



Università  
Ca' Foscari  
Venezia

Corso di Dottorato di ricerca  
inStoria delle Arti  
ciclo XXXI

Tesi di Ricerca

**Tecniche di rilievo digitale  
per la documentazione, lo studio e la fruizione  
di imbarcazioni lignee**

SSD: L-ANT/10

**Coordinatore del Dottorato**

ch. prof. Pier Mario Vescovo

**Supervisore**

ch. prof. Francesco Guerra

**Supervisore**

ch. prof. Carlo Beltrame

**Dottorando**

Elisa Costa

Matricola 962619

---

1. Introduzione	p. 3
2. Le tecniche di rilievo digitale	p. 9
2.1. Il rilievo e la documentazione in archeologia	p. 10
2.1.1. Le tecniche di rilievo delle barche in legno	p. 17
2.2. Il rilievo fotogrammetrico	p. 26
2.2.1. Gli strumenti: le macchine fotografiche e i software	p. 38
2.3. Il rilievo laser scanning	p. 45
2.3.1. Gli strumenti: i laser scanner	p. 50
2.4. Il rilievo topografico	p. 55
2.4.1. Gli strumenti: la stazione totale	p. 57
3. Le tecniche di rilievo applicate ai casi studio	p. 58
3.1. Il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio	p. 59
3.1.1. Il rilievo topografico	p. 65
3.1.2. Il rilievo fotogrammetrico	p. 71
3.1.3. Il rilievo laser scanning	p. 94
3.1.4. La tecnica costruttiva	p. 100
3.2. Il rilievo della barca di Ercolano	p. 117
3.2.1. Il rilievo fotogrammetrico	p. 125
3.2.2. Il rilievo laser scanning	p. 134
Appendice: Il confronto tra le nuvole di punti	p. 138

---

4. Le applicazioni virtuali per lo studio e la fruizione digitale	p. 146
4.1. La barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio	p. 147
4.1.1. La ricostruzione virtuale dello scafo	p. 150
4.1.2. Considerazioni sulla forma dell'imbarcazione	p. 173
4.2. La barca di Ercolano	p. 190
4.2.1. Il tour virtuale nel museo	p. 195
4.2.2. Il tour virtuale nel sito archeologico	p. 198
5. Conclusioni	p. 204
Elenco immagini e tavole	p. 209
Bibliografia	p. 222

**1**

**Introduzione**

---

# 1

## Introduzione

Scopo di questo lavoro è l'analisi critica, attraverso esperienze dirette, delle recenti tecnologie digitali utilizzabili nel campo della documentazione, dello studio e della divulgazione di imbarcazioni lignee di interesse archeologico ed etnografico; queste si rivelano utili nell'affiancare, sostenere e migliorare il lavoro dell'archeologo navale. Obiettivo della tesi è quello di dimostrare l'utilità dell'impiego delle tecniche di rilievo come base di partenza per lo studio tecnico-costruttivo e archeologico e per installazioni multimediali, al fine di promuovere la conoscenza, la fruibilità e l'accesso digitale di questo bene.

In particolare ci si è concentrati sull'analisi dell'applicazione e dello sviluppo delle metodologie per il rilievo tridimensionale e per la fruizione delle imbarcazioni, con una suddivisione della tesi in due macro-aree: il rilievo e le applicazioni virtuali, ben distinte dal punto di vista metodologico, ma strettamente connesse tra di loro nello studio applicativo. Le attività sono state condotte su due diversi casi studio: la barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio<sup>1</sup> e la barca di Ercolano<sup>2</sup>, due imbarcazioni rispettivamente del V sec. d.C. e del I sec. d.C., provenienti da due contesti differenti, da scavo archeologico di terra la prima, studiata e rilevata direttamente *in situ*, e da un contesto museale la seconda, scavata nel 1982 sotto le ceneri di Ercolano e restaurata e musealizzata nei decenni successivi.

La prima parte della tesi, i capitoli 2 e 3, è introdotta da una breve analisi del rilievo e della fotografia come tecniche di rappresentazione dei reperti e dei siti archeologici e da una breve considerazione sulle metodologie di documentazione impiegate fino ad oggi in archeologia navale.

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> G. Maggi, *Ercolano. Fine di una città*, Kairòs edizioni, Napoli, 2013; Steffy R., 1982. *The Herculaneum boat project. Final report*.

Poiché la conoscenza e la valorizzazione del patrimonio culturale e archeologico partono da una documentazione rigorosa del bene<sup>3</sup>, l'archeologo ha la necessità di descrivere i reperti indagati con una rappresentazione grafica in grado di sostituirsi all'oggetto reale<sup>4</sup>; attraverso un rilievo preciso e accurato è, infatti, possibile trarre informazioni metriche e visualizzare e indagare il soggetto nel momento in cui questo viene scavato e rimosso dal suo contesto di rinvenimento, ed è possibile ricomporre le unità stratigrafiche in una ricostruzione ideale per riparare il danno della distruzione che lo scavo inevitabilmente comporta<sup>5</sup>. La necessità di un rilievo capace di produrre un modello corrispondente all'oggetto reale risulta imprescindibile in qualsiasi settore dell'archeologia, ma la ricerca di una tecnica che sia al contempo precisa e veloce nella modalità di esecuzione è ancora più importante nel caso dell'archeologia navale e subacquea a causa della deperibilità del legno. L'archeologia navale, inoltre, richiede competenze specialistiche, motivate dalle caratteristiche peculiari dello scafo che possono essere interpretate correttamente solo da un archeologo navale esperto dell'oggetto di studio<sup>6</sup>; ciò conferma le parole di diversi studiosi<sup>7</sup> che sostengono come non sia possibile eseguire un rilievo corretto senza conoscerne appieno gli argomenti, allo stesso modo in cui uno scavo subacqueo non dovrebbe essere eseguito da un sommozzatore senza conoscenze archeologiche ma esclusivamente da un archeologo subacqueo<sup>8</sup>.

Il rilievo manuale non può essere considerato come una copia della realtà ma come il frutto di una interpretazione che seleziona alcuni elementi significativi in mezzo agli infiniti segni che compongono la visione del manufatto<sup>9</sup>. Per contro, i modelli digitali possono essere considerati come una fotografia reale dell'oggetto documentato, consentendo di ottenere un immenso archivio di dati che può essere riaperto dopo lo scavo in qualsiasi momento, senza perdere dettagli e informazioni del soggetto e dando la

---

<sup>3</sup> C. Achille e C. Monti, *Nuove metodologie di rilievo*, in *Tecniche di rilevamento. Nuove frontiere delle tecnologie*, a cura di R. A. Genovese, Napoli, 2001.

<sup>4</sup> G. Rizza, *Dalla scoperta dell'Antico all'archeologia moderna*, in *Il mondo dell'archeologia*, Treccani editore, 2002.

<sup>5</sup> A. Carandini, *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, Einaudi Editore, Torino, 2000, p. 14.

<sup>6</sup> C. Beltrame, *Documentare in archeologia navale*, in Gandolfi D., a cura di, *Archeologia subacquea. Storia, organizzazione, tecnica e ricerche*, Quaderni della Scuola Interdisciplinare delle Metodologie Archeologiche 3, Istituto Internazionale di Studi Liguri, Bordighera, 2017, pp. 159-174.

<sup>7</sup> M. Bianchini, *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma, 2008, p. 13; Carandini, *Storie dalla terra* cit., p. 12.

<sup>8</sup> P.A. Gianfrotta, P. Pomey, *Archeologia subacquea. Storia, tecniche, scoperte e relitti*. Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 1980, p. 15.

<sup>9</sup> M. Bianchini, *Manuale di rilievo* cit., p. 13.

possibilità di svolgere diverse operazioni nella fase di elaborazione e di analisi dei dati stessi. Con questo non si vuole eliminare il disegno e l'osservazione diretta di un manufatto da parte dello studioso, che rimane prerequisito necessario per la corretta interpretazione di un reperto, ma si vuole evidenziare la necessità di acquisire il patrimonio archeologico attraverso queste tecnologie per poterlo conservare e studiare.

Nel capitolo 3 si prosegue con l'esposizione analitica e teorica di alcune delle principali tecniche di rilievo esistenti per arrivare alla descrizione puntuale dei procedimenti operativi svolti per la documentazione dei due relitti scelti come casi studio. Una prima analisi della tecnica costruttiva del relitto di Santa Maria in Padovetere a Comacchio viene delineata a conclusione di questi capitoli, al fine di evidenziare una delle principali finalità del rilievo -lo studio archeologico della costruzione navale antica- e mostrare l'importanza della documentazione come mezzo rappresentativo e conoscitivo del patrimonio archeologico. L'aspetto tecnologico-navale di questa imbarcazione viene presentato approfonditamente, trattandosi di uno studio recente<sup>10</sup> ed essendo edita esclusivamente con un articolo su una rivista specializzata<sup>11</sup>; l'imbarcazione di Ercolano, invece, è stata studiata da importanti esperti di costruzione navale ai quali si rimanda<sup>12</sup> per una effettiva analisi dello scafo e in questo contesto il rilievo è utilizzato con finalità non legate strettamente alla costruzione navale.

La seconda parte, il capitolo 4, è relativa alle applicazioni digitali effettuate sui due relitti indagati. Questa fase di studio è strettamente connessa alla prima poiché realizzabile sulla base dei rilievi tridimensionali, ma in parte disgiunta poiché viene considerata come un processo secondario di elaborazione dei dati. Le innovazioni tecnologiche e gli strumenti digitali qui impiegati rappresentano infatti un completamento del lavoro per l'interpretazione e la ricostruzione di un'imbarcazione e un'evoluzione importante per la sua divulgazione.

Si è visto come le tecnologie impiegate per il rilievo siano le stesse ma in questa seconda parte di tesi si evidenzierà come siano diverse le applicazioni e le finalità. Il modello

---

<sup>10</sup> Nel 2014, la Soprintendenza si è avvalsa della collaborazione scientifica del prof. Carlo Beltrame del Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università Ca' Foscari che ha chiamato la scrivente a condurre le operazioni sul campo in qualità di assegnista di ricerca e poi di dottoranda.

<sup>11</sup> Cfr. nota 1.

<sup>12</sup> Cfr. nota 2.

tridimensionale della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio è stato utilizzato per studiare approfonditamente le caratteristiche tecnico-costruttive e per ricostruire le forme originali dello scafo, acquisendo una consapevolezza spaziale e volumetrica dell'oggetto studiato, mostrando i suoi molteplici contenuti scientifici e sottoponendosi al giudizio di un pubblico specializzato<sup>13</sup>. Il rilievo della barca di Ercolano, invece, è stato impiegato per riproporre la posizione originale del ritrovamento e contestualizzare il reperto all'interno dell'antica città di Ercolano e per mostrare virtualmente la sala museale implementata da informazioni rigorose presentate con una modalità didattica e divulgativa apprezzabili dalla vasta utenza del museo.

Il processo di studio non termina con la semplice restituzione digitale di un bene culturale, ma parte da questi dati per costruire una ricerca scientifica e un canale di comunicazione basato su strumenti di visualizzazione rivolti *in primis* ad un gruppo ristretto di esperti e successivamente ad un pubblico più ampio<sup>14</sup>. Gli obiettivi finali di un progetto di rilievo possono essere infatti molteplici e diversificati: il modello virtuale viene usato come uno strumento di studio per gli addetti ai lavori secondo una innovativa modalità di interazione con l'imbarcazione oggetto della ricerca oppure viene usato come uno strumento di comunicazione in cui gli utenti finali del patrimonio culturale non devono avere conoscenze specifiche e vengono guidati attraverso una nuova tipologia di visualizzazione offerta dalla realtà virtuale in grado di suscitare un maggior coinvolgimento e una diversa partecipazione del pubblico<sup>15</sup>. Le installazioni digitali possono essere rivolte a differenti categorie di utenti e diverse possono essere le modalità di interazione da parte del pubblico; si può dare la possibilità di accedere ad un semplice filmato costituito da immagini e musica in grado di catturare l'attenzione e stimolare le corde emotive dello spettatore nonostante la sua interazione con il bene culturale possa essere considerato quasi nullo oppure l'esperienza conoscitiva può servirsi di maggiori

---

<sup>13</sup> S. Borghini, R. Carlini, *La restituzione virtuale dell'architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 74.

<sup>14</sup> Pescarin S., Fanini B., Ferdani D., Lucci Baldassari G., Calori L., *Archeologia virtuale, realismo, interattività e performance: dalla ricostruzione alla fruizione on line*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 63.

<sup>15</sup> A. De Maio, *Dalla Realtà al Virtuale: tecnologie innovative per lo studio e la valorizzazione del patrimonio culturale*, «Technology for all», 2018.

valenze comunicative con una più ampia interazione dell'utente attraverso la possibilità di compiere un tour virtuale all'interno di un modello ricostruito<sup>16</sup>.

Il legame tra il patrimonio culturale e le nuove forme di realtà virtuale sta crescendo esponenzialmente negli ultimi tempi, creando un dialogo interdisciplinare diretto e una sinergia completa tra i due mondi<sup>17</sup>; lo scopo della ricerca è, infatti, quello di trasformare i dati scientifici in un bene comune con il presupposto essenziale di rendere le informazioni accessibili a tutti<sup>18</sup>. Termini come 'interattività', 'visualizzazione' e 'realtà virtuale' rappresentano solo alcune delle principali parole chiave impiegate nell'ambito della divulgazione. Le ricostruzioni tridimensionali e la visualizzazione immersiva di siti archeologici e reperti sono strumenti potenti per raggiungere una diversa conservazione e protezione del patrimonio, consentendo al pubblico un accesso al passato<sup>19</sup>.

Gli aspetti del rigore scientifico e storico applicati alla ricerca e alla ricostruzione e una specifica attenzione alle forme del linguaggio comunicativo si scindono e si integrano allo stesso tempo e l'archeologia digitale e virtuale sembra essere l'ambito in cui le due componenti della ricerca e della comunicazione emergono in maniera evidente<sup>20</sup>. L'importanza attribuita alle tecnologie digitali viene accresciuta dalla possibilità di ottenere diversi risultati partendo da un rilievo archeologico, attraverso gli studi analitici e ricostruttivi, per terminare nella comunicazione e divulgazione del bene indagato.

---

<sup>16</sup> Borghini, Carlani, *La restituzione virtuale* cit., p. 74.

<sup>17</sup> N. Albertini, D. Licari, A. Brogni, V. Barone, *Natural data fruition: an interactive bridge between science and humanities*, «MapPapers», 1-IV, 2014, pp.16-23.

<sup>18</sup> F. Anichini, G. Gattiglia, *La storia nascosta nei dati*, «MapPapers», 1-IV, 2014, pp. 1-44.

<sup>19</sup> F. Bruno, S. Bruno, G. De Sensi, M.L. Luchi, S. Mancuso, M. Muzzupappa, *From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition*, «Journal of Cultural Heritage», 11, 2010, pp. 42-49.

<sup>20</sup> Borghini, Carlani, *La restituzione virtuale* cit., p. 72.

**2**

**Le tecniche di rilievo digitale**

---

## 2.1

### **Il rilievo e la documentazione in archeologia**

L'archeologia, considerata come un'operazione distruttiva, è caratterizzata da una natura irreversibile, in quanto è necessario scavare ed eliminare gli strati superiori per raggiungere quelli sottostanti e la documentazione rappresenta l'unica testimonianza permanente di cui dispone l'archeologo nelle fasi di studio<sup>21</sup>. Partendo da questo presupposto, la fase di rilievo di un reperto archeologico assume un'importanza rilevante soprattutto in un contesto di scavo e di unità stratigrafiche, non dovendo, pertanto, tralasciare alcuna informazione. Qualunque traccia può restituire dati importanti ai fini della comprensione del contesto indagato e il livello dei risultati raggiungibili dipende dalla qualità delle informazioni che si sono raccolte durante il rilievo<sup>22</sup>. Fin dai primi studi archeologici, nonostante la documentazione non possieda gli aspetti scientifici e le caratteristiche metriche che si svilupperanno nel Settecento e nell'Ottocento, il disegno permette di ottenere una rappresentazione rigorosa delle scoperte al fine di ricostruire la storia e l'aspetto degli edifici antichi. Il disegno come tecnica di rilievo è da considerarsi testimonianza di un patrimonio archeologico, permettendo la memoria e la documentazione di monumenti e reperti non più presenti al giorno d'oggi o deteriorati.

Il disegno e la documentazione dei reperti e degli scavi archeologici sono rappresentati da grande qualità tecnica e artistica unita al rigore del rilievo, spingendosi sempre più verso l'aspetto scientifico che può risultare da un disegno. Nel XIX secolo, lo sviluppo del metodo stratigrafico influisce notevolmente sull'evoluzione della disciplina, affinando le procedure dello scavo archeologico e a partire da questo momento risulta sempre più necessaria la produzione di piante di fase, al fine di analizzare, documentare e studiare in maniera analitica le unità stratigrafiche una volta scavate. In questo periodo, al disegno si aggiunge la fotografia, la quale comincia pian piano ad avere un ruolo importante nella documentazione archeologica, andando ad affiancare il rilievo metrico e

---

<sup>21</sup> Carandini, *Storie dalla terra* cit., p. 13; Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 110.

<sup>22</sup> Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 110.

il disegno a mano libera, soprattutto per la sua velocità di esecuzione e, in parte, per l'assenza di interpretazione che sottende al disegnatore<sup>23</sup>.

Nel XX secolo, soprattutto negli anni Settanta e Ottanta, ci si confronta con un forte sviluppo tecnologico degli strumenti che comporta una profonda trasformazione delle discipline legate al rilievo e alla rappresentazione del territorio<sup>24</sup>. Le discipline informatiche vanno pian piano a sostituire il disegno manuale a china, sia in ambito architettonico che archeologico e il disegno informatizzato attraverso software *CAD* (*Computer-Aided-Drafting*) diventa la rappresentazione grafica finale di un rilievo realizzato sul sito. Il rapporto tra il rilievo moderno informatizzato e quello manuale tradizionale, deve raggiungere un giusto compromesso, poiché la restituzione al CAD contiene una rigidità intrinseca che potrebbe andare ad inficiare la qualità naturalistica della documentazione, ma, allo stesso tempo, facilita e velocizza il lavoro tradizionale di documentazione composto da piante prospetti e sezioni<sup>25</sup>. Questo metodo di misura e rappresentazione non toglie l'importanza fondamentale del disegno a mano in fase di scavo, il quale rispecchia fedelmente le caratteristiche dell'oggetto ed «È proprio mentre si disegna un oggetto dal vivo che inizia quel processo di comprensione e interpretazione dello stesso che è alla base dello studio dell'archeologo»<sup>26</sup>.

Alcuni dettagli di un reperto archeologico vengono rappresentati in modo migliore attraverso sfumature e particolari difficilmente ottenibili attraverso il disegno tecnico informatico. Per superare questo limite, le moderne tecnologie digitali e i migliori software di disegno insieme alla computer grafica riescono a rappresentare in maniera sempre più veritiera ogni dettaglio e ogni caratteristica di un soggetto, andando a sostituire quasi completamente il disegno manuale nella restituzione finale ma non nelle fasi di scavo; il rilievo diretto in fase di scavo.

Le tecniche di rilevamento, in particolare quelle tridimensionali e digitali, vengono sviluppate e applicate nell'ambito della geomatica, per poi svilupparsi in ambito architettonico e arrivare all'archeologia e ai beni culturali negli ultimi anni quando

---

<sup>23</sup> L. Attilia e F. Filippi, *I colori dell'archeologia: la documentazione archeologica prima della fotografia a colori (1703-1948)*, Roma, Quasar, 2009, pp. 7-8 e 20.

<sup>24</sup> G. Ceraudo, *Introduzione all'aerofotogrammetria applicata all'archeologia*, Latina, Il grande Blu, p. 9.

<sup>25</sup> De Felice G., Sibilano M.G., Volpe G., *Ripensare la documentazione archeologica: nuovi percorsi per la ricerca e la comunicazione*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 2008, p. 271.

<sup>26</sup> Rizza, *Dalla scoperta cit.*

l'interesse di queste scienze si è avvicinato sempre più a questo ambito. L'archeologia ha posto sempre molta attenzione agli aspetti metrici e negli ultimi due decenni ha sviluppato un interesse particolare verso la rappresentazione tridimensionale, sia a fini scientifici che a fini divulgativi, al fine di mantenere in questo modo il potenziale informativo di uno scavo stratigrafico, limitando la perdita di informazioni<sup>27</sup>. Fino agli anni Novanta del secolo scorso, il limite della rappresentazione bidimensionale di un oggetto non era ancora stato superato<sup>28</sup>; la posizione nello spazio e gli aspetti tecnici di un sito archeologico, di un edificio o di un'imbarcazione possono essere di difficile comprensione per un pubblico non tecnico se rappresentati con tavole tecniche ortogonali, mentre questi soggetti possono essere compresi, interpretati e apprezzati maggiormente se visualizzati con una rappresentazione 3D o prospettica, in grado di rendere il soggetto molto più simile al vero rispetto a piante prospetti e sezioni<sup>29</sup>. Le potenzialità di un ambiente 3D sono evidenti non solo nella rappresentazione finale di uno scavo, ma già in fase di rilievo permettendo un'acquisizione diretta del dato reale<sup>30</sup>. Si consideri come esempio il rilievo dell'imbarcazione del trabaccolo Marin Faliero<sup>31</sup>, in cui lo scafo è rappresentato in fig. 2.1-1 secondo le canoniche proiezioni ortogonali del disegno geometrico, interpretabili da un pubblico esperto di questo tipo di rappresentazioni e di costruzione navale, mentre in fig. 2.1-2 è evidente come la vista prospettica del modello 3D permetta una migliore interpretazione dei volumi e delle linee della barca anche dai 'non addetti ai lavori'.

---

<sup>27</sup> De Felice et al., *Ripensare la documentazione archeologica* cit., p. 276.

<sup>28</sup> F. Cairoli Giuliani, *Archeologia. Documentazione grafica*, Roma, De Luca Editore, 1986, p. 7.

<sup>29</sup> Albertini et al., *Natural data fruition* cit., p. 16.

<sup>30</sup> M. Medri, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Laterza, 2003, p. 207.

<sup>31</sup> E. Costa, *Il trabaccolo Marin Faliero. Studio e restituzione grafica dello scafo*, in *Navis 5. Archeologia, storia, etnologia navale*. Atti del I Convegno nazionale, Cesenatico, 13-14 Aprile 2012, a cura di A. Asta, G. Caniato, D. Gnola, S. Medas, 2014.

Al giorno d'oggi, il rilievo attraverso tecniche digitali è comunemente impiegato nel campo dei beni culturali, poiché permette di documentare e registrare, in tempi relativamente brevi, caratteristiche metriche, morfologiche e radiometriche (o colorimetriche<sup>32</sup>) di un soggetto, garantendo un'elevata precisione e un'alta definizione dei dettagli. L'utilizzo di tecnologie digitali innovative non presuppone che il rilievo diretto manuale sia considerato una procedura di secondo livello, in quanto lo svolgimento di un eidotipo misurato del manufatto e quindi un'attenta analisi tramite il disegno rimangono delle procedure fondamentali della documentazione, permettendo la corretta realizzazione degli elaborati digitali che si produrranno in laboratorio. Negli ultimi decenni si è assistito ad un profondo rinnovamento delle scienze del rilievo, grazie agli sviluppi iperbolici e dalla rapida crescita delle discipline informatiche e delle tecnologie elettroniche e digitali. Viviamo in un periodo in cui l'informatica si evolve in maniera molto più veloce di quanto sia mai successo con le scoperte scientifiche e tecnologiche e, di conseguenza, il mondo della ricerca archeologica deve confrontarsi con la continua evoluzione delle tecniche di rilievo, di analisi e di rappresentazione del bene archeologico che devono coesistere con le tecniche tradizionali; ognuna ha uno scopo e una funzione ben precisa e la loro diversità fa in modo che non si possano scindere se si vuole raggiungere un percorso completo di studio e di rappresentazione del patrimonio archeologico.

Inoltre, l'accessibilità degli strumenti degli ultimi anni ha portato ad una sempre maggiore integrazione delle strumentazioni di rilievo diretto e indiretto, manuali e digitali all'interno dello stesso contesto. Come vedremo anche nei casi studio della presente tesi di ricerca, tecniche differenti vengono impiegate per documentare uno stesso contesto, diversificando gli strumenti in riferimento al grado di dettaglio che si vuole raggiungere, alla precisione richiesta e alla scala di rappresentazione che si vuole ottenere, partendo dalla contestualizzazione topografica attraverso il rilievo con GPS per l'inserimento in un contesto georeferenziato, passando per il rilievo topografico locale o al rilievo con laser scanner del contesto archeologico più ampio, fino all'utilizzo della fotogrammetria, di triangolatori o del rilievo diretto dei particolari di piccole dimensioni. Di grande

---

<sup>32</sup> Con 'radiometrico' e 'colorimetro' si intendono le caratteristiche legate al colore di un oggetto secondo una normalizzazione attraverso lo studio dei modelli di colore.

importanza è l'aspetto topografico come base d'appoggio per la contestualizzazione e la rototraslazione dei diversi rilievi, che possono essere stati realizzati in momenti diversi o di porzioni staccate, all'interno dello stesso sistema di riferimento<sup>33</sup>. Le tecnologie moderne e digitali sono da considerarsi un contributo fondamentale nel rilievo del territorio e del patrimonio culturale e un indispensabile supporto al lavoro manuale, che deve rimanere di primaria importanza<sup>34</sup>.

In fase di scavo e di documentazione, molti sono i fattori che incidono sulla scelta della tecnologia di rilievo da utilizzare: le caratteristiche del reperto, la tipologia del contesto di rinvenimento, la disponibilità economica e le tempistiche a disposizione per lo svolgimento del rilievo. Influiscono in questa scelta anche le finalità del rilievo: documentazione dello stato di fatto come archivio digitale, documentazione di un elemento al fine del suo restauro e della sua conservazione, rilievo per la ricostruzione delle forme e la comprensione del manufatto o rilievo per la realizzazione della realtà virtuale<sup>35</sup>.

L'esito dell'evoluzione tecnologica di questi ultimi anni è stata la semplificazione delle fasi di acquisizione e di elaborazione dei dati che ha permesso di velocizzare e di rendere accurati anche soggetti molto complicati per dimensione o per numerosità di dettagli. Nelle tecniche di rilievo diretto, il disegno manuale, per raggiungere risultati accurati e densi di particolari, comporta un grande dispendio di tempo in fase di scavo; inoltre, le rappresentazioni necessarie, come sezioni, profili e prospetti, devono essere pensate contestualmente al rilievo. Con le tecniche digitali, invece, l'ottenimento di un modello virtuale corrispondente al vero permette di decidere a posteriori quale rappresentazione utilizzare e permette di riprodurre non solo la forma, ma anche la materia e il colore di un soggetto. Osservando le problematiche di scavo, si è giunti a considerare il rilievo digitale tridimensionale come la tecnica di documentazione più completa, poiché permette di ottimizzare il lavoro in fase di scavo, di acquisire un dato integro rispetto al

---

<sup>33</sup> C. Balletti, F. Guerra, L. Pilot, *Integrazione di tecnologie 3D multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico*, in X conferenza Nazionale ASITA, Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali ed Ambientali, 14-17 novembre, Fiera di Bolzano, Varese, Artestampa sas, 2006.

<sup>34</sup> M. Bianchini, *Manuale di rilievo* cit., p. 13; Carandini, *Storie dalla terra* cit., p. 75.

<sup>35</sup> S. Gonizzi Barsanti, F. Remondino, D. Visintini, *3D surveying and modeling of archaeological sites – some critical issues*, «Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science», II-5/W1, 2013, pp. 145-166.

rilievo bidimensionale, offrendo inoltre nuove prospettive di ricerca e di studio nelle fasi post-scavo.

Si sostiene, infatti, che l'impatto con le nuove tecnologie abbia indiscutibilmente contribuito ad ampliare le prospettive della ricerca archeologica, sia per quel che riguarda i contenuti del rilievo e della rappresentazione, sia per la riflessione sui principi e sui metodi»<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> Rizza, *Dalla scoperta* cit.

### 2.1.1

#### Le tecniche di rilievo delle barche in legno

La letteratura e le esperienze svolte hanno dimostrato come lo scavo di un'imbarcazione abbia delle caratteristiche uniche e necessiti di procedure diverse rispetto allo scavo di un altro sito archeologico<sup>37</sup>; in particolare quando i relitti vengono rinvenuti in ambiente subacqueo. I fattori peculiari che distinguono l'archeologia subacquea da quella terrestre sono rappresentati dalle caratteristiche del rilievo, dai problemi tecnici legati all'operatività sott'acqua e dalle problematiche legate al materiale dell'imbarcazione stessa<sup>38</sup>. L'ambiente subacqueo e il contesto umido favoriscono la conservazione e la preservazione della struttura lignea, la quale mantiene le condizioni originali e integre se la grana del sedimento è fine<sup>39</sup> o in presenza di argilla pura<sup>40</sup>, creando un perfetto ambiente anossico attorno al manufatto favorendone la conservazione. Al contatto con l'aria, il materiale delle imbarcazioni è soggetto ad un veloce degrado; le particelle di acqua all'interno del legno subiscono un processo di evaporazione che può portare al collasso della struttura lignea, causando distorsioni, restringimenti, rotture o il completo disintegro degli elementi strutturali<sup>41</sup>.

Le precarie condizioni del legno comportano lo svolgimento di alcune procedure in occasione del rinvenimento di un'imbarcazione in un contesto terrestre:

- mantenimento costante del legno in condizioni umide con getti leggeri d'acqua o vaporizzatori, per evitare il deterioramento del manufatto;
- svolgimento del rilievo nel minor tempo possibile e con la tecnica più efficiente al fine di documentare in maniera completa lo scafo;
- recupero dell'imbarcazione e restauro oppure, nel caso questi non possano essere effettuati, mantenimento delle condizioni anossiche attraverso il ricoprimento con geotessuto e sacchi di sabbia fine per il seppellimento del relitto sotto terra<sup>42</sup>. Non si

<sup>37</sup> O. Crumlin-Pedersen, *The Skuldelev Ships I*, «Ships and boats of the north», 4.1, Roskilde, 2002, p. 50.

<sup>38</sup> Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 11;

<sup>39</sup> A. Rosso, *Introduzione all'archeologia delle acque*, Savioprint, 1987, p. 61.

<sup>40</sup> Come nel caso della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, cfr. infra, p.

<sup>41</sup> D.W. Grattan, R.W. Clark, *Waterlogged wood*, in C. Pearson, *Conservation of marine archaeological objects*, Butterworths & Co. Ltd., 1987, p. 55.

<sup>42</sup> M.P. Valentini, J.G. Cano, *A controversial alternative conservation case: reburial of the Zencity shipwreck, Buenos Aires*, in Ikuwa V, pp. 335-336.

conoscono, però, le effettive condizioni di conservazione del materiale ligneo, non essendo stato effettuato un monitoraggio scientifico su imbarcazioni scavate e riseppellite.

In fase di scavo, risulta corretto procedere con una documentazione accurata onde evitare la perdita di informazioni metriche, radiometriche e materiche, nel caso in cui la struttura dell'imbarcazione sia soggetta a deformazioni durante il restauro o il riseppellimento.

La necessità di una documentazione accurata, capace di produrre un modello corrispondente all'oggetto reale, risulta imprescindibile in tutti i campi dell'archeologia, ma la ricerca di una tecnica che sia al contempo precisa e veloce nella modalità di esecuzione è ancora più importante nel caso dell'archeologia navale per la deperibilità del legno e dell'archeologia subacquea per le tempistiche ristrette che si hanno sott'acqua<sup>43</sup>. Per le imbarcazioni, caratterizzate da forme complesse e composite, così come per i relitti subacquei, specialmente quelli caratterizzati da un'ampia componente verticale con differenze di quote, è necessaria una tecnica di documentazione tridimensionale per estrarre informazioni e rendere meglio comprensibile il sito<sup>44</sup>.

Nel campo dell'archeologia subacquea, la difficoltà di utilizzare delle tecnologie digitali normalmente impiegate nell'archeologia di terra, come le stazioni totali e i laser scanner, ha orientato la ricerca principalmente verso il metodo topografico della trilaterazione e della tecnica fotografica<sup>45</sup>. La tecnica della trilaterazione con misure lineari è stata utilizzata per la prima volta per produrre una documentazione 3D sullo scavo del relitto del Mary Rose nel 1982 da Nick Rule, il quale propose la tecnica del DSM (*Direct Survey Method*)<sup>46</sup>. Alla fine degli anni Novanta, Peter Holt sviluppò il software *Site*

---

<sup>43</sup> M. Eric, R. Kovacic, G. Berginc, M. Pugelj, Z. Stopinsek, F. Solina, *The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites*, in Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress 2013, 28 Oct - 1 Nov, Marseille, France, IEEE, 2013, vol. 2; Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 110.

<sup>44</sup> P. Drap, J. Seinturier, L. Long, *Archaeological 3D modelling using digital photogrammetry and expert system. The case study of Etruscan amphorae*, in Proceedings of the VI Infographie Interactive et Intelligence Artificielle International Conference, 2003; K. Yamafune, R. Torres, F. Castro, *Multi-Image photogrammetry to record and reconstruct underwater Shipwreck Sites*, «Journal of Archaeological Method and Theory», p. 4; J. Green, *Maritime archaeology. A technical handbook*, Second edition, San Diego, California, Elsevier Academic Press, 2004, p. 100.

<sup>45</sup> P. Drap, *Underwater photogrammetry for archaeology*, in *Special applications of photogrammetry*, a cura di D. Silva, 2012.

<sup>46</sup> N. Rule, 1989. *The direct survey method (DSM) of underwater survey and its application underwater*. In *The International Journal of Nautical Archaeology* 18.2, pp. 157-162.

*Recorder*<sup>47</sup>, il quale ancora ai giorni nostri rappresenta uno dei metodi di rilievo più utilizzati in archeologia subacquea<sup>48</sup>. Questa tecnica consiste in una trilaterazione ottenuta misurando i punti di dettaglio del sito archeologico da una serie di punti di controllo esterni utilizzando una bindella per le distanze lineari e un computer subacqueo per conoscerne la profondità; tutte le misure sono elaborate da uno speciale software 3D che calcola le coordinate x, y, z dei punti nello spazio tramite compensazione delle misure lineari e della quota (fig. 2.1-3).



Fig. 2.1-3. Rilievo per trilaterazione attraverso il software *Site Recorder* del relitto del Mary Rose. (da *Site Recorder, User Manual*)

La sperimentazione delle tecniche di rilievo e di documentazione è in rapido sviluppo e la possibilità, con le nuove tecniche, di avere un modello tridimensionale direttamente nelle prime fasi del rilievo risulta essere vantaggioso rispetto all'ottenimento di un modello tridimensionale attraverso la rielaborazione di piante e sezioni bidimensionali o la trilaterazione<sup>49</sup>. L'utilizzo del laser scanner è ancora alle prime fasi di sperimentazione, mentre il rilievo fotogrammetrico è ampiamente utilizzato da molti studiosi<sup>50</sup> poiché

<sup>47</sup> *Site Recorder User manual*, Getting started with Site Recorder, 3HConsulting, 2007.

<sup>48</sup> P. Holt, 2003, *An assessment of quality in underwater archaeological surveys using tape measurements*, *International Journal of Nautical Archaeology* 32(2). pp. 246-251.

<sup>49</sup> G. Indruszewski, G. Farin, A. Razdan, A. Simon, D. Van Alfen, Rowe J., 2004, *Application of 3D Modeling in Ship Reconstruction and Analysis: Tools and Techniques*, in *Enter the Past. The E-way into the four Dimensions of Cultural Heritage*. CAA 2003, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceeding of the 31st conference (Vienna, april 2003) (Bar Int. Ser., 1227), Oxford, pp. 263-270, p. 263.

<sup>50</sup> Per citarne solo alcuni: S. Demesticha, D. Skarlatos, A. Neophytou, *The 4th century B.C. shipwreck at Mazotos, Cyprus: new techniques and methodologies in the 3D mapping of shipwreck excavations*, «*Journal of Field Archaeology*», 39.2, 2014, pp. 134-150; J. Henderson, O. Pizarro, M. Johnsons-Roberston, I. Mahon, *Mapping Submerged Archaeological Sites using StereoVision Photogrammetry*, «*The International Journal of Nautical Archaeology*» 42.2, 2013, pp. 243-56; M. Martorelli, C. Pensa, D. Speranza, *Digital photogrammetry for documentation of maritime heritage*, «*Journal of maritime archaeology*», vol. 9, 2014, pp. 81-93; J. McCarthy, J.

risulta essere veloce e preciso per ottenere un modello completo dell'oggetto in questione. Integrare questa ultima metodologia di documentazione con il rilievo tecnico e le misurazioni dirette è la soluzione migliore per avere uno studio completo, esauriente e preciso di un sito archeologico o di un'imbarcazione.

Durante i progetti di indagine subacquea su relitti di imbarcazioni o dei relativi carichi svolti dal team del Dipartimento di Studi Umanistici dell'Università Ca' Foscari di Venezia, sotto la direzione del professor Carlo Beltrame, sono stati sperimentati dalla sottoscritta vari metodi di rilievo secondo modalità diverse in relazione al contesto di rinvenimento. Le tecniche impiegate per lo studio dei siti archeologici sono finalizzate alla produzione di un'elaborazione 3D, che può essere originata da un'indagine tridimensionale (triangolazione o fotogrammetria), da una documentazione bidimensionale (pianta e sezioni) o direttamente dalla misurazione di ogni singolo elemento.

Al fine di illustrare la rapida evoluzione che hanno avuto le tecnologie di rilievo in ambito navale rispetto ad altri ambiti archeologici, si porta ad esempio il relitto di *Sveti Pavao* indagato negli ultimi anni e in cui sono state impiegate contestualmente diverse tecniche di rilievo atte a produrre il modello 3D finale.

L'imbarcazione, datata al 1567 con un carico di vasellame prodotto a Iznik, in Anatolia, e armato di artiglieria veneziana in bronzo, venne scoperta sul fondale di uno scoglio nell'isola di Mljet, ad una profondità di 42 m<sup>51</sup>. Durante le missioni di scavo del 2010 e 2011, organizzate in collaborazione con il Croatian Conservation Institute, sotto la direzione di Igor Miholjek, si è deciso di scavare e documentare la porzione di scavo per studiarne la tecnica costruttiva (fig. 2.1-4).

---

Benjamin, *Multi-image photogrammetry for underwater archaeological site recording: an accessible, diver-based approach*, «Journal of maritime archaeology», 3, 2014; F. Remondino, M.G. Spera, E. Nocerino, F. Menna, F. Nex, *State of the art in high density image matching*. «Photogrammetric Record», vol. 29, Issue 146, 2014, pp. 144-166; M.O. Zhukovsky, V.D. Kuznetsov, S.V. Olkhovsky, *Photogrammetric techniques for 3-d underwater record of the antique time ship from Phanagoria*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XI-5/w2.

<sup>51</sup> C. Beltrame, S. Gelichi, I. Miholjek, a cura di, *Sveti Pavao shipwreck. A 16th Century Venetian Merchantman from Mljet, Croatia*, Oxbow Books, Oxford, Philadelphia, 2014.



Fig. 2.1-4. Relitto di *Sveti Pavao*, isola di Mljet, Croazia.

A causa della profondità del relitto, dell'autonomia dell'aria e dei motivi iperbarici, il tempo di permanenza sul fondale era di soli 18 minuti e dunque la scelta della tecnica di documentazione da utilizzare era legata soprattutto alla velocità di esecuzione e alla precisione ottenibile essendo in presenza di un soggetto molto dettagliato. La porzione di uno scafo in legno è caratterizzata da elementi di piccole dimensioni che devono essere documentati precisamente per capirne la tecnica di connessione e le caratteristiche costruttive.

Innanzitutto, è stato deciso di realizzare una fotogrammetria da posizioni libere<sup>52</sup> e, in un secondo momento, di realizzare un modello 3D che potesse consentire migliore comunicazione e studio delle caratteristiche tecniche e della forma, nonché una misurazione degli stessi in qualsiasi momento durante le fasi di ricerca. La profondità del relitto e la fragilità del legno non permettevano, infatti, di lasciare lo scafo scoperto per controlli futuri, ma richiedeva una copertura immediata senza alcuna possibilità di ritorno

---

<sup>52</sup> C. Alfonso, *The photogrammetric documentation of the hull*, in C. Beltrame, *Sveti Pavao shipwreck*, cit., p. 17; J. Green, S. Matthews, T. Turanli, *Underwater archaeological surveying using PhotoModeler, virtual mapper: Different applications for different problems*. «International Journal of Nautical Archaeology» 31/2, 2002, pp. 283-292.

sul sito per nuove misurazioni. Per la realizzazione del modello 3D, creato con il software di modellazione *Rhinoceros*, la documentazione disponibile era rappresentata da disegni bidimensionali prodotti dalla fotogrammetria, una pianta e tre sezioni trasversali (fig. 2.1-5), da fotografie e da misure di dettaglio di ogni elemento ligneo.

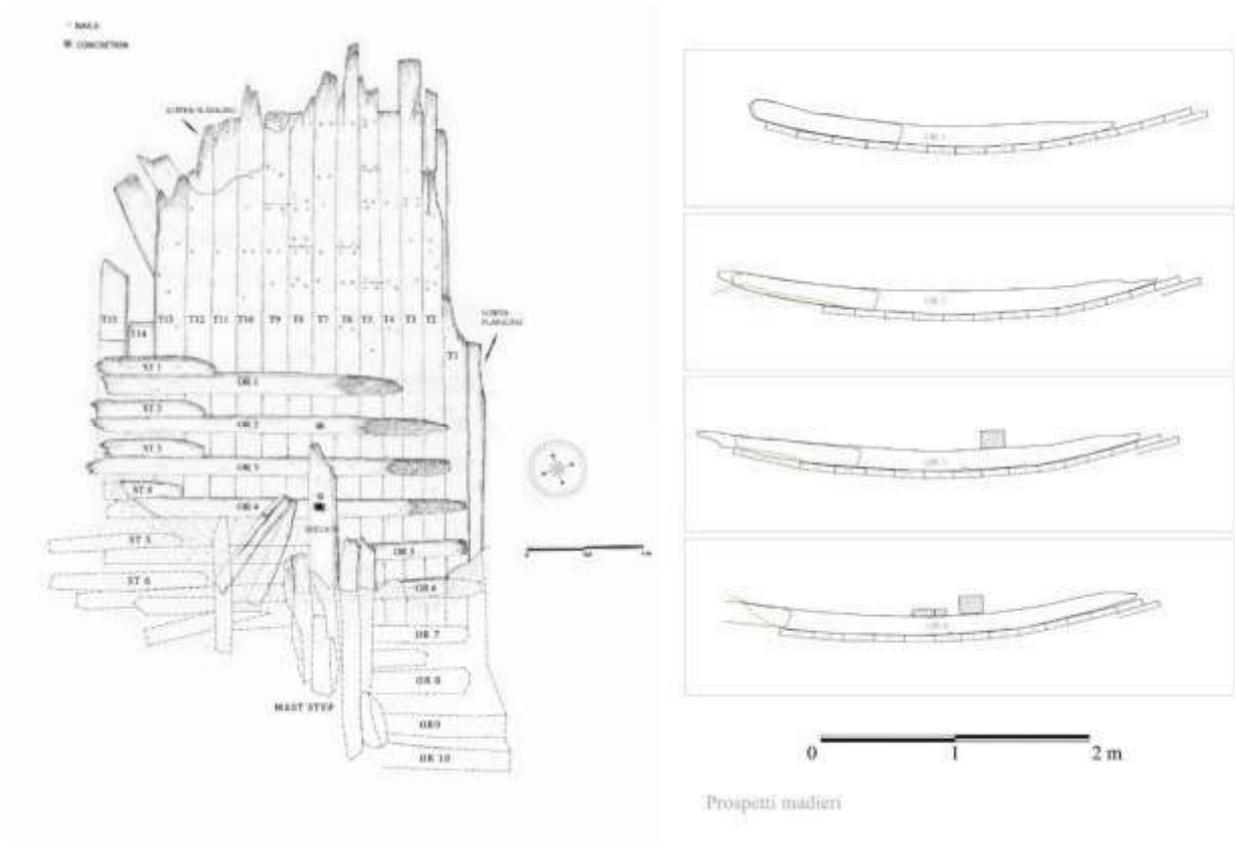


Fig. 2.1-5. Pianta e sezioni del relitto *Sveti Pavao*. (Elaborazione: C. Alfonso)

La connessione di diverse tecniche di documentazione ci ha permesso di rappresentare e modellare gli elementi costruttivi dello scafo in legno (fig. 2.1-6 e fig. 2.1-7). Per la rappresentazione cromatica e il *rendering* sono state utilizzate *texture* diverse per ogni essenza lignea, con le venature e i colori tipici del legno, al fine di ricreare verosimiglianza con le caratteristiche reali degli elementi, essenziali per lo studio della costruzione navale (fig. 2.1-8)<sup>53</sup>.

Questo tipo di documentazione consente di analizzare, studiare e apprezzare i dettagli tecnici della costruzione navale da diverse prospettive e consente di misurare ogni

<sup>53</sup> E. Costa, *3-D reconstruction of the hull*, in C. Beltrame, *Sveti Pavao shipwreck*, cit., p. 23.

elemento costruttivo singolarmente, dando la possibilità di effettuare studi analitici su volume e peso dello scafo esistente.

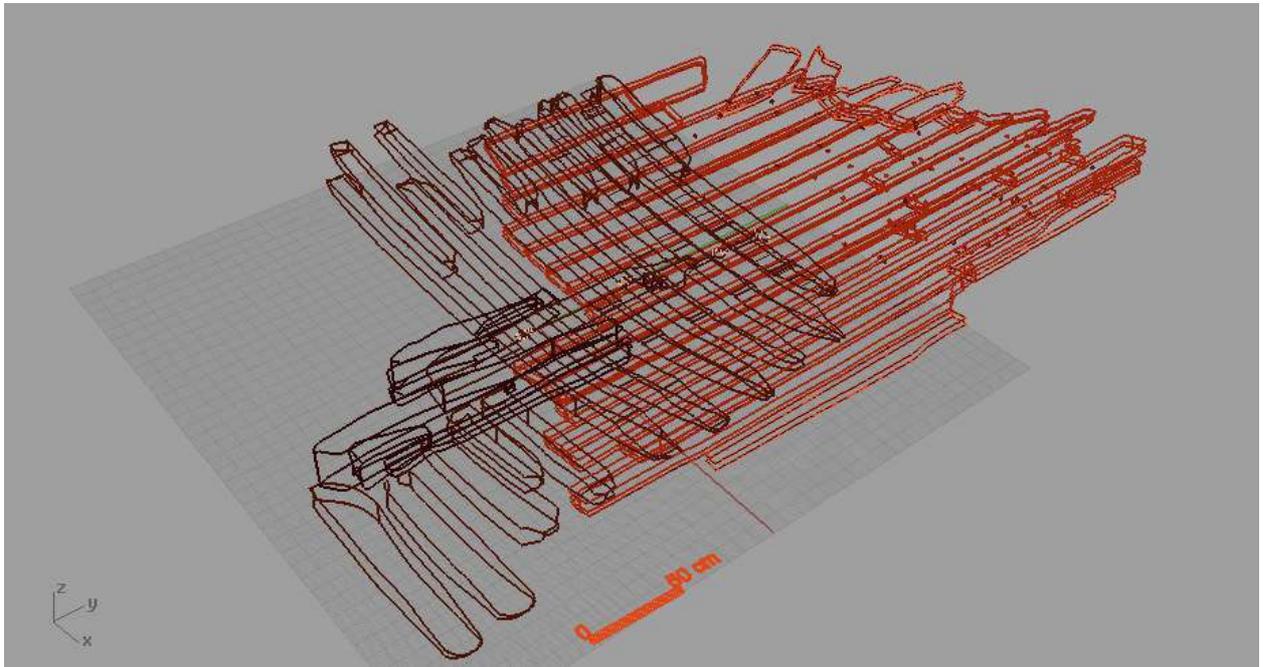


Fig. 2.1-6. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione *wireframe*.

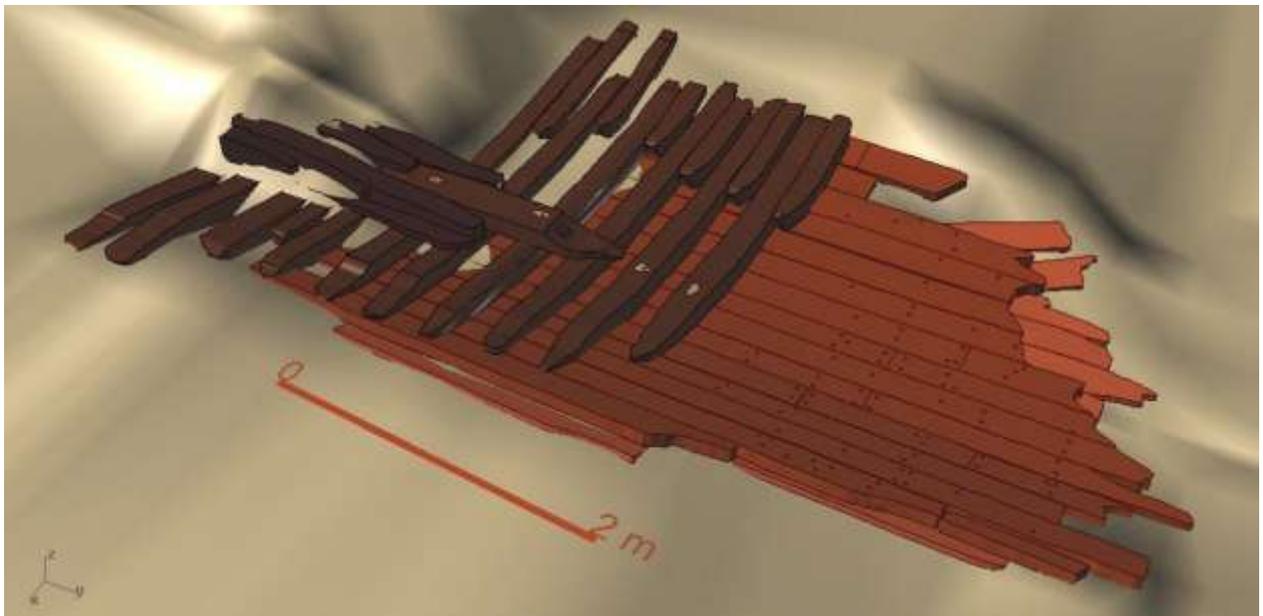


Fig. 2.1-7. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione ombreggiata.



