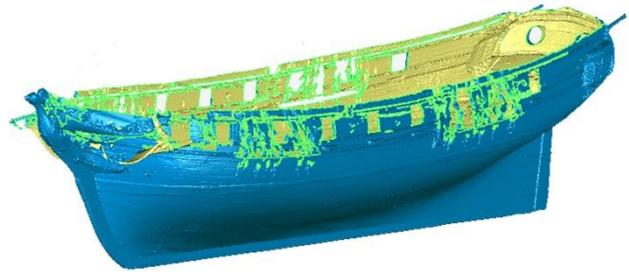


Figura 6. Modello virtuale ottenuto con il triangolatore Minolta Vivid 9-I (elaborazione: Paolo Vernier)

3. PRINCIPALI FINALITÀ DEL RILIEVO DIGITALE

Le tecniche di rilievo digitali applicate al patrimonio culturale possono essere utilizzate con due diverse finalità, una scientifica e una divulgativa.

3.1 Aspetti scientifici del rilievo

Una prima fase è quella di rielaborazione dei dati del modello virtuale al fine di riprodurre ortofoto, piante, prospetti e sezioni, utilizzabili come documentazione archeologica per l'interpretazione e lo studio dell'imbarcazione e del suo contesto storico-archeologico od ottenere un modello poligonale con il quale studiarne la costruzione navale. Una fase di studio in corso d'opera è rappresentata dalla restituzione tridimensionale di ogni elemento ligneo dello scafo del relitto di Valle Pega (Comacchio) per completarne lo studio costruttivo, ricreare la forma dello scafo originali e ipotizzarne le parti mancanti (Fig. 7-8).

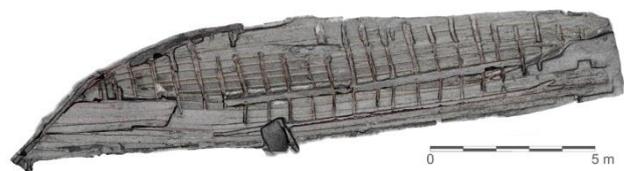


Figura 7. Ortofoto nadirale del relitto di Valle Pega, in cui si vede la triangolazione della *mesh* e le linee tridimensionali degli elementi lignei

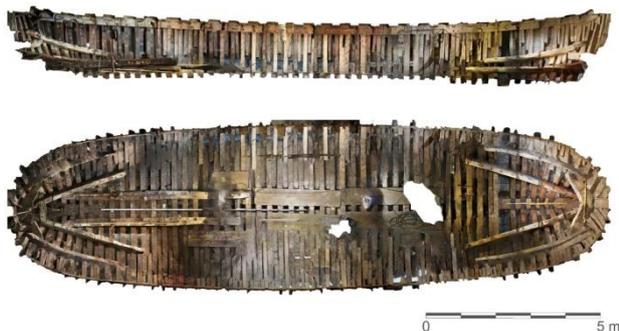


Figura 8. Ortofoto del *trabaccolo* Nuovo Trionfo: fianco sinistro dello scafo (sezione longitudinale lungo la chiglia) e pianta

Nel caso della barca di Ercolano, il rilievo digitale risulta essere di aiuto allo studio della costruzione navale anche da un punto di vista tecnico e logistico. Lo scafo, durante le fasi del restauro, è stato smontato e diviso in due porzioni poiché una parte del fianco destro era collassato su se stesso, andando a sovrapporsi al resto dello scafo. Queste due porzioni, in fase di musealizzazione, non sono state collocate e ripristinate nella loro posizione corretta. La ricostruzione virtuale permette al visitatore di visualizzare lo scafo identificandone la forma originale dell'imbarcazione senza necessariamente avere delle conoscenze pregresse sulla costruzione navale.

Una seconda fase nel processing dei dati consiste nell'analisi delle nuvole di punti ottenute tramite il rilievo fotogrammetrico e quello laser scanning, permettendo una comparazione e una integrazione dei dati, al fine di analizzare le diverse qualità e caratteristiche delle tecniche di rilievo e valutare quella o quelle più appropriate per un determinato contesto.

Le nuvole di punti vengono georeferenziate nello stesso sistema di riferimento attraverso l'utilizzo di *target* di cui si conoscono le coordinate locali, al fine di avere il modello virtuale alla scala corretta e orientato lungo l'asse verticale Z. La comparazione dei dati della barca di Ercolano e della barca di Comacchio è stata effettuata con il software CloudCompare: il risultato è accurato, < 2 mm nella quasi totalità dello scafo, eccetto per quelle porzioni difficilmente raggiungibili in cui il raggio del laser scanner non riesce ad essere abbastanza ortogonale per rispondere in maniera adeguata. Nello specifico la rifrazione crea un doppio *layer* di punti, solo uno dei quali è corretto e corrisponde alla nuvola di punti della fotogrammetria (Costa et al., 2016).