Fig. 2.1-8. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione renderizzata.

Considerando i problemi logistici dell'esempio proposto come l'elevata profondità del sito e la necessità di coprire il relitto subito dopo la documentazione, si può ribadire come la ricostruzione tridimensionale sia la migliore soluzione per un soggetto difficile e composito, poiché permette di ottimizzare il lavoro sott'acqua, di ottenere dati più completi rispetto ai disegni bidimensionali offrendo una buona base per i successivi studi di ricostruzione della nave o del carico importanti in archeologia marittima. Il modello 3D consente una migliore visione del relitto nel suo contesto e nel frattempo produce un'immagine di grande *appeal* per il pubblico, il quale si trova, in questo modo, nella condizione di apprezzare maggiormente il sito archeologico anche senza alcuna esperienza nella comprensione di una documentazione archeologica tecnica o senza la possibilità di visitare il sito personalmente.

La presente ricerca si focalizza sul complesso tema delle tecnologie digitali applicate al rilievo di imbarcazioni lignee. Le metodologie descritte sono state impiegate per la documentazione dei relitti analizzati come casi studio e hanno permesso di ottenere modelli 3D fotorealistici di soggetti dalle caratteristiche differenti. Ogni reperto richiede

una specifica tecnica di rilievo, in funzione del contesto, delle finalità che si vogliono ottenere e delle possibilità economiche e del tempo a disposizione per il progetto<sup>54</sup>. Gli autori hanno utilizzato diverse tipologie di documentazione digitale che vengono integrate tra di loro nello stesso sistema di riferimento, in modo da confrontare differenti soluzioni con precisioni e risoluzioni differenti. Questo processo permette di comparare le tecnologie impiegate e valutare quella più idonea al contesto di utilizzo e più corretta per ottenere la precisione del modello necessaria allo scopo prefissato.

---

<sup>54</sup> F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 91.

## 2.2

### Il rilievo fotogrammetrico

Per riuscire a comprendere pienamente la fotogrammetria bisogna fondare le proprie conoscenze sulla fotografia stereoscopica alla base di questa tecnica di rilievo. Verso la seconda metà dell'Ottocento iniziano i primi studi legati alla stereoscopia, una tecnica fotografica che rappresenta lo stesso soggetto, riprendendolo da due punti di vista diversi<sup>55</sup>; con questa coppia di fotogrammi è possibile avere una visione tridimensionale del soggetto, così come riusciamo a percepire la profondità e la tridimensionalità della realtà attorno a noi grazie alla visione oculare, che è una visione doppia dello stesso oggetto e viene quindi considerata stereoscopica. Questi fotogrammi potevano essere scattati da una stessa camera che veniva spostata di un determinato spazio mantenendo lo stesso asse ottico, oppure potevano essere creati dallo scatto simultaneo di due camere parallele con lo stesso asse ottico<sup>56</sup>.

Nel 1890 si osserva un enorme sviluppo di questa tecnica e si iniziano ad utilizzare modelli di camera con due obiettivi, i quali creano in maniera automatica una lastra fotografica con le due coppie di immagini visualizzate attraverso un visore stereoscopico creato appositamente per contenere le lastre e rendere visibile all'occhio umano la tridimensionalità. Queste immagini venivano spesso impiegate per rappresentare monumenti archeologici e ancora adesso vengono studiate e utilizzate per ricostruire gli edifici rappresentati, soprattutto se non più presenti. Negli scavi archeologici, la tecnica stereoscopica ha avuto un ruolo di grande importanza per la documentazione dei siti in fase di scavo e dei monumenti, a causa della grande quantità di dati metrici che queste immagini riuscivano a fornire<sup>57</sup>; ai giorni nostri, è evidente che la tecnica fotogrammetrica ha mantenuto una grande importanza e viene impiegata in maniera estensiva e approfondita in tutti gli scavi e per il rilievo di beni storici, artistici e architettonici<sup>58</sup>.

---

<sup>55</sup> Konecny 2014, p. 143.

<sup>56</sup> C. Pavia, *Roma antica in 3 dimensioni: storia e tecnica della fotografia stereoscopica in ambito architettonico*, Gangemi editore, 2005, pp. 23-25.

<sup>57</sup> Crumlin-Pedersen O., *The Skuldelev Ships I*, «Ships and boats of the north», 4.1, Roskilde, 2002, p. 51; Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 122.

<sup>58</sup> Pavia, *Roma antica* cit., p. 26-32.

Il primo sviluppo tecnico della fotogrammetria per il rilievo si ha, agli inizi del XX secolo, con l'impiego della fotografia aerea per la documentazione di siti archeologici. Le riprese, realizzate con un pallone aerostatico e tramite aerei del primo dopoguerra, rappresentano il principio di una tecnica che divenne sistematica per le ricognizioni e la foto-interpretazione del territorio, in cui si individuano le strutture interrato grazie alle variazioni della crescita dell'erba, elaborando una vera e propria disciplina scientifica e archeologica per il rilievo tramite l'aero-fotogrammetria<sup>59</sup>.

Dalla fotogrammetria aerea a piccola scala per le carte territoriali si passa facilmente alla fotogrammetria aerea a grande scala per la rappresentazione di scavi archeologici; per la rappresentazione degli alzati nei siti archeologici o dei reperti di medie e piccole dimensioni, la tecnica fotogrammetrica viene definita 'dei vicini' o '*close-range photogrammetry*'<sup>60</sup>.

La tecnica fotogrammetrica si basa sul principio della fotografia come prospettiva centrale che non corrisponde alla proiezione geometrica ideale rappresentata dalle proiezioni ortogonali mongeeane, impiegate per il disegno tecnico. Il termine stesso fotogrammetria descrive in maniera precisa l'obiettivo di questa tecnica di rilievo: dal greco *φῶς*, *φωτοσ*, luce, *γράμμα* *γράμματος*, disegno, *μέτρον*, misura = misura del disegno di luce. La fotogrammetria consiste infatti nell'ottenere le misure di un oggetto partendo dalle raffigurazioni di questo, cioè dalle immagini.

Ovviando alla necessità di interagire con l'oggetto stesso ed essendo dunque non invasiva, non distruttiva e con il minimo impatto sul reperto archeologico, questa tecnica risulta essere, insieme al laser scanning, una delle applicazioni più diffuse in campo archeologico, architettonico, ma anche naturalistico e ambientalistico.

---

<sup>59</sup> Ceraudo, *Introduzione all'aerofotogrammetria* cit., p. 27-31; Rizza, *Dalla scoperta* cit.

<sup>60</sup> T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, J. Boehm, *Close-range photogrammetry and 3D imaging*, 2<sup>nd</sup> edition, Walter de Gruyter GmbH, Berlin- Boston, 2014; F. Remondino, F. Menna, *Image-based surface measurement for close-range heritage documentation*, «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science» 37/B5-1, 2008, pp. 199-206.

La fotogrammetria è la tecnica alla base della ricostruzione di un oggetto tridimensionale di cui possediamo delle immagini fotografiche e quindi delle prospettive<sup>61</sup>. Ad punto tridimensionale di un oggetto corrisponde un solo punto bidimensionale sull'immagine determinato dalla retta proiettiva passante per il centro di prospettiva O. Il procedimento inverso, la determinazione del punto oggetto partendo dal punto immagine, non è realizzabile poiché non è possibile determinare la corretta posizione del punto sulla retta. Di conseguenza è necessario ottenere almeno una seconda immagine che raffiguri il nostro punto oggetto; al fine di calcolare le rette passanti per il punto e i centri di prospettiva O ed effettuare un'intersezione in avanti delle due rette che si intersecheranno in un solo punto. La possibilità di conoscere le coordinate tridimensionali dei punti di un oggetto permette di trasformare la rappresentazione prospettica dell'immagine fotografica in una proiezione ortogonale<sup>62</sup> (fig. 2.2-1 fig. 2.2-2).

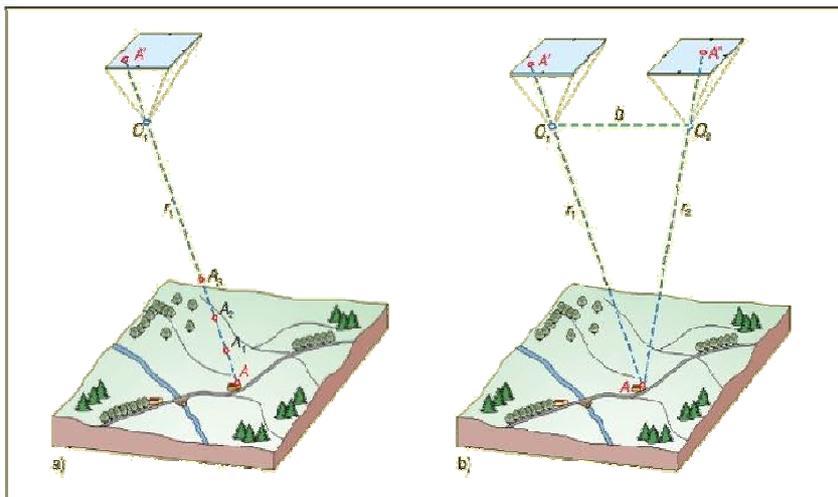


Fig. 2.2-1. Rette passanti per il punto A sull'oggetto e per il punto A' e A'' sulle immagini. (da Cannarozzo et al., p. 6)

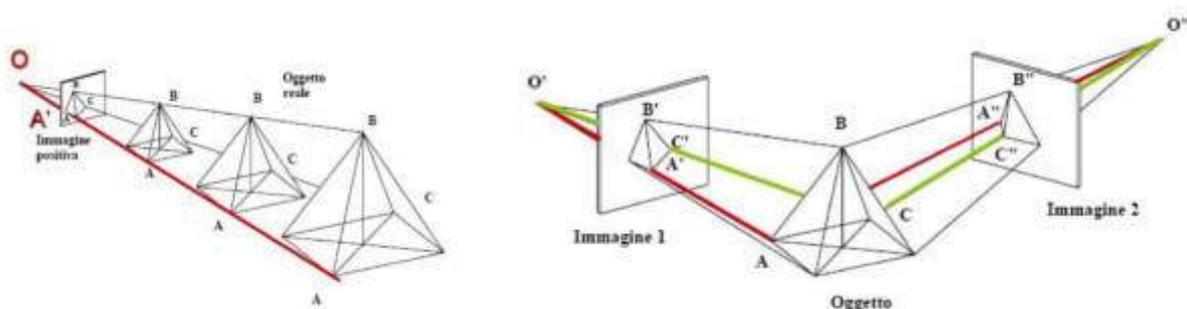


Fig. 2.2-2. Rette passanti per il punto A sull'oggetto e per il punto A' e A'' sulle immagini.

<sup>61</sup> Ceraudo, *Introduzione all'aerofotogrammetria* cit., p. 59.

<sup>62</sup> M. Medri, *Manuale di rilievo* cit., p. 67-68.

Dal punto di vista analitico, il punto A possiede 3 coordinate xyz che sono incognite, mentre il punto A' sull'immagine ha coordinate xy note; per ogni coordinata è possibile scrivere un'equazione, ma con due equazioni e tre incognite il nostro sistema è ipodeterminato e quindi non risolvibile. Se aggiungiamo una seconda immagine in cui il punto A'' ha coordinate xy note, le equazioni diventano 4, sempre per 3 incognite, creando così un sistema iperdeterminato che permette di essere risolto.

La fotogrammetria si basa su tre ordini di grandezze in stretta relazione tra di loro:

- le coordinate tridimensionali xyz dell'oggetto
- le coordinate bidimensionali xy dei punti di questo oggetto sullo spazio immagine
- una serie di parametri  $\Gamma$ <sup>63</sup>.

Le relazioni tra questi sono spiegate attraverso le diverse fasi della fotogrammetria: la presa, l'orientamento e la restituzione<sup>64</sup>.

Durante la fase di presa, le coordinate oggetto tridimensionali si trasformano in coordinate immagine bidimensionali secondo alcuni parametri interni alla camera. La geometria di presa delle immagini è di grande rilevanza per ottenere un modello fotogrammetrico corretto metricamente. Diversi possono essere gli schemi utilizzabili a seconda della forma dell'oggetto che si sta rilevando, mantenendo una sovrapposizione tra le immagini del 60 %, in maniera tale da riuscire ad avere una sovrapposizione anche tra la prima e la terza immagine della sequenza del 20 % (fig. 2.2-3).

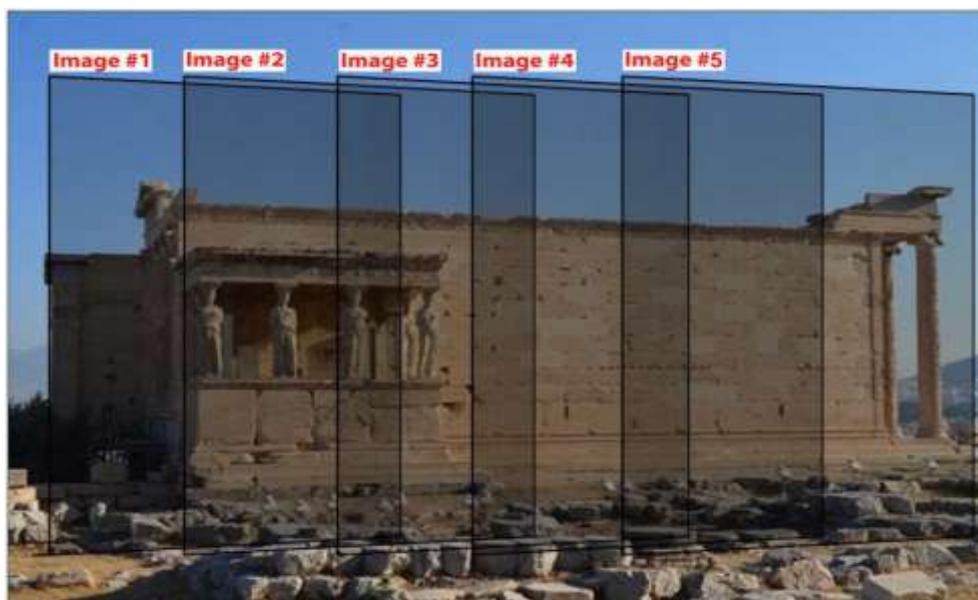


Fig. 2.2-3.  
Esempio di sovrapposizione delle immagini della strisciata ortogonale. Elaborazione personale dell'immagine.

<sup>63</sup> G. Fangi, *Note di fotogrammetria*, Ancona, CLUA, 1997.

<sup>64</sup> R. Cannarozzo, L. Cucchiarini, W. Meschieri, *Misure, rilievo, progetto*, Bologna, Zanichelli editore, 2012.

In funzione delle dimensioni dell'oggetto, della distanza da cui è possibile fotografare e dalla precisione che si vuole raggiungere, non è sempre possibile raffigurare il soggetto nella sua interezza; in questo caso è possibile effettuare delle strisciate parallele che si sovrappongono del 20 % in modo da individuare dei punti omologhi anche tra strisciate diverse.

Le modalità di presa si suddividono principalmente in due tipologie, le strisciate ortogonali e le immagini radiali. Nelle strisciate ortogonali si mantiene fissa la posizione normale, quindi ortogonale, della camera verso il soggetto; una volta scattata la prima immagine, si sposta la camera di una distanza tale da mantenere la giusta sovrapposizione, in maniera parallela al soggetto. A questo schema possono essere associate delle immagini convergenti e inclinate verso l'oggetto, realizzate alle estremità della strisciata, in modo da irrobustire il modello fotogrammetrico. Lo schema radiale viene utilizzato quando il soggetto presenta delle curvature o è a tutto tondo, come per esempio l'abside di una chiesa o una statua; in questo caso le immagini non verranno scattate parallelamente ma ruotando in modo radiale attorno al soggetto, tenendo la stessa distanza da questo come per le strisciate ortogonali, ma non mantenendo più l'asse ottico parallelo tra i diversi scatti (fig. 2.2-4-5-6).

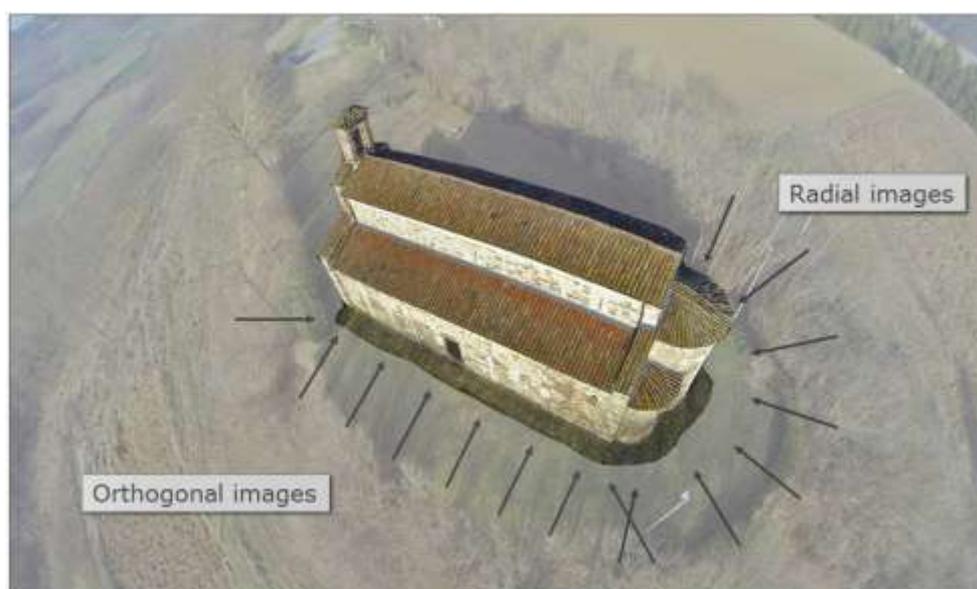


Fig. 2.2-4.  
Schema delle strisciate ortogonali con convergenti e immagini radiali (Elaborazione personale dell'immagine)



Fig. 2.2-5.  
Esempio di  
strisciate  
ortogonali



Fig. 2.2-6.  
Esempio dello  
schema radiale

La seconda e fondamentale fase della fotogrammetria è definita orientamento, in cui si forma il modello fotogrammetrico dell'oggetto e si suddivide nel modo seguente<sup>65</sup>:

- orientamento interno, nel quale avviene la ricostruzione delle stelle proiettive interne alla camera. Durante questo procedimento vengono individuati 3 parametri: posizione  $x$  e  $y$  del punto principale e distanza focale, oltre ai parametri della distorsione delle lenti dell'obiettivo. Al fine di ridurre la distorsione delle lenti e consentire l'utilizzo di camere amatoriali, è possibile effettuare una calibrazione che può essere svolta in maniera automatica dal software (*self-calibration*) che calcola i parametri di calibrazione interna nella fase di allineamento o in maniera manuale, attraverso l'inserimento dei parametri ottenuti attraverso l'elaborazione di una serie di foto di un banner a scacchiera (fig. 2.2-7);

<sup>65</sup> Cannarozzo et al., *Misure, rilievo*, cit.

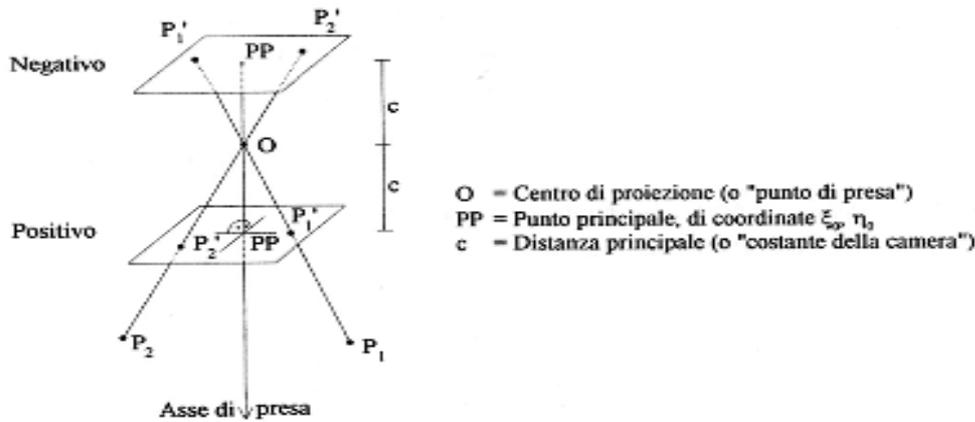


Fig. 2.2-7.  
 Schema della camera.  
 Orientamento interno

- orientamento esterno relativo, nel quale si accoppiano i raggi omologhi provenienti dallo stesso punto oggetto su diverse immagini che, resi complementari, danno luogo al modello fotogrammetrico. Le coordinate dei raggi vengono calcolate attraverso le equazioni delle rette proiettive o equazioni di collinearità in un sistema di riferimento modello, il quale non è scalato, né posizionato correttamente. In questa fase si individuano i parametri relativi alla posizione e all'orientamento delle camere in relazione tra loro: 3 parametri di posizione  $x, y, z$  e 3 parametri di rotazione  $\omega, \varphi, \kappa$ , per ogni immagine (fig. 2.2-8);

- orientamento esterno assoluto, nel quale mediante opportune rototraslazioni con variazione di scala si trasformano le coordinate modello in coordinate terreno. Il modello è quindi corretto metricamente e in una posizione definita rispetto ad un sistema locale come può essere il sistema di un sito archeologico o un sistema globale<sup>66</sup>.

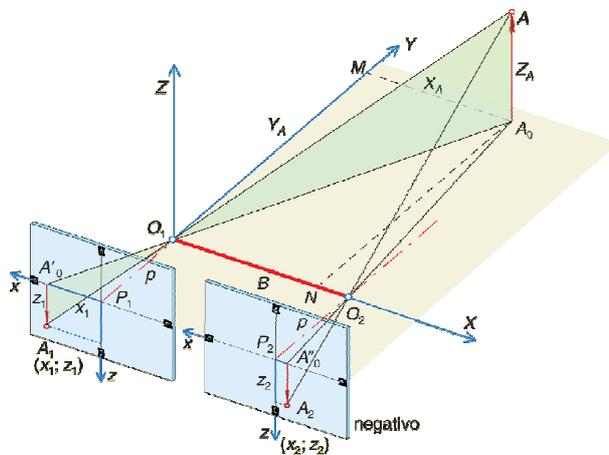


Fig. 2.2-8.  
 Schema delle camere allineate.  
 Orientamento esterno relativo.  
 (da Cannarozzo *et al.*, p.53)

<sup>66</sup> C. Balletti, F. Guerra, L. Fregonese, C. Monti, *Appunti di Fotogrammetria*, dispense del Laboratorio di Fotogrammetria della Università Iuav di Venezia, 2010, pp. 20; Cannarozzo *et al.*, *Misure, rilievo*, cit., pp. 72-80; Fangi, *Note di*, cit..

Terza ed ultima fase del procedimento fotogrammetrico è definita restituzione in riferimento alla fotogrammetria stereoscopica dove, tramite uno stereo-restitutore analogico, è possibile ottenere le coordinate di tutti i punti dell'oggetto che viene digitalizzato graficamente attraverso una vettorializzazione delle forme.

Nel processo fotogrammetrico multi-immagine, è direttamente il software che nella fase di allineamento e creazione della nuvola densa produce un modello per punti in maniera semi-automatica, senza necessità di un tecnico restitutore (fig. 2.2-9).

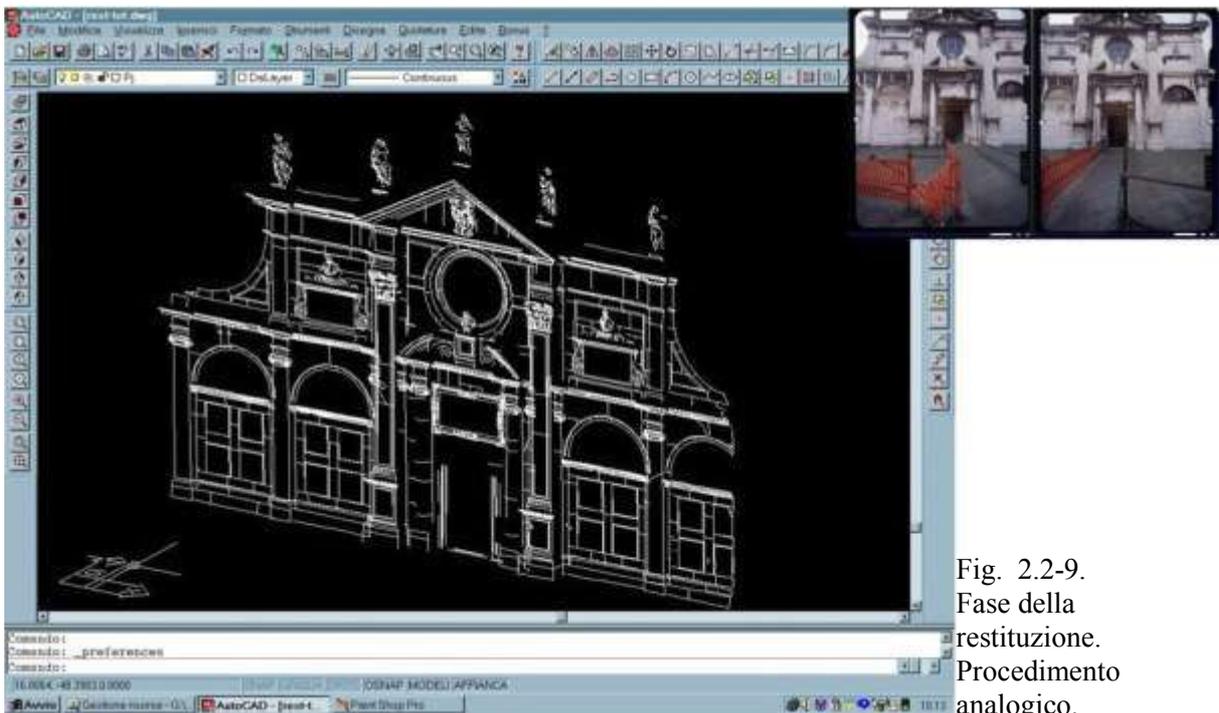


Fig. 2.2-9.  
Fase della  
restituzione.  
Procedimento  
analogico.

I rilievi fotogrammetrici sono noti da decenni, ma lo sviluppo sempre crescente di quella denominata *'Computer Vision'* ha determinato un distacco sostanziale tra la fotogrammetria analogica e quella digitale. La fotogrammetria digitale viene definita "modellazione 3D *image based*" poiché il suo procedimento si fonda sull'analisi di fotografie al fine di produrre modelli tridimensionali misurabili. I moderni software fotogrammetrici permettono di calcolare e ottimizzare l'orientamento interno ed esterno di una serie di fotogrammi in maniera semi-automatica. L'automazione del processo di orientamento e di individuazione delle equazioni di collinearità si deve principalmente allo sviluppo di nuovi algoritmi da parte della *Computer Vision*. Lo sviluppo di questi nuovi modelli matematici consente di completare il procedimento fotogrammetrico in

maniera più semplice e più efficiente rispetto alla fotogrammetria stereoscopica, permettendone ampio impiego in diversi settori di ricerca, compreso quello dell'archeologia. Il continuo progresso di queste tecniche ha permesso lo sviluppo di software *open source*, *open access* o di acquisto ad un prezzo economico, dando la possibilità agli archeologi di accedervi e di acquisire maggiori conoscenze teoriche e pratiche, senza l'appoggio di tecnici specializzati che svolgessero questo tipo di operazioni sul campo.

Le fasi di orientamento delle immagini e di riconoscimento dei punti omologhi per l'individuazione dei fasci proiettivi e il conseguente ottenimento delle coordinate tridimensionali dei punti, che nella fotogrammetria analogica venivano svolte manualmente, avvengono in maniera semi-automatica nei software di fotogrammetria digitale. Il numero superiore di punti omologhi ottenuti automaticamente permette di produrre, già dalla prima fase di allineamento, una nuvola abbastanza numerosa da consentire l'individuazione della forma dell'oggetto.

I software fotogrammetrici digitali sono inoltre meno restrittivi di quelli analogici e permettono di allineare blocchi di fotogrammi con una distribuzione meno controllata; ciò nonostante è necessario mantenere delle caratteristiche di presa ben costruite per permettere un migliore allineamento dei fotogrammi e una buona precisione e correttezza metrica.

La fotogrammetria multi-immagine infine produce direttamente un modello tridimensionale che può essere misurato; l'oggetto non viene rappresentato per punti discreti ma in continuo, senza necessità di interpretazione nella scelta dei punti da disegnare da parte dell'operatore come nella fotogrammetria stereoscopica o nelle tecniche di rilievo diretto, come la trilaterazione e il rilievo con stazione totale.

Durante il percorso di studi e di ricerca nell'ambito del rilievo archeologico, si sono potute sperimentare molte delle tecnologie di rilievo disponibili, soprattutto in ambito subacqueo. Si vuole portare ad esempio il relitto di *Cape Stoba*<sup>67</sup> in cui sono state impiegate le tecniche fotogrammetriche sia analogiche sia digitali 'multi-immagine' durante le campagne di scavo del 2012 e del 2015, anni nei quali le tecniche hanno avuto

---

<sup>67</sup> V. Zmaic Kralj, C. Beltrame, I. Miholjek, M. Ferry, *A Byzantine shipwreck from Cape Stoba (Mljet, Croatia). An interim report*, «The International Journal of Nautical Archaeology» 45, 2016, pp. 42-58.

uno sviluppo esponenziale. Non è questa la sede per descrivere accuratamente come in queste due ultime missioni sia stato fatto un salto tecnico di grande qualità nella documentazione del carico di anfore rispetto alle prime campagne del 2009, 2010 e 2011 in cui il rilievo era stato realizzato attraverso una trilaterazione e un disegno a mano e per il quale si rimanda all'articolo scritto insieme a Carlo Beltrame sulle tecniche di rilievo applicate all'archeologia subacquea<sup>68</sup>.

Il relitto di *Cape Stoba*, datato al X-XI secolo d.C. e composto da un carico di anfore vinarie e da un piccolo carico di vetro, è naufragato sui fondali dell'isola di Mljet in Croazia; il carico si trova disperso sul pendio di una costa rocciosa ad una profondità variabile dai 9 m ai 28 m e le anfore, essendo stivate sulla nave verosimilmente in diversi strati, hanno formato, sul fondale marino, uno spesso deposito stratificato che doveva necessariamente essere scavato in più fasi; il modo migliore per riuscire a rappresentare il carico in maniera completa ed efficace era costituito da una modellazione tridimensionale del sito (fig. 2.2-10).



Fig. 2.2-10. Relitto di *Cape Stoba*.

<sup>68</sup> C. Beltrame, E. Costa, *3D survey and modelling of shipwrecks in different under water environments*, «Journal of Cultural Heritage», 29, 2018, pp. 85-87.

Le campagne di scavo sono state coordinate dal *Croatian Conservation Institute* e nel 2012 è stata organizzata una quarta campagna in collaborazione con Carlo Beltrame, il quale ha optato per l'impiego del rilievo fotogrammetrico. Questo non ha però seguito lo schema standard stereoscopico o l'utilizzo di una griglia fissa su cui applicare la camera per scattare immagini a distanze prestabilite<sup>69</sup>, ma è stato svolto sulla base della realizzazione di fotografie da posizioni libere, utilizzando alcuni target misurati situati tra le anfore del carico come punti di riferimento per la scala e la rototraslazione del modello. Impiegando questa tecnica fotogrammetrica analogica, i dati acquisiti devono essere elaborati manualmente con il software *Photomodeler* per ottenere le coordinate 3D di ciascun elemento caratteristico dell'anfora e creare una nuvola di punti scelti dall'operatore<sup>70</sup>. Le coordinate 3D di orlo, anse e puntale delle anfore sono state impiegate per il posizionamento di ogni modello di anfora (fig. 2.2-11).



Fig. 2.2-11. Modello virtuale dello scavo del 2012 del relitto di Cape Stoba (Elaborazione: Stefano Caressa ed Elisa Costa)

<sup>69</sup> J.D. Leatherdale, D.J. Turner, *Underwater photogrammetry in the North Sea*, «The photogrammetric record», vol. 11, issue 62, 1983, pp. 151-167.

<sup>70</sup> E. Costa, C. Beltrame, F. Guerra, *Potentialities of 3D reconstruction in Maritime Archaeology*, in Giligny F. et al. (eds.) *Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Oxford, 2015, pp. 549-556; Zmaic Kralj et al., *A Byzantine shipwreck* cit., pp. 42-58.

Nel 2015 è stata organizzato una quinta campagna durante la quale il rilievo dei diversi strati di anfore è stato realizzato impiegando il rilievo fotogrammetrico multi-immagine<sup>71</sup>. I modelli di ciascuna anfora sono stati inseriti direttamente nella *mesh* dei tre diversi modelli fotogrammetrici del relitto di *Cape Stoba* importata direttamente nel software *Rhinoceros*. Al contrario delle altre tecniche di rilievo, con la fotogrammetria multi-immagine è stato possibile ottenere la superficie originale delle anfore, su cui sono modificati e regolati i modelli geometrici poligonali. Con quest'ultima tecnica di documentazione, il modello risulta essere più preciso per la forma dell'anfora e per il suo posizionamento (fig. 2.2-12).



Fig. 2.2-12. Modello virtuale dello scavo del 2015 del relitto di Cape Stoba.

---

<sup>71</sup> Cfr. *Infra*, p. 42.

### 2.2.1.

#### **Gli strumenti utilizzati: le macchine fotografiche e i software**

I rilievi fotogrammetrici sulle imbarcazioni sono stati realizzati con diverse macchine fotografiche: principalmente sono state impiegate camere reflex con ottiche professionali che garantiscono una buona dimensione dell'immagine e del pixel e permettono di ottenere immagini ad alta qualità come base per la documentazione fotografica e i rilievi fotogrammetrici. In alcuni casi, come vedremo in maniera più specifica nei capitoli successivi, sono state impiegate in aggiunta macchine fotografiche non professionali, come camere GoPro e fotocamere interne di cellulari (fig. 2.2-13).

Barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, campagna di rilievo 2014:

- Nikon D5000, 4288 x 2848 pixel, 300 dpi, con un obiettivo da 18-55 mm, per la fotogrammetria e le foto di documentazione;
- Canon Eos 350D, 3456 x 2304 pixel, 72 dpi, un con obiettivo da 18-55 mm, per le foto di documentazione;
- Olympus C5060WZ, 3264 x 2448 pixel, 72 dpi, con una distanza focale da 6 mm.

Barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, campagna di rilievo 2015:

- Nikon D610, 6016 x 4016 pixel, 300 dpi, con un obiettivo fisso da 20 mm;
- Canon Eos 350D, 3456 x 2304 pixel, 72 dpi, con un obiettivo da 18-55 mm, per le foto di documentazione.

Barca di Ercolano:

- Nikon D3200, 6016 x 4000 pixel, 300 dpi, con un obiettivo fisso da 22 mm, per la documentazione e per la fotogrammetria della barca, dei remi, della prua, della cima, dello scalm e del sito archeologico;
- GoPro HERO4 Silver, 4000 x 3000 pixel, 72 dpi, con una distanza focale da 3 mm, per la documentazione foto e video e per la fotogrammetria della barca, della cima, dell'argano, dell'ancora, del serpente;

- Telefono Huawei G7-L01, 4208 x 2368 pixel, 72 dpi, con una distanza focale da 3 mm, per la documentazione e per la fotogrammetria del nodo della cima, del serpente e del timone;
- Telefono Huawei P8-GRA-L09, 4160 x 2336 pixel, 72 dpi, con una distanza focale da 2 mm, per la documentazione e per la fotogrammetria del serpente;
- una coppia di GoPro HERO4 Session, 2720 x 2040 pixel, 72 dpi, con una distanza focale da 3 mm, per la realizzazione della documentazione delle fasi di rilievo attraverso i *time lapse*.

Trabaccolo Nuovo Trionfo:

- Canon EOS 6D, 5472 x 3648 pixel, con un obiettivo fisso da 20 mm, per la documentazione e per la fotogrammetria dello scafo;
- Nikon KeyMission 360 sferica, 7744 x 3872 pixel, con una distanza focale da 1,6 mm equivalente a 8,2 mm nel formato 35 mm.



Fig. 2.2-13. Alcune delle camere fotografiche impiegate: Nikon D610, GoPro Hero4 Session, Huawei P8-GRA-L09, Nikon KeyMission 360 sferica.

Nel corso di questi anni sono stati testati e impiegati diversi software di fotogrammetria:

- il software *3DFlow Zephir*<sup>72</sup>. Gli sviluppatori stessi ci hanno richiesto di testare una versione Beta del software, con la possibilità di creare modelli tridimensionali in maniera completamente automatica. Impiegando uno stesso set di immagini e mettendo a confronto i software di nostro comune utilizzo, *Zephir* non era in grado di allineare la stessa quantità di immagini e la nuvola ottenuta non aveva le stesse qualità. Inoltre, non è particolarmente intuitivo per gli utenti e non è possibile conoscere in maniera analitica i parametri utilizzati, gli errori e le precisioni ottenibili nel processamento dei dati.

- il software *Pix4D*<sup>73</sup>. Nato inizialmente per l'utilizzo di immagini e video provenienti dai droni, acquisisce una certa notorietà per la sua facilità di utilizzo, per i procedimenti automatici e soprattutto per la possibilità di condividere in maniera diretta sul web e sui social media i modelli ottenuti. Nell'ambito della ricerca scientifica viene impiegato soprattutto per allineare in maniera diretta i video, da cui estrapola i *frame*. La *Agisoft* ha sviluppato nell'ultima versione di *Photoscan 1.4.0* l'opzione di caricamento di video e l'estrapolazione in maniera automatica dei *frame*, rendendo quindi possibile l'allineamento e la creazione di modelli 3D anche da video.

- il software *Agisoft Photoscan Professional 1.4.0*<sup>74</sup> e precedenti versioni. In base alle conoscenze acquisite, si è preferito l'utilizzo di questo software, sia per la rielaborazione di immagini che di video; la possibilità di impostare manualmente i parametri, la maggiore qualità del modello 3D ottenuto e la maggiore precisione negli aspetti topografici, dall'inserimento e la collimazione dei punti alla rototraslazione del modello tramite coordinate note, sono solo alcune delle qualità di questo software.

La tecnica fotogrammetrica è stata impiegata per la documentazione delle imbarcazioni lignee illustrate in questa ricerca di dottorato: la barca cucita di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, la barca di Ercolano e il trabaccolo Nuovo Trionfo. Il rilievo dei primi due progetti è stato più complesso ed articolato poiché ha visto l'impiego e l'integrazione di diverse tecniche di rilevamento (fotogrammetria e laser scanning); per

---

<sup>72</sup> 3DFLOW 3DF Zephir, User manual, Version 4.0, 3DF Zephir Free / Lite / Pro / Aerial, 2013.

<sup>73</sup> Pix4D, Pix4Dmapper, Version 4.1, User manual, 2017.

<sup>74</sup> Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4, 2018.

questo motivo a tali progetti sono stati dedicati due capitoli separati al fine di analizzare in maniera precisa le diverse fasi di rilievo.

Per il progetto sul trabaccolo Nuovo Trionfo sono state impiegate esclusivamente strumentazioni low-cost<sup>75</sup> come una camera reflex e una camera sferica Nikon Keysession 360, essendosi svolto esternamente all'ambito accademico. L'imbarcazione, di proprietà dell'Associazione Il Nuovo Trionfo di Venezia, non ha un'importanza prettamente archeologica, ma ha un grande valore dal punto di vista etnografico, poiché è uno degli ultimi esemplari di trabaccoli naviganti. La possibilità di effettuare il rilievo fotogrammetrico è stata occasione di testare questa tecnica di documentazione su una tipologia di imbarcazione ben nota poiché già indagata nel mio percorso di studi<sup>76</sup>, in cui sono state affrontate la documentazione del trabaccolo Marin Faliero attraverso rilievo laser scanning e le relative restituzioni grafiche.

---

<sup>75</sup> M. Canciani, P. Gambogi, F.G. Romano, G. Cannat, P. Drap, *Low cost digital Photogrammetry for underwater archaeological Site survey and artifact isertion. The case study of the dolia wreck in Secche della Meloria-Livorno-Italia*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Vol. XXXIV, Part 5/W12, 2003.

<sup>76</sup> In occasione della tesi di Master di I livello dell'Università di Ca' Foscari di Venezia in *Archeologia Marittima. Archeologia e storia marittima e tecniche della ricerca archeologica subacquea* tenutosi nel 2009.

La ricerca effettuata su questa imbarcazione viene qui impiegata per esporre ed esemplificare il procedimento fotogrammetrico dei dati attraverso il software *Photoscan*.

- fase 1: allineamento delle immagini.

Individuazione dei *tie points*, dei punti omologhi sulle immagini caricate; ottenimento di una nuvola sparsa di punti con un valore radiometrico legato al *pixel* (fig. 2.2-14) e della posizione delle camere in relazione tra di loro (fig. 2.2-15).

- fase 2: ottimizzazione della nuvola.

Ottimizzazione e calcolo dei parametri interni della camera che può essere fatta in maniera automatica dal software o caricando un file di calibrazione della camera ottenuto in precedenza.

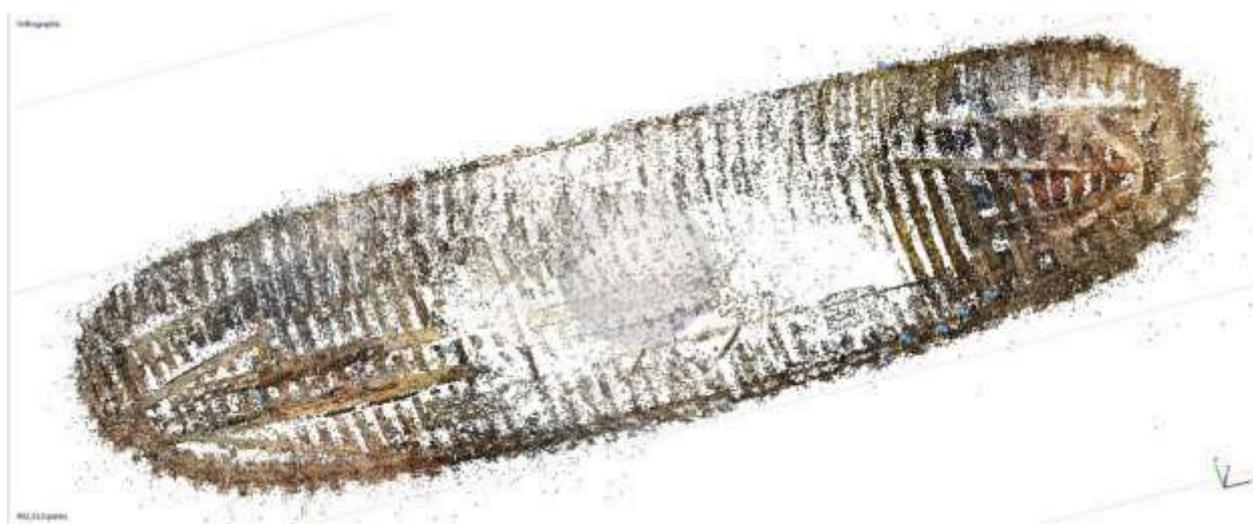


Fig. 2.2-14. Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola sparsa.

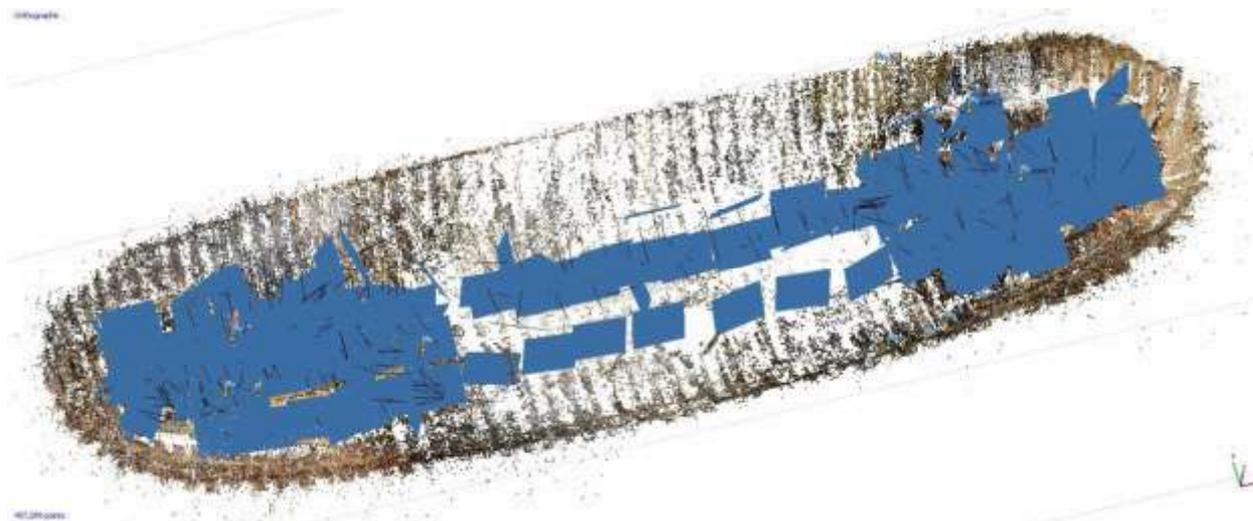


Fig. 2.2-15. Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola sparsa e posizione delle camere.

- fase 3: creazione della nuvola densa.

Il software calcola le informazioni di profondità di ogni singola immagine in base alle posizioni stimate nel processo di allineamento; nel caso del nuovo Trionfo, da una nuvola sparsa di 492.513 punti, si passa ad una nuvola densa di 8.471.304 punti (fig. 2.2-16).



Fig. 2.2-16. Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola densa.

- fase 4: creazione della *mesh*.

In base alla nuvola di punti, si effettua una triangolazione al fine di ottenere un reticolo di poligoni di forma triangolare. La *mesh* può acquisire una colorazione di *default* in cui si evidenzia la geometria dell'oggetto (fig. 2.2-17) o una colorazione ottenuta in base al colore dei vertici di riferimento del triangolo, i punti della nuvola (fig. 2.2-18).



Fig. 2.2-17-18. Trabaccolo Nuovo Trionfo, particolare: *mesh* con colore di default e con valori radiometrici RGB.

- fase 5: applicazione della *texture*.

Alla *mesh* viene applicata una *texture* calibrando le immagini all'interno del progetto e ottenendo una *texture* omogenea (fig. 2.2-19).



Fig. 2.2-19. Trabaccolo Nuovo Trionfo, particolari: mesh texturizzata.

- fase 6: rototraslazione con variazione di scala.

Le coordinate dei punti di dettaglio ottenuti attraverso la stazione totale o la trilaterazione vengono inserite nel modello, effettuando in questo modo una rototraslazione con variazione di scala secondo il sistema di riferimento locale o globale.

## 2.3

### Il rilievo laser scanning

La tecnica laser scanning è ampiamente utilizzata nel rilievo in campo architettonico, ambientale e archeologico, poiché permette di misurare e ottenere velocemente e con sistematicità la posizione di migliaia di punti che definiscono gli oggetti circostanti, attraverso la proiezione e la ricezione di un raggio laser.

La versatilità dello strumento e l'alta precisione ne consentono l'impiego in campi di ricerca molto diversi: inizialmente l'utilizzo era appannaggio dei settori dell'ingegneria civile, del monitoraggio, dell'impiantistica e del controllo strutturale, solo negli ultimi decenni si è cominciato ad impiegare questo strumento nell'ambito dell'architettura e dei beni culturali. Nel settore archeologico la diffusione di questa tecnica è inoltre dovuta al fatto che, al pari della fotogrammetria, è una tecnica non invasiva che garantisce una relazione minima con l'oggetto da misurare.

Nel corso degli anni, il veloce sviluppo delle tecnologie, ha portato ad una continua evoluzione dei laser scanner in commercio, diminuendone i costi, migliorandone la portabilità e la fruibilità e rendendo accessibile l'impiego ad un'ampia gamma di ricercatori<sup>77</sup> in diverse e difficili situazioni come per esempio le zone terremotate<sup>78</sup>.

---

<sup>77</sup> A. Pintucci, A. Vecchione, *3D recording VS tradition: a filed archaeologist point of view*, in Building bridges. Abstract book of the 23<sup>th</sup> annual Meeting of the European Association of Archaeologists 2017, Jos Bazelmans and Klinkhamer Group ed., Maastricht, 2017, p. 97.

<sup>78</sup> C. Balletti, M. Ballarin, P. Faccio, F. Guerra, A. Saetta, P. Vernier, *3D survey and 3D modelling for seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings*, «Applied Geomatics», 10, 2018; E. Fratus de Balestrini, M. Ballarin, C. Balletti, V. Buttolo, C. Gottardi, F. Guerra, S. Mander, L. Pilot, P. Vernier, *Survey methods for earthquake damages in the "Camera degli sposi" of Mantegna (Mantova)*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Vol. XL, Part 5/W2, pp. 265-270, 2013.



Fig. 2.3-1. Alcune delle tipologie di laser scanner: a sinistra due laser distanziometrici, a destra due laser triangolatori.

I laser scanner si differenziano per alcune caratteristiche come accuratezza, risoluzione, portata e velocità di scansione, che determinano la scelta del laser da utilizzare a seconda del contesto archeologico o architettonico da rilevare, delle dimensioni dell'oggetto o della precisione che si vuole ottenere:

- strumenti a lunga portata (50 m ÷ 1000 m): laser scanner distanziometrici, con precisioni centimetriche;
- strumenti a media portata (1 m ÷ 50 m): laser scanner distanziometrici o triangolatori, con precisioni da 0.2 mm a 6 mm;
- strumenti a piccola portata (< 1 m): laser scanner triangolatori, con precisioni sub-millimetriche (fig. 2.3-1).

Il raggio laser emesso può rispondere in maniera diversa a seconda del materiale su cui viene emesso; quando una radiazione colpisce un corpo, questa energia viene in parte assorbita, in parte riflessa e in parte trasmessa. La quantità di luce che viene riflessa e trasmessa al sensore ricevente dello scanner viene definita riflettanza (fig. 2.3-2).

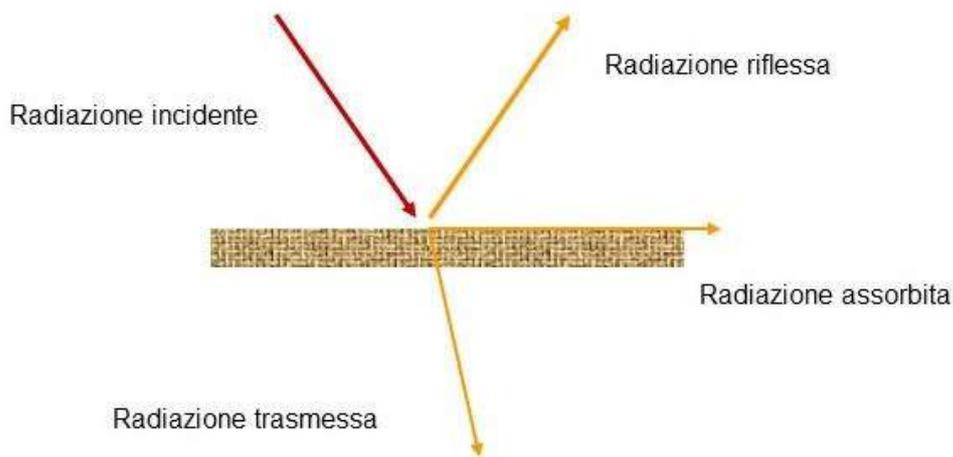


Fig. 2.3-2.  
Alterazioni del raggio laser al contatto con un oggetto.

Ogni oggetto determina un diverso comportamento della luce, in relazione al proprio materiale e colore e le caratteristiche dei materiali sono elencate in specifiche tabelle; nel caso dell'archeologia navale, al legno asciutto corrisponde una riflettanza pari al 94% che diminuisce nel caso del legno bagnato, in funzione dell'aumento dell'assorbimento dell'energia e, quindi, della luce. Il calcare e l'argilla, che si trovano negli scavi di imbarcazioni lignee, hanno una riflettanza attorno al 75%. Gli elementi di colore scuro, inoltre, hanno una percentuale di riflettanza inferiore rispetto agli elementi di colore chiaro.

Esistono diverse tipologie di laser scanner, in relazione all'emissione del raggio e alla qualità di analisi effettuata dallo scanner sul segnale di ritorno dall'oggetto.

I laser scanner distanziometrici hanno la prerogativa di avere l'emettitore e il ricevitore del raggio laser nella stessa posizione, ciò che cambia è la modalità di calcolo del raggio di ritorno:

- nel laser scanner *time of flight*(TOF) si calcola il tempo impiegato dal segnale emesso a ritornare al sensore. Il laser emette un continuo fascio di luce infrarossa verso il punto da rilevare; il segnale di ritorno è intercettato da una lente di ricezione che convoglia il raggio all'interno di un fotodiodo, il quale trasmette l'indicazione di captazione attraverso un impulso elettrico. Il tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione è quantificato da un orologio che invia il dato allo strumento, determinando la misura della distanza.

- nel laser scanner a comparazione di fase, si calcola la differenza di fase tra l'onda emessa e l'onda riflessa. Lo scanner emette un segnale laser modulato che colpisce l'oggetto e ritorna verso lo strumento, compiendo quindi un percorso di andata e ritorno; la fase del segnale emesso viene confrontata con quella del segnale riflesso da un dispositivo all'interno del distanziometro detto comparatore di fase, determinando lo sfasamento angolare tra le due sinusoidi. Nel percorso di andata e ritorno risulta quindi compreso un numero intero  $n$  di lunghezze d'onda, più una frazione di lunghezza d'onda corrispondente allo sfasamento (fig. 2.3-3).

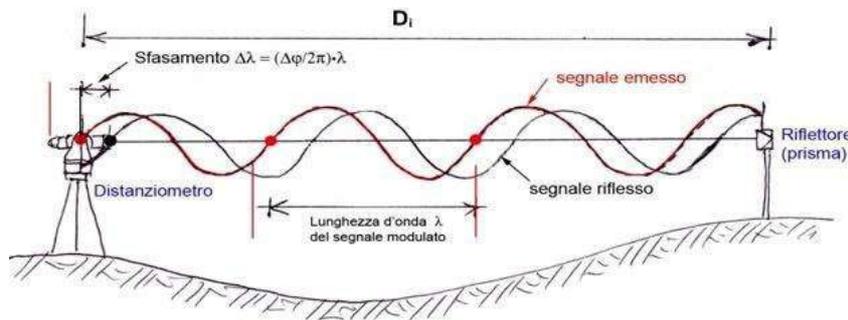


Fig. 2.3-3. Schema del raggio di luce nei laser scanner a comparazione di fase.

I laser scanner triangolatori hanno un raggio di azione massimo di 2 m; essendo più precisi, sono impiegati per rilevare oggetti di piccole dimensioni. L'emettitore e il sensore ricevente sono collocati in due posizioni note diverse e il calcolo del segnale viene effettuato tramite una triangolazione tra i sensori e il punto di riflessione sull'oggetto (fig. 2.3-4)<sup>79</sup>.

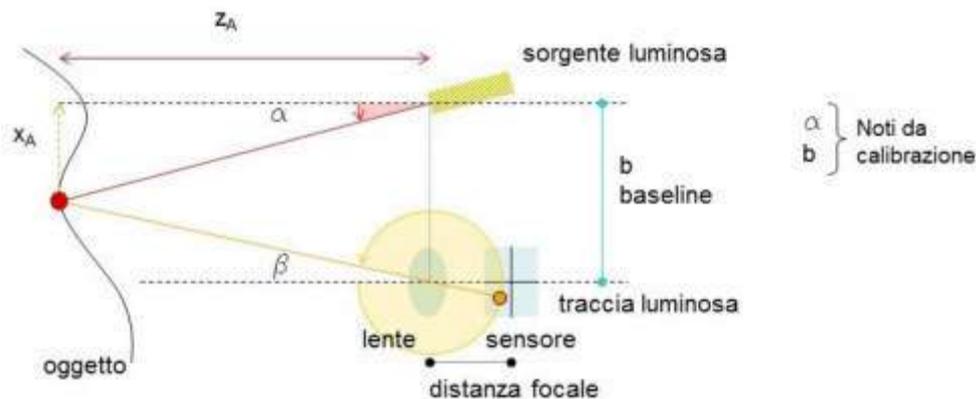


Fig. 2.3-4. Schema del raggio di luce nei laser triangolatori.

<sup>79</sup> M. Sgregonzoli, G.P.M. Vassena, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Volume 1, Starrylink Editrice, 2007, p. 1-95.

I parametri di acquisizione e le modalità di acquisizione delle scansioni, come lo schema di presa e la segnalizzazione dei target per l'orientamento delle nuvole, vengono impostati in funzione del soggetto da rilevare, delle condizioni logistiche e delle finalità del rilievo. Sia per soggetti di grandi che di piccole dimensioni, è necessario effettuare diverse scansioni attorno al soggetto per riuscire a rilevare tutti i dettagli presenti; la quantità numerica delle scansioni è relativa alla quantità dei dettagli, valutabile direttamente *in situ*. L'allineamento delle diverse scansioni può avvenire direttamente in fase di rilievo<sup>80</sup> oppure in una seconda fase attraverso software appositi in cui l'allineamento viene effettuato nuvola su nuvola o attraverso una georeferenziazione di target.

La tecnica laser scanning mette a disposizione uno strumento che in modo autonomo acquisisce milioni di punti senza un criterio logico nella selezione dei punti rilevati sull'oggetto, diversamente da quello che succede durante un rilievo con una stazione totale o un rilievo diretto dell'operatore. Il trattamento dei dati avviene in diverse fasi: una prima fase, come la georeferenziazione e l'orientamento delle nuvole, e una seconda fase di pulizia, di decimazione e di filtratura della nuvola con eliminazione del rumore<sup>81</sup>.

---

<sup>80</sup> I triangolatori, per esempio, sono direttamente collegati al computer ed effettuano l'allineamento nuvola su nuvola in concomitanza della scansione

<sup>81</sup> Con 'rumore' si intende un segnale di disturbo rispetto all'informazione corretta che ne altera le caratteristiche compromettendone l'intelligibilità.

### 2.3.1

#### Il rilievo laser scanning: i laser scanner

In questo paragrafo vengono analizzati i modelli di laser scanner che sono stati da noi impiegati per i rilievi effettuati nel corso di questi tre anni di ricerca. Il funzionamento di questi laser segue le caratteristiche del rilievo laser scanning indagato nelle pagine precedenti<sup>82</sup>.

Il Laser Scanner Faro Focus 3D 120 rientra nella categoria dei laser a differenza di fase (fig. 2.3-5), ha una portata da 0,60 m a 120 m e un campo visivo di 360° orizzontali e 300° verticali, è caratterizzato da un'incidenza normale (perpendicolare) su superficie riflettente del 90% che produce un errore di  $\pm 2$  mm su una distanza lineare di 10 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.



Fig. 2.3-5. Laser Scanner Faro Focus 3D 120. Rilievo barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, 2015.

<sup>82</sup> Cfr. *supra*, p. 45.

Ogni scansione crea una nuvola di circa 600 milioni di punti, che viene allineata con le altre nuvole attraverso una serie di GCP (*Ground Control Point*) che vengono rilevati topograficamente e servono per stimare i parametri della rototraslazione in un sistema di riferimento locale. I *target* dei GCP vengono posizionati sul sito durante tutte le fasi operative, dal rilievo topografico a quello laser scanning al rilievo fotogrammetrico; in questo modo le coordinate tridimensionali dei punti saranno le stesse per ogni modello virtuale creatosi, in maniera tale da poterne controllare la correttezza metrica ed inserire in un unico sistema di riferimento i diversi modelli ottenuti con tecniche di rilievo differenti.



Fig. 2.3-6. Laser Scanner Faro Focus 3D 120. Rilievo barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, 2015. Confronto tra nuvola di punti *intensity* e nuvola di punti con valori radiometrici.

Il risultato del rilievo è rappresentato da una nuvola in tonalità di grigio, denominata *'intensity'*, prodotta in considerazione della quantità di intensità di ritorno del raggio laser dopo aver colpito l'oggetto. Successivamente avviene la registrazione delle immagini a 360° tramite una fotocamera integrata al laser scanner che fornisce dati fotorealistici a colori a 70 megapixel, effettuando un adeguamento automatico della luminosità per ogni

---

scatto; queste immagini, applicate alla nuvola di punti, permettono di assegnare il valore RGB in relazione ai pixel delle immagini stesse (fig. 2.3-6).

Il Laser Scanner Triangolatore Minolta Vivid 9i è stato sviluppato per misure dimensionali di precisione richieste dall'industria come ad esempio la lavorazione di stampi, pressofusione, parti metalliche e stampi per la plastica o per il controllo qualità. Il sistema di scansione laser con specchio galvanometrico ad alta precisione e l'elaborazione estremamente rapida dell'immagine, permettono di effettuare una scansione in soli 2.5 secondi, catturando più di 300.000 punti, con un'accuratezza nella precisione della misura di 50 micron ( $\pm 0.05$  mm su una distanza 0.6-1.0 m) con sistema di compensazione *Field Calibration System* dipendente dalle condizioni ambientali. Grazie alle tre ottiche intercambiabili con autofocus (Tele ( $f = 25.5$  mm), Medio ( $f = 14.5$  mm) e Grandangolo ( $f = 8$  mm)) e al sistema di calibrazione e compensazione delle condizioni ambientali per ottenere sempre una elevata accuratezza e precisione, questo laser scanner viene utilizzato principalmente per il rilievo di oggetti di piccole dimensioni o con grandi quantità di dettagli, avendo come *range* di acquisizione una distanza da 0.5 m a 2.5 m. Mediante una ruota di filtri interferenziali, il *Vivid 9i* può acquisire il colore (*texture* RGB a 24 Bit) così da permettere una correlazione geometrica e radiometrica (x,y,z, RGB). Il software *Advanced Polygon Editing* permette il completo controllo della scansione contestualmente alla sua realizzazione e consente di elaborare i dati acquisiti e di esportarli direttamente sotto forma di *mesh* poligonali (fig. 2.3-7).



Fig. 2.3-7. Laser Scanner triangolatore Minolta Vivid-9i. Rilievo del modello ligneo del brigantino Cygne.

In ambito nautico, viene utilizzato in maniera estensiva ed efficace il triangolatore laser *Faro ScanArm* con *LLP*, che rappresenta un potenziamento del *Faro ScanArm* utilizzato per digitalizzare manualmente i profili e gli elementi costruttivi di uno scafo. Il beneficio di rappresentare in scala 1:1 un'imbarcazione è quello di avere una copia a grandezza naturale degli elementi lignei disponibili per lo studio; la differenza e l'evoluzione sostanziale di un laser ad alta risoluzione è quella di poter ottenere un rilievo accurato, senza l'interpretazione del tracciamento da parte dell'archeologo.

Solo per fare alcuni esempi, questo strumento è stato impiegato in ambito archeologico sui relitti bizantini di Yenikapi a Istanbul<sup>83</sup>, sul relitto del XVI secolo Arade 1 in

<sup>83</sup> C. Pulak, R. Ingram, M. Jones, *Eight Byzantine Shipwrecks from the Theodosian Harbour Excavations at Yenikapi in Istanbul, Turkey: an Introduction*, «International Journal of Nautical Archaeology», 44 /1, 2014, pp. 39-73.

---

Portogallo<sup>84</sup>, sul relitto del XVII secolo de La Belle nella Baia di Matagorda, nel Golfo del Messico<sup>85</sup> o sul relitto del World Trade Center a New York<sup>86</sup>.

Effettuando un confronto tra le diverse tecniche è inevitabile notare la precisione che si può ottenere con questa strumentazione rispetto al rilievo fotogrammetrico, che tuttavia viene comunemente impiegato nel rilievo di imbarcazioni per motivi logistici legati alla deperibilità del legno, per motivi economici e per la necessità di documentare il relitto *in situ*<sup>87</sup>.

---

<sup>84</sup> F. Castro, *The Arade 1 Shipwreck: A Small Ship at the Mouth of the Arade River, Portugal*, in F. Hocker and A. Englert, a cura di, *Connected By the Sea: Proceedings of the 10th Symposium on Boat and Ship Archaeology*, 2006, Oxford, Oxbow Books, pp. 300-305; V. Loureiro, J.G. Alves, *The Arade 1 Shipwreck: Preliminary Results of the 2004 and 2005 Field Seasons*, «International Journal of Nautical Archaeology», 37/2, 2008, pp. 273-282.

<sup>85</sup> G. Grieco, *Modeling La Belle: A Reconstruction of a Seventeenth-Century Light Frigate*, College Station, TX, Texas A&M University, 2003.

<sup>86</sup> C.M., Dostal, *Laser scanning as a methodology for the 3D digitization of the archaeological ship timbers: a case study using the World Trade Center shipwreck*, Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Relatore D.L. Hamilton, Texas A&M University, 2017, p. 163.

<sup>87</sup> *Ibidem*.

## 2.4

### Il rilievo topografico

La topografia (dal greco *τόπος*, luogo e *γράφειν*, scrivere) è la scienza che si occupa della misurazione del territorio e che impiega strumenti e metodi operativi, di calcolo e di disegno, necessari per ottenere una rappresentazione grafica misurata di una parte della superficie terrestre.

Nelle campagne di rilevamento, anche archeologico, la topografia acquisisce un ruolo essenziale, poiché attraverso di esso viene definito il sistema di riferimento locale che serve da base per i rilievi realizzati con le diverse strumentazioni; si determina così la posizione dei punti di appoggio alla fotogrammetria e dei punti di controllo per la registrazione e l'allineamento delle nuvole prodotte dal laser scanner.

La struttura del rilievo topografico è organizzata secondo livelli di tipo gerarchico: si procede realizzando reti di ordine decrescente, con una stretta dipendenza delle reti di ordine inferiore da quelle di ordine superiore:

- rete principale o di I ordine, denominata rete di inquadramento. La rete principale definisce la struttura primaria e costituisce dunque l'ossatura del rilievo, alla quale si collegano le altre reti, definendo il sistema di riferimento locale.

- rete secondaria o di II ordine, denominata rete di raffittimento. La rete secondaria consiste in un numero maggiore di punti di stazione, utilizzando come punti di riferimento i caposaldi della rete principale.

- rete di III ordine, denominata rete di dettaglio. La rete di III ordine serve a definire diverse tipologie di punti classificabili in relazione al loro impiego:

- punti di dettaglio topografico, rilevati per irraggiamento sull'oggetto e impiegati per la costruzione del modello grafico o numerico<sup>88</sup>.

- punti di appoggio alla fotogrammetria che hanno lo scopo di consentire l'orientamento assoluto dei modelli fotogrammetrici e di migliorare l'orientamento relativo tra i fotogrammi stessi.

---

<sup>88</sup> Cfr. *infra*, pp. 64-69.

- punti di appoggio per la rototraslazione delle scansioni laser, che allineano il sistema di riferimento dello strumento laser scanner con quello locale del rilievo topografico<sup>89</sup>.

I punti di appoggio vengono segnalizzati sull'oggetto attraverso apposite mire visibili nei fotogrammi e nella nuvola di punti e la loro distribuzione è organizzata in funzione della geometria di presa, in modo da risultare in numero sufficiente su ogni singola scansione o modello fotogrammetrico.

Strumento fondamentale per il rilievo topografico è il teodolite, strumento ottico a cannocchiale per la misurazione delle direzioni angolari azimutali sul piano orizzontale e zenitali sul piano verticale. Al teodolite viene associato comunemente un distanziometro a raggi infrarossi, andando a costituire la Stazione Totale, ordinariamente impiegata in ambiti architettonici e sugli scavi archeologici<sup>90</sup>.

Il distanziometro può essere del tipo tradizionale quando utilizza un prisma riflettente per effettuare la misura distanziometrica, oppure del tipo laser quando rileva la distanza senza l'ausilio del prisma. Questo secondo tipo viene utilizzato nel caso di punti inaccessibili o di soggetti archeologici, permettendo un'indagine non invasiva.

Posizionata la stazione totale sul primo caposaldo, al quale vengono assegnate delle coordinate locali, viene posizionato su un secondo caposaldo un treppiede con il prisma riflettente. La dimensione del prisma influenza la portata del distanziometro; per la collimazione dei caposaldi della rete principale o secondaria si ricorre a prismi con un diametro di 50 mm, posizionati su una apposita basetta solidale con il treppiede per il posizionamento della stazione totale, in modo da diminuire gli errori di misura. Per il rilievo dei punti di dettaglio direttamente sull'oggetto o sul sito archeologico sono più adatti i mini-prisma con un diametro di 20-30 mm, i quali, montati su paline rigide, vengono tenuti in bolla sulla verticale del punto da rilevare in maniera manuale.

---

<sup>89</sup> M. Borgherini, A. Guerra, P. Modesti, *Architettura delle facciate: le chiese di Palladio a Venezia. Nuovi rilievi, storia, materiali*, Venezia, Marsilio editori, 2010, pp. 185-186.

<sup>90</sup> Medri, *Manuale di rilievo* cit.

## 2.4.1

### Gli strumenti utilizzati: la stazione totale

Per i casi studi in questione, l'appoggio topografico è stato impiegato esclusivamente durante il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio. Sono stati utilizzati due modelli diversi di Stazione Totale: una *Topcon GPT 2005* per il rilievo degli strati archeologici e dei punti di dettaglio dell'imbarcazione e una *Leica TCR 1103* per il rilievo dei punti di appoggio alla fotogrammetria e al rilievo laser scanning (Fig. 3.1-1-2).

L'impiego di due stazioni diverse e quindi di due sistemi di riferimento locali ha reso necessaria la rototraslazione di un sistema sull'altro tramite coordinate rilevate con GPS.

La Stazione Totale *Topcon GPT 2005* ha una precisione angolare di  $5''/1$  mgon di  $\pm 3$  mm + 2 ppm sulla distanza, mentre la *Leica TCR 1103* ha precisioni superiori con una precisione angolare di  $3''/1$  mgon e di  $\pm 2$  mm + 2 ppm sulla distanza.



Fig. 2.4-1-2. Stazione Totale Topcon GPT 2005 (Università degli Studi di Milano) e Leica TCR 1103 (Laboratorio di fotogrammetria, Università Iuav di Venezia).

**3**

**Le tecniche di rilievo applicate ai casi studio**

---

### 3.1

#### Il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio



Fig. 3.1-1. Il sito di Santa Maria in Padovetere con in primo piano il relitto.

Il primo caso studio preso in considerazione riguarda il relitto di Santa Maria in Padovetere, individuato nel 2008 con il rinvenimento di una porzione del fondo e alcune ordinate durante gli scavi presso l'area adiacente i resti della pieve del VI sec. d.C. di Santa Maria in Padovetere, a Comacchio. L'indagine è stata condotta dalla società Tecne S.r.l., sotto la direzione della Soprintendenza Archeologica dell'Emilia Romagna, nella persona di Fede Berti<sup>91</sup>.

Nell'autunno del 2014, la Soprintendenza nella persona del funzionario dott. Mario Cesarano, ha deciso di riaprire il saggio di scavo (fig. 3.1-1). La prima fase di lavoro è durata dal 1 ottobre a circa metà dicembre 2014 mentre una seconda campagna finalizzata al completamento dello scavo dell'imbarcazione nella zona di poppa e all'ampliamento dell'area di scavo è stata organizzata dal 17 agosto al 19 settembre 2015.

<sup>91</sup> F. Berti, *Fortuna Maris. La nave romana di Comacchio*, Nuova alfa, Bologna, 1990; C. Balista e F. Berti, *Carotaggi geoarcheologici e scavi nei pressi della Chiesa di santa Maria in Padovetere, anni 2006 e 2008*, «Atti dell'Accademia delle Scienze di Ferrara», volume 94, 2017, p. 97

Per la documentazione e lo studio dell'imbarcazione, la Soprintendenza si è avvalsa della collaborazione scientifica del prof. Carlo Beltrame che ha chiamato la scrivente a condurre le operazioni sul campo in qualità prima di assegnista di ricerca poi di dottoranda.

La datazione dei frammenti di legno rilevata dalle analisi al radiocarbonio inquadra lo scafo in un periodo compreso tra il IV e il VI secolo d.C., periodo che viene confermato e ristretto a prima della seconda metà V secolo d.C. dal rinvenimento, a contatto con il legno, di *nummi*, monete di grande diffusione a cavallo tra il IV e il V d.C. e di anfore Keay LII del V sec. d.C.<sup>92</sup>.

L'imbarcazione, sepolta sotto un spesso deposito stratigrafico alluvionale, giace lungo la sponda sinistra del paleo alveo del fiume *Padus* (Padovetere), un fiume navigabile che collegava probabilmente il porto di *Vaetranus* a nord di Ravenna con la città di *Voghenza*, la Ferrara romana, e che rappresentava uno dei tanti fiumi dell'area del Delta del Po; questi univano il Mare Adriatico con le città dell'entroterra romano in direzione est-ovest e scomparvero durante il Medioevo<sup>93</sup>. La valutazione geologica e topografica dell'area circostante lo scavo è stata condotta da Paolo Mozzi con l'Università Ca' Foscari di Venezia<sup>94</sup>, dimostrando che tra il primo quarto del V e l'ultimo quarto del VI secolo d.C. il fiume *Padus* cambiò il suo corso lasciando un deposito di 2 m di spessore sulla sponda sinistra del letto precedente; questa datazione è ulteriormente limitata all'inizio del V secolo dall'assenza di reperti archeologici che precedono questo periodo nell'area coperta dalle inondazioni<sup>95</sup>.

La presenza dell'imbarcazione del V secolo d.C. e di due piroghe, sepolte da due piene successive del fiume<sup>96</sup>, confermano l'esistenza di una zona fluviale di rilevante

---

<sup>92</sup> M. Cesarano e C. Corti, *Sacro e profano. Le recenti ricerche nell'area archeologica di S. Maria in Padovetere a Comacchio (IV-IX secolo)*, in , p. 355 e 362.

<sup>93</sup> C. Balista, L. Bonfatti, M. Calzolari, *Il paesaggio naturale e antropico delle Valli tra Spina e Comacchio e le sue trasformazioni dall'Età etrusca all'Alto Medioevo*, in *Genti del delta da Spina a Comacchio. Uomini, territorio e culto dall'antichità all'alto Medioevo*, Ferrara, 2007, p. 19.

<sup>94</sup> A. A. Rucco, *Dalle 'carte' alla terra. Il paesaggio comacchiese nell'alto medioevo*, in Gelichi S., a cura di, *Costruire territory / costruire identità: lagune archeologiche a confronti tra antichità e medioevo*, «Reti Medievali Rivista», 16.2, Florence, 2015, p. 210; A.A. Rucco, P. Mozzi, E. Ninello, *Indagini nell'area di S. Maria in Padovetere in Valle Pega*, in Rucco A.A., ed., *Comacchio nell'alto Medioevo. Il paesaggio tra topografia e geoarcheologia*, Firenze, pp. 95–104.

<sup>95</sup> E. Grandi, *Un delta in movimento. Il caso di Comacchio tra tarda antichità e alto medioevo*, in Gelichi S., a cura di, *Costruire territory / costruire identità: lagune archeologiche a confronto tra antichità e medioevo*, «Reti Medievali Rivista», 16.2, Florence, 2015, p. 8-9; Rucco, *Dalle carte cit.*, p. 210.

<sup>96</sup> Databili una tra la fine del V e l'inizio del VI secolo d.C. e una al VII secolo d.C.

frequentazione<sup>97</sup> nelle vicinanze di quella che era una giunzione strategica di corsi d'acqua che portavano in diverse direzioni<sup>98</sup>. A sud-est della chiesa, il canale *Motta della Girata* (toponomastica assegnata probabilmente dalla presenza di un piccolo tumulo su un'ansa), fu scavato in direzione nord-est probabilmente nel VII secolo per collegare il fiume *Padus* e la località Santa Maria in Padovetere con il porto lagunare di Santa Maria in Padovetere<sup>99</sup>. La vicinanza di un sito verosimilmente utilizzato per scopi profani e religiosi prima dell'affondamento dello scafo<sup>100</sup> e la presenza di una giunzione tra il fiume e il canale fanno presumere che questo fosse un sito di ormeggio regolarmente utilizzato. Un'ipotesi plausibile è che l'imbarcazione sia stata ormeggiata non lontano dal luogo in cui è stata trovata e successivamente trascinata a valle e affondata durante un'improvvisa inondazione.

Le arterie fluviali favorivano la permeabilità nell'entroterra cisalpino con una navigazione per acque interne, che doveva necessariamente essere intrapresa con apposite imbarcazioni sottili e a fondo piatto, adatte a percorrere canali artificiali e fiumi di piccole dimensioni. Spesso queste imbarcazioni sostituivano l'albero della vela con un piccolo alberello atto al traino, all'alzaia<sup>101</sup>; non è il caso dell'imbarcazione di Santa Maria in Padovetere, né della barca di Valle Ponti<sup>102</sup> rinvenuta negli anni Ottanta in una zona limitrofa, che non recano tracce di scassa per l'albero per la vela o per l'alberello dell'alzaia.

Lo scafo è stato rinvenuto con il fondo inclinato e il fianco destro adagiato orizzontalmente sulla sponda del paleo alveo, come mostra la sezione stratigrafica del rivale del fiume di tav. 3.1-1. Analizzando la stratigrafia individuata durante le fasi di scavo è evidente come le differenti caratteristiche del terreno abbiano determinato la diversa conservazione del legno: le parti ad una quota inferiore (fianco destro, poppa e parte del fondo) sono state rinvenute in uno strato di argilla, in una condizione anossica che ha garantito una perfetta conservazione del legno, mentre quelle alla quota superiore

---

<sup>97</sup> Cesarano e Corti, *Sacro e profano* cit. p. 356.

<sup>98</sup> Balista et al., *Il paesaggio naturale* cit., p. 28.

<sup>99</sup> Rucco et al., *Indagini nell'area* cit. p. 103

<sup>100</sup> Cesarano e Corti, *Sacro e profano* cit..

<sup>101</sup> C. Beltrame C., *Imbarcazioni lungo il litorale alto-adriatico occidentale, in età romana. Sistema idroviario, tecniche costruttive e tipi navali*, in *Strutture portuali e rotte marittime nell'Adriatico di età romana*, Centro di Antichità alto-adriatiche, Casa Bertoli Aquileia, Trieste-Roma, 2001, p. 431 e p. 435.

<sup>102</sup> Berti, *Fortuna Maris* cit.

in uno strato sabbioso più traspirante, risultano più compromesse e danneggiate. Anche il fattore post-deposizionale potrebbe aver influito sulla diversa conservazione dello scafo. Con molta probabilità siamo di fronte ad un avvenimento improvviso come la piena di un fiume che ha portato la barca ad arenarsi sul rivale in posizione laterale con un ricoprimento della porzione bassa dello scafo nello strato di argilla, come rappresentato schematicamente in fig. 3.1-2, similmente a quanto accaduto all'imbarcazione Arles-Rhone 3<sup>103</sup>. Il deterioramento della parte alta suggerisce un ricoprimento meno rapido che ha lasciato esposto il legno al logorio della corrente. Verosimilmente il livello dell'acqua raggiungeva la quota del profilo sinistro del fondo, come mostrato in fig. 3.1-3, comportando la totale scomparsa del fianco emerso, nonostante sia da tenere in considerazione anche la possibilità di un impatto agrario nei secoli successivi all'affondamento.



Fig. 3.1-2. Rappresentazione dello scavo, con inserita l'unità stratigrafica relative all'argilla che ricopre la parte bassa dello scafo.

<sup>103</sup> S. Marlier, a cura di, *Arles-Rhone 3, un chaland gallo-romain du Ier siècle après Jésus-Christ*, «Archeonautica», 18, CNRS Éditions, 2014, p. 75.

La decisione da parte della Soprintendenza di non recuperare e restaurare l'imbarcazione è stata un importante fattore nella scelta della metodologia di rilievo da impiegare; una volta terminato lo scavo non sarebbe più stato possibile effettuare uno studio diretto sullo scafo. Una seconda motivazione, la fragilità del materiale che necessita di essere tenuto costantemente bagnato per evitare il collasso e la deformazione della struttura lignea, ha portato alla decisione di realizzare una documentazione digitale tridimensionale.

Le diverse tecniche impiegate permettono un'acquisizione veloce e completa e forniscono una quantità tale di dati precisi che vengono processati ed elaborati in modo da poter effettuare diverse analisi e misurazioni, anche dopo il risepellimento dello scafo sotto uno strato protettivo di sabbia<sup>104</sup>.

---

<sup>104</sup> C. Lemée, *The renaissance shipwrecks from Christianshavn*, «Ships and boats of the north», 6, Roskilde, 2006, p. 82.

### 3.1.1

#### Il rilievo topografico

Durante le fasi della campagna di scavo da ottobre a dicembre 2014, è stato utilizzato come prassi il rilievo topografico per la creazione di un sistema locale<sup>105</sup>, che nel caso in esame è collegato al punto di stazione di riferimento (0 di cantiere), collocato nell'area della chiesa tardo antica. La rete topografica realizzata dall'Università degli Studi di Milano con la stazione totale Topcon GPT 2005 è composta da 7 punti di stazione (100 - 700). I caposaldi 200, 300 e 400 sono posizionati all'interno dell'area della chiesa, mentre gli altri sono strettamente collegati all'area di scavo della parte circostante, corrispondente alla zona del rivale del fiume dove è stata rinvenuta la barca. Da queste ultime stazioni sono state documentate le diverse fasi di scavo, le unità stratigrafiche, le sezioni e i reperti rinvenuti (fig. 3.1-3).

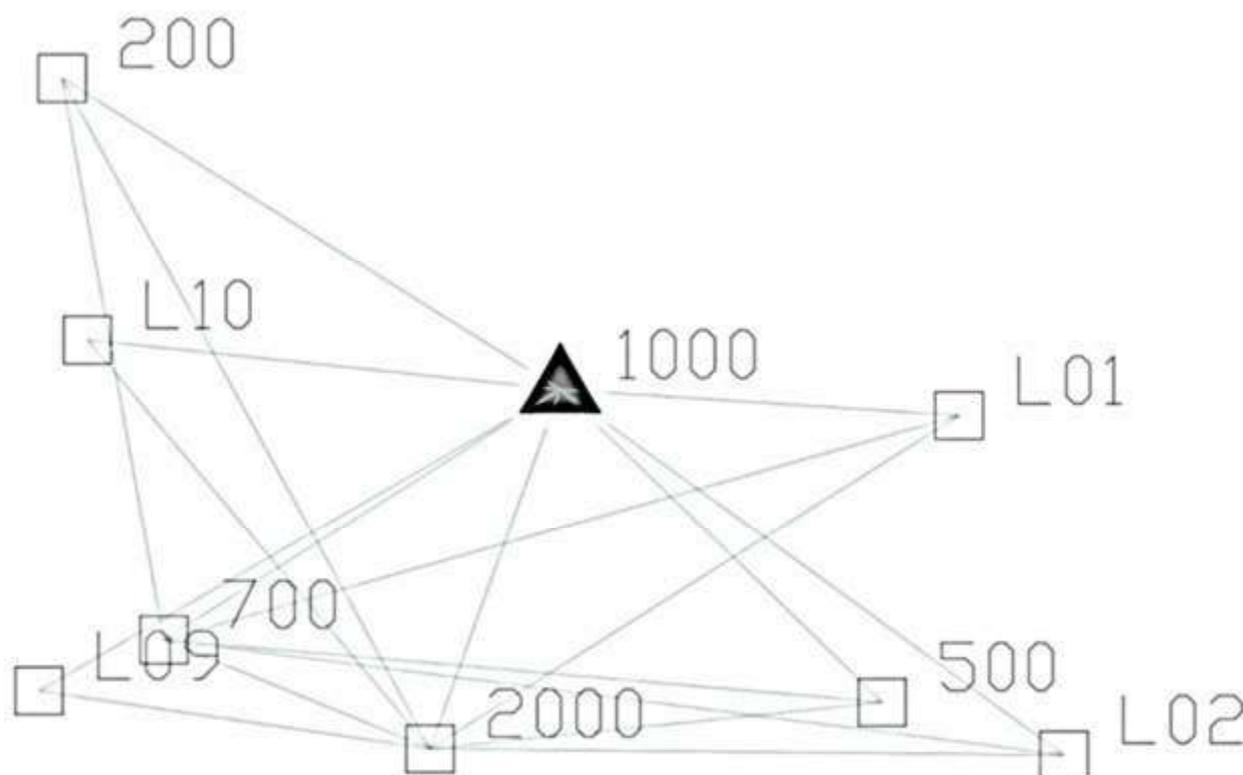


Fig. 3.1 - 3. Alcune stazioni della rete topografica di inquadramento (stazioni 200, 500, 700, 1000, 2000) e della rete di appoggio al laser scanner (target L01, L02, L09, L10)

<sup>105</sup> M. Guyon, *Méthodologie d'une fouille d'épaves en milieu terrestre*, «Archeonautica», 16, CNRS Éditions, pp. 25-34, 2010, p. 26.

Dal caposaldo 700 è stato effettuato il rilievo per punti di dettaglio dell'imbarcazione, utilizzando una tecnica di rilievo nota in archeologia fino all'avvento delle più moderne tecniche digitali<sup>106</sup>. Attraverso una serie di misurazioni dell'ingombro dello scafo, dei fori della cucitura, delle ordinate e delle tavole di fasciame è stato possibile documentare la totalità dello scafo. Ogni elemento ligneo è stato rilevato con una serie di punti ad intervalli regolari tra 5 e 10 cm a seconda delle caratteristiche dell'elemento costruttivo e dei dettagli presenti sulla porzione da rilevare (fig. 3.1-4 fig. 3.1-5). Nel rilievo del fasciame, i punti sono stati acquisiti seguendo i fori della cucitura, poiché lo spigolo delle tavole è nascosto dalla presenza del cordolo di calafataggio. Misurando i fori è stata effettuata, in questo modo, la descrizione simultanea di tre elementi costruttivi dello scafo: i fori della cucitura, le tavole di fasciame e i rotoli di calafataggio.



Fig. 3.1-4. Fase del rilievo per punti di dettaglio della barca di Santa Maria in Padovetere.

<sup>106</sup> C. Beltrame, *Documentare in archeologia navale*, in Gandolfi D. (a cura di), *Archeologia subacquea storia, organizzazione, tecnica e ricerche*. Quaderni della Scuola Interdisciplinare delle Metodologie Archeologiche – 3, 2017, pp. 165; Bruseth J.E., Turner T.S., Feherenbach T.R., *From a watery grave: the discovery and excavation of La Salle's shipwreck, La Belle*, Paperback, 2006; C. Lemée, *The renaissance shipwrecks* cit., pp. 82-102; J. Pakkanen, *Combining intensive total station drawing and photogrammetry in archaeological fieldwork documentation*, in *Building bridges*. Abstract book of the 23<sup>th</sup> annual Meeting of the European Association of Archaeologists, Jos Bazelmans and Klinkhamer Group ed., Maastricht, 2017, p. 95.



Fig. 3.1-5. Fase del rilievo per punti di dettaglio della barca di Santa Maria in Padovetere.

Attraverso lo schermo digitale della stazione totale sono state assegnate delle sigle alfanumeriche ad ogni elemento rilevato per facilitare il riconoscimento dei punti una volta caricati sul software di disegno *AutoCAD*. Le diverse sigle assegnate descrivono in maniera generica l'elemento ligneo:

- T, le tavole di fasciame
- M, i madieri, le ordinate
- F, la falca, la prima tavola sovrapposta
- SF, la sorafalca, la seconda tavola sovrapposta. Falca e sorafalca sono termini presi dalla marineria veneziana in uso ai giorni nostri; vengono usati in questo contesto poiché efficacemente descrittivi di questo elemento ligneo in fase di scavo
- D, il dormiente
- P, il pagliolato, il fasciame interno, di camminamento
- PIR, la piroga. In questo contesto è stata documentata con la stesa tecnica anche la piroga sovrastante stratigraficamente l'imbarcazione romana.

Contestualmente alla fase di rilievo digitale, veniva stilato a mano un elenco con i numeri dei punti rilevati e una breve descrizione sintetica relativa all'elemento ligneo; in questo modo, si veniva a decodificare un rilievo composto da numeri e codici in maniera più precisa e descrittiva, al fine di facilitare l'elaborazione dei dati al computer a fine scavo, evitando di perdere informazioni importanti (fig. 3.1-6).

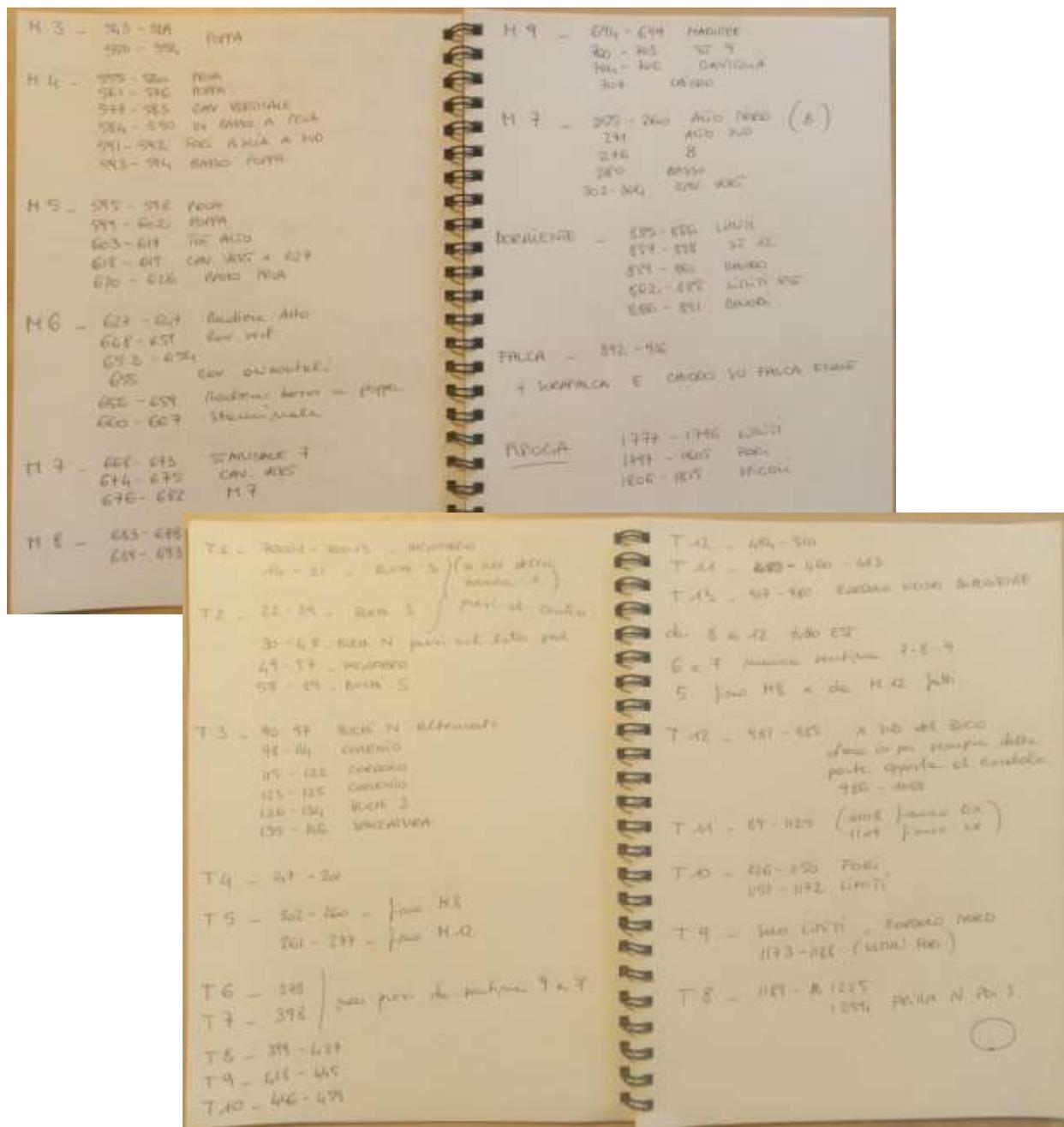


Fig. 3.1-6. Elenchi dei punti di dettaglio del rilievo con stazione totale stilati in fase di scavo.

Una volta aperto il file finale sul software *AutoCAD*, ogni punto è rappresentato da una croce relativa alla posizione, dal codice alfanumerico relativo all'elemento ligneo e da un numero progressivo preceduto dalla sigla CHI di chiatta (fig. 3.1-7 e fig. 3.1-8).

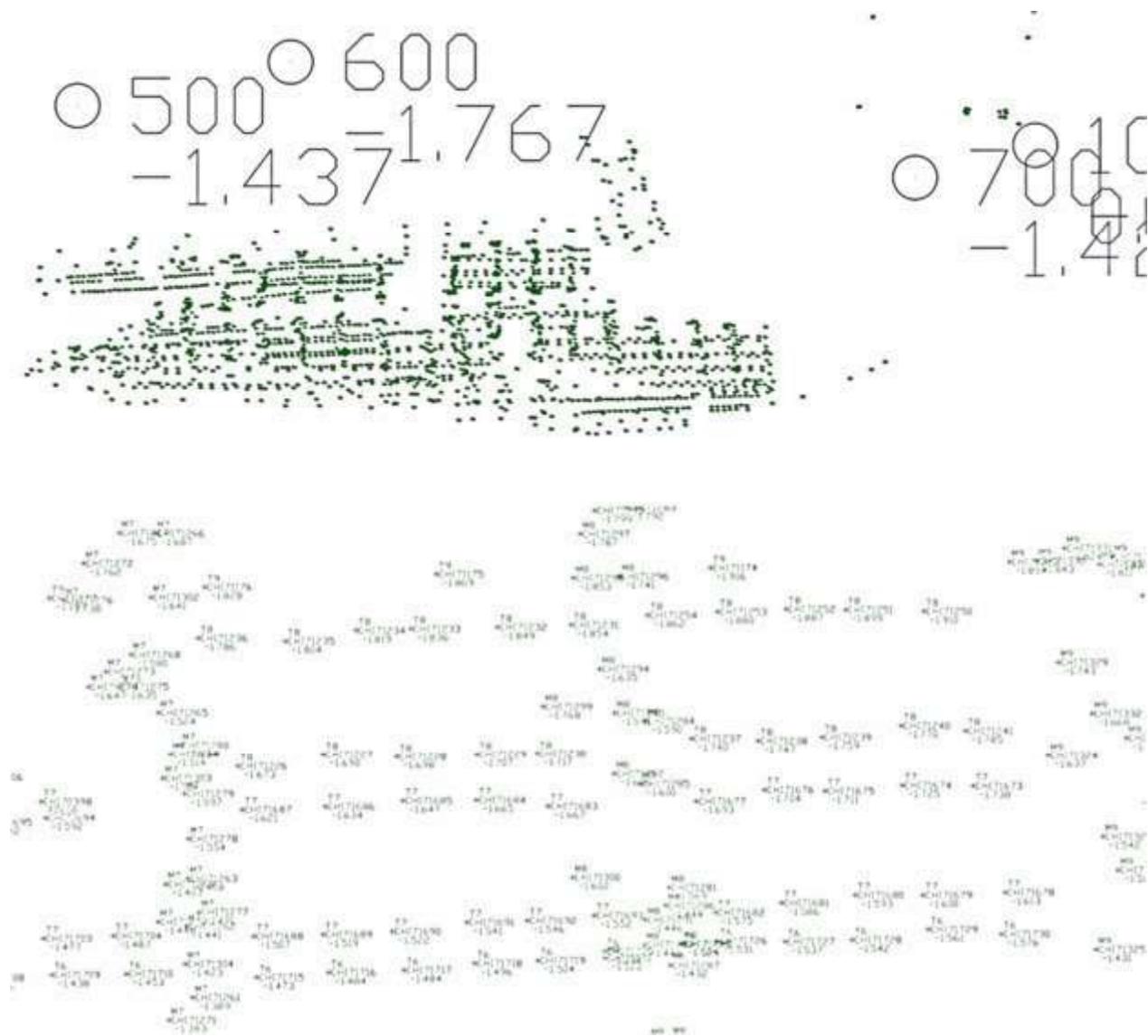


Fig. 3.1-7-8. La barca di Santa Maria in Padovetere rilevata per punti di dettaglio dalla stazione 700, totale e particolare.

La tecnica di rilievo in esame è risultata molto dispendiosa in termini di tempo e impegno, sia nelle fasi di rilievo, che nella fase di restituzione al computer, durante la

quale i punti sono stati collegati in modo da ottenere le linee descrittive dell'imbarcazione (fig. 3.1-9). Fino ad alcuni anni fa era questa la tecnica comunemente usata sugli scavi per rilevare tridimensionalmente un oggetto<sup>107</sup>, poiché non richiedeva particolari risorse strumentali e cognitive, diversamente dalle tecniche fotogrammetriche che necessitano di camere metriche e tecnici specializzati, non sempre disponibili.

Il rilievo che si ottiene è corretto dal punto di vista metrico, con un'accuratezza millimetrica in relazione alla precisione della rete e dello strumento; per contro, questa tecnica ha i difetti di essere condizionata dall'interpretazione del rilevatore e di rappresentare l'oggetto solo per linee e punti e non 'in continuo' come con le nuove tecniche digitali a disposizione.

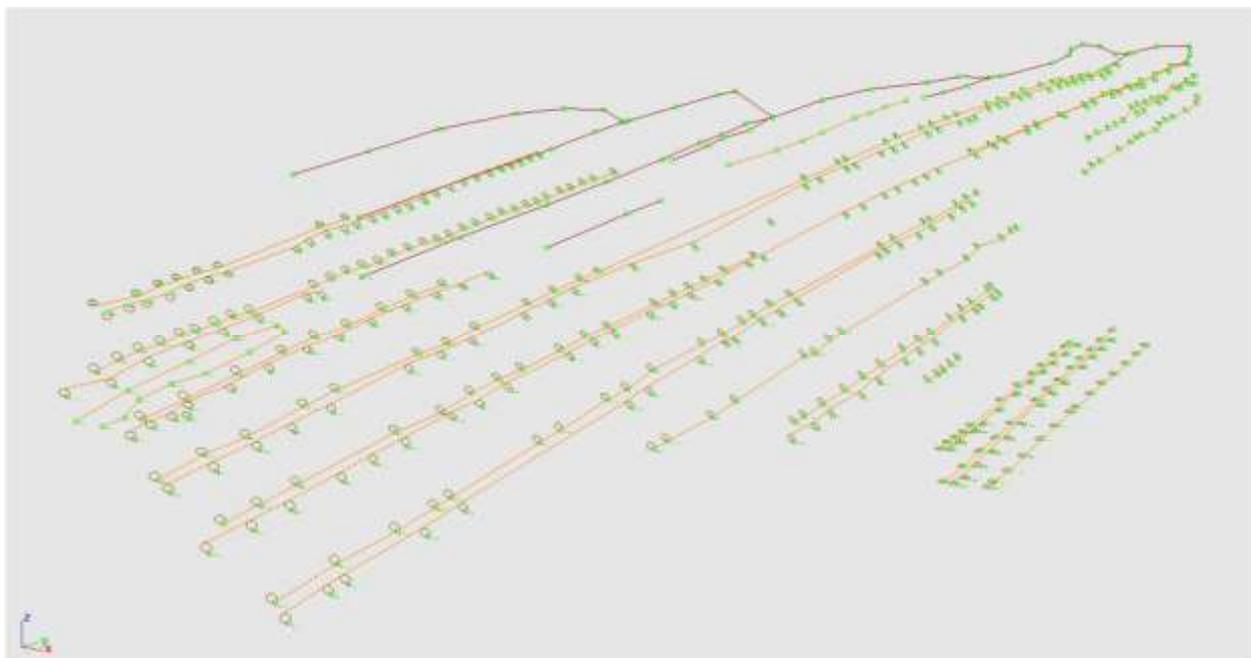


Fig. 3.1-9. Restituzione parziale del rilievo di dettaglio realizzato con la Stazione Totale.