3.2 Aspetti didattici del rilievo

Le tecnologie digitali, inoltre, sono essenziali come base di partenza per rilievi con fini didattici e divulgativi del patrimonio culturale, poiché è importante che anche le installazioni multimediali siano create su un rilievo corretto e accurato.

Attraverso la realizzazione di modelli virtuali, è possibile rimuovere o aggiungere elementi seguendo le fasi stratigrafiche di uno scavo ed effettuare studi e visualizzazioni dei diversi periodi cronologici. Le informazioni spaziali danno maggiore enfasi a un sito archeologico rispetto alle usuali immagini bidimensionali, le quali non mostrano la profondità e la spazialità effettiva di uno specifico contesto (Beraldin et al., 2005).

Per esempio, nel caso studio di Ercolano, siamo stati in grado, in base alla pianta di scavo, di collocare la barca nella posizione in cui era stata rinvenuta e quindi nell'esatta posizione in cui è stata ricoperta dalle ceneri durante l'eruzione del 79 d.C. Per realizzare ciò è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico della parte di città vicina alla spiaggia, attraverso l'impiego di alcune decine di

immagini scattate dal percorso pedonale rialzato del sito archeologico. Nella nuvola di punti ottenuta è stato inserito virtualmente, attraverso l'utilizzo del software *Pointools*, il modello per punti della barca, precedentemente rilevato nella sala espositiva. Grazie a queste tecnologie, il pubblico può interfacciarsi con il patrimonio culturale ed esplorarlo in maniera più efficace (Fig. 9).

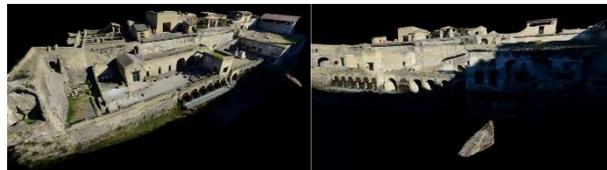


Figura 9. Due diverse viste del sito della città di Ercolano con inserita l'imbarcazione nella posizione originale

Un semplice ma efficace metodo di rappresentazione di un soggetto a fini divulgativi è rappresentato dall'utilizzo di immagini sferiche, che vengono visualizzate attraverso dei visori stereoscopici e interattivi dando l'impressione di trovarsi all'interno del soggetto stesso. Per la nostra ricerca, questa tecnica è stata utilizzata all'interno del *trabaccolo* Nuovo Trionfo ed è stato creato un video statico della porzione di prua dello scafo, visionabile al link <https://www.youtube.com/watch?v=oYrzLdyxPdk>. La camera Nikon *Keymission 360* realizza due immagini a 180° da una stessa posizione; queste subiscono una operazione automatica di unione, detta *stitching*, la quale permette di creare una immagine unica che viene visualizzata, con una visione sferica, attraverso l'impiego di appositi visori tridimensionali o apposite piattaforme *web*, come *YouTube* e *Facebook*.

La figura 10 rappresenta una immagine sferica proiettata in due dimensioni; se si guardasse questa immagine con un apposito visore o su una specifica piattaforma, non si visionerebbero le deformazioni presenti sull'immagine.



Figura 10. Immagine sferica della prua del *trabaccolo* Nuovo Trionfo

Sistemi di realtà immersiva e realtà virtuale basati sul rilievo di oggetti reali sono tecniche che determinano l'impiego di un rilievo metrico e scientifico a fini didattici di grande *appeal* e sono ultimamente molto utilizzati per navigare virtualmente all'interno di siti archeologici e città sepolte. La possibilità di interagire ed esplorare nel dettaglio il patrimonio archeologico con una visione tridimensionale è sicuramente un valore aggiunto alla ricerca scientifica (Bruno et al., 2010).

4. SVILUPPI FUTURI

Negli ultimi anni, "museo virtuale" è un termine frequentemente utilizzato nel settore culturale. Un oggetto, sia questo

archeologico o artistico-pittorico, può essere virtualmente inserito in un contesto museale già esistente o ricreato ex-novo.

Il rilievo realizzato sulla barca di Ercolano verrà utilizzato come base per la creazione di video e installazioni multimediali per la divulgazione e la promozione del bene archeologico. Il restauro e la musealizzazione di questa imbarcazione permettono di utilizzarne lo scafo come supporto per il *video mapping*, senza interagire in maniera fisica con il legno. Per esempio, usando ologrammi e video installazioni, si può ricreare la forma originale dello scafo e il colore del legno direttamente sui resti archeologici presenti. Recentemente, questa tecnica è stata ampiamente usata su monumenti, siti archeologici e musei. Un importante esempio per l'archeologia marittima e navale è il museo del Mary Rose, a Portsmouth, nel Regno Unito, il quale fa ampiamente uso di installazioni, sia di tipo scientifico che didattico, come le ricostruzioni storiche della vita di bordo. Il relitto del Mary Rose, la nave ammiraglia della famiglia reale Tudor nella metà del 1500, venne scavata e recuperata nei primi anni '80; il restauro è durato 20 anni, ma tutte le fasi del lavoro sono state rese visibili tramite il posizionamento del relitto all'interno di una teca di vetro termo-controllata, creata appositamente per permettere la visualizzazione del relitto da parte del pubblico.