<sup>107</sup> Cfr. nota 106.

### 3.1.2

#### Il rilievo fotogrammetrico

Sulla base delle conoscenze pregresse nell'ambito del rilievo archeologico, si è deciso di impiegare la fotogrammetria multi-immagine per documentare l'imbarcazione utilizzando una tecnica che fosse veloce e al contempo accurata, in modo da riuscire ad ottenere la massima precisione senza sottoporre l'imbarcazione ad ulteriori stress rispetto a quelli già subiti durante lo scavo. Negli ultimi anni questa tecnica viene ampiamente usata in quasi tutti gli scavi archeologici, per la sua facilità e versatilità di utilizzo in diversi e complessi ambiti, come quello subacqueo, e per la sua economicità, come si può dedurre anche dalla ricca letteratura di riferimento<sup>108</sup>.

In un ambito complesso come quello di uno scafo in legno, caratterizzato da molteplici elementi e da una grande differenza di quota tra i piani e gli elementi costruttivi, la scelta di una documentazione tridimensionale risulta nettamente vantaggiosa. Diversamente dal rilievo realizzato con la stazione totale o il disegno manuale, la tecnica fotogrammetrica produce un modello tridimensionale corretto metricamente e al contempo fedele nella resa fotografica e nella texturizzazione, senza alcun tipo di contatto fisico con l'imbarcazione ed eliminando le problematiche dovute alle tempistiche<sup>109</sup>.

---

<sup>108</sup> Solo per citarne alcuni: Canciani et al., *Low cost digital* cit.; M. Capulli, *The Precenico shipwreck: an 11th-13th century vessel from the river Stella I*, in Proceedings of the 14 Isbsa, Gdansk. Baltic and beyond, 2017; J.L.Casaban, I.Radic Rossi, K.Yamafune, F. Castro, *Underwater photogrammetry applications: the Gnalic shipwreck, 2013 (Croazia)*, in Proceeding of IKUWA, 2014; Dostal, *Laser scanning* cit., p. 156; J.McCarthy, *Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community*, «Journal of Archaeological Science», 43, pp. 175-185; K.Yamafune, R. Torres, F.Castro, *Multi-Image Photogrammetry to Record and Reconstruct Underwater Shipwreck Sites*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 2016; S. Marlier, *Arles-Rhone 3* cit.; M.O.Zhukovsky, V.D.Kuznetsov, S.V.Olkhovsky, *Photogrammetric techniques* cit..

<sup>109</sup> Crumlin-Pedersen O., *The Skuldelev Ships I* cit., p. 51; Marlier, *Arles-Rhone 3* cit., p. 56.

### Rilievo fotogrammetrico multi-immagine 2014

I rilievi fotogrammetrici sono stati effettuati regolarmente durante il corso dello scavo, non appena una nuova porzione di imbarcazione fosse stata scavata e quindi esposta all'aria. Il contesto aerobico in cui si trova l'imbarcazione dopo lo scavo mette a repentaglio la solidità del legno, rendendo necessaria una documentazione immediata in modo da non perdere dettagli dei particolari costruttivi dello scafo. Sono stati quindi realizzati tre rilievi fotogrammetrici nell'arco dei tre mesi di lavoro e una documentazione fotografica giornaliera, al fine di documentare, sia le fasi di scavo che l'imbarcazione.

Il primo rilievo ha avuto luogo il 3 ottobre 2014, sulla prima porzione di scafo esposta; sono stati effettuati 60 scatti disposti secondo una strisciata fotogrammetrica unica nadirale al soggetto e una seconda strisciata perpendicolare alla prima delle porzioni della barca più scavate. Il primo rilievo è risultato utile anche per testare questa tecnica applicata ad un soggetto complesso; alcune delle problematiche principali riscontrate durante il rilievo sono legate alla scarsa quantità e qualità di luce presente e alla tipologia del materiale che non presenta sostanziali differenze cromatiche tra i diversi elementi, a volte difficilmente riconoscibili in un'immagine. Nella fase di presa bisogna fare attenzione, infatti, a mantenere la stessa focale della camera per ogni strisciata, alla luce e al bilanciamento del bianco e all'esposizione soprattutto quando ci si trova in contesti di legno bagnato in cui il soggetto è spesso molto scuro<sup>110</sup>.

Per lo svolgimento del rilievo sono state seguite le consuete prassi della fotogrammetria<sup>111</sup>: la sovrapposizione del 60% tra le immagini, il mantenimento della stessa distanza dal soggetto. In questo caso la distanza era di circa 1,5 m poiché la minima porzione scavata consentiva di camminare attorno allo scafo rimanendo in posizione nadirale su di esso (fig. 3.1-10).

Il risultato è stato soddisfacente per quanto riguarda sia l'operatività sul campo che il processamento dei dati al computer e il modello finale acquisito. I parametri impiegati sono stati impostati su *Medium*, per riuscire a controllare immediatamente sul campo la resa del rilievo fotogrammetrico. La portabilità su computer portatili è una delle

<sup>110</sup> Dostal, *Laser scanning* cit., p. 163.

<sup>111</sup> Cfr. *supra*, cap. 2.2.

principali peculiarità degli odierni software fotogrammetrici, poiché permette di controllare immediatamente sul campo la fase di acquisizione e il processamento dei dati, permettendo di correggere e di integrare le immagini o i metodi di un rilievo. Per questo motivo, al fine di ridurre i tempi di calcolo e di elaborazione dei dati, i primi modelli fotogrammetrici vengono realizzati a bassa risoluzione. Successivamente, una volta in possesso della documentazione corretta e completa, è possibile effettuare le rielaborazioni ad alta risoluzione, che in alcuni casi possono richiedere diverse ore o giornate intere di calcolo per ottenere il modello finale.

Il secondo rilievo è stato realizzato il 23 ottobre 2014 su una porzione di imbarcazione più grande, comprensiva di parte del fondo e del fianco dello scafo; sono state utilizzate 94 immagini, disposte secondo due strisciate parallele longitudinali e due strisciate trasversali allo scafo, con una sovrapposizione superiore rispetto al 20 % necessario per le strisciate fotogrammetriche (fig. 3.1-11).

Per il rilievo fotogrammetrico conclusivo della campagna di scavo del 2014, svoltosi il 21 novembre, l'imbarcazione è stata lavata e pulita minuziosamente dai residui di sabbia e argilla, prima di ricoprire lo scafo con geo-tessuto e sacchi di sabbia. Per questo rilievo è stato impiegato un totale di 129 immagini; 52 di queste sono state scattate seguendo strisciate nadirali al soggetto, 52 seguendo lo stesso andamento, ma mantenendo la macchina in posizione obliqua, in modo da riuscire a rappresentare anche la parte verticale delle ordinate e i dettagli delle porzioni difficili da fotografare, e 25 immagini sono state scattate da una distanza maggiore secondo uno schema radiale attorno allo scavo (fig. 3.1-12).

Un fattore importante nella fase di presa nel rilievo fotogrammetrico è l'individuazione della distanza dalla quale scattare le foto al fine di produrre un modello ad una determinata scala nominale, cioè la scala per la quale è corretto stampare un disegno o un'ortofoto. Il principio della scala nominale è legato al concetto di errore di graficismo, che convenzionalmente si assume pari a 0,2 mm (lo spessore più piccolo della punta delle chine da disegno) moltiplicato per il fattore di scala. Per esempio, la scala archeologica tipica di un progetto di scavo è la scala 1:20; moltiplicando 0.2 mm x 20 si ottiene un risultato pari a 4 mm, determinando che in un disegno alla scala 1: 20 tutto quello che nella realtà è più piccolo di 4 mm non viene rappresentato. In alcuni soggetti ricchi di dettagli e piccoli particolari, come nel caso di un'imbarcazione, si utilizzano la scala 1:10, con un errore di graficismo di 2 mm, o 1: 5, con un errore di 1 mm.

L'ottenimento di una documentazione accurata con le tecniche digitali è possibile se gli strumenti impiegati hanno una precisione strumentale alta; la qualità delle macchine fotografiche unita alla ridotta distanza di scatto dal soggetto e gli errori minimi della rete ottenuta con la stazione totale ci permettono di raggiungere alte precisioni.

Per prima cosa si deve calcolare la dimensione del pixel della camera, secondo la formula:

$$\text{Dimensione del pixel} = \frac{\text{dimensione del sensore, lungo asse x}}{\text{numero dei pixel, lungo asse x}}$$

La dimensione del sensore della Nikon D5000 impiegata per il rilievo è 23.6 x 15.8 mm, mentre il numero di pixel dell'immagine è 4288 x 2848 pixel, da cui si ricava che  $23.6 / 4288 = 0.0055 \text{ mm} = 5 \text{ micron}$ .

Per calcolare la distanza da cui effettuare le strisciate fotogrammetriche si applica la seguente formula della scala dell'oggetto, in cui "f" rappresenta la focale utilizzata, "dm" la distanza media dal soggetto, "px sensore" il numero di pixel del sensore e "px scala" il numero dei pixel raffigurati nell'immagine alla scala alla quale voglio rappresentare il mio oggetto (fig. 3.1-15):

$$c : dm = 1 : L$$

$$f : dm = \text{px. sensore} : \text{px. scala}$$

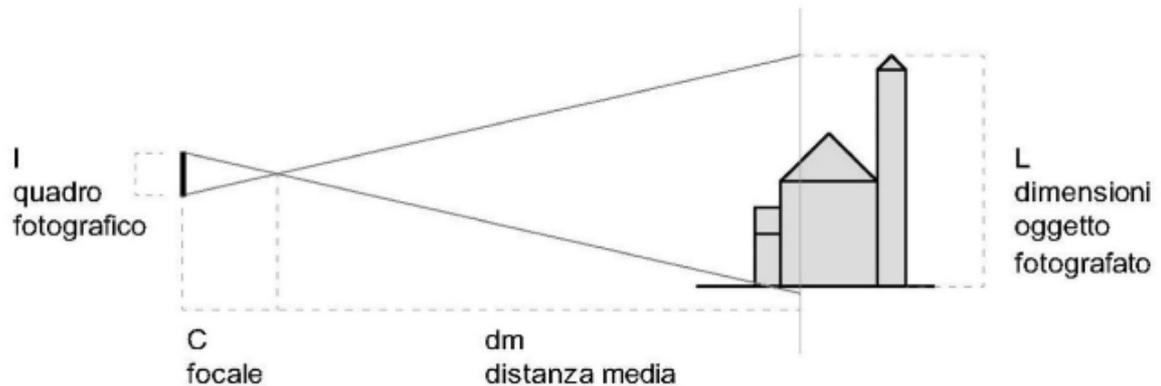


Fig. 3.1-13. Schema esplicativo del rapporto della scala nominale tra camera e oggetto.

Per prima cosa bisogna calcolare  $L = 2 \text{ mm (per la scala 1:10)} \times 4288 \text{ (nr. pixel)} = 8576 \text{ mm} = 8.576 \text{ m}$ , che rappresenta la quantità di soggetto raffigurato nell'immagine.

$$18 : x = 23.6 : 8576 \text{ mm}$$

Si deve quindi mantenere una distanza dal soggetto di  $6541 \text{ mm} = 6.541 \text{ m}$  per ottenere un modello stampabile correttamente in scala 1:10. Calcolando che le fotografie sono state scattate da una distanza media di 2 m, la scala raggiungibile è nettamente superiore, permettendoci di rappresentare dettagli di piccole dimensioni.

Nel processo fotogrammetrico del *software Agisoft Photoscan* il valore del pixel equivalente all'errore di graficismo della nostra scala viene inserito nella fase di estrazione dell'ortofoto del modello, la quale viene in questo modo scalata in maniera corretta permettendo di misurare gli oggetti rappresentati sull'immagine (tav. 3.1-2).

---

Documentazione fotografica e foto raddrizzamento 2014

Il rilievo fotografico di dettaglio dello scafo, realizzato con la Nikon D5000 e la Canon Eos 350D<sup>112</sup>, è di primaria importanza sia per la documentazione degli elementi lignei, che come appoggio alla documentazione fotogrammetrica e successivamente alla restituzione grafica.

Una volta realizzato il rilievo fotogrammetrico, si è voluto effettuare un confronto tra l'ortofoto prodotta con questa tecnica e il fotomosaico di immagini raddrizzate; il fotoraddrizzamento viene spesso utilizzato negli scavi archeologici<sup>113</sup> poiché semplice e veloce e corretto metricamente nel caso del rilievo di unità stratigrafiche rappresentate da terreno in piano senza grandi differenza di quote. Abbiamo avuto modo di notare spesso come questa tecnica venga utilizzata impropriamente poiché non si conoscono in maniera approfondita le regole analitiche alla base di questo procedimento. Il raddrizzamento, definito anche fotogrammetria monoscopica per l'impiego di una sola immagine, restituisce un'immagine corretta e misurabile solo se l'oggetto da rilevare è assimilabile ad un piano. Il procedimento effettua una trasformazione geometrica bidimensionale dell'immagine attraverso la corrispondenza delle coordinate bidimensionali *xy* di *target* misurati con le corrispondenti coordinate *xy* sull'immagine. Essendo l'immagine bidimensionale, non è possibile ottenere la coordinata *z* dei punti con una immagine sola, inoltre l'immagine mantiene la prospettiva della fotografia anche dopo la trasformazione geometrica; di conseguenza, gli oggetti posti su piani diversi da quello in cui sono posizionati i *target* risultano traslati e non è possibile disegnarli nella posizione corretta e con le corrette dimensioni.

Gli archeologi della ditta impegnata nello scavo (Epic snc) hanno comunque scattato una serie di fotografie utili al raddrizzamento e al fotomosaico, nonostante come pianta finale sia stata usata l'ortofoto metricamente corretta ottenuta dal rilievo fotogrammetrico. In questa occasione, mettendo a confronto le due tecniche di rilievo è stato possibile rendere evidenti gli errori che si possono determinare impiegando la tecnica sbagliata in un determinato contesto.

---

<sup>112</sup> Le caratteristiche delle camere fotografiche sono specificate nel capitolo precedente relativo agli strumenti utilizzati, cfr. *supra*, cap. 2.2.1.

<sup>113</sup> Beltrame, *Documentare in archeologia* cit., p. 161; Gianfrotta, Pomey, *Archeologia subacquea* cit., p. 118-119.

In fase di scavo, sono stati disposti secondo una griglia regolare 26 *target* sullo scafo ligneo, 4 o 6 per immagine, e con l'utilizzo di una Olympus C5060WZ e di una asta telescopica sono state effettuate due strisciate di 11 immagini totali, scattate in maniera nadirale rispetto al suolo. Il raddrizzamento, ottenibile singolarmente per ogni immagine, non richiede che le fotografie vengano scattate con un'alta percentuale di sovrapposizione, ma è necessario che si sovrapponga solo quella parte di immagine in cui sono presenti i *target* in maniera da riuscire a costruire il fotomosaico tramite le coordinate note. Il software *RDF* è stato utilizzato per il raddrizzamento di ogni singola immagine e il software *AutoCAD* per l'unione delle immagini raddrizzate e georeferenziate nel sistema di coordinate locale (fig. 3.1-14).

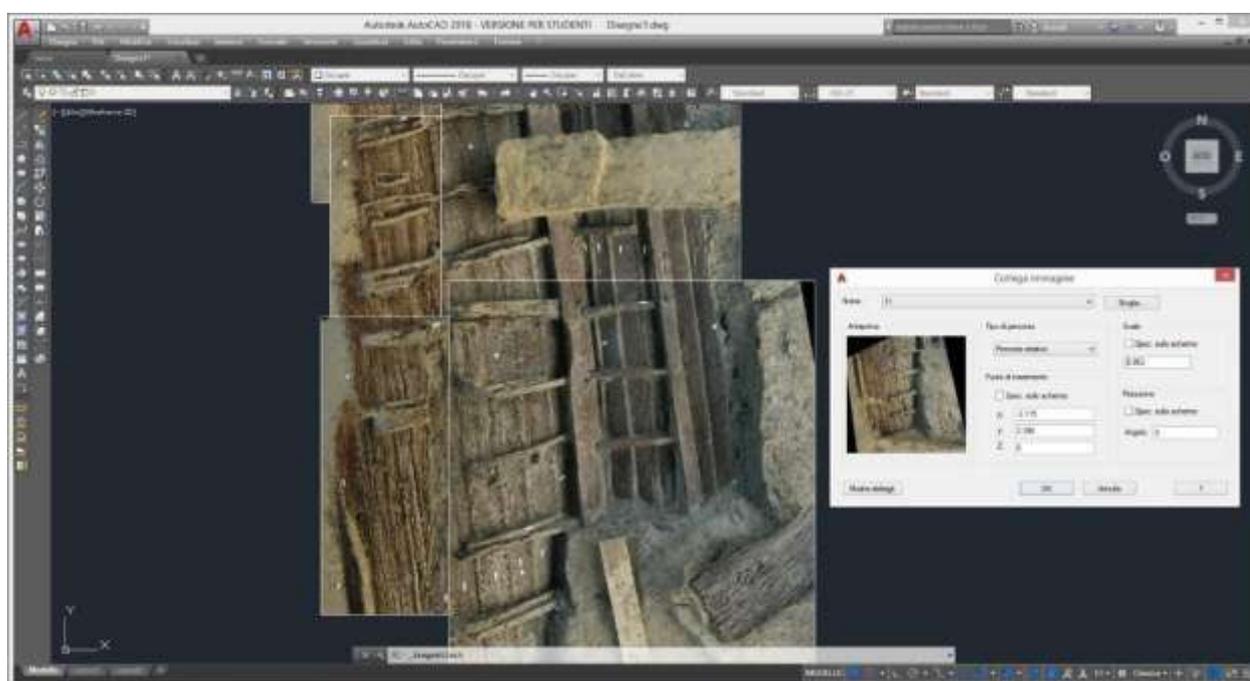


Fig. 3.1-14. Realizzazione del fotomosaico e unione delle immagini raddrizzate tramite coordinate topografiche dei punti.

Per l'elaborazione con il software fotogrammetrico *Agisoft Photoscan*, la sovrapposizione delle immagini non era sufficiente per ottenere una nuvola di punti completa poiché inferiore a 60%. Di conseguenza, sono state aggiunte 12 immagini con la stessa inquadratura delle precedenti ma con una lieve differenza nella rotazione della camera, sufficiente per realizzare il procedimento fotogrammetrico.

Per il modello fotogrammetrico sono state utilizzate le stesse coordinate impiegate per il raddrizzamento di ogni singolo fotogramma; è stato così possibile sovrapporre i due risultati (fotomosaico e ortofoto) e controllare il risultato finale (fig. 3.1-18). Nel fotomosaico si nota che alcune porzioni di scafo, come le ordinate che sono verticali rispetto al fondo, subiscono una deformazione evidente data dalla prospettiva centrale dell'immagine, risultando errate sia dal punto di vista metrico che della posizione (fig. 3.1-19). Nell'ortofoto risultante dal processo fotogrammetrico, invece, l'oggetto tridimensionale viene visto ortogonalmente, come se venisse proiettato su un piano, non presentando le deformazioni prospettiche delle immagini. Gli elementi lignei risultano quindi nella posizione corretta e sono metricamente misurabili.

### Rilievo fotogrammetrico multi-immagine 2015

Nell'agosto del 2015, grazie ad un finanziamento del MiBact, voluto dal ministro Franceschini in persona dopo la sua visita allo scavo, si è potuto riaprire lo scavo ed effettuare il rilievo e lo studio della porzione di imbarcazione mancante. In questa campagna archeologica ci si è avvalsi per documentare il sito di due delle tecniche impiegate nel 2014, la fotogrammetria e il rilievo laser scanning, poiché durante il processamento dei dati è stato evidenziato come queste siano le tecniche di documentazione più appropriate e più precise in ambito archeologico, confermando le nostre ricerche ed ipotesi iniziali.

Per le foto di documentazione è stata impiegata una Canon Eos 350D, mentre per il rilievo fotogrammetrico una Nikon D610, con un'ottica fissa da 20 mm.

Nel corso della seconda campagna di scavo e di rilievo sono stati realizzati due diversi rilievi fotogrammetrici al termine dello scavo totale dell'imbarcazione, cercando di scegliere il momento della giornata in cui le ombre fossero minime. La luce naturale presente sul sito in questa seconda campagna, svoltasi nel periodo estivo, non era ottimale per la documentazione fotografica, poiché la luce del sole creava zone di piena luce in contrasto con zone d'ombra nelle parti di scavo sotto la copertura.. Come si può evincere dalle figure 3.1-16 e 3.1-17, risulta esserci una differenza sensibile tra le fotografie scattate in una giornata di sole e quelle, invece, realizzate in una giornata nuvolosa.



Fig. 3.1-16-17. Fotografia dello scavo scattata in una giornata di sole, a sinistra, e fotografia dello scavo scattata in una giornata nuvolosa.

Il primo rilievo fotogrammetrico ha avuto luogo il 9 settembre 2015, non appena terminato lo scavo dell'imbarcazione, nonostante l'ultima tavola del fianco si trovasse alla quota più profonda di scavo, sommersa dall'acqua della falda eccezionalmente alta e le condizioni di luce naturale fossero problematiche (fig. 3.1-18 e 3.1-19).



Fig. 3.1-18-19. Due immagini esplicative della situazione alla quota più profonda dello scavo in cui la tavola di fasciame viene sommersa dall'acqua di falda.

Era comunque indispensabile documentare lo scafo a fine giornata e a fine lavoro, così da ottenere il modello virtuale dell'imbarcazione pulita. Per questo rilievo sono state scattate 305 immagini, delle quali circa 250 solo per la nuova porzione di scafo portata alla luce nella campagna di scavo 2015; 150 immagini sono state scattate ad una distanza ravvicinata e concentrandosi maggiormente sulla zona di poppa, cercando di rappresentare tutti i particolari sottosquadro (fig. 3.1-20).

Il secondo rilievo è stato effettuato il 15 settembre 2015 su tutta l'imbarcazione, con un totale di 145 immagini, 88 delle quali scattate ad una distanza omogenea di circa 2-3 m, seguendo strisciate nadirali e radiali attorno allo scafo e 57 immagini a distanza ravvicinata raffigurando i particolari della zona di poppa. Il rilievo è stato effettuato in una giornata di cielo coperto, permettendo di avere una condizione luce ottimale su tutto lo scafo (fig. 3.1-21).

Per ottenere il modello finale, le nuvole di punti dei due rilievi realizzati sono stati uniti nello stesso sistema di riferimento, eliminando dal primo rilievo i punti che non erano corretti, come quelli della parte di scafo sotto l'acqua di falda; attraverso l'integrazione dei due modelli, la geometria del modello virtuale risulta corretta. Per la fase di

texturizzazione, sono state lasciate attive solo le immagini provenienti dalle strisciate realizzate nella giornata di luce ottimale, come si può notare nella figura 3.1-22, in cui le immagini attive sono rappresentate da un rettangolo di colore blu, mentre quelle disattivate da un rettangolo azzurro.

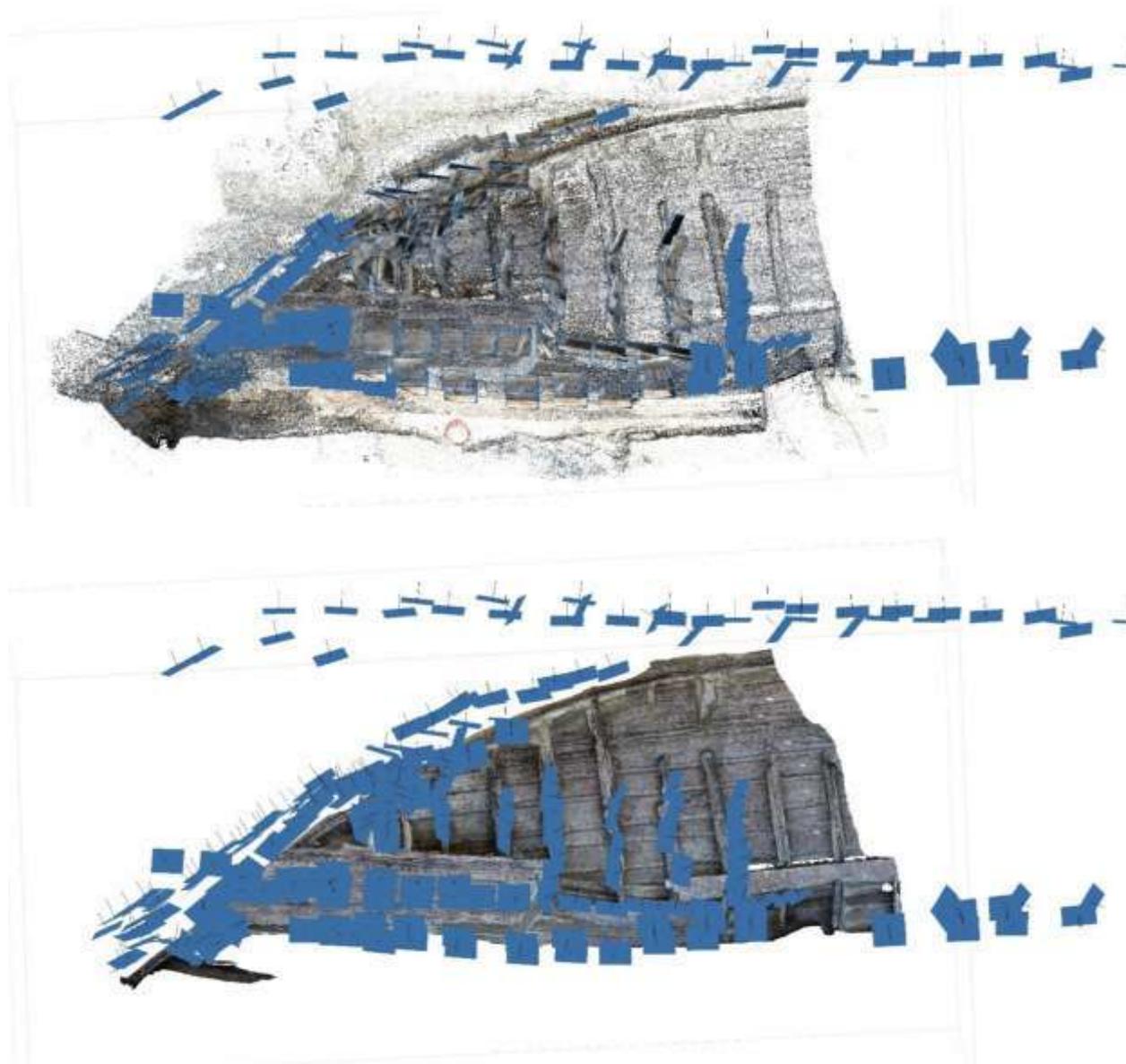


Fig. 3.1-20. Nuvola di punti, mesh e posizione delle camere della zona di poppa. Rilievo fotogrammetrico del 9 settembre 2015.

Il rilievo del 2015 è stato integrato al rilievo del 2014 attraverso una serie di punti di dettaglio dell'imbarcazione, non potendo più impiegare i *target* presenti nel 2014, rimossi maldestramente dagli archeologi della soprintendenza nel momento in cui si è riaperto lo scavo per alcune riprese del programma televisivo "Super Quark". L'inserimento dei due modelli fotogrammetrici nello stesso sistema di riferimento si è ottenuto con precisioni intorno al mm, poiché i punti di dettaglio dello scafo, dei quali avevamo acquisito le coordinate dal rilievo fotogrammetrico del 2014, erano ben visibili in entrambi i modelli (fig. 3.1-23).

Ottenuto il modello finale completo nel sistema di riferimento corretto dello scavo, sono state estrapolate le ortofoto relative alla pianta e al prospetto dell'imbarcazione, mantenendo l'inclinazione effettiva dello scafo così come era stato rinvenuto (tav. 3.1-1). Il modello virtuale è stato successivamente elaborato per portare l'imbarcazione in assetto di navigazione e per ricostruire gli elementi costruttivi e le parti mancanti<sup>114</sup>.

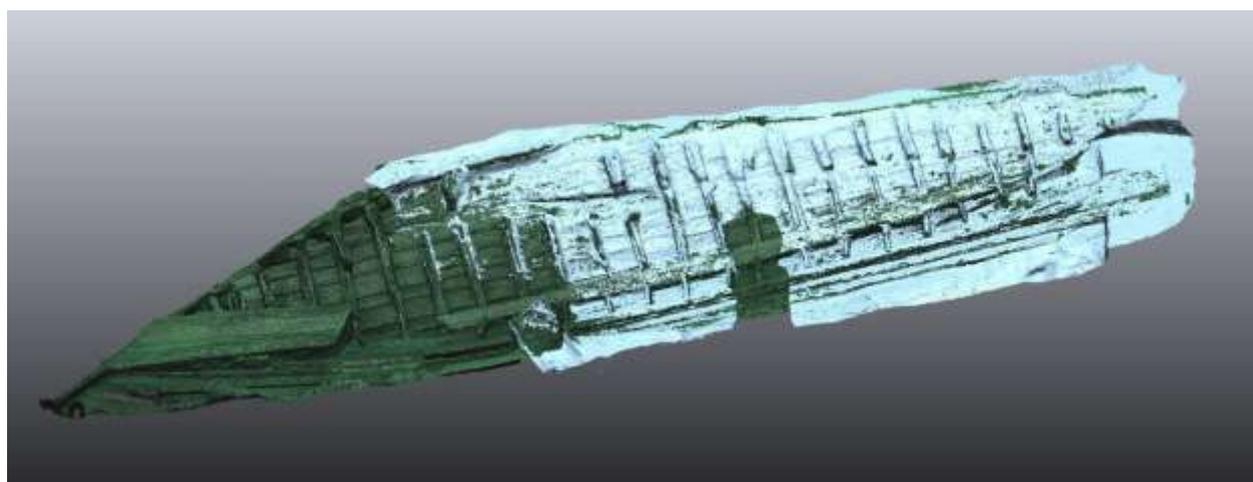


Fig. 3.1-23. Unione delle nuvole fotogrammetriche del 2014, in azzurro, e del 2015, in verde.

---

<sup>114</sup> Cfr. *infra*, cap. 4.1.1.

## Pianta di scavo e sezioni

Sulla base delle ortofoto prodotte dal rilievo fotogrammetrico sono state realizzate delle tavole bidimensionali al fine di produrre un'iniziale documentazione che potesse agevolare lo studio dello scafo e costituire un rilievo da consegnare alla Soprintendenza Archeologia per l'Emilia Romagna. È stata quindi vettorializzata la pianta con l'imbarcazione in posizione di scavo, inclinata sul fianco destro, mentre per le sezioni è stata estrapolata la porzione di *mesh* relativa ad alcune sezioni (fig. 3.1-24), sulle quali sono state disegnate manualmente le linee delle ordinate che sono state poi proiettate sul piano verticale in modo da creare le sezioni bidimensionali.

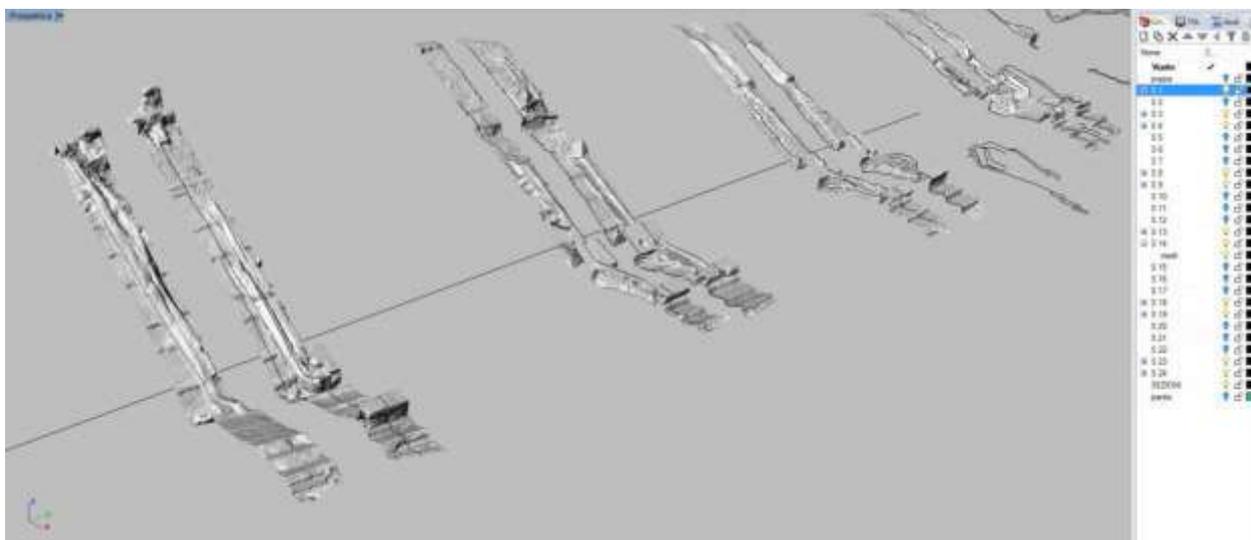


Fig. 3.1-24. Particolare delle ordinate estrapolate dalla *mesh* totale dello scafo.

### 3.1.3

#### Il rilievo laser scanning

##### Rilievo laser scanning 2014

Attraverso il rilievo laser scanning, che permette di rilevare a 360° e in maniera automatica e veloce, si sono documentati e rilevati l'intera area di scavo e parte del cantiere circostante. Questa tecnica viene spesso utilizzata infatti in contesti troppo grandi per poter usare la fotogrammetria o il laser triangolatore per ottenere una nuvola di punti al contempo accurata<sup>115</sup>.

Sono stati innanzitutto posizionati i *target* a scacchiera sui pilastri di cemento di sostegno della copertura e su piccole piattaforme mobili attorno allo scafo per non intaccare l'imbarcazione, al fine di orientare in un sistema di riferimento noto ogni singola scansione e allinearle tra di loro.

Nel 2014 sono state effettuate 11 scansioni, 4 delle quali da una posizione rialzata attorno al sito archeologico, 6 all'interno (fig. 3.1-25) e 1 direttamente sul testimone di terra risparmiato durante le fasi di scavo perfettamente al centro dello scafo.



Fig. 3.1-25. Una delle scansioni del rilievo laser scanning all'interno dello scavo. Campagna di rilievo 2014.

<sup>115</sup> Dostal, *Laser scanning* cit., p. 171.

Ogni scansione impiega circa 5 minuti per l'acquisizione dei punti, con una densità di un punto ogni 6 mm ad una distanza di 10 m, permettendo di creare una nuvola di circa 44 milioni di punti; una volta effettuata la scansione, il laser impiega ulteriori 3 minuti per acquisire 84 immagini fotografie a colori per scansione. Il software *Faro Scene 5.5.3.16* permette la visualizzazione della scansione tramite la nuvola di punti o la vista piana dell'insieme delle fotografie, come mostrato dalla figura 3.1-26. Una volta caricate le scansioni è stato possibile effettuare il loro allineamento in un sistema di riferimento unico attraverso la presenza dei *target* a scacchiera utilizzati come *GCP (Ground Control Points)*, dei quali conoscevamo le coordinate dal rilievo topografico (Fig. 3.1-27).

Al termine dell'allineamento, la nuvola totale è formata da 482 milioni di punti e copre un raggio di 120 m dalla posizione di ogni singola scansione, comprendendo il paesaggio circostante e la copertura del sito. Di conseguenza, è stata effettuata un'operazione di pulizia dei punti esterni, per eliminare gli elementi di disturbo, rendere più leggera e gestibile la nuvola e mettere in luce esclusivamente gli elementi strettamente necessari per il rilievo, come l'imbarcazione (fig. 3.1-28).



Fig. 3.1-26. Vista piana di una delle scansioni del rilievo laser scanning.

### Rilievo laser-scanning 2015

Durante la campagna di rilievo del 2015, non appena terminato lo scavo e la pulizia dell'imbarcazione, si è effettuato il rilievo con il laser scanner Faro Focus 3D, mantenendo lo stesso settaggio delle impostazioni impiegate durante la campagna di rilievo del 2014, al fine di ottenere approssimativamente la stessa numerosità di punti con la stessa precisione. Sono state realizzate in totale 12 scansioni, 6 delle quali dalla zona più alta attorno al sito archeologico e 6 all'interno, in prossimità dello scafo (fig. 3.1-29).



Fig. 3.1-29. Una delle stazioni all'interno dello scavo utilizzate per il rilievo laser scanning. Campagna di rilievo 2015.

Ogni scansione misura circa 44 milioni di punti, mentre l'intero sito archeologico viene restituito attraverso una nuvola completa contenente circa 526 milioni di punti, unione delle 12 scansioni, le cui posizioni sono riconoscibili in figura 3.1-34 dai cerchi più scuri in cui lo strumento non ha acquisito punti. L'allineamento delle scansioni è stato realizzato con il software *Faro Scene 5.5.3.16* sulla base delle coordinate dei *target* della campagna di rilievo del 2014, poiché i pilastri della copertura sulla quale erano stati

posizionati erano rimasti fissi durante la pausa tra le due campagne, permettendo di reimpiegare le coordinate del sistema di riferimento precedente.

Il rilievo laser scanning è stato realizzato due giorni dopo il rilievo fotogrammetrico, durante i quali, a causa di una forte pioggia, una delle sezioni di scavo è crollata sull'imbarcazione, andando a spezzare alcuni elementi lignei. Effettuando il confronto tra le nuvole di punti risultano evidenti i punti di frattura e le deformazioni avvenute, a conferma di come una documentazione giornaliera e precisa sia necessaria per non perdere informazioni metriche importanti.

### 3.1.4

#### La barca di Santa Maria in Padovetere e la tecnica costruttiva

La barca di Santa Maria in Padovetere appartiene ad una tipologia di imbarcazioni a fondo piatto, la cui tecnica costruttiva viene definita a guscio o, ancor meglio, ‘*sur sole*’, dove il fasciame viene assemblato prima degli altri elementi ed ha una funzione strutturale, mentre le ordinate vengono posizionate successivamente, a solo rinforzo dello scafo; la forma piatta del fondo non solo acquista importanza strutturale ma rappresenta la parte di scafo da cui iniziano le fasi costruttive<sup>116</sup>. Nelle imbarcazioni su guscio, le connessioni tra le tavole hanno, di conseguenza, un’importanza primaria: in area mediterranea troviamo le tecniche a mortasa e tenone e a cucitura. Le *sutiles naves*<sup>117</sup>, le navi cucite, sono ben conosciute in tutto il Mediterraneo Occidentale nel periodo greco-arcaico; in Alto-Adriatico ne troviamo una testimonianza archeologica nella barca di Zambratija<sup>118</sup>, mentre la prima evidenza di epoca romana è solo del II secolo d.C. con la barca di Lipe nei dintorni di Lubiana<sup>119</sup>. La presenza in queste zone della tecnica a cucitura si prolunga fino al VII secolo d.C. con la barca di Cervia, e probabilmente fino all’XI secolo con la barca di Pomposa che è però di dubbia datazione<sup>120</sup>. Sembra infatti che questa tecnica fosse utilizzata solo da carpentieri navali alto adriatici ed illirici, come testimoniano i diversi ritrovamenti in quest’area<sup>121</sup>.

<sup>116</sup> C. Beltrame, *Archeologia marittima del Mediterraneo. Navi, merci e porti dall’antichità all’età moderna*, Carocci editore, 2012, p.; Marlier, *Arles-Rhone 3* cit., p. 81; E. Rieth, M. Guyon, *Les épaves Gallo-Romaines*, «Archeonautica» 16, CNRS Editions, Paris, 2010, pp. 41-42.

<sup>117</sup> Plinio il Vecchio, *Nat. Hist.*, XXIV, 40.

<sup>118</sup> Boetto G., Uhač M., Koncani Uhač I., *The sewn boat of Zambratija (XII-X century BCE, Istria, Croatia)*. 2° Convegno nazionale Cultura navale e marittima, Genova, Italy, 2016; KoncaniUhač I., Boetto G., Uhač M. (ed.) 2017, *Zambratija – Prapovijesnusivanibrod / Prehistoricsewn boat / Una barca cucita preistorica / Un bateaucousuprèhistorique*. Catalogue of the exhibition, Pula.

<sup>119</sup> A. Gaspari, *A cargo ship of Mediterranean sewn construction from Lipe and its place in research into continental shipbuilding in the Roman period*, in P. Turk, J. Istenic, T. Knific, T. Nabergoj (eds), *The Ljubljana – A river and its past*, Ljubljana, 2009.

<sup>120</sup> C. Beltrame, *Imbarcazioni lungo il litorale alto-adriatico occidentale, in età romana. Sistema idroviario, tecniche costruttive e tipi navali*, in *Strutture portuali e rotte marittime nell’Adriatico di età romana, Centro di Antichità alto-adriatiche*, Casa Bertoli Aquileia, Trieste-Roma, 2001, p. 441; Capulli et al. 2014, p. 215.

<sup>121</sup> Beltrame, *Imbarcazioni lungo* cit.; C. Beltrame, *Le sutiles naves romane lungo il litorale alto Adriatico. Nuove testimonianze e considerazioni tecnologiche*, «Archeologia subacquea, studi, ricerche e documenti» 3, 2002, pp. 353-79; Berti, *Fortuna Mariscit*; M. Bonino, *Tecniche costruttive navali insolite nei reperti di Cervia, Pomposa e Pontelagoscuro*, in Atti del Convegno Internazionale di Studi sulle Antichità di Classe, Ravenna, 1968, pp. 209-217; M. Bonino, *Sewnboats in Italy: sutilesnaves and barche cucite*, in S. McGrail, E. Kentley, a cura di, *Sewnplank boats*, Oxford, 1985, pp. 87-104.; Z. Brusic e M. Domjan, *Liburnian boats – their construction and form*, in S. McGrail, E. Kentley, a cura di, *Sewn plank boats*, Oxford, 1985, pp. 67-85; F. Castro e M. Capulli, *A Preliminary*

Nelle imbarcazioni cucite, il fasciame viene assemblato con corde passanti attraverso fori ricavati lungo i bordi delle tavole; le cime di cucitura trattengono i cordoli di calafataggio in fibra vegetale che, posizionati internamente allo scafo, assicurano la tenuta stagna dell'imbarcazione<sup>122</sup>. La modalità di intreccio delle cime può variare a seconda delle imbarcazioni, ma alcune caratteristiche sono comuni in tutti gli scafi dell'area alto adriatica: il cordolo è impostato internamente all'imbarcazione, le caviglie coniche che bloccano la cucitura hanno un'inclinazione diagonale a stringere verso l'esterno dove la cucitura è alloggiata in un incavo che protegge la cima dall'usura e riduce l'attrito dell'opera viva (fig. 3.1-30)

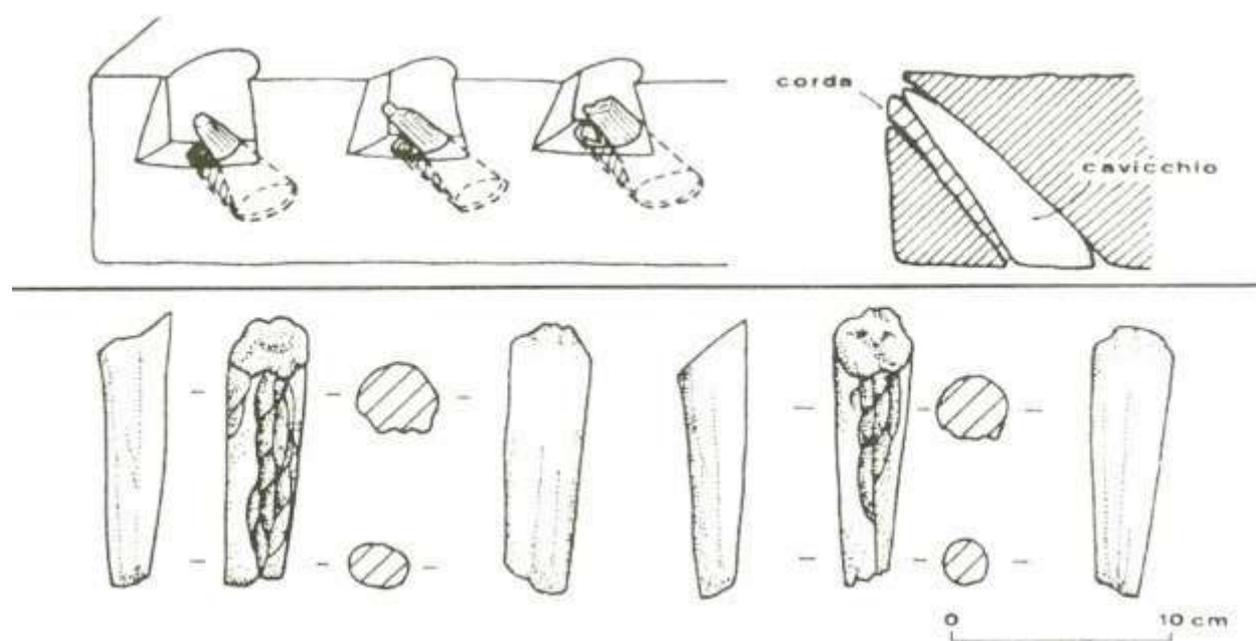


Fig. 3.1-30. Disegni della tecnica costruttiva “a cucitura” e delle caviglie della barca cucita del Lido di Venezia. (Disegno di G. Boetto, da Beltrame 1996, p. 40)

Nella barca di Santa Maria in Padovetere, i fori, dal diametro di 2 cm, sono distanziati a intervalli di 5-8 cm e scorrono a 2 cm dal profilo interno della tavola e a filo nella parte esterna, come si è potuto osservare nelle porzioni di tavole del fianco sinistro collassate (fig. 3.1-31). Lo schema di cucitura consiste in una X con doppio passaggio trasversale XIXIXIXIX (fig. 3.1-32) ed è simile a quello dello scafo di Valle Ponti, del I secolo

*report of recording the Stella 1 Roman River Barge, Italy*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 45/1, 2016, pp. 29-41.; Gaspari, *A cargo ship* cit.

<sup>122</sup> Beltrame, *Le sutiles naves* cit., p. 353.

a.C., rinvenuto alla fine degli anni Ottanta vicino a Comacchio, a meno del numero di corde trasversali che nel caso di Valle Ponti erano quattro<sup>123</sup>. Anche l'intreccio della corda è della stessa tipologia<sup>124</sup>: la treccia a tre trefoli risulta essere più morbida e omogenea nella piegatura e allo stesso tempo è più piatta rispetto ad una corda tonda a più trefoli (fig. 3.1-33).



Fig. 3.1- 31. Le tavole del fianco collassate che hanno permesso di studiare la cucitura sul lato esterno.

<sup>123</sup> Berti, *Fortuna Maris* cit., p. 30 e fig. 4.

<sup>124</sup> L. Castelletti, A. Maspero, S. Motella, M. Rottoli, *Le corde e gli intrecci di fibra vegetale*, in F. Berti (ed.), *Fortuna Maris. La nave romana di Comacchio*, Firenze, Nuova alfa, 1990, p. 155.

Lo scafo è orientato in senso est-ovest, allineato con la riva dell'antico alveo del fiume *Padus* su cui giace con il fondo inclinato di 40° rispetto la verticale. Il limite sinistro del fondo della zona di prua è stata rinvenuta ad una quota di - 1,70 m s.l.m. ed mentre la parte più bassa è formata principalmente dal fianco destro e dalla poppa e giace, a - 4 m s.l.m., sotto il livello della falda acquifera, conservandosi quindi in condizioni eccellenti.

La lunghezza totale dello scafo preservato è di 20 m, il fondo misura 17 m x 2.90 m e la porzione del fianco misura in altezza 1.45 m a centro barca e 2.15 m nella parte in prossimità della poppa.

Gli elementi rinvenuti consistono in: 9 tavole cucite del fondo, l'asta di poppa e due elementi lignei probabilmente appartenenti alla timoneria, 5 tavole cucite del fianco destro, 3 tavole sovrapposte del fianco destro, una delle quali è divisa in due tavole connesse tra di loro a mortasa e tenone, una porzione di tavola cucita del fianco sinistro ancora connessa con il fondo, 3 porzioni di tavole cucite del fianco sinistro e una porzione di tavola sovrapposta del fianco sinistro, il dormiente del fianco destro, una tavola del fasciame interno o paiolato, 24 coppie di ordinate e 5 staminali (fig. 3.1-34 e tav. 3.1-2<sup>125</sup>).

---

<sup>125</sup> Si veda Tav. 3.1-5 a p. 92.

Le 9 tavole che compongono il fondo hanno uno spessore di 5 cm e una larghezza variabile da 24 a 36 cm, coprono l'intera lunghezza dello scafo e sono tagliate in maniera da conferire al fondo una forma affusolata ad entrambe le estremità.

In prossimità della poppa tra le ordinate M17 ed M19, lungo la tavola del fondo T3, troviamo una cucitura a riparazione di una probabile fessura longitudinale del legno.

I fianchi dritti sono cuciti con le tavole esterne del fondo e presentano, oltre alla cucitura, una chiodatura diradata con 4 chiodi in ferro distanziati ca. 1 m sull'unica parte visibile della prima tavola del fianco sinistro, dove è evidente la smussatura a 45° tra il fianco e il fondo, permettendo una connessione più solida tra le parti e non consentendo che le tavole del fondo o del fianco si deformino singolarmente causando delle fessurazioni.

Nella parte centrale, le tavole del fianco formano un angolo di 130° con il fondo. Il lato destro è composto da 8 tavole: le prime cinque sono assemblate a paro mediante cucitura, mentre le tre tavole superiori sono sovrapposte e inchiodate; una di queste non copre l'intera lunghezza ma parte da circa due terzi dello scafo. Le cinque tavole cucite (T10-T14) hanno una larghezza media di 28 cm e uno spessore di 4,5 cm; l'ultima tavola T14 presenta il bordo superiore più spesso e viene interpretato come un rinforzo per accogliere i chiodi che lo uniscono alla prima tavola sovrapposta. Le tavole T11 e T13 non raggiungono l'estremità di prua ma terminano affusolate circa a un terzo e a metà dello scafo, per seguirne le linee d'acqua.

Le prime due tavole sovrapposte, T15 e T16, sono larghe 24 cm e spesse circa 6 cm; nella porzione di poppa, alla tavola T16 è accoppiata tramite la tecnica a mortasa e tenone una tavola triangolare a raggiungere una larghezza di 70 cm, per rialzare la zona terminale dello scafo. I 6 tenoni sono privi di caviglie e sono disposti lungo la tavola con un passo irregolare<sup>126</sup>. Ad ulteriore rialzo, a 6 m dalla poppa viene aggiunta una terza tavola sovrapposta di forma triangolare allungata. Queste tre tavole sovrapposte vengono inchiodate con radi chiodi in ferro; l'impiego di questa tecnica di assemblaggio delle tavole lascia supporre che queste non avessero una funzione strutturale e che non

---

<sup>126</sup> Misurando da poppa abbiamo 12 cm tra la 1° e la 2° mortasa, 38 cm tra la 2° e la 3°, 42 cm tra la 3° e la 4°, 42 cm tra la 4° e la 5°, 65 cm tra la 5° e la 6°.

andassero mai sotto il livello dell'acqua, ma che fossero utilizzate verosimilmente come protezione del fianco durante gli ormeggi necessitando di essere spesso sostituite.

Lo spessore delle tavole diminuisce in maniera regolare verso poppa, fino a raggiungere lo spessore della battura di 1,2 cm. Negli ultimi due metri verso poppa, la sovrapposizione delle tavole diminuisce gradualmente fino a sparire nella connessione con l'asta, dove le tavole si accostano *a paro*; per realizzare questo accorgimento, la tavola sottostante presenta infatti una calettatura degradante lungo la superficie di contatto tra le tavole (fig. 3.1-35).

All'estremità di poppa, la prima tavola sovrapposta T15 ha tre incavi di 4 cm, 7 cm e 10 cm di larghezza e 3 cm di profondità, due rettangolari e uno trapezoidale, ricavati nel bordo superiore, che servivano a sostenere i bagli trasversali della coperta.



Fig. 3.1-35. Zona di poppa dello scafo in cui si nota sulla destra la calettatura degradante dello spessore della tavola sovrapposta.

La zona di poppa è collassata sul fianco destro (fig. 3.1-41), conservandosi nello strato di argilla che ha consentito di preservare l'intera lunghezza dell'asta, misurando 3,60 m e formando un angolo di  $140^\circ$  rispetto al fondo. L'asta, che ha uno spessore costante di 14 cm e un profilo variabile da 17 cm a 15 cm nella parte superiore, si curva e continua esternamente per ca.40 cm lungo la tavola centrale del fondo, a cui è fissato con tre chiodi di ferro. L'intera lunghezza dell'asta è percorsa da una battura spessa 2-3 cm, in cui sono alloggiati e inchiodati le tavole. Inoltre, all'estremità inferiore dell'asta, si preservano alcuni fori distanziati a intervalli di ca. 10 cm, funzionali alla cucitura delle prime due tavole di fasciame del fianco, di cui non si conservano le cime. La parte superiore dell'asta presenta, lungo l'asse dello scafo, un foro passante rettangolare dentro cui si trova un legno fratturato di 60 cm con un diametro di 3 cm. Un elemento di legno a forma di L, inclinato e non più in posizione, è inchiodato al fianco sinistro a 15 cm dall'asta; in base alla forma trapezoidale e alla presenza di due chiodi sui lati inclinati – uno ancora in connessione con il fianco– fa supporre verosimilmente che questo elemento fosse un baglio di rinforzo della poppa, sollecitato in maniera evidente dal timone, al quale la forma a L di questo potrebbe essere connessa (fig. 3.1-36 e fig. 3.1-37).



Fig. 3.1-36. Zona di poppa dello scafo.

Le ordinate, sono costituite da coppie alternate e simmetriche di elementi lignei unici a forma di L ricavati da rami naturalmente curvi e sono connesse allo scafo e tra di loro attraverso caviglie lignee cilindriche verticali e orizzontali del diametro di 2 cm, diversamente da altri casi, come il relitto di Comacchio Valle Ponti, in cui le ordinate sono cucite al fondo<sup>127</sup>. Le ordinate accoppiate hanno una sezione rettangolare di circa 12 cm di larghezza (6 cm per ogni elemento), 16-22 cm di altezza e hanno un interasse di ca. 60-80 cm. Sulla faccia a contatto con le tavole del fondo e del fianco, in corrispondenza dei rotoli di calafataggio, sono presenti degli archetti intagliati di 10 cm di larghezza e 3-4 cm di altezza; lungo la faccia a contatto con il fondo, sono inoltre presenti i fori di biscia rettangolari di 7 cm di larghezza e 2 cm di altezza, situati al centro di ogni tavola al fine di evitare il ristagno dell'acqua in punti inaccessibili e favorirne lo scorrimento, al fine di facilitare lo svuotamento della barca (fig. 3.1-38).

In alcuni casi, le ordinate non coprono l'intera altezza del fianco e necessitano di un elemento aggiuntivo, denominato staminale, che viene fissato mediante un chiodo passante in ferro lungo la giuntura diagonale tra i due elementi. Gli staminali misurano in media 15 cm di altezza e hanno lo stesso spessore delle ordinate.

---

<sup>127</sup> F. Berti, *La nave di Valle Ponti*, 2017, in D. Gandolfi, a cura di, *Archeologia subacquea. Storia, organizzazione, tecnica e ricerche*. Scuola Interdisciplinare delle Metodologie Archeologiche – 3, p. 209.

Lungo il fianco è stato inchiodato alle ordinate, da M4 a M18, un dormiente largo 14 cm e spesso 6 cm, molto simile a quello trovato nella barca di Valle Ponti<sup>128</sup>; nel lato superiore sono state create sette piccole riseghe rettangolari probabilmente atte ad alloggiare i bagli (*transtra*) a sostegno del ponte, che purtroppo non si sono conservati. Sei di esse misurano circa 10 cm di larghezza e 4 cm di profondità, il primo all'estremità di prua misura 40 cm di lunghezza, mentre la parte terminale di poppa presenta uno scanso a forma di L, con due fori di 2 cm di diametro posizionati a 5 cm e 40 cm dalla fine testa della tavola.

Sopra le ordinate, sul fondo, rimane in posizione e inchiodata all'ordinata M9 una tavola di fasciame interno del pagliolato lunga 10 m, spessa 4,5 cm e larga 30, che presenta delle riseghe rettangolari lungo il bordo per adattarsi e rinforzare le porzioni verticali delle ordinate. La superficie visibile mostra molti segni di lavorazione con l'ascia e nella zona centrale, tra le ordinate M12 e M13, sono stati realizzati tre fori quadrangolari, due dei quali misurano ca. 7 cm di lato e uno 4 cm, che delimitano una lavorazione ad arco del bordo interno della tavola. Nella sentina in corrispondenza di questi elementi, tra le tavole T2 e T8, non si trovano né i fori di cucitura né il cordolo di calafataggio e non è stato possibile individuare la tipologia di connessione impiegata in questo punto siccome bisognerebbe smontare lo scafo e mettere in luce lo spessore delle tavole. Potrebbe essere verosimile l'impiego di mortase e tenoni non incavigliati che non possono essere individuati dall'esterno. Tra le tavole T8 e T9, sono invece visibili le caviglie dei fori della cucitura e, in corrispondenza delle ordinate, il rotolo tagliato, segno che in origine le due tavole erano cucite (fig. 3.1-39).

Una situazione simile è stata riscontrata nella nave cucita di Valle Ponti, dove manca il calafataggio nella sentina centrale e la tavola del pagliolato è lavorata con la stessa curvatura<sup>129</sup>. È interessante notare come questa caratteristica insolita sia stata utilizzata in due barche forse realizzate nella stessa zona ma a distanza di quasi cinque secoli. La proposta di Bonino<sup>130</sup> che questa fosse la posizione di un'alberatura è plausibile, ma non giustificherebbe l'assenza di cuciture tra il fasciame che creerebbe un'area critica di

---

<sup>128</sup> Berti, *Fortuna Maris* cit., p. 31.

<sup>129</sup> *Ibidem*, p. 31.

<sup>130</sup> *Ibidem*, p. 38.

infiltrazione di acqua nello scafo. Un'interpretazione suggerita dal professor Beltrame è che questa fosse la posizione di una pompa di sentina e che l'assenza dei rotoli di calafataggio avrebbe permesso il libero flusso di acqua in questa parte centrale dello scafo. Il relitto Port-Vendres A<sup>131</sup> dimostra come questa lavorazione della tavola fosse tipica per il montaggio della pompa di sentina nelle navi marittime del periodo imperiale.

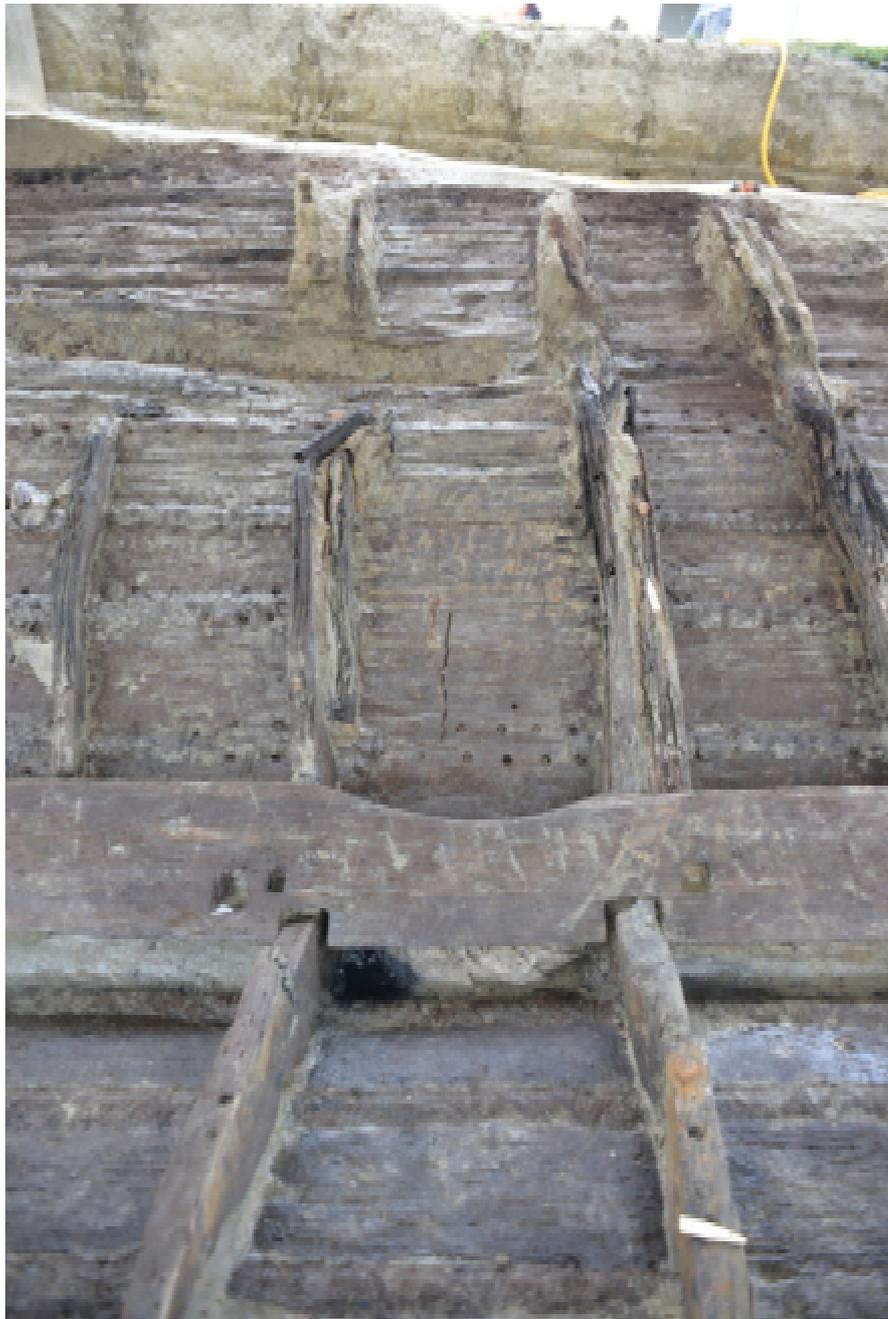


Fig. 3.1-39. Parte centrale dello scafo con lavorazione curva del paiolato e assenza di cuciture nel fondo.

<sup>131</sup> Chevalier Y. E Santamaria C., *L'épave de l'Anse Gerbal à Port-Vendres*, «Extrait de la revue d'Etudes Ligures 1-3», 1971, p. 27.

Da un punto di vista tecnologico, l'uso nella stessa barca di tre differenti metodi costruttivi per la connessione delle tavole – cucitura, mortase e tenoni e chiodatura di tavole sovrapposte – dimostra come i cantieri navali dell'epoca tardo-antica situati lungo l'Alto Adriatico fossero a conoscenza di ogni soluzione tecnica disponibile. Si riscontra un forte conservatorismo nell'uso delle tecniche a cucitura e a mortasa e tenone, usate nel Mediterraneo, unito all'impiego di tecniche più comunemente usate nell'Europa centrale<sup>132</sup>. È evidente come ogni aspetto costruttivo venisse affrontato con la tecnica ritenuta più adeguata: la cucitura, ad esempio, garantiva maggior velocità di esecuzione rispetto la tecnica a mortasa e tenone, mentre l'utilizzo di tavole sovrapposte e inchiodate ne facilitava la rimozione in caso di sostituzione. In un testo di Cassiodoro<sup>133</sup>, si parla delle imbarcazioni che, trainate lungo i fiumi, erano soggette a frequenti urti; nonostante l'autore scriva che queste non subivano danni, al tempo stesso, è presumibile che le tavole sovrapposte fossero realizzate per protezione dagli urti contro il rivale del fiume ai danni dei quali si poteva ovviare facilmente con la sostituzione della tavola. Verosimilmente, il commercio di beni tra l'Europa centrale e la Pianura Padana testimoniato da una cospicua evidenza archeologica per il periodo tardo-antico, ha facilitato la condivisione delle conoscenze sulla costruzione navale<sup>134</sup>.

---

<sup>132</sup> Cfr. *infra*, cap. 4.1.2, i confronti effettuati con altri relitti, sulla base delle forme e delle tecniche costruttive.

<sup>133</sup> Cassiodoro, *Variarum Libri XII*, XII, 24: *...carinae vestrae flatus asperos non pavesunt: terram cum summa felicitate contingunt et perire nesciunt, quae frequenter inpingunt...*

<sup>134</sup> R. Bockius, *Technological transfer from the Mediterranean to the Northern provinces*, in E. Kiriati e C. Knappett, a cura di, *Human Mobility and Technological Transfer in the Prehistoric Mediterranean*, British School at Athens Studies in Greek Antiquity, Cambridge University Press, 2016.

In epoca romana, il paesaggio dell'area padana era caratterizzato da foreste di Quercia, Pino marittimo, Olmo, Frassino, Salice, Tiglio e Pioppo e da una scarsa antropizzazione lungo il *Padus* e la Fossa Augusta<sup>135</sup>. L'analisi del legno della barca di Santa Maria in Padovetere, effettuata da Alessandra Forti e Stephanie Wicha, ha indicato l'uso preponderante di Quercia (*Quercus sp.*) e di Olmo (*Ulmus*). La *Quercus sp.* viene impiegata per il fasciame del fianco, per metà delle ordinate, per il dormiente, per l'asta di poppa, per il perno lungo l'asta e per le caviglie che uniscono le ordinate al fasciame, l'*Ulmus* per il fasciame del fondo, per le ordinate restanti, per l'elemento a forma di L della poppa e per l'ultima tavola sovrapposta del fianco. Il Bosso (*Buxus*) è stato utilizzato per almeno una caviglia utilizzata per fissare la cucitura nei fori e il Leccio (*Quercus ilex*) per almeno una caviglia verticale impiegata per unire le ordinate allo scafo (tav. 3.1-4). L'uso dell'Olmo e della Quercia viene considerato una pratica tipica nella costruzione di navi cucite del periodo romano nell'Italia settentrionale<sup>136</sup>; questi alberi erano ampiamente diffusi nel Delta del Po e nel nord Italia in generale e le loro proprietà fisiche li rendono adatti alla costruzione navale. L'unica scelta insolita a causa della durezza di questo legno riguarda l'uso del Bosso per le caviglie che bloccano la cucitura; in altri relitti, come il Lido di Venezia 1 e il Lido di Venezia 2, vengono impiegati legni teneri, in particolare il Tiglio (*Tilia*), ritenuti più adatti in quanto gonfiandosi a contatto con l'acqua, migliorano le prestazioni tecniche del cuneo<sup>137</sup>.

---

<sup>135</sup> D. Pupillo, *Economia, produzioni e commerci nel Delta di età romana*, in Genti del delta da Spina a Comacchio. Uomini, territorio e culto dall'antichità all'alto Medioevo, Ferrara, 2007, pp. 214-15.

<sup>136</sup> C. Beltrame, D. Gaddi, *Lo studio ricostruttivo della nave romana di Grado*, «L'archeologo subacqueo», XIV, 3, 2013; Berti, *La nave cit.*, p. 208.

<sup>137</sup> Beltrame, *Le sutiles naves cit.*, pp. 357-368.

## 3.2

### Il rilievo della barca di Ercolano



Fig. 3.2- 1. La barca di Ercolano all'interno della sala espositiva del Parco Archeologico.

Il secondo caso studio preso in considerazione riguarda la barca di Ercolano. Nei mesi successivi alla chiusura del cantiere di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, è stata effettuata una richiesta formale per la documentazione tramite tecniche digitali della barca di Ercolano alla Soprintendenza Speciale per Pompei, Ercolano e Stabia nella persona del Soprintendente Massimo Osanna, e successivamente, dopo la recente riforma, al Parco Archeologico Ercolano, nella persona del Direttore *ad interim* Filippo M. Gambari. Nel dicembre del 2016 ci è stato possibile accedere al padiglione del museo degli scavi archeologici chiuso al pubblico dove è conservata l'imbarcazione e organizzare una breve missione di rilievo della barca (Fig. 3.2-1).

La città di Ercolano venne distrutta dalla famosa eruzione del Vesuvio il 24 Agosto del 79 d.C., seppellita da diversi strati di colate piroclastiche che permisero la perfetta conservazione della città fino a giorni nostri. In particolare, lo straordinario stato di conservazione dei legni e dei materiali organici è dovuto al repentino seppellimento

all'interno della coltre di ceneri bollenti che ha causato la carbonizzazione del legno, senza causarne però la totale distruzione per l'assenza di ossigeno e quindi l'assenza delle fiamme<sup>138</sup>. Lo scavo sistematico della città avviene a partire dal 1927, sotto la direzione di Amedeo Maiuri<sup>139</sup>, grazie al quale è stata restituita alla comunità gran parte della città. Negli anni Ottanta, un'intuizione dell'allora Direttore degli Scavi di Ercolano Giuseppe Maggi<sup>140</sup> portò ad un approfondimento degli scavi archeologici nell'area dell'*insula* nord-occidentale, nel settore delle Terme Suburbane; vennero così individuati la sabbia vulcanica dell'antica spiaggia e gli ex fornicci delle terme dove vennero rinvenuti circa 300 corpi di Ercolanensi, a conferma del pensiero di Maggi di come gli abitanti della città, allo stesso modo dei Pompeiani, non fossero riusciti a fuggire e a dimostrazione della posizione del litorale davanti all'area urbana<sup>141</sup>. I fuggiaschi furono sorpresi nel cuore della notte dall'arrivo della prima nube ardente che, con una temperatura di oltre 400° e una velocità di 80 km/h, raggiunse la città e provocò la morte istantanea per shock termico di tutti gli abitanti. L'arrivo delle ondate di fango vulcanico dal Vesuvio ricoprì poi i resti dei loro corpi, sigillandoli nella posizione in cui si trovavano al momento della morte<sup>142</sup> (Fig. 3.2-2).



Fig. 3.2- 2. Pianta degli scavi dell'area del litorale della città di Ercolano.

<sup>138</sup> De Carolis, *I legni carbonizzati di Ercolano: storia delle scoperte e problematiche conservative*, «Archeologia uomo territorio», 17, 1998, pp. 44.

<sup>139</sup> Amedeo Maiuri, *I nuovi scavi di Ercolano*, I-II, Roma, 1958.

<sup>140</sup> G. Maggi, *Ercolano. Fine di una città*, cit.

<sup>141</sup> D. Camardo, S. Court, M. Guidobaldi, M. Notomista, *Ercolano e il mare*, «Archeo», 345, 2014, pp. 71.

<sup>142</sup> *Ibidem*, p. 72.

All'interno di questi spazi sono stati rinvenuti inoltre numerosi oggetti legati alle attività marinare ed elementi di imbarcazioni già smontate in antico che attestano come questa zona fosse stata riadibita alla manutenzione delle barche e al ricovero delle attrezzature da pesca. A questo ambito si riconnettono il rinvenimento di un dritto di prora a forma di testa di serpente dipinto in rosso, di un timone, di sei remi e di un accumulatore di fasciame pronto per l'utilizzo. Collegato al mare e all'attività marinare sono inoltre un argano verticale, una cima avvolta, numerosi strati di cuoio, una rete da pesca, un accumulatore di pesi da rete in piombo e un cestino di vimini chiuso da un coperchio che all'esame radiografico ha rivelato la presenza di un lungo cordino al quale sono collegati degli ami. Questi ultimi, di diverse dimensioni, attestano un'intensa attività di pesca dovuta alla vicinanza della città al mare.

A pochi metri da questi edifici, su quella che era la spiaggia della città, nel 1982 venne rinvenuta al di sotto di 23 m di depositi vulcanici un'imbarcazione capovolta di 9 m di lunghezza, con la prua rotta e collassata internamente allo scafo<sup>143</sup>. Sulla base degli studi stratigrafici è apparso come la barca non fosse appoggiata direttamente sulla spiaggia, ma si trovasse ad un livello superiore, nell'unità stratigrafica (U.S.) denominata S-1 relativa alla prima ondata di cenere piroclastica più leggera. La maggior parte dello scafo si trova infatti all'interno dell'unità stratigrafica F-1 relativa al flusso piroclastico più denso che potrebbe averne causato il capovolgimento e la carbonizzazione dei legni; la parte del fondo e della poppa si trovano invece all'interno dell'onda S-2 e del flusso F-2 successivi<sup>144</sup> (Fig. 3.2-3).

---

<sup>143</sup> R. Steffy, *The Erculaneum boat* cit.

<sup>144</sup> H. Sigurdsson, S. Carey, W. Cornell, T. Pescatore, *The eruption of Vesuvius in A.D. 79*, «National Geographic Research», 1/3, 1985, pp. 366-367.

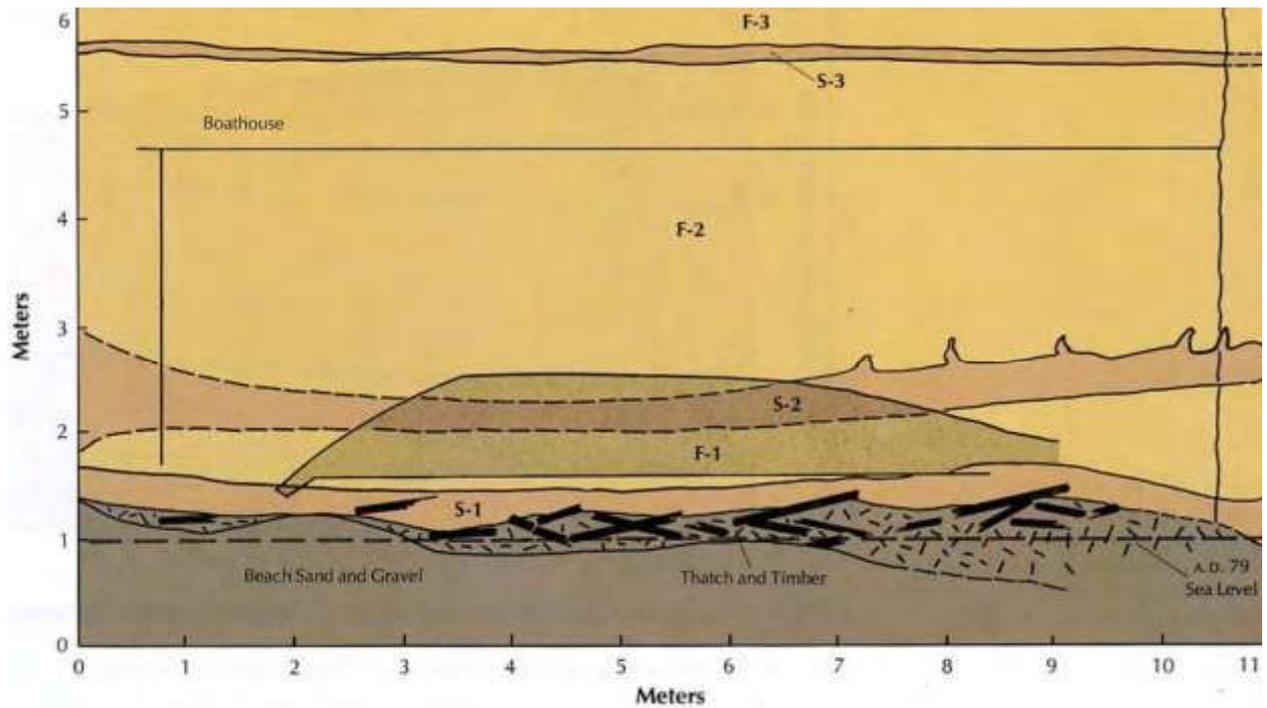


Fig. 3.2- 3. Sezione dello scavo relativa all'imbarcazione (da Sigurdsson et al., *The eruption of Vesuvius* cit., p. 367).

Terminato lo scavo, la consistenza del legno carbonizzato e il mantenimento dello scafo in un ambiente naturalmente umido per la presenza delle falde acquifere hanno garantito l'integrità del legname fino al primo intervento di restauro *in situ* tra il 1983 e il 1987 elaborato dall'Istituto Centrale per il Restauro. In questa fase, venne applicato sul fasciame uno strato di garza e carta di riso mediante Paraloid B72 sciolto in acetone per bloccare fenomeni di distacco e fessurazioni legati allo stato di conservazione del reperto e al ritiro del legno carbonizzato; creato lo strato di isolamento con la carta di riso, lo scafo venne poi rivestito da uno strato di gomma siliconica e contenuto in due gusci di vetroresina, uno interno ed uno esterno, modellati a forma dello scafo<sup>145</sup>. Nel 1990 la barca venne trainata lungo delle profonde rampe che permettevano di raggiungere la parte bassa dello scavo alla profondità di 23 m (Fig. 3.2-4).

<sup>145</sup> De Carolis, *I legni carbonizzati* cit., pp. 44.

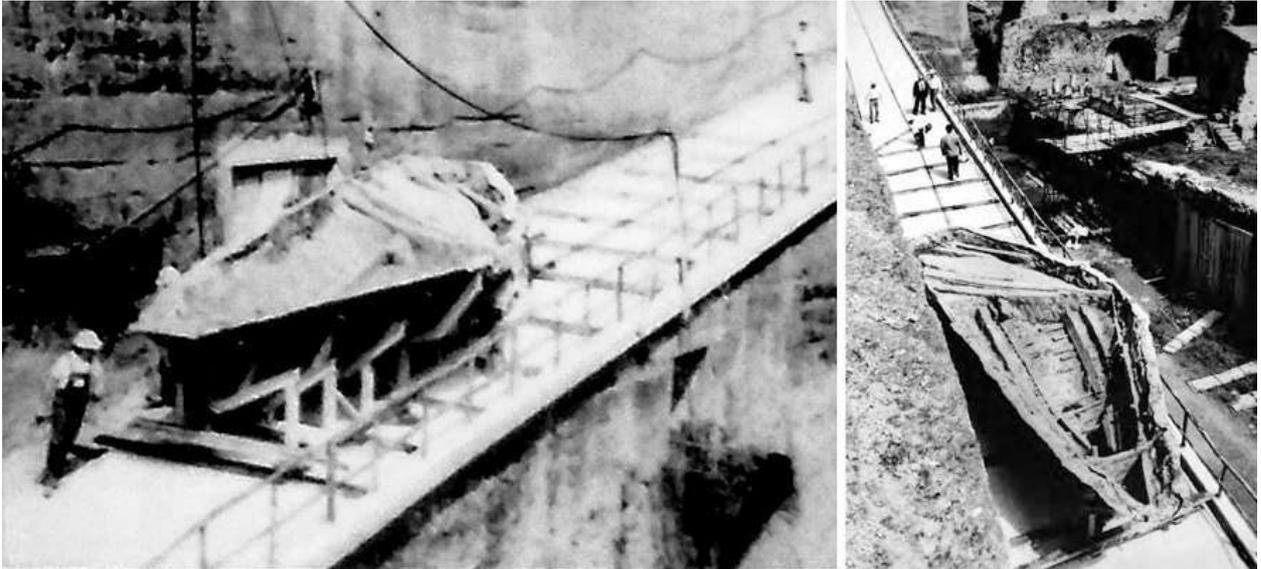


Fig. 3.2- 4. Fasi di recupero dell'imbarcazione attraverso delle rampe, 1990.

Negli anni 2008-2009, lo strato di vetroresina interna venne rimosso insieme al fasciame del fianco ripiegato all'interno della barca ed venne realizzato lo scavo del deposito vulcanico che ancora riempiva parte dello scafo. Terminato questo primo intervento di restauro che permise di mettere in luce l'interno della barca e la parte esterna fino alla cinta esterna, la Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Pompei, Ercolano e Stabia (SAPES), realizzò un padiglione nel sito archeologico della città di Ercolano nel quale esporre la barca e alcuni degli oggetti legati alle attività marinare<sup>146</sup>.

Diverse sono le motivazioni che ci hanno portato a scegliere questa imbarcazione come caso studio. Per prima cosa, la sua fruibilità poiché essendo esposta in un padiglione all'interno degli scavi di Ercolano era facilmente agibile. La possibilità di confrontarci con un'imbarcazione già restaurata, musealizzata e visibile in ogni momento consente di testare approfonditamente le tecniche digitali, permettendo di correggere eventuali errori e di mettere a punto una metodologia di rilievo codificata. Momentaneamente la sala rimane chiusa al pubblico, ma la sua collocazione dà la possibilità a noi archeologi di effettuare studi e ricerche eliminando quelle problematiche legate alle tempistiche che troviamo nei contesti di scavo archeologico. Nel caso della barca di Santa Maria in Padovetere, infatti, i rilievi e la documentazione dovevano essere

<sup>146</sup> Camardo et al., *Ercolano e il mare* cit., p. 74.

svolti in breve tempo per la necessità di riportare l'imbarcazione nella sua condizione di giacitura pre-scavo, in un contesto anaerobico che non consente il deterioramento del legno.

Un secondo motivo è l'assenza di una documentazione tridimensionale realizzata con tecniche moderne quali la fotogrammetria o il laser scanning che permettono di ottenere un modello virtuale oggettivo di alta qualità metrica senza l'interpretazione di un operatore. Nel caso di Ercolano, il legno carbonizzato è particolarmente delicato nonostante il restauro<sup>147</sup> e come tutti i materiali organici richiede costante controllo e monitoraggio delle condizioni ambientali in cui è contenuto. Momentaneamente, a causa della mancanza di una climatizzazione con temperatura e umidità costanti all'interno della stanza museale, il legno versa in cattive condizioni, deteriorandosi e sgretolandosi lentamente (Fig. 3.2-5). La realizzazione di una documentazione con tecniche innovative che realizzino un modello tridimensionale texturizzato assicurano una conservazione almeno virtuale del soggetto e un monitoraggio costante se questi rilievi fossero realizzati regolarmente.



Fig. 3.2- 5. Particolare dell'imbarcazione in cui si notano le condizioni sofferenti del legno.

<sup>147</sup> Steffy, *The Herculaneum boat* cit., p. 7.

Al momento esistono solo un disegno e un modello ricostruttivo dell'imbarcazione (Fig. 3.2-6), realizzati in maniera semplicistica e in alcuni punti non veritieri, non corrispondendo in maniera puntuale né all'oggetto reale né all'affresco da cui si potevano estrarre informazioni per le forme costruttive di prua e poppa. Evidente è l'importanza della realizzazione di un rilievo tridimensionale fotogrammetrico o laser scanning, sulla base del quale poter ricostruire puntualmente l'imbarcazione.



Fig. 3.2- 6. Disegno e modello virtuale dell'imbarcazione di Ercolano.

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. Il modello tridimensionale ottenuto con il rilievo diventa la base per il riassetto virtuale delle parti, utile per gli studiosi ma anche per il pubblico, consentendo di visualizzare lo scafo identificandone le linee originali dell'imbarcazione senza necessariamente avere delle conoscenze pregresse sulla costruzione navale.

Un altro elemento che ci ha fatto propendere per lo studio di questa imbarcazione è legato alle possibilità di impiegare le nuove tecnologie digitali come base per la creazione di installazioni interattive in un contesto museale in cui il materiale presente è molto interessante, l'allestimento è moderno, ma alcune informazioni tecnologiche necessitano di migliorie al fine di alzare la qualità della sala espositiva e del Parco Archeologico stesso.

Come specificato nel capitolo precedente per la barca di Santa Maria in Padovetere, durante lo scavo della quale è stato documentato sia lo scafo che il contesto di

rinvenimento, il rilievo della barca romana di Ercolano include anche il contesto museale in cui è contenuta l'imbarcazione. Il rilievo di questo risulta essere utile per una possibile analisi dello spazio espositivo, per studi inerenti l'allestimento museale, con integrazioni al materiale presente con video e installazioni inerenti la barca e la vita di bordo in età romana, impiegando lo scafo e i reperti presenti nella sala, come i remi, le cime o l'argano.

### 3.2.1

#### Il rilievo fotogrammetrico

La prima scelta sulla metodologia da impiegare per la documentazione della barca di Ercolano è ricaduta sul rilievo fotogrammetrico multi-immagine, essendo la tecnica che maggiormente ci ha soddisfatto nel corso degli anni di ricerca e che si è visto essere ampiamente utilizzata in archeologia navale<sup>148</sup>. Inoltre, la qualità fotografica della texturizzazione è nettamente superiore a quella ottenibile con la tecnica laser scanning; attraverso la fotogrammetria si possono ottenere quindi rilievi corretti e accurati ma al tempo stesso con una qualità grafica che permette molti usi.

Dopo l'esperienza fatta sulla barca di Santa Maria in Padovetere e l'ottenimento di un modello accurato, abbiamo seguito le stesse modalità operative, migliorando la dove erano stati riscontrati i problemi operativi come l'apertura focale dell'obiettivo e di conseguenza la profondità di campo delle immagini.

Seguendo il principio della scala nominale legato al concetto di errore di graficismo spiegato nel precedente capitolo<sup>149</sup> e impiegando la stessa formula della distanza, abbiamo determinato che scattando immagini ad una distanza ravvicinata di ca. 1,5-2 m, con una camera reflex digitale da 6016 x 4000 pixel, si può raggiungere una precisione nettamente inferiore ai 2 mm necessari per la scala 1:10 normalmente impiegata per il rilievo archeologico dei particolari.

Diverse sono state le macchine fotografiche utilizzate per il rilievo dell'imbarcazione e degli oggetti inerenti alle attività marinare presenti all'interno della sala museale e per la documentazione video delle fasi del rilievo<sup>150</sup>.

La camera reflex Nikon 3200 *full frame* con un obiettivo da 18 mm è stata adottata principalmente per i modelli dello scafo e della prua, per i quali sono state scattate rispettivamente 350 e 50 immagini. Delle 350 fotografie dello scafo principale, 85 sono servite per documentare la parte esterna dove il legno è stato pulito dalla vetroresina, 80 per la parte interna dello scafo, realizzate in entrambi i casi seguendo delle strisciate

<sup>148</sup> Vedi nota 106.

<sup>149</sup> Cfr. supra, cap. 2.2.

<sup>150</sup> Una Nikon D3200, una GoProHERO4 Silver e due cellulari Huawei da 10MP per i rilievi fotogrammetrici edue GoPro HERO4 Session per la realizzazione di *time lapse* per la documentazione delle fasi del rilievo.

ortogonali al soggetto con una ricopertura tra le immagini maggiore del 60% (Fig. 3.2-7-8).



Fig. 3.2- 7. Alcune immagini della strisciata fotogrammetrica realizzata con la Nikon D3200.

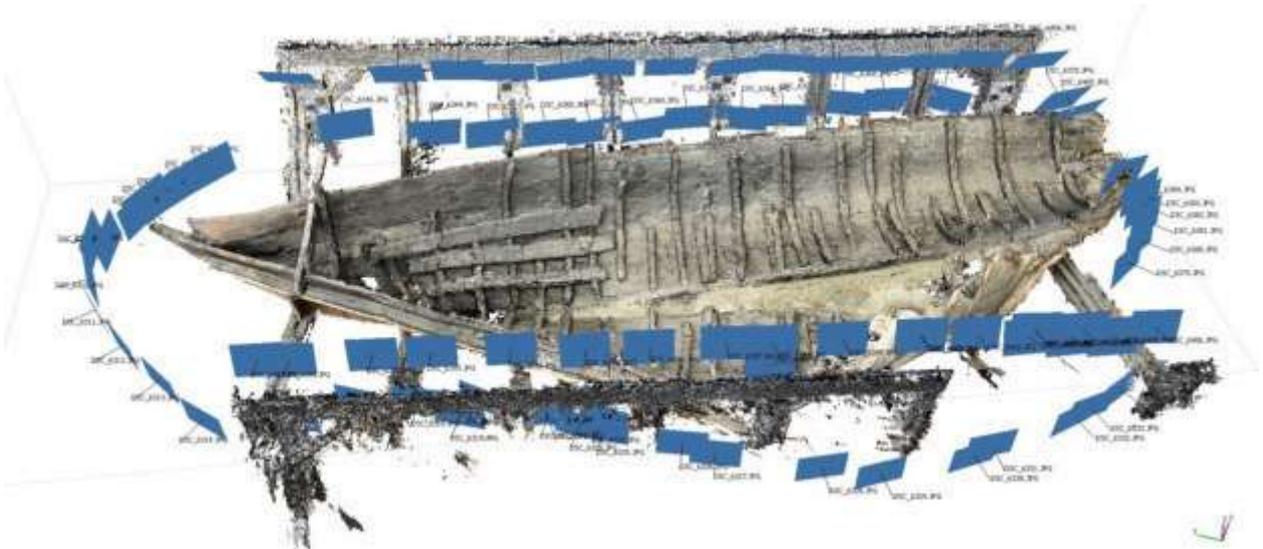


Fig. 3.2- 8. Nuvola di punti con la posizione delle camere nella fase di orientamento relativo.

In aggiunta a queste, sono state realizzate altre due strisciate diagonali rispetto allo scafo (60 immagini per la parte interna e 25 per quella esterna) per meglio rappresentare gli elementi verticali dello scafo, come le ordinate; 100 immagini sono state scattate radialmente attorno agli elementi della timoneria e della poppa, perché sono molto dettagliati e sono importanti dal punto di vista della costruzione navale essendo uno dei pochi esempi giunti fino a noi. Le immagini sono state elaborate all'interno di un progetto del software Agisoft Photoscan al fine di produrre un modello virtuale univoco dal quale è stata ricavata l'ortofoto con una dimensione del pixel di 1 mm. Stessa elaborazione è stata utilizzata per la porzione di prua inserita nella posizione corretta

all'interno dell'ortofoto dello scafo (Tav. 3.2-1). Non si può ancora in questa fase ritenere corretta questa ortofoto come pianta finale dello scafo, perché le due porzioni sono solo state affiancate nella giusta posizione, ma la correttezza metrica e la giusta rotazione delle parti può avvenire solo a fine rielaborazione del modello virtuale e ricostruzione.

Per il rilievo fotogrammetrico della barca, è stata impiegata anche una GoPro HERO4 Silver; la distorsione grandangolare dell'obiettivo permette di comprendere in un'unica immagine tutta la larghezza dello scafo grazie ad una semplice asta telescopica (Fig. 3.2-9). L'utilizzo di queste camere viene ultimamente impiegato soprattutto per le riprese dei siti archeologici da drone poiché sono camere leggere e poco costose. È utile comparare il modello ottenuto con i risultati della fotogrammetria realizzata con la camera reflex e con la nuvola di punti ottenuta con il laser scanner al fine di valutarne la qualità metrica dei rilievi con camere fotografiche amatoriali e studiarne le potenzialità. Solitamente queste camere necessitano di una calibrazione della distorsione della lente realizzata in laboratorio con dei banner a scacchiera, ma con le nuove versioni dei software, tale distorsione viene spesso calcolata in automatico permettendo un uso facile e veloce di queste camere. Il risultato è di qualità metrica e fotografica inferiore rispetto al modello creato attraverso il rilievo fotogrammetrico, poiché le immagini scattate con questa camera hanno una dimensione minore e una distorsione radiale molto evidente. Inoltre, in questo contesto, le immagini sono state scattate seguendo esclusivamente due strisciate parallele, il che non ha permesso di rappresentare in maniera adeguata alcuni elementi di poppa più caratterizzati.



Fig. 3.2- 9. Alcune immagini della strisciata fotogrammetrica realizzata con la GoPro Hero4 Session.

Alcuni degli oggetti pertinenti la navigazione sono posizionati all'interno di teche di vetro, come la decorazione a forma di serpente della prua, l'argano e il timone, non permettendo la documentazione con la fotocamera Nikon a causa dei riflessi sul vetro visibili all'interno dell'obiettivo. La camera GoPro non poteva ugualmente essere impiegata per gli stessi motivi di riflesso sul vetro e la difficoltà di messa a fuoco e per la grande distorsione dell'obiettivo nel momento in cui ci si avvicina al vetro per evitare i riflessi. Si è deciso quindi di testare l'utilizzo di uno Smartphone con una buona fotocamera, nonostante non sia possibile con questi strumenti controllare la qualità metrica del modello ottenuto poiché il software non ne riconosce l'orientamento interno. Ugualmente, appoggiando il telefono sul vetro e rimanendo il più possibile ortogonali all'oggetto è stato possibile effettuare le strisciate fotogrammetriche e ottenere immagini senza riflessi e con una corretta messa a fuoco.

### 3.2.2

#### Il rilievo laser scanning



Fig. 3.2- 10. Fase del rilievo laser scanning.

I rilievi laser scanning sono stati effettuati con il Laser Faro Focus 3D utilizzando differenti risoluzioni a seconda della precisione necessaria per un determinato scopo, in modo da ottenere due nuvole di punti con numerosità diverse (Fig. 3.2-11).

Per la parte relativa alla stanza e agli elementi circostanti l'imbarcazione sono state realizzate 15 scansioni, utilizzando una risoluzione  $\frac{1}{4}$  e una qualità 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 che 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 al caso precedente (20580 x 8534 punti).

In totale sono state effettuate 14 scansioni: 8 da sopra l'impalcatura, 5 a poppa, 1 a prua (Fig. 3.2-12-13).



Fig. 3.2- 11. Scansione realizzata all'ingresso della sala museale.

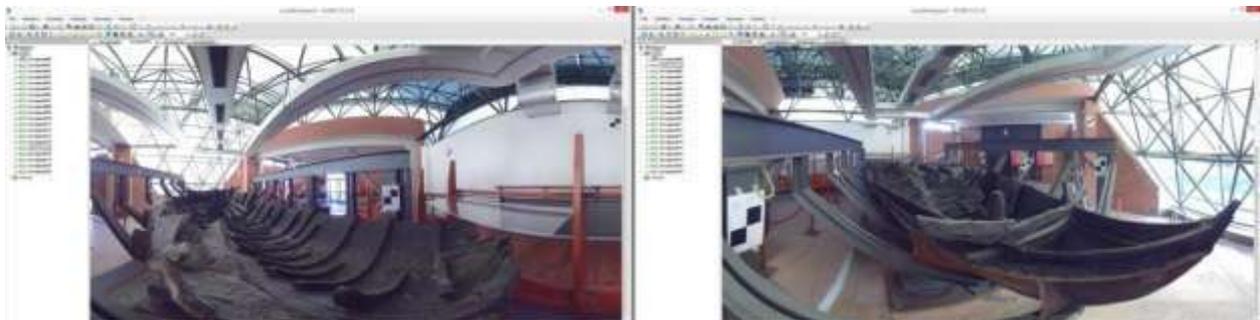


Fig. 3.2- 12. Scansioni a prua e a poppa dell'imbarcazione.

Nel museo e nell'impalcatura sono stati collocati target a scacchiera in modo da permettere l'allineamento delle diverse nuvole di punti all'interno di un sistema di riferimento univoco e creare una nuvola unica; ogni stazione laser è stata posizionata in modo da rilevare da 6 a 16 target, per un totale di 25 (Fig. 3.2-14). Diversamente dal rilievo laser scanning effettuato a Santa Maria in Padovetere in cui i target sono stati rilevati con la stazione totale in modo da avere delle coordinate topografiche note, l'allineamento è stato realizzato 'nuvola su nuvola' mantenendo una scansione fissa come

referimento sulla quale vengono collegate le altre attraverso i target; questi possiedono coordinate topografiche relative alla posizione di ogni scansione nella quale si individua come punto 0,0,0 del sistema di riferimento il centro ottico del laser scanner e come asse z la verticale del laser messo in bolla (Fig. 3.2-15).



Fig. 3.2- 13. Scansione laser in cui sono evidenti i target utilizzati per l'allineamento delle nuvole di punti.

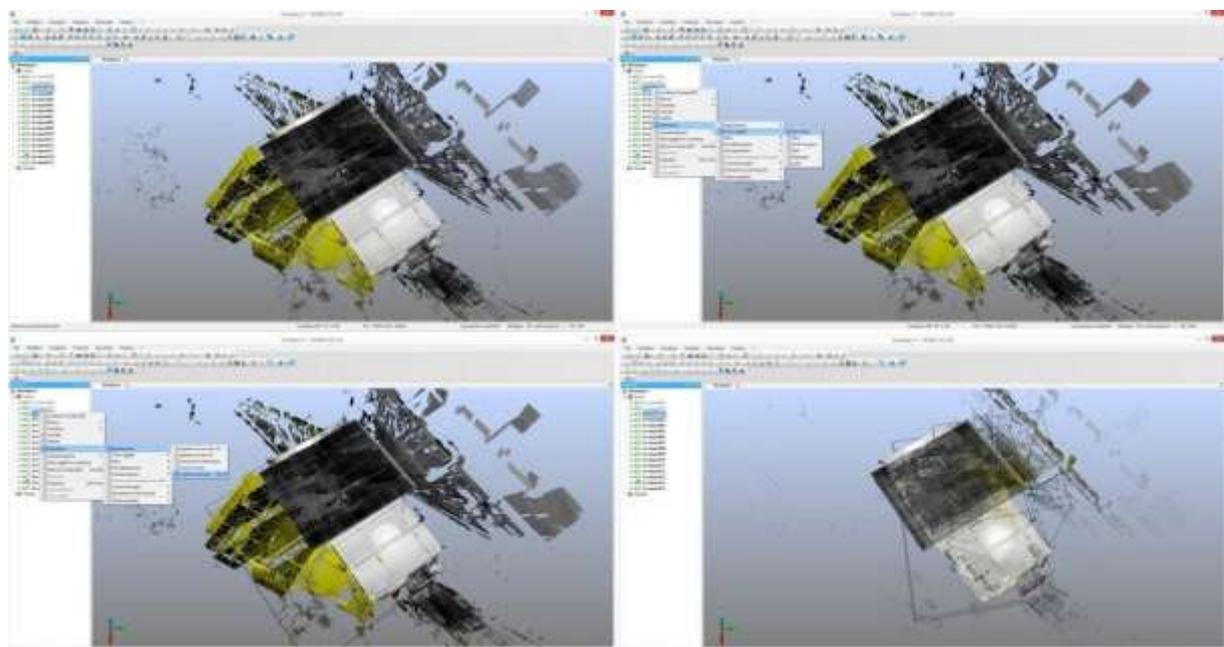


Fig. 3.2- 14. Fasi dell'allineamento realizzato 'nuvola su nuvola'.

## **Appendice: Il confronto tra le nuvole di punti**

### La barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio

Una fase del processo di elaborazione dei dati acquisiti consiste nell'analisi e nello studio della precisione dei rilievi attraverso il confronto delle nuvole di punti e permette di comparare o integrare i risultati ottenuti con le diverse tecniche, al fine valutarne la correttezza e di determinare quale sia la tecnica migliore da utilizzare in un determinato contesto, quali di queste possano o debbano essere integrate e di determinare quale tecnica utilizzare per la ricostruzione del modello virtuale in base alla precisione e all'accuratezza della nuvola ottenuta. La sovrapposizione delle nuvole ottenute tramite il rilievo fotogrammetrico e il laser scanning è stata possibile grazie alla loro georeferenziazione, utilizzando dei *target* del rilievo topografico del 2014 di cui sono note le coordinate locali come sistema di riferimento principale.