La creazione del museo attorno allo scafo è ciò che lo rende così importante nel panorama mondiale del patrimonio marittimo.

5. CONCLUSIONI

Al giorno d'oggi, le nuove tecnologie e i nuovi supporti ottici e grafici, come la realtà virtuale e aumentata, supportano gli studiosi e i ricercatori nella documentazione, nello studio e nella fruizione dei beni culturali nei settori più vasti. La nostra esperienza vuole mettere in luce il corretto approccio verso la documentazione del patrimonio archeologico tramite l'utilizzo e l'integrazione di diverse tecnologie, acquisendo il potenziale di ognuna di queste. L'esperienza pregressa mostra come attualmente il rilievo laser scanning e la fotogrammetria multi-immagine, utilizzando sia camere professionali che amatoriali, siano considerabili come due eccellenti soluzioni per ottenere un rilievo tridimensionale di un'imbarcazione in legno. In aggiunta all'importanza dell'oggetto virtuale a scopi scientifici, la rappresentazione di un reperto archeologico attraverso le tecnologie digitali e sistemi stereoscopici di visualizzazione serve a promuovere la conoscenza del patrimonio al grande pubblico. La realtà virtuale immersiva sta diventando sempre più la nuova frontiera e la nuova concezione di musealizzazione, nella quale il museo stesso può essere considerato una ICT (*Information and Communication Technology*) più che un semplice contenitore di oggetti.

RINGRAZIAMENTI

Due dei casi studio citati in questo articolo (la barca di Comacchio e la barca di Ercolano) fanno parte della tesi di dottorato di Elisa Costa, di cui il prof. Carlo Beltrame e il prof. Francesco Guerra sono i tutor.

Lo scavo di Comacchio è stato condotto dall'Università Ca' Foscari di Venezia, sotto la direzione del prof. Beltrame e della sovrintendenza Archeologica dell'Emilia Romagna. Si ringraziano la suddetta sovrintendenza e il Parco Archeologico di Ercolano per il permesso concesso allo studio delle imbarcazioni.

BIBLIOGRAFIA

Albertini N., Licari D., Brogni A., Barone V., 2014, Natural data fruition: an interactive bridge between science and humanities. *MapPapers, 1-IV*.

Anichini F., Gattiglia G., 2014, La storia nascosta nei dati. *MapPapers, 1-IV*.

Beltrame C., Costa E., 2016, A 5th-Century-AD Sewn-Plank River Barge at St Maria in Padovetere (Comacchio-FE), Italy: an interim report. *International Journal of Nautical Archaeology, 45.2*, pp. 253-266.

Beraldin J.A., Picard M., El-Hakim S.F., Godin G., Valzano V., Bandiera A., 2005, Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. *SPIE Electronic Imaging 2005. Videometrics, IX*.

Boetto G., Carsana V., Giampaola D., 2009, Il porto di Neapolis e i suoi relitti. *Arqueologia Nautica Mediterrània, Monografies del CASC 8*, pp. 457-470.

Bruno F., Bruno S., De Sensi G., Luchi M.L., Mancuso S., Muzzupappa M., 2010, From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage, 11*, pp. 42-49.

Costa E., Beltrame C., Guerra F., 2015, Potentialities of 3D reconstruction in Maritime Archaeology. *Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA, 21st Century Archaeology, methods and tools, Concepts*, pp. 549-556.

Costa E., Balletti C., Beltrame C., Guerra F., Vernier P., 2016, Digital survey techniques for the documentation of wooden shipwrecks. *ISPRS, XLI-B5*, pp. 237-242.

Cufar K., Merela M., Eric M., 2014, A roman barge in the Ljubljanica river (Slovenia): wood identification, dendrochronological dating and wood preservation research. *Journal of Archaeological Science 44*, pp. 128-135.

Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Jimenez Fernandez-Palacios B., Visintini D., 2014, Critical factors and guidelines for 3D surveying and modelling in Cultural Heritage. *International Journal of Heritage in Digital Era, 3.1*, pp. 141-157.

Kokabas U., 2012, The latest link in the long tradition of maritime archaeology in Turkey: the Yenikapi shipwrecks. *European Journal of Archaeology, 15 (1)*, pp. 1-15.

Yamafune K., Torres R., Castro F., 2016, Multi-Image Photogrammetry to Record and Reconstruct Underwater Shipwreck Sites. *Journal of Archaeological Method and Theory*

Zhukovsky M.O., Kuznetsov V.D., Olkhovsky S.V., 2013, Photogrammetric techniques for 3-d underwater record of the antique time ship from Phanagoria. *ISPRS, XI-5/w2*.