La comparazione delle nuvole di punti è stata effettuata con il software *CloudeCompare*, che permette di caricare le due nuvole e impostare i parametri per il confronto; il *range* della scala è stato impostato su 3 cm, con una colorazione variabile dal blu (errore 0 cm) al rosso (errore 3 cm).

Sono stati effettuati tre diversi confronti:

- confronto tra nuvola di punti del 2014 e nuvola di punti del 2015 provenienti dal rilievo fotogrammetrico
- confronto tra nuvola di punti del 2014 e nuvola di punti del 2015 provenienti dal rilievo laser scanning
- confronto tra nuvola di punti proveniente dal rilievo laser scanning e nuvola di punti proveniente dal rilievo fotogrammetrico, entrambe del 2015.

Il risultato è accurato in tutti i tre progetti, con una preponderanza di punti con errori di distanza molto bassi, ottenendo una deviazione standard pari a 3.7 mm, mentre la colorazione rossa è dovuta alla mancanza di dati della campagna di scavo del 2014 su cui non è possibile fare il confronto (fig. 3.A-1).

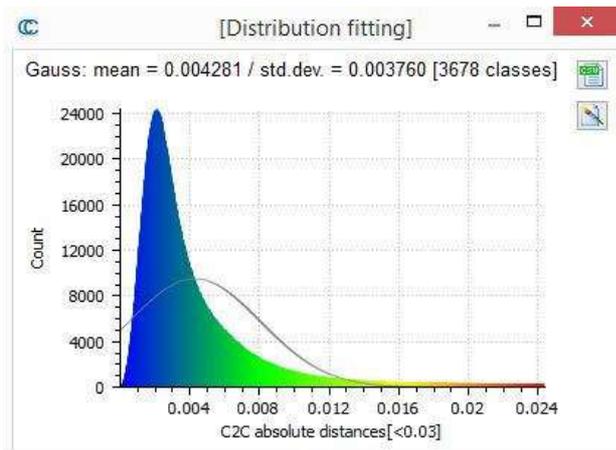


Fig. 3.A-1. Diagramma a campana di Gauss relativo al confronto tra le nuvole 2014 e 2015.

Nel confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo fotogrammetrico, mantenendo come riferimento la nuvola del 2014, l'errore maggiore (circa 10 mm) è visibile in quella porzione di scafo alla quale non si è dedicata particolare attenzione, poiché si trova vicino all'estremità che sarebbe stata indagata maggiormente l'anno successivo (fig. 3.A-2a). Se invece si mantiene come riferimento il rilievo del 2015 e le analisi vengono effettuate sulla nuvola della campagna 2014, si noterà la presenza di punti con errore intorno a 12-15 mm in quella parte di imbarcazione in cui il legno era già molto asciutto e quindi fragile in fase di scavo e che si è deformata maggiormente durante il periodo di pausa tra le due campagne; la presenza di punti di colore rosso, invece, che rappresenta elementi con differenze maggiori di 3 cm, denota una mancanza di dati riguardanti i sostegni di argilla che sono stati scavati prima di effettuare la documentazione del 2015 o porzioni di ordinate che sono collassate (fig. 3.A-2b).

Nel confronto tra i modelli laser scanning, invece, l'errore maggiore (circa 12 mm) si concentra nel fianco dello scafo ed è probabilmente attribuibile ad un problema di orientamento delle due nuvole nello stesso sistema di riferimento o di rifrazione del raggio laser durante il rilievo che produce una nuvola rumorosa (fig. 3.A-3).

Il confronto tra le nuvole di punti provenienti dal rilievo fotogrammetrico e dal rilievo laser scanning si è dimostrato utile per indagare i seguenti aspetti:

- l'analisi dei dati per valutare la qualità metrica e l'accuratezza dei rilievi
- la conferma di una necessaria documentazione giornaliera.

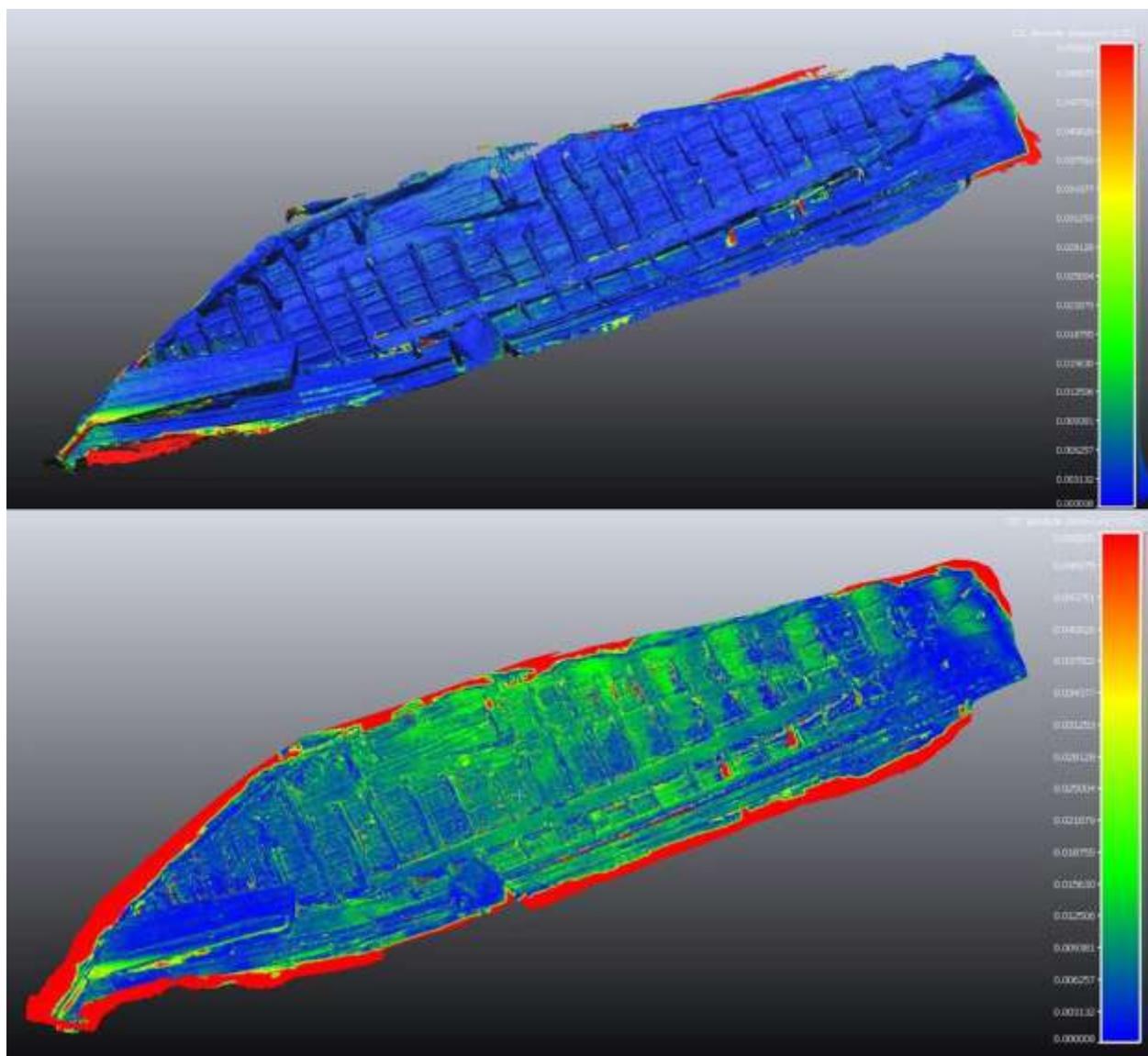


Fig. 3.A-4. Confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo laser scanning e la fotogrammetria.

Il primo confronto (fig. 3.A-4a) è stato realizzato sulla nuvola di punti fotogrammetrica, in riferimento a quella prodotta dal laser scanner, ottenendo come risultato una perfetta coincidenza delle due nuvole, con errori di distanza inferiori ai 3 mm. Nel secondo (fig. 3.A-4b), in cui la nuvola laser viene analizzata in base a quella fotogrammetrica, è evidente una discrepanza di circa 18 mm nella parte centrale dello scafo, attribuibile al rumore del raggio laser che genera un secondo strato non corretto di punti parallelo al primo. Questa differenza può essere dovuta all'errata rifrazione del raggio sul legno o all'allineamento inesatto di una delle scansioni del laser scanner (fig. 3.A-5).

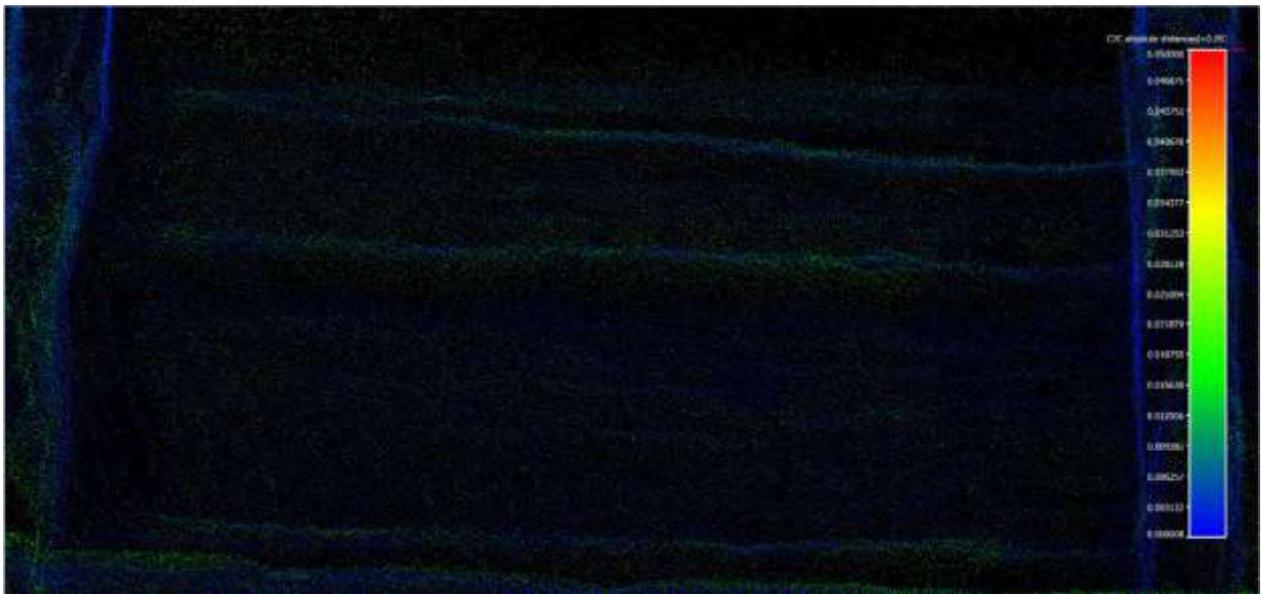


Fig. 3.A-5. Particolare della doppia nuvola di punti del confronto tra le nuvole ottenute con il rilievo laser scanning e quello fotogrammetrico.

Il rilievo fotogrammetrico è stato realizzato immediatamente al termine dello scavo, mentre il rilievo laser scanning è stato svolto due giorni dopo per motivi logistici, non essendo il laser scanner presente in cantiere. In quei giorni, una sezione di terra è crollata a causa di una forte pioggia, danneggiando alcuni elementi lignei dell'asta di poppa dello scafo, rappresentati nel confronto delle nuvole da una colorazione rossa dei punti<sup>151</sup> (fig. 3.A-6).

<sup>151</sup> Tale colorazione è riferibile ad un errore intorno ai 5 cm.

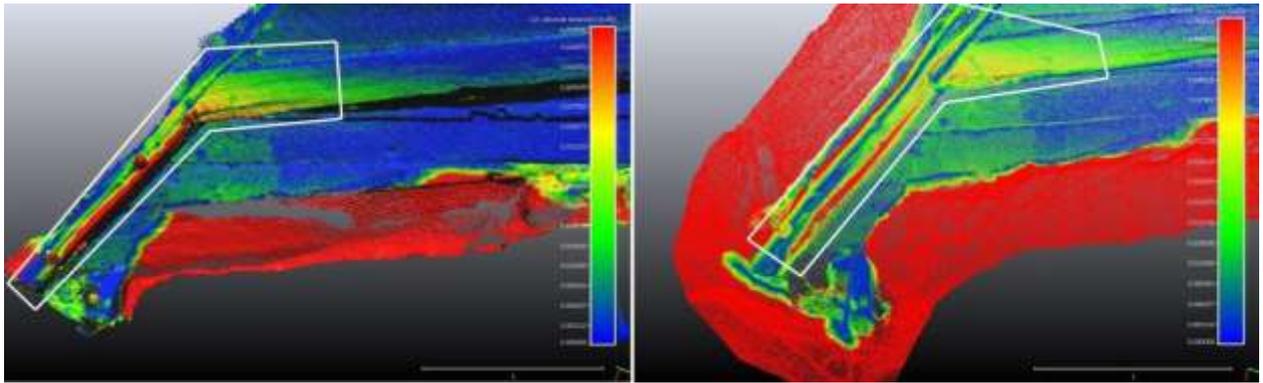


Fig. 3.A-6. Particolare dell'asta di poppa nel confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo laser scanning e la fotogrammetria.

È importante sottolineare che se il rilievo fotogrammetrico non fosse stato eseguito appena terminato lo scavo e avessimo aspettato la presenza in cantiere del laser scanner, il rilievo dell'imbarcazione sarebbe stato realizzato solo dopo la frattura. È necessario tenere presente che lo scavo archeologico è una situazione precaria, in cui imprevisti di varia natura possono modificare e compromettere lo stato di fatto. Tale frangente, supportato dal confronto delle nuvole di punti, mette in luce la necessità di effettuare un rilievo giornaliero al fine di acquisire un modello virtuale utile alla documentazione dell'imbarcazione.

## La barca di Ercolano

Le nuvole di punti prodotte dalle due tecniche di rilievo rappresentano un dato importante dal punto di vista scientifico, sia per la correttezza geometrica con precisioni che possono essere inferiori al centimetro, che per l'analisi e il confronto delle diverse metodologie. Attraverso il software *CloudeCompare* è stato infatti possibile effettuare delle comparazioni tra i due rilievi in modo da valutare la precisione delle due tecniche di rilievo.

La nuvola di punti ottenuta con il laser scanner viene integrata quella fotogrammetrica grazie alla presenza dei target bianchi e neri posizionati precedentemente; la prima contiene un numero di punti inferiore, ma viene usata come riferimento locale poiché si ha la certezza della sua correttezza geometrica e metrica. La procedura comparativa delle nuvole di punti è la stessa utilizzata per il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, in cui i parametri di confronto sono stati impostati secondo un *range* di scala pari a 3 cm, con una colorazione variabile da blu (errore 0 cm) al rosso (errore 3 cm).

Diversamente da Santa Maria in Padovetere, in cui il confronto è stato realizzato anche tra le due nuvole realizzate con la stessa tecnica ma in due anni differenti, sulla barca di Ercolano la comparazione si è svolta esclusivamente tra la nuvola fotogrammetrica e quella laser scanning. Nel caso del confronto realizzato sulla nuvola di punti fotogrammetrica, in riferimento a quella prodotta dal laser scanner, si ottiene come risultato una perfetta coincidenza delle due nuvole, con errori di distanza inferiori ai 2 mm (Fig. 3.A-7). Nel caso della nuvola laser analizzata in base a quella fotogrammetrica, è evidente una discrepanza dai 15 mm ai 30 mm nella parte centrale dello scafo, attribuibile al rumore del raggio laser che genera un secondo strato di punti parallelo al primo (Fig. 3.A-8). Anche in questo contesto si è notato come il confronto risulti essere preciso sulla quasi totalità dello scafo, tranne che in quelle parti dello scafo più difficili da raggiungere dal raggio laser, in cui è presente un doppio strato di punti, solo uno dei quali corrisponde rigorosamente alla nuvola di punti fotogrammetrica. Questa differenza può essere dovuta all'errata rifrazione del raggio sul legno o all'allineamento inesatto di una delle scansioni del laser scanner; considerando però lo stesso errore e lo stesso

sdoppiamento delle nuvole nella zona della sentina difficilmente raggiungibile dal laser è verosimile che l'errore sia dovuto alla rifrazione del raggio.

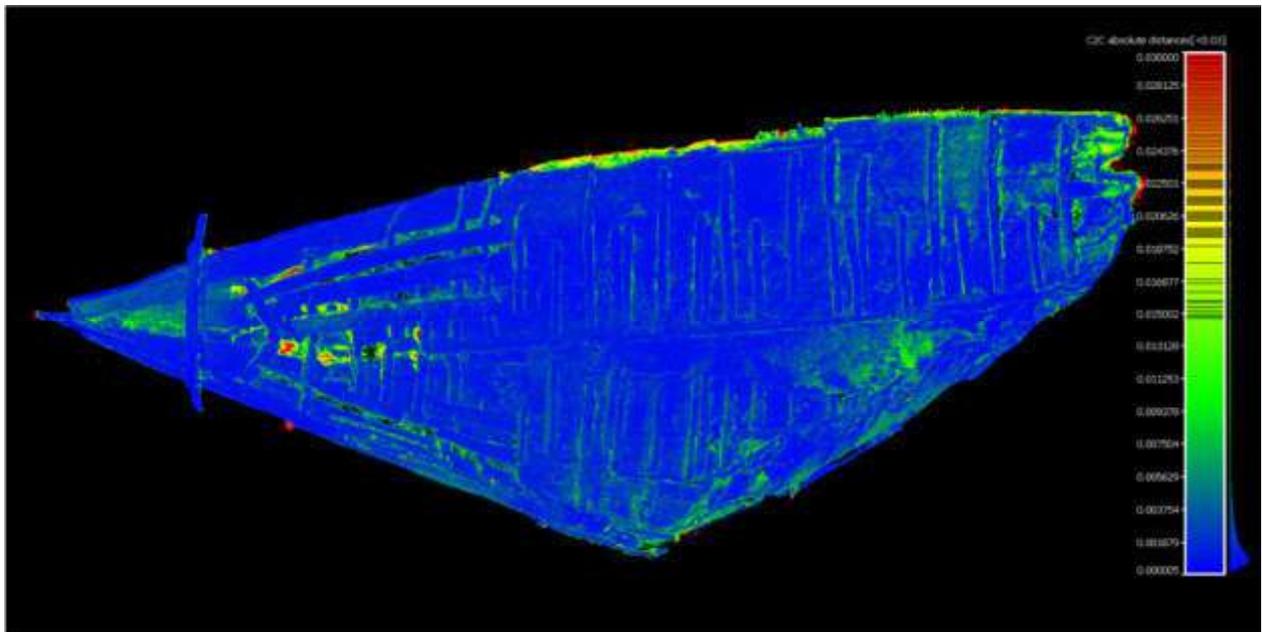


Fig. 3.A-7. Confronto realizzato sulla nuvola di punti fotogrammetrica in riferimento a quella prodotta dal laser scanner.

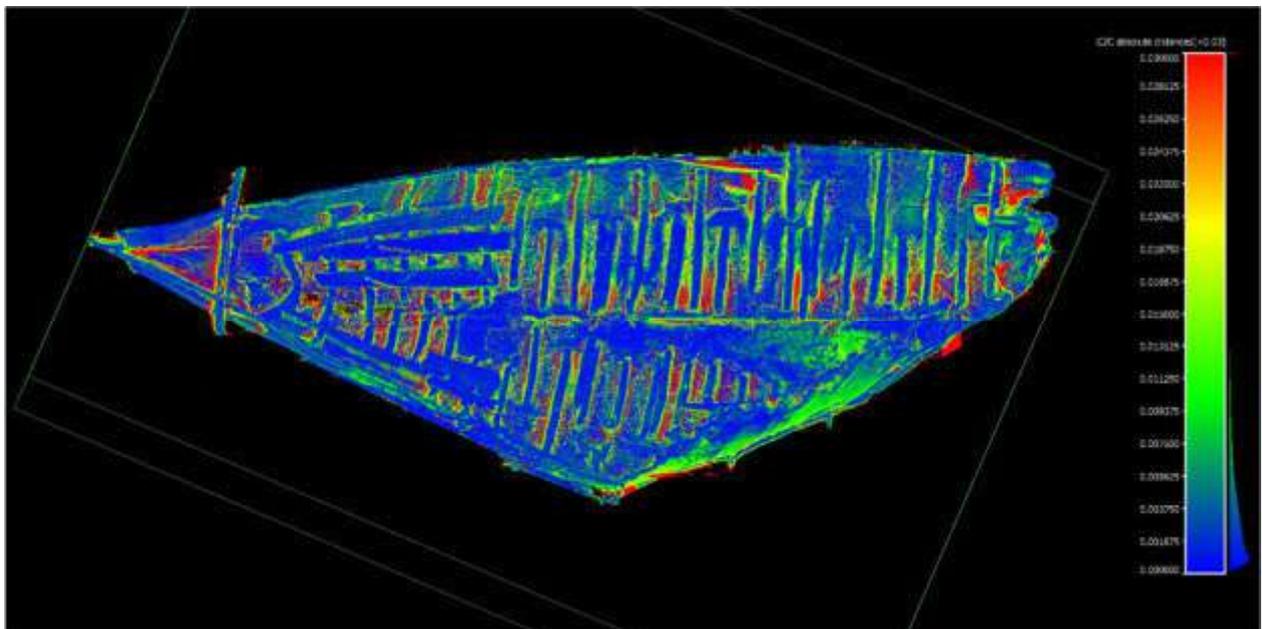


Fig. 3.A-8. Confronto realizzato sulla nuvola di punti prodotta dal laser scanner in riferimento a quella fotogrammetrica.

**4**

**Le applicazioni virtuali  
per lo studio e la fruizione digitale**

---

## 4.1

### La barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio

Gli archeologi navali ritengono importante lo studio ricostruttivo dei relitti al fine di studiare in maniera approfondita le forme di un'imbarcazione<sup>152</sup>. Un'ampia letteratura<sup>153</sup> illustra la ricostruzione degli scafi attraverso la realizzazione di modelli lignei o virtuali con la grafica tridimensionale. Fino all'avvento delle tecniche di rilievo digitali che permettono di ottenere un dato tridimensionale già al momento dell'acquisizione, la documentazione bidimensionale era impiegata per realizzare i modelli lignei a tutto tondo che avrebbero permesso di analizzare tridimensionalmente le forme dello scafo e permettere la ricostruzione delle sue forme originarie attraverso operazioni meccaniche e pratiche, che si dimostrano ancora adesso uno strumento molto utile per l'analisi delle linee dello scafo. Il modello tridimensionale in cartoncino si è sempre dimostrato insostituibile come strumento per interpretare le forme costruttive ma anche le tecniche di assemblaggio degli elementi lignei<sup>154</sup>.

Come sostiene Ole Crumlin-Pedersen<sup>155</sup> parlando delle navi vichinghe, i ritrovamenti di imbarcazioni recuperate in contesti archeologici sono una fonte importante per lo studio delle imbarcazioni e della navigazione marittima e si rende necessaria la ricostruzione dello scafo per l'interpretazione corretta della costruzione navale, soprattutto in contesti in cui gli scafi sono solo parzialmente conservati.

Nel corso di questi ultimi due anni di ricerca, ci è stato chiesto a quale scopo si realizzi un modello per superfici semplificate pur disponendo di un modello virtuale texturizzato perfettamente corrispondente all'oggetto reale. Ad un occhio non esperto d'imbarcazioni antiche, non risultava comprensibile ed evidente la necessità di rielaborare manualmente un modello per ottenerne un altro, sebbene di due tipologie diverse.

---

<sup>152</sup> M. Martorelli, C. Pensa, D. Speranza, *Digital photogrammetry for documentation of Maritime Heritage*, «Journal of Maritime Archaeology», 9, 2014, pp. 81-93.

<sup>153</sup> *Ibid.*; C. Beltrame, *Documentare in archeologia* cit., p. 161; Crumlin-Pedersen O., *The Skuldelev Ships I* cit., p. 55; C. Lemée, *The renaissance shipwrecks* cit., pp. 102-105.

<sup>154</sup> Indruszewski, *Application of 3D* cit., p. 270.

<sup>155</sup> O. Crumlin-Pedersen, *Viking Age* cit., 1997.

Le risposte a tale quesito sono varie: innanzitutto, la restituzione e la modellazione poligonale dell'imbarcazione non sostituiscono il modello virtuale ottenuto tramite tecnologie digitali. I modelli rappresentano due tipologie di visualizzazione differenti: il modello fotogrammetrico è una copia verosimile del soggetto, corretta metricamente e radio metricamente che permette di prendere misure e visualizzare l'esatta cromaticità del soggetto, mentre il modello restituito al CAD è volutamente schematico al fine di facilitare le operazioni di studio della costruzione navale e l'interpretazione dello scafo.

D'altra parte, la natura incompleta e indeterminata delle evidenze archeologiche in fase di scavo non è comprensibile ad un occhio inesperto, soprattutto nel caso di un soggetto complesso come un'imbarcazione<sup>156</sup>; di conseguenza, il metodo migliore per conoscerne le forme e studiarne la tecnica costruttiva consiste nella scomposizione della stessa negli elementi che la compongono, individuabili e interpretabili separatamente. La modellazione e la restituzione grafica non sono oggettive quanto la rappresentazione del modello digitale, ma sono necessarie per disegnare ed evidenziare alcuni elementi nascosti o per completare e migliorare un rilievo e per eliminare dettagli ininfluenti quali fessurazioni o degrado del legno<sup>157</sup>, al fine di rendere accessibili le diverse parti che compongono l'imbarcazione. Questa tecnica di modellazione viene spesso criticata a causa del fattore della soggettività dello studioso nell'interpretazione degli elementi, infatti risulta indispensabile, per non invalidare la scientificità del rilievo laser scanning o fotogrammetrico, che lo studioso che si occupa della documentazione e della restituzione grafica sia un esperto di costruzione navale<sup>158</sup>.

Software di modellazione tridimensionale, come *3DStudio*, *Maya* o *Rhinoceros*, sono ampiamente utilizzati per elaborare le nuvole di punti e le *mesh* texturizzate di un rilievo digitale, al fine di ricreare la realtà di un sito o di un manufatto<sup>159</sup>. Nel caso della barca di Santa Maria in Padovetere, di cui disponiamo di metà dello scafo quasi perfettamente integra ma deformata, la ricostruzione completa delle linee dello scafo è possibile

---

<sup>156</sup> J. Coates, S. Mc Grail, D. Brown, E. Gifford, G. Grainge, B. Greenhill, P. Marsden, B. Rankov, C. Tipping, E. Wright, *Experimental boat and ship archaeology: principles and methods*, «The International Journal of Nautical Archaeology» 24/4, p. 295.

<sup>157</sup> Beltrame, *Documentare in archeologia* cit., p. 161.

<sup>158</sup> *Ibid.*

<sup>159</sup> Remondino, *Reality-based 3D* cit..

esclusivamente attraverso la correzione della distorsione delle forme ottenute tramite il rilievo attraverso una restituzione digitale<sup>160</sup>.

Negli ultimi tempi, la modellazione e le tecnologie digitali vengono impiegate per ricostruire le imbarcazioni, per analizzare e studiare gli spazi interni di uno scafo e ipotizzare un possibile stivaggio del carico, come nel caso del relitto portoghese del XVII secolo d.C. *Nossa Senhora dos Mártires* denominato Pepper Wreck, accorgendosi dell'importanza di uno studio multidisciplinare condotto da ingegneri navali, archeologi e storici della navigazione<sup>161</sup>.

Le tecniche di rilievo impiegate sulla barca di Santa Maria in Padovetere sono ben sviluppate e consolidate come metodo di documentazione, ma la ricostruzione virtuale ha seguito in parte metodi sperimentali, combinando tecniche note con nuovi approcci e sfruttando gli sviluppi delle tecnologie digitali. Il modello virtuale rappresenta l'imbarcazione *in situ* ed è composto sia dagli elementi lignei costruttivi che dall'argilla lasciata come elemento di supporto di alcune parti per evitarne il collasso. Solo con una modellazione manuale è stato possibile eliminare virtualmente queste parti e disegnare ogni elemento ligneo nelle sue forme reali, permettendo lo studio delle tecniche costruttive. Inoltre, disponendo di un fianco completo, la modellazione virtuale ha consentito la ricostruzione delle forme originali della barca, sia di quelle esistenti che di quelle ipotizzabili. Diversamente dalle navi di cui si conoscono i progetti di costruzione (dal tardo medioevo in poi)<sup>162</sup>, lo studio approfondito delle forme di imbarcazioni come quella di Santa Maria in Padovetere, costruite con il fasciame auto-portante e realizzate “a occhio”, senza un progetto e una documentazione scritta, richiede una rappresentazione ricostruttiva delle linee e delle sezioni dello scafo<sup>163</sup>.

---

<sup>160</sup> Gonizzi et al., *3D Surveying* cit.; T. Jones, N. Nayling, P. Tanner, *Digitally reconstructing the Newport Medieval Ship: 3D designs and dynamic visualisations for recreating the original hull form, loading factors, displacement, and sailing characteristics*, Underwater archaeology proceedings, Advisory council on under water archaeology, 2013, pp. 123-124.

<sup>161</sup> F.V. Castro, *The Pepper Wreck: a Portuguese Indiaman at the mouth of the Tag river*, Texas A&M University Press, College Station, 2005; F. Castro, N. Fonseca, T. Vacas, A. Sauer, *Numerical models and the dynamic interpretation and reconstruction of medieval and early modern shipwrecks*, CMAC News and Reports 2/1, 2010, p. 2.

<sup>162</sup> P. Pomey, É. Rieth, *L'archéologie navale*, Parigi, 2005, pp. 181-182.

<sup>163</sup> Indruszewski, *Application of 3D* cit., p. 264.

#### 4.1.1

##### La ricostruzione virtuale dello scafo

###### La vettorializzazione degli elementi lignei esistenti<sup>164</sup>

Mettendo a confronto le nuvole di punti create con le diverse tecniche di rilievo, si è deciso di impiegare il modello virtuale ottenuto tramite la fotogrammetria, in quanto la correttezza metrica è risultata buona e rispetto alla nuvola laser scanning ha una numerosità di punti superiore e una resa cromatica migliore grazie all'utilizzo delle *textures* fotografiche provenienti dalle immagini scattate con una camera reflex professionale. Il lavoro svolto può essere schematizzato per punti in modo da descrivere il procedimento:

- inizialmente la nuvola di punti ottenuta durante la campagna di rilievo del 2014 è stata suddivisa in 6 porzioni al fine di aumentare la risoluzione della nuvola densa e della *mesh*, ottenendo una buona caratterizzazione dei piccoli dettagli ma rendendo al contempo il modello più maneggevole sul *software Rhinoceros*, come illustrato anche da Kotaro Yamafune al convegno Isbsa 14 nel 2015 a Danzica in riferimento al relitto di Gnalic<sup>165</sup> (Fig. 4.1-1). La nuvola di punti è orientata nel sistema di riferimento locale dello scavo, ciò ne consente la suddivisione in blocchi mantenendo fisse le coordinate e la ricomposizione in un unico modello.

---

<sup>164</sup> G. Boetto, M. Uhač, I. Koncani Uhač, *The sewn boat of Zambratija (XII-X century BCE, Istria, Croatia)*. 2° Convegno nazionale Cultura navale e marittima, Genova, Italy, 2016;

Castro et al., *A preliminary report* cit.; Pulak et al., *Eight byzantine* cit.; I. Koncani Uhač, G. Boetto, M. Uhač, a cura di, *Zambratija – Prapovijesnu sivani brod / Prehistoric sewn boat / Una barca cucita preistorica / Un bateau cousu préhistorique*, Catalogue of the exhibition, Pula, 2017.

<sup>165</sup> Yamafune, power point presentato al convegno “*International Symposium on boat and ship archaeology*” e reperito sulla pagina personale dell'autore al link:

[https://www.academia.edu/16274486/A\\_Proposed\\_Methodology\\_for\\_Recording\\_and\\_Analyzing\\_Shipwreck\\_Sites\\_Using\\_Phogrammetry](https://www.academia.edu/16274486/A_Proposed_Methodology_for_Recording_and_Analyzing_Shipwreck_Sites_Using_Phogrammetry).

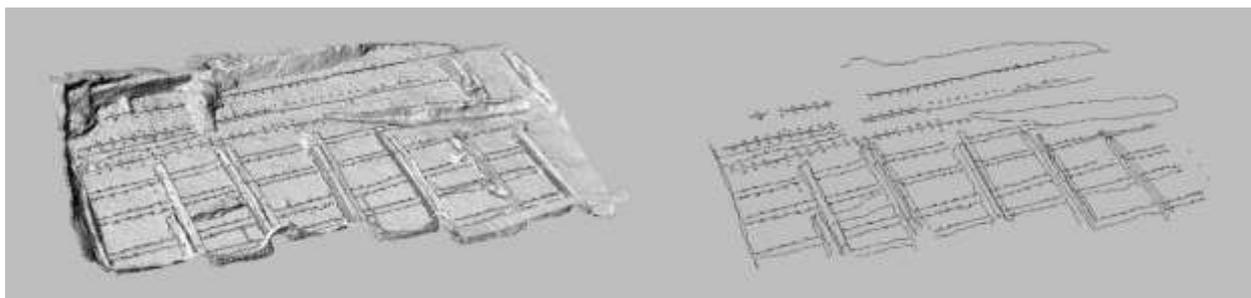


Fig. 4.1-1. Una delle parti suddivise della *mesh* del fondo e le linee relative agli elementi costruttivi.

- Sono stati quindi creati *layers* distinti per ogni elemento costruttivo, identificati da un colore diverso per facilitare il riconoscimento delle linee disegnate e per agevolare le operazioni di restituzione lavorando solo sul *layer* interessato; gli elementi lignei sono stati disegnati manualmente seguendo gli spigoli e le curve di ogni porzione visibile<sup>166</sup> (fig. 4.1-2a).

- al modello creato sono state aggiunte le due porzioni individuate durante la campagna di rilievo del 2015, relative alla parte di poppa e al testimone di terra mantenuto per facilitare le operazioni di scavo (fig. 4.1-2b); per queste era stata realizzata una pianta bidimensionale tramite la digitalizzazione dell'ortofoto<sup>167</sup> che viene impiegata per una sperimentale tecnica di restituzione: la proiezione sulla *mesh* delle linee della pianta. Il risultato, ottenuto esclusivamente sulla parte dello scafo visibile in proiezione dall'alto, è stato soddisfacente, nonostante la proiezione generi in maniera automatica delle linee molto complesse che devono essere semplificate e regolarizzate facendo attenzione a non perdere il dettaglio delle informazioni<sup>168</sup>. (fig. 4.1-2b).

Di alcune parti lignee, nascoste dall'argilla a sostegno degli elementi o dagli stessi elementi costruttivi, non è stato possibile ottenere il modello virtuale. Per una documentazione completa bisognerebbe smontare l'imbarcazione, ma ciò non è possibile a meno che non siano previsti il recupero e il restauro; di conseguenza è necessaria un'integrazione attraverso il disegno manuale e un'operazione di ricostruzione digitale delle parti non visibili.

<sup>166</sup> Dostal, *Laser scanning* cit., p. 87.

<sup>167</sup> Cfr. *supra*, cap. 3.3, tavola 3.3-2.

<sup>168</sup> Jones *et al.*, *Digitally reconstructing* cit., p. 124.

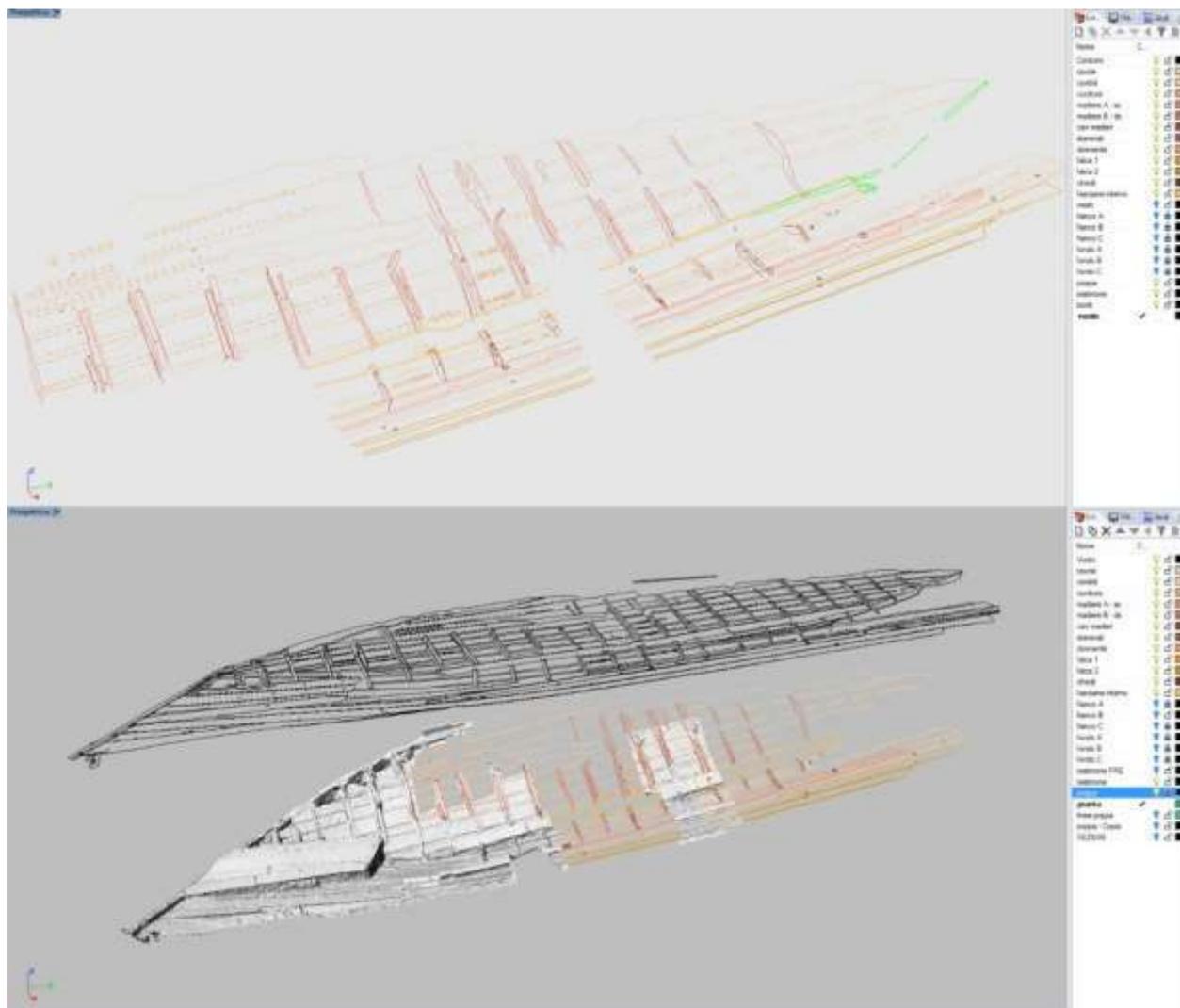


Fig. 4.1-2. a. Linee corrispondenti agli elementi lignei. b. Pianta proiettata sulle *mesh* del 2015

Come descritto nel capitolo precedente relativo alla tecnica costruttiva della barca di Santa Maria in Padovetere<sup>169</sup>, essendo il fondo uno degli elementi principali dello scafo e il primo da cui si inizia la costruzione “*sur sole*”, si è deciso di iniziare la vettorializzazione dai cordoli di calafataggio in corrispondenza del comento tra le tavole, l’interstizio tra i corsi di fasciame. Di queste conosciamo la forma, la posizione e la consistenza ma non ne individuiamo gli spigoli, poiché posizionati al di sotto del cordolo (fig. 4.1-3).

- la restituzione è stata realizzata solo per la parte di fondo relativa alla sentina, poiché il cordolo stesso rimane nascosto dalle ordinate trasversali (fig. 4.1-4a); è stato

<sup>169</sup> Cfr. *supra*, cap. 4.1.

quindi necessario interpretare il modello e disegnare delle linee di giunzione per dare continuità al cordolo di calafataggio. Inoltre, sono stati rappresentati anche gli elementi costruttivi relativi alla cucitura, ovvero le cime e le caviglie che tengono collegate le tavole di fasciame, del fondo e del fianco (fig. 4.1-4b).



Fig. 4.1-3. Porzione del fondo.

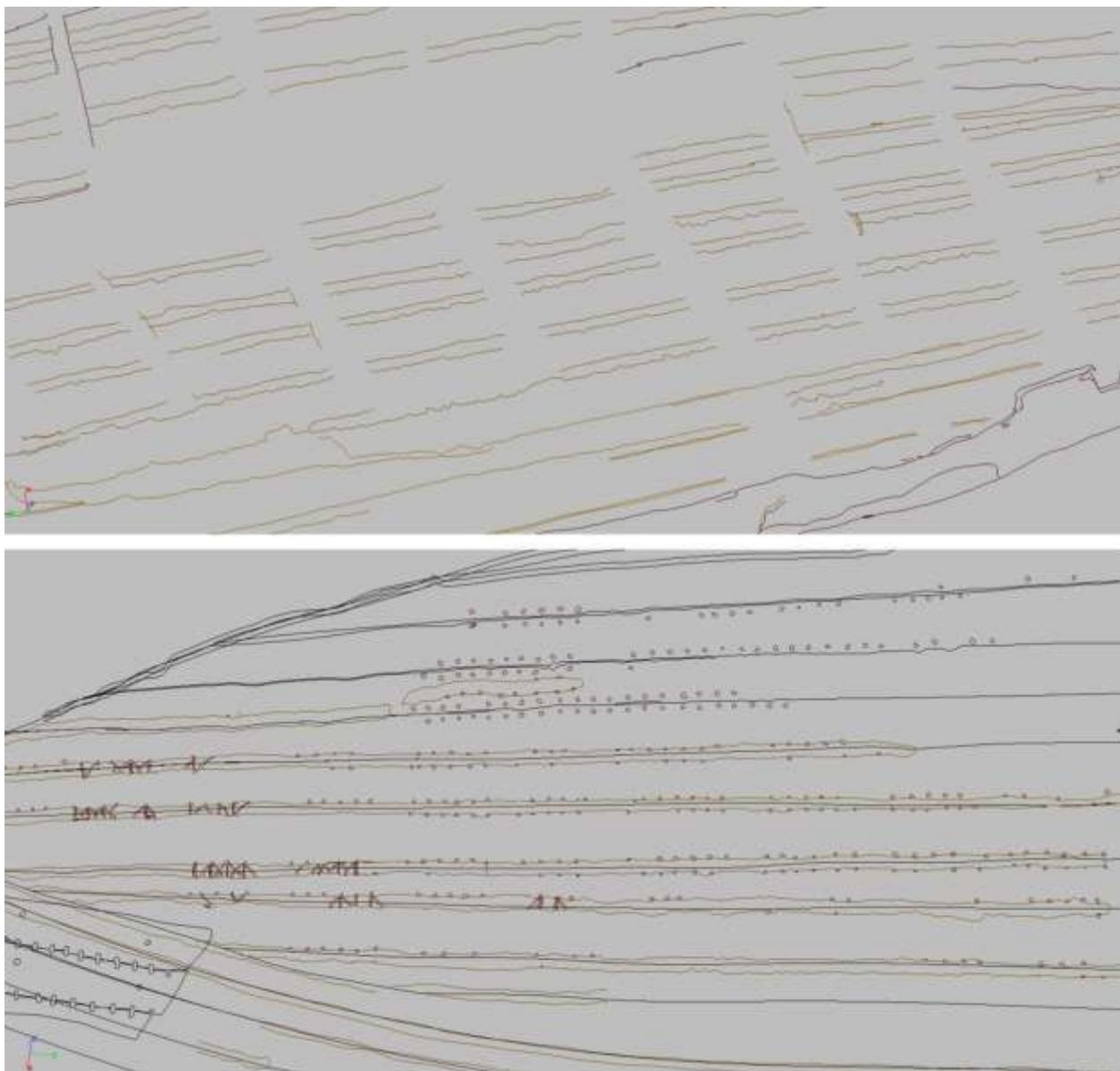


Fig. 4.1-4. a. Rappresentazione spezzata dei comenti visibili. b. Particolare di poppa con tavole del fondo, comenti e cucitura.

- determinati i cordoli è stato possibile ipotizzare l'andamento delle tavole del fondo e del fianco prolungando la linea del comento visibile laddove il calafataggio era assente per deterioramento dello stesso o per mancanza costruttiva, come nella parte centrale del fondo (tav. 4.1-1).

- successivamente si è proceduto alla rappresentazione degli elementi longitudinali, ovvero le falche sovrapposte, la tavola di pagliolato del fasciame interno e il dormiente, disegnando direttamente sulla *mesh* senza necessità di interpretazione (tav. 4.2-2).

- si è dunque proseguito con la restituzione delle parti trasversali come le ordinate di cui si sono mantenute le forme originali cercando di non eliminare alcun particolare importante per la ricostruzione delle tecniche costruttive, come le caviglie lignee verticali che collegano le ordinate al fondo o quelle orizzontali che collegano le ordinate tra di loro. Alcune parti erano già state rappresentate nella tavola bidimensionale e sono state quindi proiettate sulla *mesh*, mentre per completare la rappresentazione delle ordinate è stata necessaria l'integrazione con il disegno manuale (fig. 4.1-5).



Fig. 4.1-5. Restituzione delle linee delle ordinate di sinistra.

- una volta ottenuta la totalità delle linee degli elementi lignei, in una visualizzazione definita *wireframe*, come quella che si ottiene attraverso il rilievo con il braccio misuratore *Faro CAM2 Arm*<sup>170</sup> utilizzato abitualmente nella documentazione di imbarcazioni in laboratorio, si è potuto ottenere il volume degli elementi attraverso un modello per superfici (tav. 4.1-3).

<sup>170</sup> Crumlin-Pedersen O., *Ten golden years for maritime archaeology in Denmark, 1993-2003*, «Maritime Archaeology. Newsletter from Roskilde», nr. 20, 2003, pp. 31, 35; Tanner P., *Digital reconstruction and analysis of the Newport ship*. in Newport Medieval ship project. Specialist report: reconstructing the hull shape. Newport city council. Cyngordinas Casnewydd, 2013, p. 17.

### La ricostruzione degli elementi lignei esistenti

Dalle prime analisi del rilievo effettuato, risultano evidenti le deformazioni subite dal legno; l'imbarcazione, adagiata sul rivale del fiume, presenta il fondo inclinato di 45° e il fianco sinistro in posizione orizzontale. Questo assetto ha provocato, come nel relitto *Arles-Rhone 3*<sup>171</sup>, la caduta del fianco sinistro e della poppa e la distorsione parziale del fianco destro, creando conseguentemente una leggera apertura del fianco rispetto alle ordinate che sono rimaste quasi integre.

- la prima operazione da svolgere per eliminare tali deformazioni e ricostruire le forme dello scafo originali è la rotazione dello scafo in posizione di navigazione<sup>172</sup>. È stata quindi effettuata la rotazione rigida di tutto lo scafo prendendo come riferimento l'ordinata centrale M14 in senso trasversale e la tavola centrale T5 in senso longitudinale. Una volta portata a termine tale operazione, è risultata evidente la deformazione in senso longitudinale subita dalle tavole del fondo, mostrando come queste si siano adagate sul rivale del fiume, perdendo il loro assetto originale (fig. 4.1-6a).

- è stato quindi necessario eseguire lo sviluppo delle tavole per riportare il fondo alla sua forma corretta. Durante questo procedimento, le tavole del fasciame si allineano lungo l'asse orizzontale senza subire variazioni dimensionali poiché non sono proiettate sul piano, ma vengono distese (fig. 4.1-6b). La tecnica dello sviluppo è stata successivamente impiegata per le tavole del fondo e del fianco durante la preparazione degli elementi da stampare per la realizzazione del modello ligneo, in modo da poterli nuovamente piegare nella fase di ricostruzione delle forme<sup>173</sup>.

Attraverso lo sviluppo è stato possibile individuare la corretta forma del fondo. Per prima cosa si è considerata la tavola T5 come asse centrale dello scafo poiché termina a poppa in corrispondenza dell'asta; in base a questa è stato specchiato il fianco destro conservato, ma in questo modo il fianco sinistro risulta in corrispondenza della linea azzurra di figura 4.1-7 e non corrisponde alla porzione di fianco esistente. Se invece andiamo a creare un asse centrale in base alle linee del fondo esistenti, questo

<sup>171</sup> Marlier, *Arles-Rhone 3* cit., p. 76.

<sup>172</sup> Jones et al., *Digitally reconstructing* cit., p. 124.

<sup>173</sup> M. Ravn, *Recent Advances in Post-Excavation Documentation: Roskilde Method*, in N. Günserin, *Between Continents: Proceedings of the 12th international symposium on boat and ship archaeology*, Istanbul 2009, 2012, p. 316.

corrisponde alla linea verde e non alla nostra tavola T5. Di conseguenza, si è ipotizzato che l'imbarcazione di Santa Maria in Padovetere non fosse simmetrica<sup>174</sup>; questa caratteristica potrebbe essere considerata come plausibile sulla base di confronti con altre imbarcazioni, come il relitto Arles-Rhone 3<sup>175</sup> che risulta asimmetrico e probabilmente anche il relitto del fiume Stella<sup>176</sup> se si effettuano dei controlli sulle misure dello scafo.



Fig. 4.1-6. a. Deformazione delle tavole del fondo. b. Sviluppo delle tavole sul piano orizzontale.

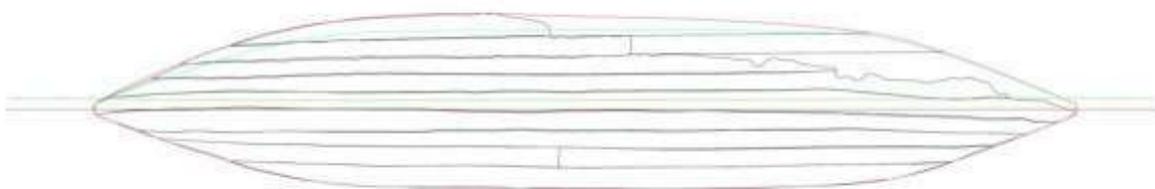


Fig. 4.1-7. Linee per lo studio della simmetria del fondo.

<sup>174</sup> Sull'asse trasversale maggiore, il fianco dentro misura 1.37 e il fianco sinistro 1.66, mentre in lunghezza rispettivamente 17.40 m e 17.51 m.

<sup>175</sup> Marlier, *Arles-Rhone 3* cit., pp. 223-226.

<sup>176</sup> Castro F., Capulli M., 2016. A Preliminary report of recording the Stella 1 Roman River Barge, Italy. *The International Journal of Nautical Archaeology*, 45.1, p. 33.

Osservando il modello ottenuto dal rilievo risulta manifesto che l'imbarcazione ha subito un'importante deformazione anche in senso trasversale.

- l'inclinazione delle ordinate (fig. 4.1-8) è stata normalizzata prendendo come centro di rotazione il punto dell'ordinata in corrispondenza della tavola centrale T5 (fig. 4.1-9a). Avendo seguito la deformazione delle tavole del fondo anche in senso longitudinale, le ordinate non possono semplicemente essere traslate in verticale lungo l'asse z poiché risulterebbero più ravvicinate tra loro, ma devono essere riposizionate rispettando le distanze originali.

- le misure degli interassi sono state riportate sulla linea centrale del fondo sviluppato ed è stato possibile posizionare correttamente le ordinate, verificando la corrispondenza tra i rotoli di calafataggio e gli archetti (fig. 4.1-10). Si è ottenuto così un errore di sviluppo di 1,7 cm, su una lunghezza totale di 17 m, equivalente all'1%.

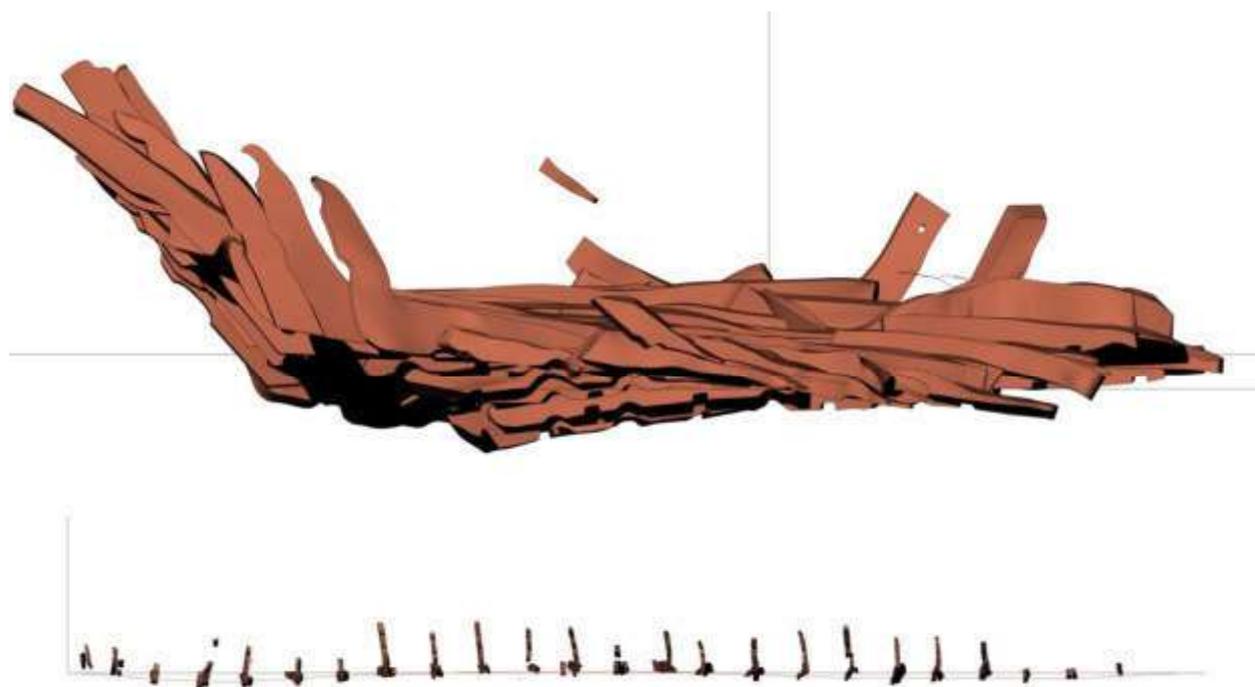


Fig. 4.1-8. Ordinate come rinvenute in scavo. a. vista in sezione trasversale. b. vista longitudinale



Fig. 4.1-10. Ordinate del fondo con fori di biscia e archetti per i cordoli di calafataggio.

- l'asta di poppa, inclinata di  $45^\circ$  rispetto al fondo, è stata ruotata singolarmente e posizionata sulla verticale, utilizzando come centro di rotazione il punto di contatto con la tavola T5 del fondo a cui è inchiodata (fig. 4.1-12). L'asta è stata rimodellata poiché nel crollo del fianco sinistro ha subito, oltre alla rotazione trasversale rispetto al fondo, anche una leggera torsione, evidente dal confronto tra la *mesh* del rilievo originale e il volume ricostruito presentato in fig. 4.1-11.



Fig. 4.1-11. Asta di poppa originale (*mesh* di colore marrone) e ricostruita (volume di colore grigio).



Fig. 4.1-12. Viste dello scafo ruotato con ancora gli elementi deformati.

- per le tavole di fasciame del fianco, invece, non è sufficiente una rotazione, ma bisogna effettuare una torsione. Una tecnica comunemente utilizzata in questo contesto è rappresentata dal comando *Bend*, appunto Piegare, del software *Rhinoceros*<sup>177</sup>, ma la presenza di forme troppo complesse delle tavole rilevate non ne ha permesso l'utilizzo; inoltre, si è notato come questo comando portasse ad una piegatura troppo forzata non veritiera per una tavola di legno.

- si è quindi deciso di creare sulle tavole di fasciame una rete di triangoli che potesse essere piegata e ruotata in modo da torcere la tavola senza modificarne le misure effettive poiché il triangolo è una figura indeformabile (fig. 4.1-14b). Le prime operazioni sono state svolte sulla tavola del fianco a contatto con il fondo partendo dalla parte centrale ancora connessa, dove infatti la torsione risulta semplice e corretta; alle estremità, invece, non è stata possibile la congiunzione tra le tavole a meno che il fondo stesso non fosse soggetto ad una piegatura andando a connettersi al fianco in una posizione rialzata. Questa operazione ha portato ad un innalzamento delle linee del fondo alle estremità, con un sollevamento di 22 cm a prua e di 12 cm a poppa, facendo acquisire

<sup>177</sup> Jones *et al.*, *Digitally reconstructing cit.*, p. 127.

al fondo una curvatura plausibile per un corretto idrodinamismo e della quale si hanno confronti con barche a fondo piatto antiche e moderne<sup>178</sup>.

- l'operazione di piegatura tramite la suddivisione in triangoli (fig. 4.1-14a) è stata svolta su tutte le tavole del fianco singolarmente, prendendo come riferimento quella precedente in modo da mantenere un'omogeneità del fianco, come se si stesse operando manualmente con un modello di studio in cartoncino<sup>179</sup>. Si è riusciti in questo modo a piegare e ruotare nella posizione corretta il fianco destro dell'imbarcazione, controllando la corrispondenza tra le tavole ricostruite e gli archetti sulle ordinate in corrispondenza del cordolo, come era stato fatto per le tavole del fondo.

- l'asta di poppa è stata ruotata lungo l'asse longitudinale di alcuni gradi in modo da far corrispondere in maniera corretta l'estremità delle tavole piegate con il punto di connessione sull'asta misurato direttamente durante lo scavo (fig. 4.1-13).

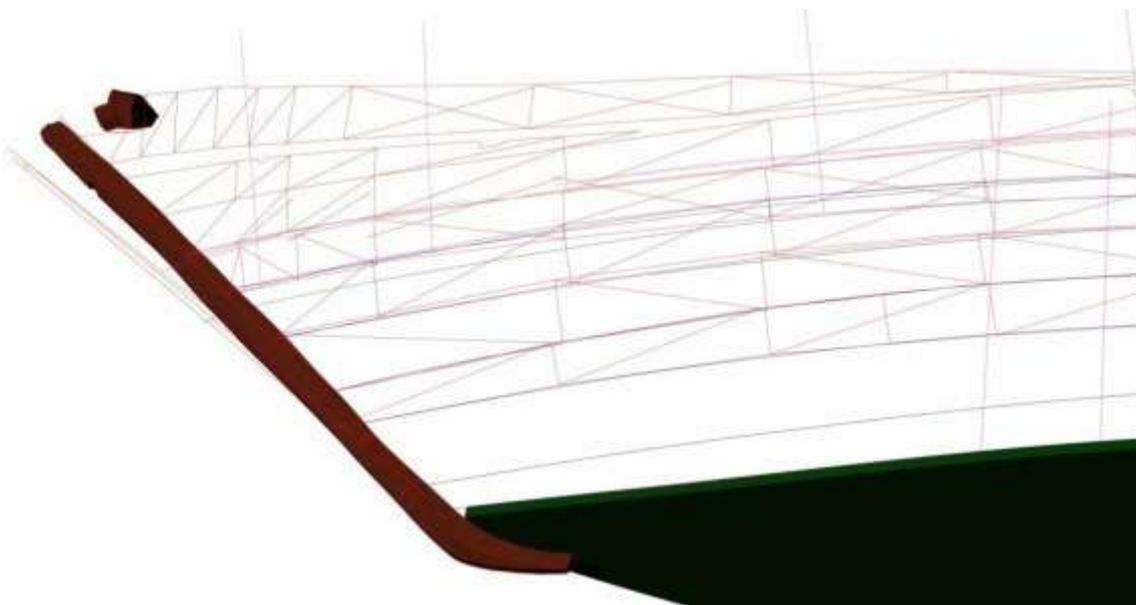


Fig. 4.1-13. Asta ruotata e triangoli delle tavole del fianco nella zona di poppa.

<sup>178</sup>E. Rieth e M. Guyon, *Les épaves Gallo-Romaines*, «Archaeonautica», 16, CNRS Editions, Paris, 2010, pp. 35-104; Marlier, *Arles-Rhone 3* cit..

<sup>179</sup> Beltrame C., Gaddi D., 2013. *Lo studio ricostruttivo della nave romana di Grado*, «L'archeologo subacqueo», XIV/3, p. 14; p. 38-48; A. Ben-Zeev, Y. Kahanov, J. Tresman, M. Artzy, *The Ma'agan Mikhael ship. Volume III: a reconstruction of the hull*, Leon Recanati Institute for Maritime Studies, University of Haifa, 2009.

- ultimate le parti strutturali esterne longitudinali si è proseguito con le ordinate interne trasversali; le ordinate di destra sono completamente integre nella parte del fianco e degradate nella metà sinistra della piana appoggiata al fondo, mentre di quelle di sinistra rimane solo la metà destra della piana (fig. 4.1-15).



Fig. 4.1-15. Ordinate del fondo in fase di scavo.

- per prima cosa sono state ricostruite le ordinate di destra eliminando le deformazioni e ricostruendo dove necessario, integrando la parte terminale della piana sulla base dell'ordinata gemella simmetrica.

- successivamente, per completare l'ossatura trasversale dello scafo e integrare la parte mancante sinistra, le ordinate ricostruite sono state specchiate lungo l'asse centrale, traslate e modificate in modo da essere posizionate correttamente a contatto con il fianco. Non essendoci una perfetta simmetria tra la parte sinistra del fondo (tavole T1-T4) e quella destra (tavole T6-T9), gli incavi degli archetti e i fori di biscia delle ordinate sono stati modificati e riposizionati in maniera corretta (tav. 4.1-4b).

- ricostruite le ordinate, si nota come queste abbiano subito una leggera rotazione trasversale in maniera omogenea, avvenuta contestualmente ad una deformazione del fondo come appare evidente dall'assenza di rottura nelle caviglie di connessione verticali

(tav. 4.1-4a). Il modello finale è stato corretto normalizzando l'asse orizzontale e verticale delle ordinate rispetto al fondo (tav. 4.1-4b,c).

- gli elementi longitudinali interni, come la tavola del pagliolato e il dormiente, sono stati raddrizzati seguendo la stessa procedura impiegata per le tavole del fianco attraverso la triangolazione. Il dormiente è stato anche modificato nella parte di prua in modo da seguire l'andamento dell'ultima tavola del fasciame per ricreare la corrispondenza necessaria di questi due elementi costruttivi che rappresentano il sostegno su cui si appoggiano le tavole della coperta. (tav. 4.1-4c).

Per determinare la linea corretta del fianco, l'angolazione delle ordinate è stata analizzata e impiegata insieme alla curvatura delle tavole, attenendosi alle corrette prassi nella ricostruzione delle forme dei relitti<sup>180</sup>. Diversamente da molti di questi<sup>181</sup> di cui rimane solo l'opera viva dell'imbarcazione e devono essere ipotizzate le linee dello scafo, il nostro lavoro è consistito in una ricostruzione di forme esistenti ma deformate. In questa parte del lavoro di ricerca sulla ricostruzione degli elementi esistenti sono stati inseriti anche il fianco sinistro e parte delle ordinate di sinistra nonostante l'assenza di queste, potendo effettuare una copia simmetrica senza ipotizzarne le linee, ma considerando la presenza della parte destra dello scafo come una prova tangibile attraverso la quale si può conoscere la forma di tutto lo scafo (tav. 4.1-4b).

---

<sup>180</sup> Beltrame e Gaddi, *Lo studio ricostruttivo* cit., p. 14; Jones *et al.*, *Digitally reconstructing* cit., p. 124.

<sup>181</sup> Batchvarov K. N, *Design and construction of a Black Sea Ottoman ship*, in *Between continents*. Proceedings of the Twelfth Symposium on Boat and Ship Archaeology, Istanbul 2009, 2012, pp. 175-181; Capulli M., 2017. *The Precenticco shipwreck: an 11th-13th century vessel from the river Stella I*. Proceedings of the 14 Isbsa, Gdansk. Baltic and beyond. 2015; Casaban J.L., Radic Rossi I., Yamafune K., Castro F., *Underwater photogrammetry applications: the Gnalic shipwreck, 2013 (Croazia)*, in Proceeding of IKUWA 2014, 2014; Castro, *The Pepper wreck* cit.; Castro et al., *Numerical models* cit.; Castro et al., *A Preliminary report* cit., Gassend J.-M., Liou B., Ximénès S, *L'épave 2 de l'anse des Laulorns (Martigue, Bouches-du-Rhone)*, in *Archeonautica* 4, 1984, pp. 75-106; Poveda P., *Hypothetical Reconstruction of the Dramont E Shipwreck*, in Gunsenin N. (ed.) *Between Continents: Proceedings of the 12th international symposium on boat and ship archaeology, Istanbul 2009 (ISBSA12)*, 2012, pp. 331-336.

### La ricostruzione degli elementi lignei non presenti

Un'importante fase di modellazione riguarda quegli elementi dei quali si possono ipotizzare le forme e le dimensioni, poiché se ne possono tracciare le linee o sono presenti sullo scafo segni evidenti della loro esistenza per associazione costruttiva. Per esempio nel caso della barca di Santa Maria in Padovetere, diversi sono gli elementi costruttivi che sono stati ricostruiti in maniera ipotetica: l'asta di prua, i bagli, le tavole della coperta, il timone, l'albero di prua.

La posizione e la forma dell'asta di prua sono state realizzate sulla base della chiusura delle tavole del fianco che si congiungono in una determinata posizione lungo l'asse centrale dello scafo. Queste sono deteriorate e non raggiungono l'asse centrale a prua, come si evince dalla maglia triangolare di colore azzurro o rosso in fig. 4.1-16. Per riuscire a determinare l'estremità di prua, le linee delle tavole sono state allungate in maniera automatica seguendo la curvatura della tavola fino al piano verticale passante per l'asse centrale dello scafo, riproducendo le operazioni che risulterebbero operando su un modello in cartoncino<sup>182</sup>. Le linee generate sono le più probabili poiché create su una porzione mancante molto piccola (1-2 m) rispetto alla lunghezza di tutta la tavola (18-20 m) di cui conosciamo la curvatura corretta (fig. 4.1-16).

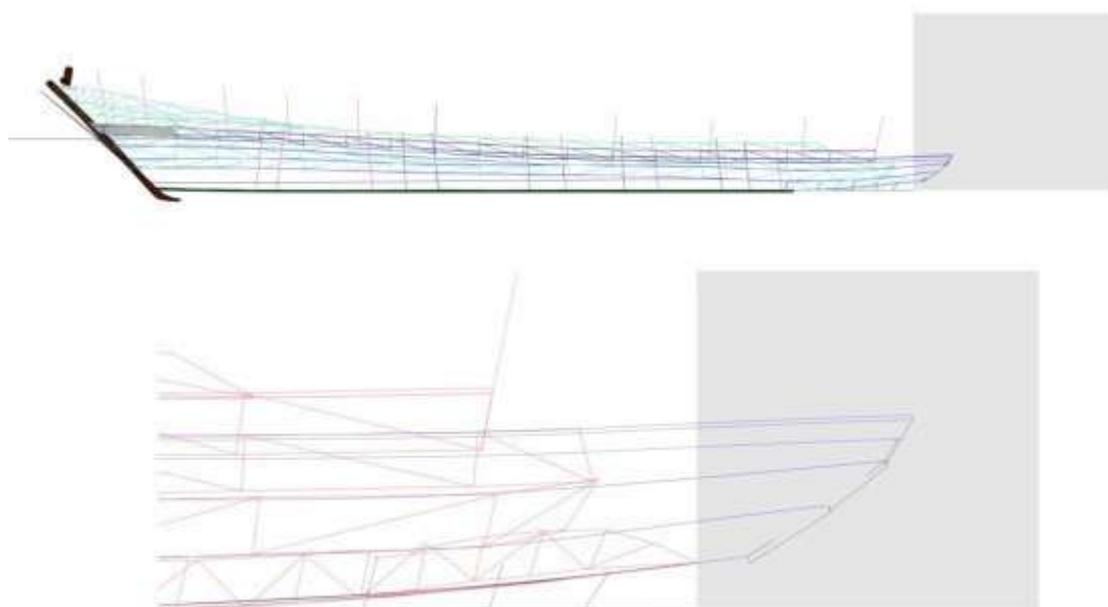


Fig. 4.1-16. Definizione delle linee di prua in base al prolungamento delle linee delle tavole del fianco.

<sup>182</sup> Ben Zeev, *ivi.*, p. 38-39.

Non si conosce invece la forma in sezione dell'asta, la quale viene infatti creata in maniera del tutto ipotetica, prendendo come riferimento la sezione dell'asta di poppa e confrontandoci con altri relitti anche se con differenti caratteristiche costruttive e di diversa datazione<sup>183</sup> (fig. 4.1-17).

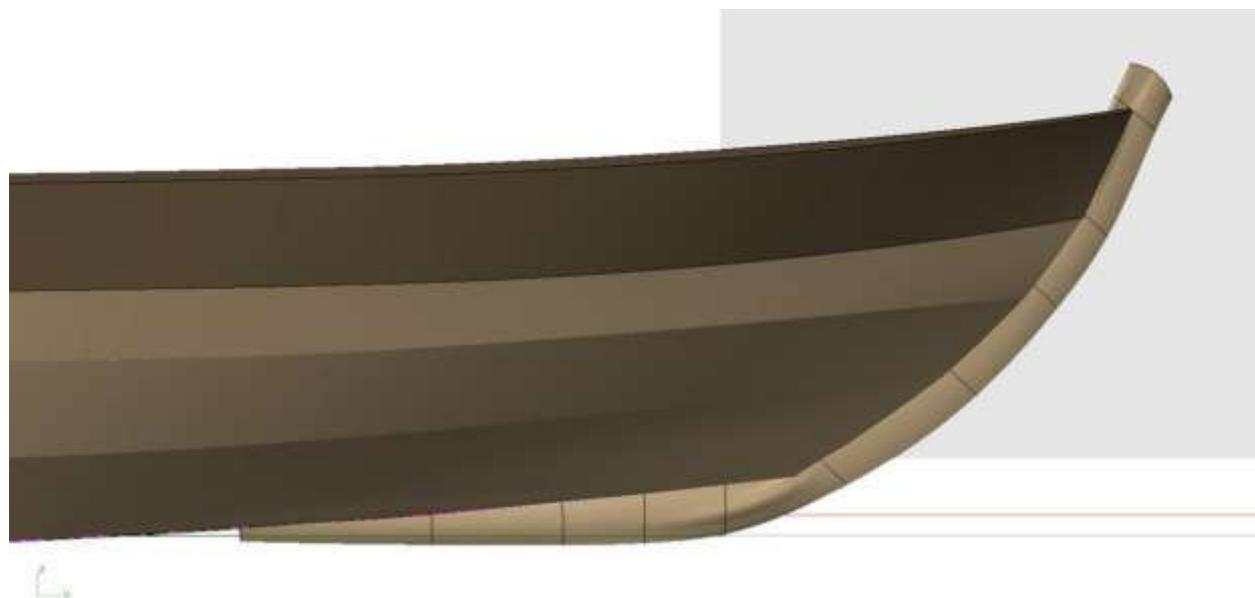


Fig. 4.1-17. Ricostruzione dell'asta di prua.

L'esistenza di una serie di bagli trasversali (fig. 4.1-18) è stata ipotizzata sulla base delle riseghe rettangolari del dormiente poste a distanze regolari; queste non presentano un taglio ortogonale all'andamento del dormiente e quindi del fianco, ma sono leggermente inclinati per far sì che i bagli non abbiano una curvatura troppo accentuata. I bagli venivano impiegati come sostegno per le tavole della coperta ed è stata ipotizzata la presenza di tre coperte distinte (fig. 4.1-19) in corrispondenza degli elementi trasversali posizionati ad una distanza tale da permettere il camminamento al di sopra delle tavole senza che queste si spezzino.

<sup>183</sup> Charlin G., Gassend J-M., Lequément R, 1978, *L'épave antique de la baie de Cavalière (Le Lavandou, Var)*, in «Archaeonautica», 2, Edition du CNRS, pp. 64-65.

#### 4.1.2

##### **Considerazioni sulla forma dello scafo**

La barca di Santa Maria in Padovetere rappresenta una delle pochissime imbarcazioni per la navigazione fluviale di epoca romana conosciute in Europa meridionale della quale si conoscono le forme pressoché complete, essendosi conservati il fondo, un fianco integro e l'intera estremità di poppa. Le caratteristiche dello scafo come il fondo piatto, l'assenza di una pontatura totale dello scafo e l'assenza di una scassa dell'albero per la vela avvalorano l'idea dell'utilizzo di questa imbarcazione come barca da trasporto per acque interne.

La forma affusolata e lunga, con un rapporto di quasi 1/6 tra larghezza e lunghezza del fondo, è rappresentativa delle proporzioni canoniche di una barca fluviale individuate dai confronti archeologici e soprattutto etnografici dei secoli scorsi. Diversamente da una barca marittima, le imbarcazioni fluviali non richiedono forme tonde e larghe per resistere alla forza del mare, ma necessitano di linee allungate al fine di poter percorrere anche i canali più stretti e contrastare in misura minore la corrente nel momento del traino da valle a monte.

La barca di Santa Maria in Padovetere e i relitti Stella 1<sup>184</sup>, Corte Cavanella<sup>185</sup> e Precenicco<sup>186</sup>, solo per citarne alcuni, evidenziano come la forma affusolata del fondo fosse probabilmente una caratteristica tipica dell'Alto Adriatico in contrapposizione alle forme squadrate che si rinvennero nei relitti centro-europei di imbarcazioni fluviali<sup>187</sup>. Il confronto più pertinente è rappresentato dal relitto Stella 1 del I secolo a.C. rinvenuto a 150 km in linea d'aria dal sito; nonostante questa imbarcazione sia meno conservata, entrambe mostrano le estremità appuntite, il fondo piatto, i fianchi dritti e la cucitura come tecnica di assemblaggio delle tavole, mentre, essendo più piccolo, il relitto Stella 1 presenta ordinate singole. Cronologicamente vicino a questa imbarcazione, di circa un

---

<sup>184</sup> Castro e Capulli *A Preliminary report* cit.

<sup>185</sup> C. Beltrame, *Imbarcazioni lungo il litorale alto-adriatico occidentale, in età romana. Sistema idroviario, tecniche costruttive e tipi navali*, in *Strutture portuali e rotte marittime nell'Adriatico di età romana*, Centro di Antichità alto-adriatiche, Casa Bertoli Aquileia, Trieste-Roma, 2001, pp. 431-449.

<sup>186</sup> M. Capulli, *The Precenicco shipwreck: an 11th-13th century vessel from the river Stella 1*, in *Baltic and beyond Proceedings of the 14 Isbsa*, Gdansk 2015, 2017.

<sup>187</sup> Cfr. oltre.

secolo successivo, è il relitto di Corte Cavanella, annoverato tra le imbarcazioni cucite del litorale lungo adriatico rinvenute in contesti terrestri; questo scafo, di cui rimangono solo le tavole del fondo presenta le stesse caratteristiche affusolate. Anche questo scafo, è di più piccole dimensioni e precedente cronologicamente alla barca di Santa Maria in Padovetere e non può essere confrontato per le parti relative ai fianchi e alle strutture lignee trasversali.

Un terzo scafo, il relitto di Precenicco, rinvenuto anch'esso lungo il fiume Stella, presenta la stessa caratteristica del fondo allungato che conferma come questa forma sia una caratteristica delle barche fluviali anche nel XI secolo, nonostante le tecniche tecnico-costruttive poco si associno al nostro relitto, poiché non costruito con la tecnica a cucitura.

Altri confronti si possono fare con i relitti fluviali di epoca romana dell'Europa centrale e settentrionale, sebbene le loro tecniche di costruzione siano molto diverse da quelle del Mare Adriatico. Possiamo osservare una somiglianza generale nella forma e nelle proporzioni di larghezza e lunghezza e in alcune caratteristiche tecniche, come il fondo piatto, i fianchi dritti e la sovrapposizione delle tavole del fianco, nonostante in questi casi la tecnica di chiodatura sia più strutturale. Si possono citare i relitti di Zwammerdam 2, 4 e 6<sup>188</sup>, di Woerden 1<sup>189</sup> e 7<sup>190</sup>, di Xantem-Wardt<sup>191</sup>, di De Meern 1 e 4<sup>192</sup> e di Mainz 6<sup>193</sup>.

---

<sup>188</sup> Weerd de, M.D., Roemerzeitliche Transportschiffe und EinbaeumeausNigrumPullum/Zwammerdam (Z.-H.), *Studien zu den Militaergrenzen Roms*, 2, 1977, 187-98 and plates 13-19.

<sup>189</sup> Haalebos, J.K., Een Romeinsschipte Woerden, Lelystad, Rijksdienstvoor de Ijsselmeerpolders, in Reinders, H.R. ed., *Flevobericht*, 280, Lelystad, 1987, p. 27.

<sup>190</sup> Blom, E., Vos, W.K., De 'Woerden 7': Een Romeinse platbodem, in Blom, E., Vos, W.K., eds., *Woerden-Hoochwoert. De opgravingen 2002-2004 in het Romeinse castellum Laurium, de vicus en van het schip de 'Woerden 7' (ADC Rapport 910)*, Amersfoort, 2008, 349-401.

<sup>191</sup> Böcking, W., Caudicaria - Römische Lastkähne. Neue Schiffsfunde im Xantener Raum. *Antike Welt* 27, 1996, 209-15.

<sup>192</sup> Groot De, T., Morel, 2007, J.-M.A.W., 2007, eds., *Hetschip uit de Romeinse tijd De Meern 4 nabij boerderij de Balije, Leidsche Rijn, gemeente Utrecht: waardstellend onderzoek naar de kwaliteit van hetschip en het conserverend vermogen van het bodemmilieu*, Amersfoort, pp. 33, 38.

<sup>193</sup> Pferdehirt, B., 2002, Das schiff 6 aus Mainz, in A. Mees, B. Pferdehirt, eds., *Roemerzeitliche Schiffsfunde in der datenbank NAVIS I*, Mainz, pp. 100-102.

La mancanza di confronti relativi all'opera morta, agli elementi lignei interni e alla copertura non ci permette di effettuare ricostruzioni certe di questa parte di scafo. Una serie di bagli trasversali è stata ricostruita sulla base dell'individuazione di riseghe rettangolare intagliate nello spessore del dormiente; queste sono disposte ad una distanza regolare in due posizioni centrali dello scafo. La posizione di questi fa pensare ad una imbarcazione semi coperta, tipica di un'imbarcazione fluviale con le tavole disposte sopra i bagli maggiormente ravvicinati, lasciando una porzione centrale libera per facilitare il posizionamento del carico dentro la stiva. In un'imbarcazione fluviale, infatti, non sussiste il rischio dell'ingresso delle onde rispetto ad uno scafo marino e coperture mobili venivano solitamente impiegate per assicurare la protezione del carico dalle intemperie. Oltre a queste due porzioni di coperta, sono state ricostruite una piccola porzione a poppa in corrispondenza di piccoli incavi lungo la seconda tavola sovrapposta e una coperta di prua nonostante sia mancante il confronto archeologico tangibile, ma dove ragionevolmente può essere posizionata al fine di evitare l'ingresso dell'acqua da prua durante la navigazione.

L'assenza di una coperta totale per facilitare il posizionamento di un carico libero o di grandi dimensioni potrebbe essere confermata dal ritrovamento di un'alta percentuale di pollini di *Brassicaceae*, di segale, di canapa, di *Cucumis sativus* e *Cucumis melo* che venivano trasportati sparsi sull'imbarcazione. Inoltre la presenza di pollini di alcune erbacee utilizzate come foraggio per gli animali e la presenza di alcuni batteri associati esclusivamente agli escrementi animali, in particolare agli ovini, fanno pensare al trasporto animale, per i quali è necessario uno spazio ampio e scoperto.



Fig. 4.1- 20. Ipotesi del carico con trasporto animale.

La lunga asta di poppa e i fianchi rialzati in questa estremità dello scafo, lasciano supporre la presenza in questa zona di un timoniere. Confronti con questa sistemazione di poppa si possono trovare in alcuni rilievi di epoca romana rinvenuti in Germania: la stele del *nauta Blussus* del Landesmuseum di Mainz<sup>194</sup> e la stele del Roemisch Germanisches Museum di Colonia<sup>195</sup> o il rilievo dell'*aedicula* del tempio di Nehalennia<sup>196</sup>. Queste risalgono al I secolo d.C. e raffigurano barche fluviali a fondo piatto in cui il timoniere si erge su un piccolo rialzo che permette di vedere la rotta e di governare un lungo timone. Sembra che anche la barca fluviale F trovata nel porto fluviale di Pisa S. Rossore avesse un solo timone montato sul lato dello scafo<sup>197</sup>. Nonostante siano imbarcazioni riferite a secoli precedenti e ad un'area geografica diversa, è importante notare come la ricostruzione tridimensionale delle testimonianze archeologiche della barca di Santa Maria in Padovetere confermi le fonti iconografiche di imbarcazioni con un'alta poppa.

Nel mondo archeologico pochissimi sono i ritrovamenti degli elementi della timoneria, poiché spesso mobili o collegati alla poppa tramite cime degradabili e poiché posizionati in una porzione di scafo che raramente si conserva. La forma del timone delle imbarcazioni centro europee è però diversa da quella ipotizzata per la barca di Santa Maria in Padovetere poiché in quest'ultima la poppa è più inclinata; verosimilmente, il timone qui impiegato era più lungo e posizionato diagonalmente affianco all'asta nella zona sommitale in appoggio sul blocco in legno a L. Confronti archeologici di un lungo remo-governale, o remo-timone, sono stati rinvenuti in un rilievo in terracotta di una tomba della necropoli di *Portus* nell'Isola Sacra (fig. 4.1-21)<sup>198</sup> e sul rilievo alla base della statua del fiume Tevere conservata al Louvre (fig. 4.1-22)<sup>199</sup>.

---

<sup>194</sup> <https://www.regionalgeschichte.net/rheinessen/weisenau/kulturdenkmaeler/grabstein-des-blussus.html>

<sup>195</sup> [https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Rudder\\_of\\_a\\_Roman\\_Boat\\_\(RG\\_Museum\\_Koeln,\\_Germany\).JPG](https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Rudder_of_a_Roman_Boat_(RG_Museum_Koeln,_Germany).JPG)

<sup>196</sup>

<sup>197</sup> Bonino, M., 2015, *Navi mercantili e barche di età romana*, Roma, p. 71.

<sup>198</sup> Da *Portus Romae: i porti di Claudio e di Traiano*. [www.luniversoeluomo.org/storia/portus.htm](http://www.luniversoeluomo.org/storia/portus.htm)

<sup>199</sup> S. Medas, *La navigazione tardo-antica in Adriatico. L'iconografia navale e la peculiarità della tradizione nautica*, «CuPAUAM», 42, 2016, pp. 149-150.

Dai confronti etnografici si può notare come il remo-governale sia posizionato a poppa su diverse tipologie di imbarcazioni fluviali a fondo piatto lungo i fiumi del Centro Europa, come chiamate *Courpets* che navigano lungo il fiume Dordogna fino all'inizio del XX secolo<sup>200</sup> o le *Zillia* lungo la Moldava nel XVIII secolo o i *Rabelos* lungo il corso del Douro in Portogallo. Questi confronti, iconografici, archeologici ed etnografici, suggeriscono che il lungo perno passante attraverso l'asta di poppa e l'elemento a forma di L in coperta possano essere collegati alla timoneria, nonostante al momento le domande sull'effettivo utilizzo del perno centrale non abbiano ancora una risposta.

A differenza del timone laterale di epoca romana impiegato per le navi da mare che opera solo per rotazione ed è fisso, il remo-timone di queste barche fluviali è mobile, sia lateralmente che lungo l'asse longitudinale. Il timoniere in questo modo ha la possibilità di governare l'imbarcazione anche in acque basse avanzando sulla coperta e modificando l'inclinazione del timone, lasciando la pala immersa mantenendo l'efficacia del timone (tav. 4.1-5). Il pescaggio dello scafo può variare a seconda del tipo di materiale trasportato e del suo peso; la mobilità dei movimenti di questa tipologia di remo permette una reversibilità tale ma mantenere in ogni situazione il suo effetto propulsivo e direzionale<sup>201</sup>.

---

<sup>200</sup> Beaudouin, *Bateaux des fleuves* cit. p. 73

<sup>201</sup> E. Rieth, *Des bateaux et des fleuves. Archéologie de la batellerie du Néolithique au Temps modernes en France*, Paris, Editions Errance, 1998, pp. 109-111.

Uno dei principali elementi di un'imbarcazione è legato alla scelta del mezzo di propulsione, che, in ambito fluviale dove le possibilità di manovra non sono libere quanto in ambito marino, è limitata e maggiormente importante; la diversità dei mezzi di propulsione è legata alle restrizioni fisiche delle vie d'acqua: la limitazione laterale legata alla prossimità delle rive, la limitazione verticale legata alla ridotta profondità e una limitazione longitudinale che determina una navigazione assiale tra monte e valle e viceversa, le quali comportano un abbandono quasi totale della vela e una propensione per i remi, siano questi utilizzati come tali o come pertiche, e per il traino. L'assenza di scalmi o di incavi sul bordo estremo del fianco ci fanno pensare che questa barca non venisse mossa attraverso l'uso dei remi; nemmeno l'impiego delle pagaie è plausibile a causa della troppa altezza del fianco, mentre è più probabile l'utilizzo di uno o più remi come pertica per lo spostamento dello scafo. Nonostante le esigue informazioni archeologiche relative alla modalità di propulsione della barca di Santa Maria in Padovetere, si possono tenere in considerazione le parole degli autori latini che descrivendo la navigazione lungo i corsi d'acqua di questa zona come il *Padus*, la *Fossa Augusta* e il *Vaternus*, menzionano l'uso del traino<sup>202</sup> e dei remi; il traino era infatti anche il modo di propulsione più utilizzato dalle imbarcazioni lungo il fiume Tevere verso la metà del VI secolo d.C.<sup>203</sup>. In particolare Cassiodoro<sup>204</sup> descrive la navigazione fluviale svolta dai Veneziani negli spostamenti commerciali verso la città di Ravenna in una lettera ai Veneziani del 537 d.C., indicando come questa via fosse considerata un percorso tranquillo e sicuro, nel momento in cui il mare non fosse stato navigabile e come queste fossero trainate senza fatica dagli uomini. Anche Isidoro parla di imbarcazioni fluviali che vengono trainate da funi denominate *Pontonium*, a dimostrare l'utilizzo di queste barche come trasporto<sup>205</sup>.

<sup>202</sup> Gaius Valgius Rufus, *Fr* 4.

<sup>203</sup> Marziale, *Epigrammaton libri*, III, 67, 1-4; Procopius, V, 26, 11-12.

<sup>204</sup> Cassiodoro, *Variarum Libri* XII, XII, 24: "*Per hospitia quod ammodo vestra discurritis, qui per patriam navigatis. Accedit etiam commodis vestris, quod vobis aliud iter aperitur perpetua securitate tranquillum. Nam cum ventis saevientibus mare fuerit clausum, via vobis panditur per amoenissima fluviorum. Carinae vestrae flatus asperos non pavescent: terram cum summa felicitate contingunt et perire nesciunt, quae frequenter inpingunt. Putantur eminus quasi per prata ferri, cum eorum contingit alveum non videri. Tractae funibus ambulant, quae stare rudentibus consuerunt, et condicione mutata pedibus iuvant homines naves suas: vectrices sine labore trahunt, et pro pavore velorum utuntur passu prosperiore nautarum.*"

<sup>205</sup> Isidorus, *Etymologiae*, XIX, 1, 24.

Il traino, inoltre, rappresenta il modo più specifico di propulsione per la navigazione contro corrente. Le fonti, la presenza, nella zona di prua, di un baglio dalle dimensioni più ampie rispetto agli altri e i confronti archeologici<sup>206</sup> ed etnografici, hanno supportato in maniera evidente la ricostruzione di un piccolo albero di alaggio attraverso il quale poter effettuare il traino dell'imbarcazione. Da un punto di vista fisico, se la barca fosse trainata da una cima posta sull'estremità andrebbe a sbattere contro la riva a meno di uno sforzo eccessivo del timoniere per mantenere la barca parallela alla riva, mentre se fosse trainata da una cima centrale questa tenderebbe a ruotare attorno a questo punto, rendendo impossibile l'avanzamento dell'imbarcazione. Se si posiziona l'albero tra l'estremità avanti e il centro di gravità dello scafo, la barca acquisisce un andamento leggermente diagonale rispetto alla corrente; in questo modo, il risultato della forza di resistenza dell'acqua si applicherà alla parte anteriore della barca e tenderà a spostarla lontano dalla riva, in maniera tale da contrastare la trazione dalla riva e far avanzare lo scafo parallelamente a questa, limitando lo sforzo esercitato sul timone<sup>207</sup>.

Il baglio di prua, largo circa 40 cm, può essere abbastanza solido da essere predisposto per un albero dal diametro di 14 cm, ma, essendo posizionato a circa 1/5 della lunghezza, risulta più spostato in avanti confronto ad altri relitti, come Mainz 6 e Zwammerdam 2 e 4 in cui l'albero si posiziona a 1/4 della lunghezza oppure Woerden 1 in cui si trova a 1/3,4. In epoche più recenti si utilizzano delle cime posizionate a prua per aprire o chiudere l'angolo della cima di traino, per spostare verso prua la trazione; in questo modo le differenti posizioni degli alberi rinvenuti nei relitti sono in tutti i casi corrette.

---

<sup>206</sup> Il relitto fluviale gallo romano Arles Rhone 3 e la barca *caudicaria* rinvenuta a Fiumicino che presenta ancora la scassa.

<sup>207</sup> Rieth, *Des bateaux et des fleuves* cit., p. 106.

Tavole finali dello scafo completo di parte esistente e parte ricostruita

Le tavole e le rappresentazioni grafiche non devono essere considerate come un corredo illustrativo atto ad abbellire un testo, ma fanno parte del testo stesso al fine di studiare e interpretare un reperto archeologico; il tempo dedicato alla comprensione di un disegno dovrebbe essere lo stesso impiegato per la descrizione dell'oggetto all'interno del testo perché la sua rappresentazione grafica acquisisca pieno valore<sup>208</sup>. La necessità di rappresentare forme tridimensionali complesse su superfici bidimensionali come la carta ha portato allo sviluppo di un insieme di convenzioni per il disegno in cui l'oggetto è rappresentato attraverso una serie di viste ortogonali e perpendicolari tra loro; solitamente, nel caso di oggetti regolari come gli edifici, questi sono paralleli alla superficie rappresentata e sono integrati da sezioni dell'oggetto e anche la documentazione navale segue tradizionalmente questi principi grafici. Nelle pubblicazioni è infatti ancora predominante la rappresentazione grafica bidimensionale della realtà attraverso piante e sezioni che possono derivare da un rilievo manuale o da una rappresentazione della realtà tridimensionale visualizzata ortogonalmente senza il rischio di errori nella proiezione tra le varie viste<sup>209</sup>.

Diverse sono le tavole che sono state create sulla base della rappresentazione digitale del modello della barca di Santa Maria in Padovetere:

- La tavola del piano dei legni esterni ed interni dello scafo, seguendo le caratteristiche tipiche del disegno navale sui piani ortogonali<sup>210</sup>, uno longitudinale, lungo la fiancata destra, uno orizzontale, parallelo al piano di galleggiamento dell'imbarcazione e due piani verticali, trasversali alla chiglia e paralleli alla sezione maestra, uno a prua e uno a poppa (tav. 4.1-6);

- La tavola con il piano di costruzione e le linee d'acqua (tav. 4.1-7);

- La tavola degli elementi trasversali (ordinate e staminale) con il profilo dello scafo sezionato (tav. 4.1-8)

- La tavola con la rappresentazione dei legni rinvenuti, di quelli ipotizzati sulla base di elementi presenti e quelli ipotizzati su confronti (tav. 4.1-9);

<sup>208</sup> Cairoli Giuliani, *Archeologia. Documentazione* cit., p. 7.

<sup>209</sup> Yamafune et al, *Multi-Image Photogrammetry* cit., p. 14.

<sup>210</sup> Costa, *3-D reconstruction* cit., p.275-276; Dostal, *Laser scanning* cit., p. 102-109.

- La tavola con le fasi costruttive (tav. 4.1-10).

In riferimento a questo ultimo punto, possiamo determinare, sulla base di confronti archeologici<sup>211</sup> ed etnografici<sup>212</sup> che le tavole del fondo vengono posizionate come primo elemento sopra un ‘cantiere’, una piattaforma di lavoro caratterizzato solitamente da travi trasversali al fondo al fine di facilitare il posizionamento e l’assemblaggio delle tavole non essendo presente la chiglia. Venivano poi posizionate e inchiodate le due aste alla tavola centrale del fondo e successivamente si andavano quindi a connettere i due fianchi al fondo e alle aste lungo la battura. Non è possibile determinare se una volta connessi questi tre elementi, i successivi fossero il dormiente o le falche sovrapposte, ma si può supporre che prima venisse montato il dormiente sulle ordinate per dare robustezza al fianco e solo successivamente venissero posizionate e inchiodate le falche.

La possibilità di realizzare facilmente innumerevoli ricostruzioni tridimensionali e l’opportunità di disegnare direttamente in scala 1:1 attraverso la digitalizzazione delle forme sono solo alcuni degli elementi che favoriscono l’impiego sempre più ampio di queste tecniche in ambito archeologico<sup>213</sup>.

---

<sup>211</sup>E. Rieth e M. Guyon, *Les épaves Gallo-Romaines*, «Archaeonautica», 16, CNRS Editions, Paris, 2010, p. 43.

<sup>212</sup>F. Beaudouin, *Bateaux des fleuves de France*, 1985, Douarnenez.

<sup>213</sup>Coates, *Experimental boat* cit.; P. Tanner, *The testing and analysis of hypothetical ship reconstruction*, in Litwin, J. & W. Ossowsky (eds): *Baltic and beyond. Continuity and change in shipbuilding*, 2018, p. 143.

## 4.2

### La barca di Ercolano

Nei capitoli sul rilievo<sup>212</sup> abbiamo visto come grazie alle tecniche digitali sia possibile ottenere modelli tridimensionali delle imbarcazioni e del loro contesto circostante, sia nel caso di un sito archeologico che di una sala museale, e nel capitolo precedente<sup>213</sup> abbiamo visto come metodi di modellazione e di ricostruzione virtuale vengano utilizzati per lo studio della costruzione navale dell'imbarcazione di Santa Maria in Padovetere. In questo capitolo invece si mostrerà come le tecnologie digitali ed informatiche possano essere impiegate per elaborazioni video e installazioni multimediali al fine di divulgare e rendere fruibile il patrimonio archeologico e nello specifico un bene che al momento è chiuso al pubblico. Queste tecnologie possono essere applicate al vasto ambito del patrimonio culturale come un veicolo per raggiungere diversi scopi, come la conservazione, la ricostruzione, la documentazione, la ricerca e la promozione e la comunicazione<sup>214</sup>.

Negli ultimi anni, il campo dei beni culturali ha assistito ad un significativo sviluppo delle metodologie, delle tecnologie e degli strumenti per il rilievo archeologico strumentale, raggiungendo un impattante utilizzo delle ICT (*Information and Communication Technology*), le tecnologie dell'informazione e della comunicazione per la musealizzazione e la fruizione culturale<sup>215</sup>. Oggi, come mai prima d'ora, si riscontra un crescente interesse del mondo della cultura e della ricerca verso l'ambito informatico a dimostrazione di come le tecniche indagate possano essere applicate in diversi ambiti, da quelli umanistici come l'arte, la storia e l'archeologia, a quelli scientifici come la biologia o la medicina. Il *Digital Cultural Heritage*, così come viene abitualmente definito l'ambito del patrimonio culturale legato al mondo digitale, investe ambiti a diverse scale:

---

<sup>212</sup> Cfr. supra, p. e p.

<sup>213</sup> Cfr. supra, p.

<sup>214</sup> F. Bruno, S. Bruno, G. De Sensi, M.L. Luchi, S. Mancuso, M. Muzzupappa, *From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition*, «Journal of cultural heritage», 11, 2010, p. 42.

<sup>215</sup> A. De Maio, *Dalla Realtà al Virtuale: tecnologie innovative per lo studio e la valorizzazione del patrimonio culturale*, «Technology for all», 2018; Manfredini et al., p. 81; F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 91.

dal reperto, all'architettura, al territorio<sup>216</sup>. Tramite la digitalizzazione dei dati di scavo è quindi possibile restituire diversi prodotti adatti a molteplici usi; i contenuti complessi sono resi facilmente accessibili grazie alle diversificate applicazioni digitali che ne consentono l'apprezzabilità a diverse fasce di apprendimento<sup>217</sup>.

I concetti di ricerca scientifica, innovazione e tecnologia si inseriscono sempre più in ambito culturale e archeologico, in un coesistere necessario ed un continuo concretizzarsi di comuni intenzioni al servizio del visitatore, trovando armonicamente e inevitabilmente un punto di incontro e di fusione<sup>218</sup>. È importante che le installazioni multimediali per la fruizione digitale siano create su basi scientifiche corrette e accurate e le tecniche digitali di rilievo si sono dimostrate essenziali come base di partenza per ottenere modelli utilizzabili a scopi didattici e divulgativi del patrimonio culturale. 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 ultimamente sono 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<sup>219</sup>. Per la nostra ricerca siamo in possesso di un metodo di documentazione preciso che crea un modello virtuale realistico, offrendo un'opportunità di divulgazione e di presentazione ad un ampio pubblico di siti archeologici non più visibili.

Conseguentemente, anche i musei si stanno rinnovando e modernizzando per rimanere al passo con la ricerca e le realtà virtuali e immersive stanno modificando il concetto di musealizzazione in cui il museo stesso diventa una ICT più che un semplice contenitore di oggetti e manufatti. Negli ultimi anni, "museo virtuale" è un termine frequentemente utilizzato nel settore culturale, dove un oggetto, sia questo archeologico o artistico-pittorico, può essere virtualmente inserito in un contesto museale già esistente.

---

<sup>216</sup> R. Pierdicca, *Musei e Open Space per conoscere e far conoscere dai bene culturali aumentati allo spazio sensibile*, «Technology for all», 2018.

<sup>217</sup> Meschini A., *Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 15.

<sup>218</sup> E Longo, *Ricerca scientifica e tecnologia al servizio del visitatore*, «Technology for all», 2018.

<sup>219</sup> F. Bruno, S. Bruno, G. De Sensi, M.L. Luchi, S. Mancuso, M. Muzzupappa, *From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition*, «Journal of cultural heritage», 2010, p. 43; Meschini, *Tecnologie digitali cit.*, p. 17.

All'interno di musei e di parchi archeologici la musealizzazione viene adesso realizzata seguendo approcci diversi, con postazioni interattive nelle quali gli utenti possono interrogare e consultare le fonti storiche o archeologiche che descrivono un oggetto oppure visualizzare e navigare all'interno di un sito archeologico o di un museo attraverso i nuovi *devices* stereoscopici (*Head Mounted Display*). Realtà Aumentata e Realtà Virtuale stanno diventando il mezzo principale per comunicare in maniera interattiva con il visitatore, coinvolgendolo direttamente grazie alle ricostruzioni 3D e alle interfacce digitali per l'interazione<sup>220</sup>. Bisogna però spiegare la differenza tecnica che sussiste tra realtà aumentata e realtà virtuale. La prima è progettata per mantenere la connessione dell'utente con il mondo reale, aumentando le informazioni di un determinato contesto: per esempio, la visualizzazione contestuale sullo schermo sia del reperto che della sua ricostruzione o di informazioni archeologiche nel momento in cui il reperto stesso viene inquadrato da uno strumento digitale come un tablet o uno smartphone. Può essere considerata realtà aumentata anche la realizzazione di ologrammi all'interno del museo o di proiezioni di video sugli oggetti al fine di riprodurre i colori originali o elementi ricostruiti. Il senso della realtà virtuale o immersiva è invece convincere gli utenti di essere entrati in una realtà completamente nuova nel momento in cui si indossano i visori stereoscopici che escludono il mondo circostante ingannando il cervello dell'utente con una visione tridimensionale, come se l'utente si trovasse completamente immerso nel mondo antico. La realtà virtuale viene considerata come un nuovo modo di pensare la divulgazione culturale, come esperienza partecipativa in cui il pubblico non è più solamente uno spettatore passivo, ma diventa attivo e interagente.

Lo sviluppo di soluzioni semplici e modelli virtuali consentono una narrazione ed un'esposizione dei manufatti sempre più fluida ed evoluta, rivolgendosi ad un vasto numero di utenti e cercando di capirne le reali esigenze, studiandone i comportamenti, le preferenze o le abitudini di visita e sviluppando postazioni interattive e soluzioni informative e multimediali che possano essere capite e apprezzate<sup>221</sup>. L'obiettivo che ci si pone è quello di facilitare e migliorare l'accessibilità ai beni culturali attraverso l'utilizzo di strumenti multimediali che rispondano alle richieste comunicative del pubblico, dai

---

<sup>220</sup> Pierdicca, *Musei e Open Space* cit.

<sup>221</sup> Pierdicca, *Musei e Open Space* cit.

bambini delle scuole, agli studenti universitari, alle famiglie e ai pensionati, elaborando strumenti e prodotti didattici interattivi che permettano un'adeguata fruizione e comprensione dei beni culturali e dei siti archeologici. Per raggiungere tale obiettivo i musei e i siti archeologici devono predisporre dispositivi multimediali e postazioni interattive al fine di incentivare la partecipazione e l'uso dei beni archeologici attraverso strumenti di mediazione innovativi in grado di consentirne l'interpretazione a tutti i visitatori introducendo livelli di lettura e prospettive differenti<sup>222</sup>.

La barca di Ercolano è conservata in una sala museale chiusa al pubblico per ragioni logistiche ed economiche che non permettono di mantenere lo scafo ligneo in uno stato di conservazione adeguato. Il rilievo è stato svolto sia a scopo scientifico in modo da documentare uno scafo che giace in condizioni precarie che a scopo di fruizione virtuale della barca essendo la sala chiusa al pubblico. Il ripristino virtuale di un'imbarcazione o di un manufatto archeologico risulta di grande aiuto per poter fruire di un patrimonio archeologico che non può essere studiato e visitato per ragioni di conservazione<sup>223</sup>. Installazioni multimediali possono essere create all'interno del Parco Archeologico di Ercolano o del MAV, il Museo Archeologico Virtuale, in cui sono già presenti ricostruzioni e installazioni virtuali di Pompei ed Ercolano, tra le quali una inerente all'imbarcazione in questione mentre le restanti sono relative agli edifici e alla vita pubblica e privata delle due città. Due approcci possono essere applicati su quelli che vengono definiti “*virtual museums*” a seconda dei diversi contesti e dalle diverse necessità al fine della fruizione del bene: la ricostruzione di un museo già esistente, in cui l'utente può simulare una visita e godere del patrimonio archeologico in una modalità differente, oppure la creazione di uno spazio virtuale nuovo in cui navigare. Il museo virtuale vuole coniugare il concetto tradizionale di esposizione e divulgazione del patrimonio e le tecnologie digitali, virtuale e multimediali come nuovo mezzo di comunicazione.

---

<sup>222</sup> F. Anichini, G. Gattiglia, *La storia nascosta nei dati*, «MapPapers», 1-IV, 2014, p. 2.

F. Cochetti, *Progetto Caracalla Full Immersion Audio-video guida delle Terme di Caracalla*, «Technology for all», 2018; Meschini, *Tecnologie digitali* cit., p. 15.

<sup>223</sup> J.-A. Beraldin, M. Picard, S.F. El-Hakim, G. Godin, V. Valzano, A. Bandiera, *Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment*, «SPIE: Electronic Imaging 2005. Videometrics IX», 2005.

I tour virtuali realizzati per questa ricerca permettono all'utente di navigare all'interno di una porzione del sito archeologico e della sala museale, visualizzando gli oggetti e l'imbarcazione in mostra; il primo tour realizzato all'interno del museo permette all'utente di avere una diretta interazione con gli oggetti, visualizzandone contenuti informativi scientifici, mentre nel secondo, all'interno della città di Ercolano, il tasso di interattività è praticamente nullo ma con questa tipologia di navigazione si vuole agire sulle corde emotive dello spettatore proiettandolo direttamente in un'epoca antica.

Inoltre, con questo caso studio si vuole porre l'attenzione sulla mancata fruibilità che il patrimonio archeologico è costretto a subire; è necessario un più aperto accesso dei dati al fine di far diventare i dati stessi e il patrimonio un bene comune effettivamente utilizzabile dal pubblico. E per diventare tale, il dato archeologico deve subire una trasformazione per poter essere percepito e apprezzato da un'ampia utenza senza però perdere la correttezza scientifica<sup>224</sup>.

La progettazione e la realizzazione di un tour virtuale che abbia le informazioni necessarie e il realismo delle immagini e delle ricostruzioni all'interno delle quali si naviga, deve tenere conto delle capacità di calcolo del dispositivo mobile che verrà impiegato per la visualizzazione del prodotto finale. Il giusto rapporto complessità del modello di base e il dettaglio necessario per un determinato fine determinano la scelta del supporto visivo utilizzabile e la qualità di esportazione del modello digitale<sup>225</sup>.

---

<sup>224</sup> A. Palombini, *Raccontare storie, raccontare Storia. La divulgazione del patrimonio nel solco delle tecniche narrative*, «MapPapers», 1-IV, 2014, p. 3.

<sup>225</sup> Coralini A., Vecchietti E., *L'archeologia attraverso un 3D virtual model*, in *Ut natura ars. Virtual Reality e archeologia*, Atti della Giornata di Studi (Bologna, 22 aprile 2002), a cura di A. Coralini, D. Scagliarini Corlaita, Imola, Universitu Press Bologna, 2007, p. 22; Scopigno R., Cignoni P., Montani C., *High quality digital acquisition and virtual presentation of three-dimensional models*, «Archeologia e Calcolatori», Supplement 1, 2007, p. 173.

## 4.2.1

### Il tour virtuale nel museo

Per la realizzazione del tour virtuale all'interno del museo sono state impiegate alcune immagini sferiche ottenute dal rilievo laser scanner, scegliendo quelle che rappresentassero il museo in tutte le zone dove erano presenti i reperti e che definissero il percorso più o meno prestabilito che l'utente percorre abitualmente. Sono state quindi selezionate un'immagine della zona di ingresso dove sono presenti gli oggetti relativi alle attività marinare (Fig. 4.2-1), un'immagine dello scafo principale visto dalla passerella rialzata tale da visualizzare lo scafo da una zona migliore e altre due immagini della sala dove sono presenti gli altri pannelli informativi e la parte di prua staccata dallo scafo (Fig. 4.2-2).

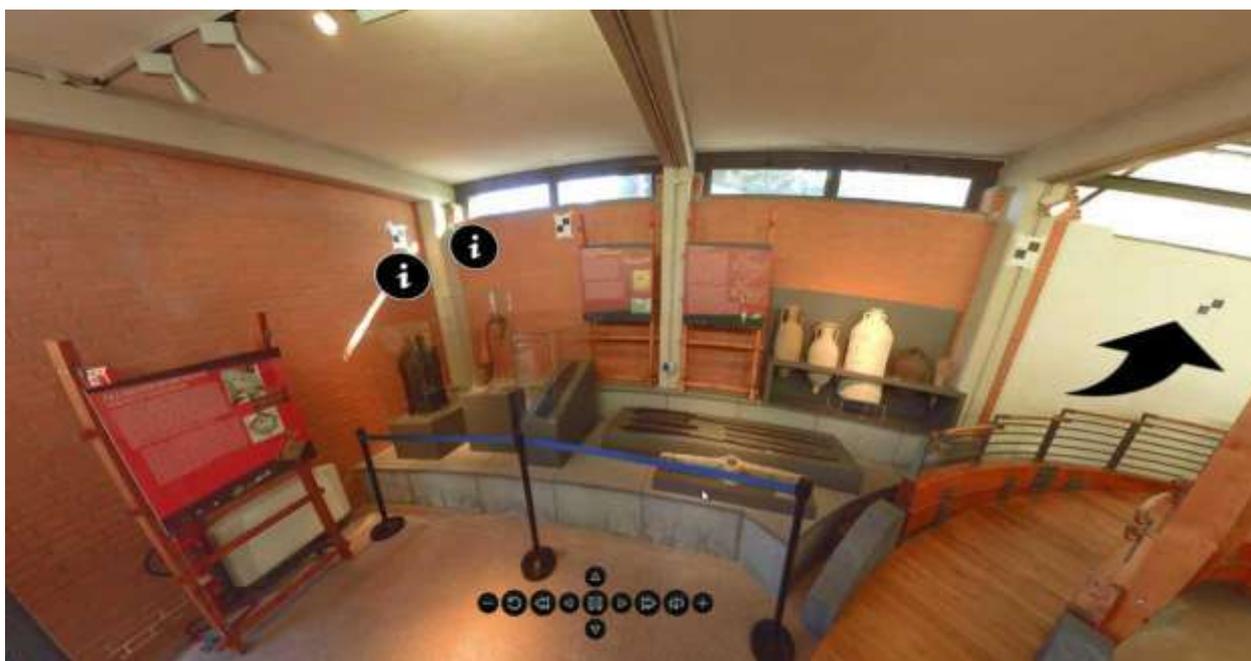


Fig. 4.2-1. Fermo immagine del tour virtuale della zona dell'ingresso con in mostra le attrezzature marinare.



Fig. 4.2-2. Fermo immagine del tour virtuale della zona vicino alla prua dello scafo.

Attraverso il software *3DVista* è stato creato un percorso visivo unico attraverso il quale l'utente può spostarsi da un punto all'altro attraverso delle frecce. La visualizzazione può essere effettuata sia attraverso uno schermo digitale che un visore; il software crea in automatico una doppia visione dell'immagine sferica nel caso dell'utilizzo del visore che permette all'utente di leggere le due immagini attraverso la tecnica stereoscopica creando un'illusione di profondità e, quindi, trasformando la coppia di immagini nell'esperienza di un mondo tridimensionale (Fig. 4.2-3).

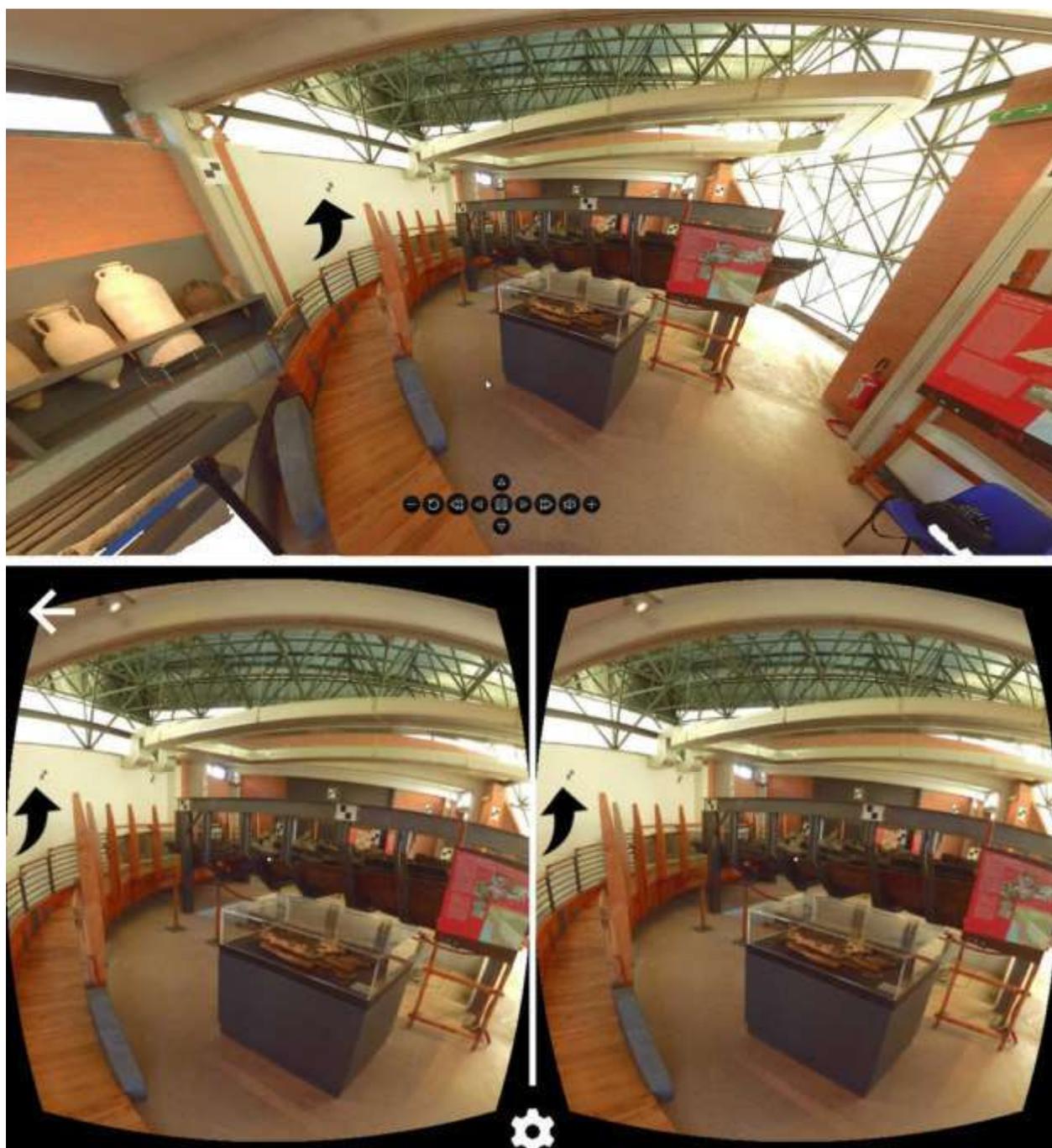


Fig. 4.2-3. Le diverse visualizzazioni possibili all'interno del software 3DVista

All'interno del tour virtuale sono stati inseriti alcuni pannelli informativi posizionati vicino agli oggetti presenti in mostra che si attivano nel momento in cui l'utente decide di selezionare il pulsante 'info' presenti (Fig. 4.2-4-5).



Fig. 4.2-4. Pannello informativo relativo allo scafo di Ercolano.



Fig. 4.2-5. Pannello informativo relativo all'argano.

Le informazioni stesse possono essere realizzate a pannello oppure a video, come quello creato per la zona di prua in cui sono evidenziate e spiegate le fasi di distacco della prua collassata sullo scafo e la rotazione che questa deve compiere per essere posizionata correttamente e ricostruire lo scafo nelle sue forme corrette (Fig. 4.2-6).



Fig. 4.2-6. Il video dimostrativo del distacco delle tavole della zona di prua.

Questo metodo di rappresentazione del soggetto è semplice ma efficace a fini divulgativi; l'utilizzo di immagini sferiche che vengono visualizzate attraverso i visori stereoscopici danno l'impressione all'utente di trovarsi all'interno dell'ambientazione stessa. Negli ultimi tempi, questi *devices* di visualizzazione hanno raggiunto una buona qualità di rappresentazione ed immersività in una scena virtuale grazie alle schede video sempre più potenti e alle tecniche di computer grafica performanti ed accurate.

Si è pensato che fosse utile ricreare un tour virtuale nella sala museale per permettere al pubblico di accedervi virtualmente in questa fase di chiusura della sala e per realizzare un video immersivo e interattivo da inserire nella pagina web del museo e stimolare la curiosità per una visita qualora ci siano le possibilità di riaprire la sala.

## 4.2.2

### **Il tour virtuale nel sito archeologico**

Una seconda installazione virtuale sulla barca di Ercolano è realizzata sui dati ottenuti attraverso il rilievo fotogrammetrico. Oltre alle immagini sferiche, infatti, i laser scanner e le tecniche di fotogrammetria sono in grado di fornire modelli 3D di manufatti ed ambienti estremamente dettagliati, permettendo di implementare la visualizzazione realistica della realtà virtuale<sup>226</sup>.

Attraverso l'impiego di software diversificati in base al loro utilizzo è possibile navigare all'interno della nuvola di punti in maniera virtuale; questa, impiegata come base di supporto, può essere lavorata in modi differenti a seconda dello scopo del progetto o del tipo di risultato richiesto. Nel caso di Santa Maria in Padovetere, la nuvola è servita come partenza per la modellazione poligonale per ottenere le forme dello scafo originali o per ricreare lo scavo e permettere di rivivere e di interagire con il contesto di rinvenimento dell'imbarcazione; nel caso di Ercolano è stata invece utilizzata per ricreare il contesto storico della barca e navigare all'interno della nuvola di punti nella strade e nelle terrazze antistanti la spiaggia.

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 (Fig. 4.2-7). La nuvola di punti rappresenta quella porzione della città di Ercolano prospiciente al mare, dove sono presenti le grandi terrazze che si affacciavano sulla spiaggia e i magazzini, le strutture coperte impiegate come cantieri navali e rimessaggio delle barche e delle attrezzature da pesca (Fig. 4.2-8). Il modello è stato scalato in base a una misurazione diretta sul sito ed è stato posizionato sulla verticale corretta considerando i piani orizzontali e verticali degli edifici; sull'ortofoto creata è stata inserita la pianta di scavo realizzata nel 1982 della parte relativa alla spiaggia in cui sono presenti i magazzini, gli scheletri e l'imbarcazione (Fig. 4.2-9).

---

<sup>226</sup> De Maio, *Dalla Realtà al Virtuale* cit.



Fig. 4.2-7. Alcune delle immagini impiegate per la strisciata fotogrammetrica del sito archeologico.



Fig. 4.2-8. Modello fotogrammetrico del sito archeologico di Ercolano.



Fig. 4.2-9. Pianta del sito archeologico con l'inserimento della pianta originale degli scavi.

In base alla pianta di scavo, siamo stati in grado, di collocare la barca nella posizione in cui venne rinvenuta e quindi di riproporre l'esatta posizione in cui si è arenata, si è capovolta ed è stata ricoperta dalle ceneri durante l'eruzione del 79 d.C. Attraverso l'utilizzo del software *Pointools*, la nuvola di punti del sito ottenuta è stata integrata con

l'inserimento e il posizionamento del modello per punti della barca, precedentemente rilevato nella sala espositiva sempre tramite il rilievo fotogrammetrico<sup>227</sup> (Fig. 4.2-10). È stata quindi creata una navigazione attraverso gli edifici simulando il percorso che si poteva compiere per raggiungere la spiaggia dalla città.

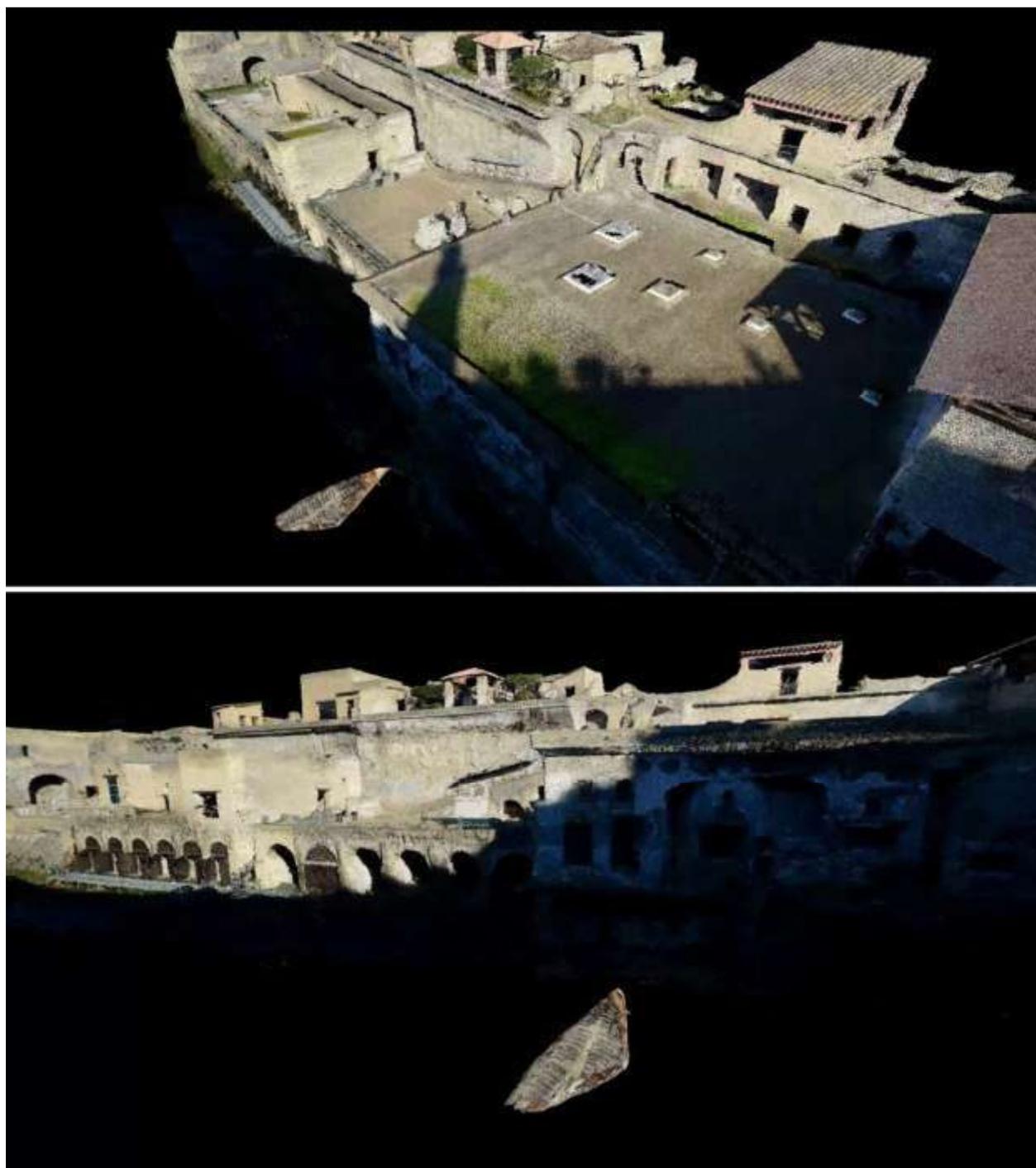


Fig. 4.2-10. Nuvola di punta completa del sito archeologico con l'imbarcazione nella posizione di rinvenimento.

<sup>227</sup> Cfr. *supra* cap. 3.2.1., p. 125.

Una delle principali problematiche della comunicazione di informazioni e dati tridimensionali è legata ai grandi oneri computazionali nel momento in cui ci si confronta con elaborazioni tridimensionali alle quali è richiesta l'accuratezza del dettaglio come principale requisito<sup>228</sup>. Per ovviare a tale problema, diverse possono essere le soluzioni conseguibili, tra le quali l'utilizzo della visualizzazione esclusivamente della nuvola di punti più leggera oppure la decimazione<sup>229</sup> della mesh e l'applicazione di una texture che nasconda le imperfezioni metriche causate dalla inferiorità numerica dei triangoli. Attraverso questa visualizzazione interattiva l'utente, navigando all'interno del modello può immedesimarsi negli antichi abitanti della città, può simulare il percorso di visita del sito di Ercolano, può visualizzare gli edifici in modo ravvicinato e diversamente dal contesto reale può visualizzare l'imbarcazione dove è stata rinvenuta. Grazie alle più innovative tecnologie digitali, il pubblico può interfacciarsi con il patrimonio culturale ed esplorarlo in maniera diversa ed efficace (Fig. 4.2-11).



Fig. 4.2-11. Vista dell'imbarcazione e della spiaggia dalle terrazze degli edifici.

<sup>228</sup> Meschini, *Tecnologie digitali* cit., p. 19.

<sup>229</sup> Decimazione = Riduzione del numero di punti della nuvola o dei triangoli che compongono la *mesh*.

**5**

## **Conclusioni**

---

---

## 5

### Conclusioni

L'esperienza affrontata in questi capitoli ha voluto evidenziare come le nuove tecnologie di rilievo e di visualizzazione, i supporti ottici e grafici, fino ad arrivare alla realtà virtuale e aumentata, supportino efficacemente gli studiosi e i ricercatori nella documentazione, nello studio e nella fruizione dei beni culturali. Si è voluto mostrare il corretto approccio nella documentazione del patrimonio archeologico attraverso l'utilizzo e l'integrazione di diverse tecnologie, analizzando il potenziale di ognuna di queste a seconda del contesto di utilizzo e delle finalità richieste. La documentazione del patrimonio archeologico è necessaria per il suo studio conoscitivo e per la sua conservazione e le tecnologie digitali virtuali, contraddistinte da accuratezza, portabilità, basso costo e velocità di acquisizione, sono essenziali per i siti archeologici. In particolare, all'interno della disciplina archeologico-tecnologica della geomatica applicata ai beni culturali, i contesti navali e le imbarcazioni antiche presentano determinate specificità geometriche e ambientali, sia per quanto riguarda il loro rilievo digitale che la loro conservazione e fruizione. Le imbarcazioni infatti sono un oggetto peculiare a causa del particolare tipo di materiale, del colore omogeneo del legno, della struttura dettagliata e delle condizioni degradate di quest'ultima, che rendono difficile la distinzione degli elementi e di conseguenza la loro documentazione.

Una delle funzioni principali delle tecniche digitali di rilievo è rappresentata dalla possibilità di estrarre, integrare e condividere informazioni archeologiche precise e accurate, ottenibili dai modelli tridimensionali in scala 1: 1, anche senza avere a disposizione il sito reale, che in molti casi può risultare non più accessibile. Dal punto di vista metodologico, fondamentale risulta la scelta delle tecniche di rilievo impiegabili nei diversi contesti e l'integrazione di queste. Si è visto come attualmente il rilievo laser scanning e la fotogrammetria multi-immagine siano le più avanzate metodologie di rilevamento e siano due eccellenti soluzioni per ottenere la documentazione di un'imbarcazione in legno, caratterizzate da materiale degradato e omogeneo, da complessità geometrica e preponderanti mancanze. Nel percorso di studi si è data

particolare importanza al rilievo topografico come tecnica imprescindibile per l'integrazione delle metodologie di rilievo, delle nuvole di punti fotogrammetriche e delle nuvole laser scanning.

I modelli virtuali e le informazioni spaziali tridimensionali riescono a conferire maggiore enfasi ai siti archeologici rispetto alle piante bidimensionali e alle immagini, le quali non mostrano la profondità e l'effettiva spazialità di uno specifico contesto. Attraverso la realizzazione di questi modelli virtuali è stato possibile realizzare diverse tipologie di visualizzazione: un modello tridimensionale ricostruito dell'imbarcazione di Santa Maria in Padovetere a Comacchio e del suo contesto ambientale e il modello della barca di Ercolano inserito nella stanza del museo in cui si trova o nella spiaggia in cui è stato rinvenuto in prossimità della città antica. Questi sono stati utilizzati con diverse finalità, legate sia all'ambito scientifico che all'ambito della comunicazione.

Oggi, le tecniche di indagine tridimensionale sono ampiamente utilizzate in archeologia per documentare il patrimonio culturale, poiché sono caratterizzate da velocità e semplicità di acquisizione sul campo e permettono di ottenere una documentazione precisa dal punto di vista tecnico e allo stesso tempo veloce durante le operazioni sul campo. Oltre alle elevate precisioni metriche e di caratterizzazione cromatica dell'oggetto ottenibili attraverso l'utilizzo delle tecniche digitali, la tesi ha voluto delineare il beneficio dato dalle scansioni laser e dalle immagini fotogrammetriche per garantire la continuità degli scavi e la velocità di acquisizione, fondamentali nell'indagine di un'imbarcazione lignea. In situazioni estreme, come nel nostro caso, dove la priorità è ricoprire immediatamente la barca al fine di non stressare il legno e non rallentare lo scavo, una tecnica di rilievo rapida e veloce che richieda solo poche ore per raccogliere i dati rappresenta la perfetta soluzione per realizzare una documentazione completa e precisa. Al termine della nostra ricerca si è capito come nessuna tecnica contenesse efficacemente tutte le caratteristiche necessarie alle diverse richieste, quali la flessibilità nella fase di acquisizione dei dati, la completa automatizzazione del processo di generazione di modelli, l'accuratezza geometrica, il foto-realismo del risultato, la "leggerezza" e portabilità dei file e i costi contenuti; da qui la necessità dell'integrazione delle tecniche o almeno il loro confronto.

Questi metodi di documentazione e le successive elaborazioni dei dati hanno combinato le tecniche di rilievo consolidate con i nuovi approcci di modellazione e visualizzazione, sfruttando gli sviluppi delle tecnologie digitali che sono diventate accessibili anche da un punto di vista economico e applicativo. Tale sviluppo metodologico, soprattutto per la parte di restituzione partendo dal modello virtuale deformato della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio, non è stato esente da rischi e ha comportato lunghi processi di calcolo e di elaborazione, ma l'efficacia di queste nuove procedure nel soddisfare i rigorosi requisiti della ricostruzione navale è stata ampiamente confermata. Un importante contributo delle tecniche della geomatica è stato sperimentato per la modellazione virtuale delle parti lignee esistenti e deformate e di quelle mancanti di questa imbarcazione partendo da un dato di scavo difficilmente indagabile dal punto di vista delle linee d'acqua effettive dello scafo se non attraverso la sua ricostruzione. L'aumento progressivo nell'esperienza tecnica in questi nuovi approcci digitali ha permesso e permetterà ai ricercatori di specializzarsi sempre di più nell'applicazione metodologica in ambiti diversi.

La modellazione dello scafo documentato *in situ* ha permesso la decodificazione delle forme complete dello scafo, consentendoci di studiare e analizzare una tipologia di imbarcazione peculiare sia per il contesto mediterraneo che per il contesto centro-nord europeo. La possibilità di operare con le tecniche digitali più innovative rende le operazioni di studio più veloci ed efficienti, in particolare nelle fasi di ipotesi ricostruttive degli elementi non esistenti, permettendo di effettuare diverse ipotesi all'interno dello stesso modello virtuale.

In aggiunta alla scientificità del rilievo, la rappresentazione di un reperto archeologico attraverso le tecnologie digitali e i sistemi stereoscopici di visualizzazione servono a promuovere la conoscenza del patrimonio da parte di diverse categorie di utenti, portando la realtà virtuale e immersiva a diventare sempre più la nuova frontiera e la nuova concezione di fruizione interattiva di un bene culturale. La ricostruzione virtuale viene quindi considerata contestualmente ricerca scientifica da un lato e comunicazione dei beni culturali dall'altro, senza che queste debbano essere disgiunte o distinte,

permettendo una pluralità di utilizzi che sta comportando un impiego sempre maggiore delle tecnologie digitali da parte di tutti gli ambiti legati al patrimonio archeologico.

Nell'era dei media digitali applicati al patrimonio culturale, i risultati ottenuti, come i tour virtuali, i video ricostruttivi e le installazioni interattive, hanno fornito contenuti versatili sia per la ricerca scientifica che per esposizioni museali, che permettono al pubblico la comprensione di molti aspetti dell'archeologia navale con possibili sviluppi futuri riguardo ad un ampio ventaglio di ambiti divulgativi. Le tecnologie non possono sostituire la metodologia di studio e la conoscenza, ma si è giunti ormai a consolidare l'impiego delle tecniche digitali più evolute come base di studio dei reperti e degli scavi archeologici e considerandole quasi predominanti nella comunicazione.

Lo scambio di conoscenze metodologiche e l'interdisciplinarietà di questa tesi, contemplando sia l'ambito umanistico che quello scientifico, hanno infatti offerto un ambiente favorevole di crescita dello studio delle imbarcazioni e nelle discipline archeologiche navali, ottimizzando lo sviluppo di alternative credibili alle tecniche tradizionali, evidenziando come l'approccio corretto alla documentazione del patrimonio culturale sia rappresentato da una sinergia e integrazione di tecnologie e saperi.

## **Elenco immagini e tavole**

---

## Elenco immagini

### Capitolo 2.1. Il rilievo e la documentazione in archeologia

- Fig. 2.1-1. Proiezioni ortogonali dello scafo interno del trabaccolo Marin Faliero. p. 13
- Fig. 2.1-2. Vista assonometrica del modello tridimensionale dello scafo interno del trabaccolo Marin Faliero. p. 13
- Fig. 2.1-3. Rilievo per trilaterazione attraverso il *software Site Recorder* del relitto del Mary Rose (da Site Recorder, User Manual). p. 19
- Fig. 2.1-4. Relitto di *Sveti Pavao*, isola di Mljet, Croazia. p. 21
- Fig. 2.1-5. Pianta e sezioni del relitto *Sveti Pavao* (elaborazione: C. Alfonso). p. 22
- Fig. 2.1-6. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione *wireframe*. p. 23
- Fig. 2.1-7. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione ombreggiata. p. 23
- Fig. 2.1-8. Modello tridimensionale del relitto *Sveti Pavao*, visualizzazione renderizzata. p. 24

### Capitolo 2.2. Il rilievo fotogrammetrico

- Fig. 2.2-1. Rette passanti per il punto A sull'oggetto e per il punto A' e A'' sulle immagini. (da Cannarozzo *et al.*, 2012, p. 6). p. 28
- Fig. 2.2-2. Rette passanti per il punto A sull'oggetto e per il punto A' e A'' sulle immagini. p. 28
- Fig. 2.2-3. Esempio di sovrapposizione delle immagini della strisciata ortogonale. p. 29
- Fig. 2.2-4. Schema delle strisciate ortogonali con convergenti e

	immagini radiali.	p. 30
Fig. 2.2-5.	Schema delle strisciate ortogonali.	p. 31
Fig. 2.2-6.	Schema delle strisciate radiali.	p. 31
Fig. 2.2-7.	Schema della camera. Orientamento interno.	p. 32
Fig. 2.2-8.	Schema delle camere allineate. Orientamento esterno relativo. (da Cannarozzo <i>et al.</i> , p.53)	p. 32
Fig. 2.2-9.	Fase della restituzione. Procedimento analogico.	p. 33
Fig. 2.2-10.	Relitto di <i>Cape Stoba</i> .	p. 35
Fig. 2.2-11.	Modello virtuale dello scavo del 2012 del relitto di <i>Cape Stoba</i> .	p. 36
Fig. 2.2-12.	Modello virtuale dello scavo del 2015 del relitto di <i>Cape Stoba</i> .	p. 37
Fig. 2.2-13.	Alcune delle camere fotografiche impiegate: Nikon D610, GoPro Hero4 Session, Huawei P8-GRA-L09, Nikon KeyMission 360 sferica.	p. 39
Fig. 2.2-14.	Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola sparsa.	p. 42
Fig. 2.2-15.	Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola sparsa e posizione delle camere.	p. 42
Fig. 2.2-16.	Trabaccolo Nuovo Trionfo: nuvola densa.	p. 43
Fig. 2.2-17-18.	Trabaccolo Nuovo Trionfo, particolare: <i>mesh</i> con colore di default e con valori RGB.	p. 43
Fig. 2.2-19.	Trabaccolo Nuovo Trionfo, particolari: <i>mesh</i> texturizzata.	p. 44

### Capitolo 2.3. Il rilievo laser scanning

Fig. 2.3-1.	Alcune delle tipologie di laser scanner: a sinistra due laser distanziometrici, a destra due laser triangolatori.	p. 46
Fig. 2.3-2.	Alterazioni del raggio laser al contatto con un oggetto.	p. 47
Fig. 2.3-3.	Schema del raggio di luce nei laser scanner a	

	comparazione di fase.	p. 48
Fig. 2.3-4.	Schema del raggio di luce nei laser triangolatori.	p. 48
Fig. 2.3-5.	Laser Scanner Faro Focus 3D 120. Rilievo barca di Santa Maria in Padovetere, 2015.	p. 50
Fig. 2.3-6.	Laser Scanner Faro Focus 3D 120. Rilievo barca di Santa Maria in Padovetere, 2015. Confronto tra nuvola di punti intensity e nuvola di punti colorata.	p. 51
Fig. 2.3-7.	Laser Scanner triangolatore Minolta Vivid-9i. Rilievo modello ligneo del brigantino Cygne.	p. 53

#### Capitolo 2.4. Il rilievo topografico

Fig. 2.4.1.	Stazione Totale Topcon GPT 2005 (Università degli Studi di Milano)	p. 57
Fig. 2.4.2.	Stazione Totale Leica TCR 1103 (Laboratorio di fotogrammetria, Università Iuav di Venezia).	p. 57

#### Capitolo 3.1. Il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio

Fig. 3.1-1.	Il sito di Santa Maria in Padovetere con il relitto in primo piano affianco alla chiesa.	p. 59
Fig. 3.1-2.	Rappresentazione dello scavo, con inserita l'unità stratigrafica relative all'argilla che ricopre la parte bassa dello scafo.	p. 62
Fig. 3.1-3.	Alcune stazioni della rete topografica di inquadramento (stazioni 200, 500, 700, 1000, 2000) e della rete di appoggio al laser scanner (target L01, L02, L09, L10).	p. 65
Fig. 3.1-4.	Fase del rilievo per punti di dettaglio della barca di Santa	

---

	Maria in Padovetere.	p. 66
Fig. 3.1-5.	Fase del rilievo per punti di dettaglio della barca di Santa Maria in Padovetere.	p. 67
Fig. 3.1-6.	Elenchi dei punti di dettaglio del rilievo con stazione totale stilati in fase di scavo.	p. 68
Fig. 3.1-7.	La barca di Santa Maria in Padovetere rilevata per punti di dettaglio dalla stazione 700, totale e particolare.	p. 69
Fig. 3.1-8.	Particolare dei punti in cui si riescono a leggere le sigle utilizzate per riconoscere gli elementi lignei dello scafo.	p. 69
Fig. 3.1-9.	Restituzione parziale del rilievo di dettaglio realizzato con la Stazione Totale.	p. 70
Fig. 3.1-10.	Nuvola di punti sparsa e posizione delle camere dopo la fase di allineamento delle immagini del rilievo fotogrammetrico del 3 ottobre 2014.	p. 74
Fig. 3.1-11.	Nuvola di punti sparsa e posizione delle camere dopo la fase di allineamento delle immagini del rilievo fotogrammetrico del 23 ottobre 2014.	p. 75
Fig. 3.1-12.	Nuvola di punti sparsa e posizione delle camere dopo la fase di allineamento delle immagini del rilievo fotogrammetrico del 21 novembre 2014.	p. 76
Fig. 3.1-13.	Schema esplicativo del rapporto della scala nominale.	p. 78
Fig. 3.1-14.	Realizzazione del fotomosaico e unione delle immagini raddrizzate tramite coordinate topografiche dei punti.	p. 81
Fig. 3.1-15.	Sovrapposizione in trasparenza del fotomosaico ottenuto con il raddrizzamento e dell'ortofoto ottenuta con il rilievo fotogrammetrico.	p. 83
Fig. 3.1-16.	Fotografia dello scavo scattata in una giornata di sole.	p. 85
Fig. 3.1-17.	Fotografia dello scavo scattata in una giornata nuvolosa.	p. 85
Fig. 3.1-18-19.	Due immagini esplicative della situazione alla quota più profonda in cui la tavola di fasciame è sommersa	p. 86

- dall'acqua di falda.
- Fig. 3.1-20. Nuvola di punti, mesh e posizione delle camere della zona di poppa. Rilievo fotogrammetrico del 9 settembre 2015. p. 87
- Fig. 3.1-21. Nuvola di punti, mesh e posizione delle camere dello scafo intero. Rilievo fotogrammetrico del 15 settembre 2015. p. 88
- Fig. 3.1-22. Unione dei rilievi fotogrammetrici del 9 e del 15 settembre 2015. Particolare della zona di poppa. p. 89
- Fig. 3.1-23. Unione delle nuvole fotogrammetriche del 2014, in azzurro, e del 2015, in verde. p. 90
- Fig. 3.1-24. Particolare delle ordinate estrapolate dalla *mesh* totale dello scafo. p. 91
- Fig. 3.1-25. Una delle stazioni all'interno dello scavo utilizzate per il rilievo laser scanning. Campagna di rilievo 2014. p. 94
- Fig. 3.1-26. Vista piana di una delle scansioni del rilievo laser scanning. p. 95
- Fig. 3.1-27. Vista piana di una delle scansioni del rilievo laser scanning con indicati i target impiegati per l'allineamento. p. 96
- Fig. 3.1-28. Nuvola di punti dell'imbarcazione, realizzata con rilievo laser scanning del 2014. p. 96
- Fig. 3.1-29. Una delle stazioni all'interno dello scavo utilizzate per il rilievo laser scanning. Campagna di rilievo 2015. p. 97
- Fig. 3.1-30. Disegni della tecnica costruttiva "a cucitura" e delle caviglie della barca cucita del Lido di Venezia. (Disegno di G. Boetto, da Beltrame 1996, p. 40) p. 101
- Fig. 3.1-31. Le tavole del fianco collassate che hanno permesso di studiare la cucitura sul lato esterno. p. 102
- Fig. 3.1-32. Fotografia e schema ricostruttivo della cucitura interna. p. 103

Fig. 3.1-33.	Frammento di trefolo a treccia dalla cucitura.	p. 103
Fig. 3.1-34.	La barca di Santa Maria in Padovetere al termine dello scavo.	p. 105
Fig. 3.1-35.	Zona di poppa dello scafo in cui si nota sulla destra la calettatura degradante dello spessore della tavola sovrapposta.	p. 107
Fig. 3.1-36.	Zona di poppa dello scafo.	p. 108
Fig. 3.1-37.	Schizzo misurato dell'asta di poppa dello scafo.	p. 109
Fig. 3.1-38.	Ordinate trasversali e particolare con archetti per le cuciture e fori di biscia.	p. 111
Fig. 3.1-39.	Parte centrale dello scafo con lavorazione curva del paiolato e assenza di cuciture nel fondo.	p. 113

### Capitolo 3.2. Il rilievo della barca di Ercolano

Fig. 3.2-1.	La barca di Ercolano all'interno della sala espositiva del Parco Archeologico.	p. 117
Fig. 3.2-2.	Pianta degli scavi dell'area del litorale della città di Ercolano.	P. 118
Fig. 3.2-3.	Sezione dello scavo relativa all'imbarcazione (da Sigurdsson et al., <i>The eruption of Vesuvius</i> cit., p. 367)	p. 120
Fig. 3.2-4.	Fasi di recupero dell'imbarcazione attraverso delle rampe, 1990.	p. 121
Fig. 3.2-5.	Particolare dell'imbarcazione in cui si notano le condizioni sofferenti del legno.	p. 122
Fig. 3.2-6.	Disegno e modello virtuale dell'imbarcazione di Ercolano.	p. 123
Fig. 3.2-7.	Alcune immagini della strisciata fotogrammetrica realizzata con la Nikon D3200.	p. 126

---

Fig. 3.2-8.	Nuvola di punti con la posizione delle camere nella fase di orientamento relativo.	p. 126
Fig. 3.2-9.	Alcune immagini della strisciata fotogrammetrica realizzata con la GoPro Hero4 Session.	p. 129
Fig. 3.2-10.	Fase del rilievo laser scanning.	p. 134
Fig. 3.2-11.	Vista piana della scansione realizzata all'ingresso della sala museale.	p. 135
Fig. 3.2-12.	Vista delle scansioni a prua e a poppa dell'imbarcazione.	p. 135
Fig. 3.2-13.	Scansione laser in cui sono evidenti i target utilizzati per l'allineamento delle nuvole di punti.	p. 136
Fig. 3.2-14.	Fasi dell'allineamento realizzato 'nuvola su nuvola'.	p. 136

#### Appendice al Capitolo 3: Il confronto tra le nuvole di punti

Fig. 3.A-1.	Diagramma a campana di Gauss relativo al confronto tra le nuvole 2014 e 2015.	p. 139
Fig. 3.A-2.	Confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo fotogrammetrico.	p. 140
Fig. 3.A-3.	Confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo laser scanning.	p. 140
Fig. 3.A-4.	Confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo laser scanning e la fotogrammetria	p. 141
Fig. 3.A-5.	Particolare della doppia nuvola di punti del confronto tra le nuvole ottenute con il rilievo laser scanning e quello fotogrammetrico.	p. 142
Fig. 3.A-6.	Particolare dell'asta di poppa nel confronto tra le nuvole di punti ottenute con il rilievo laser scanning e la fotogrammetria.	p.143
Fig. 3.A-7.	Confronto realizzato sulla nuvola di punti fotogrammetrica in riferimento a quella prodotta dal laser	

	scanner.	p. 145
Fig. 3.A-8.	Confronto realizzato sulla nuvola di punti prodotta dal laser scanner in riferimento a quella fotogrammetrica.	p. 145
<u>Capitolo 4.1. Applicazioni virtuali: la barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio</u>		
Fig. 4.1-1	Una delle parti suddivise della mesh del fondo e le linee relative agli elementi costruttivi.	p. 151
Fig. 4.1-2	a. Linee corrispondenti agli elementi lignei. b. Pianta proiettata sulle <i>mesh</i> del 2015.	p. 152
Fig. 4.1-3	Porzione del fondo.	p. 153
Fig. 4.1-4	a. Rappresentazione spezzata dei comenti visibili. b. Particolare di poppa con tavole del fondo, comenti e cucitura.	p. 154
Fig. 4.1-5	Restituzione delle linee delle ordinate di sinistra.	p. 155
Fig. 4.1-6	a. Deformazione delle tavole del fondo. b. Sviluppo delle tavole sul piano orizzontale.	p. 160
Fig. 4.1-7	Linee per lo studio della simmetria del fondo.	p. 160
Fig. 4.1-8	Ordinate come rinvenute in scavo. a. vista in sezione trasversale. b. vista longitudinale.	p. 161
Fig. 4.1-9	Ordinate raddrizzate. a. vista in sezione trasversale. b. vista longitudinale.	p. 162
Fig. 4.1-10	Ordinate del fondo con fori di biscia e archetti per i cordoli di calafataggio.	p. 163
Fig. 4.1-11	Asta di poppa originale (mesh di colore marrone) e ricostruita (volume di colore grigio).	p. 163
Fig. 4.1-12	Viste dello scafo ruotato con ancora gli elementi deformati.	p. 164
Fig. 4.1-13	Asta ruotata e triangoli delle tavole del fianco nella zona di poppa.	p. 165

---

Fig. 4.1-14	Suddivisione in triangoli delle tavole del fianco e delle estremità del fondo per raddrizzare le tavole.	p. 166
Fig. 4.1-15	Ordinate del fondo in fase di scavo.	p. 167
Fig. 4.1-16	Definizione delle linee di prua in base al prolungamento delle linee delle tavole del fianco.	p. 170
Fig. 4.1-17	Ricostruzione dell'asta di prua.	p. 171
Fig. 4.1-18	Ricostruzione dei bagli sulla base delle riseghe rettangolari del dormiente.	p. 172
Fig. 4.1-19	Ricostruzione delle coperte sulla base della posizione dei bagli.	p. 172
Fig. 4.1-20	Ipotesi del carico con trasporto animale.	p. 175
Fig. 4.1-21	Rilievo in terracotta da Portus, Roma, con barca <i>caudicaria</i> e lungo remo-timone centrale.	p. 177
Fig. 4.1-22	Rilievo sulla base di statua del fiume Tevere, con imbarcazione e lungo remo-timone centrale.	p. 177
Fig. 4.1-23	Ricostruzione del traino dell'imbarcazione di Santa Maria in Padovetere.	p. 182

#### Capitolo 4.1. Applicazioni virtuali: la barca di Ercolano

Fig. 4.2-1	Fermo immagine del tour virtuale della zona d'ingresso con in mostra le attrezzature marinare.	p. 195
Fig. 4.2-2	Fermo immagine del tour virtuale della zona vicino alla prua dello scafo.	p. 196
Fig. 4.2-3	Le diverse visualizzazioni possibili all'interno del software 3DVista.	p. 197
Fig. 4.2-4	Pannello informativo relativo allo scafo di Ercolano.	p. 198
Fig. 4.2-5	Pannello informativo relativo all'argano da spiaggia.	p. 198
Fig. 4.2-6	Il video dimostrativo del distacco delle tavole della zona	

---

	di prua.	p. 199
Fig. 4.2-7	Alcune delle immagini impiegate per la strisciata fotogrammetrica del sito archeologico.	p. 201
Fig. 4.2-8	Modello fotogrammetrico del sito archeologico di Ercolano.	p. 201
Fig. 4.2-9	Pianta del sito archeologico con l'inserimento della pianta originale degli scavi.	p. 201
Fig. 4.2-10	Nuvola di punti completa del sito archeologico con l'imbarcazione nella posizione di rinvenimento.	p. 202
Fig. 4.2-11	Vista dell'imbarcazione e della spiaggia dalle terrazze degli edifici.	p. 203

---

**Elenco tavole**Capitolo 3.1. Il rilievo della barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio

- Tav. 3.1-1. Sezione trasversale della barca e lungo l'asse Nord-Sud dello scavo perpendicolare al fiume. p. 63
- Tav. 3.1-2. Ortofoto della pianta dell'imbarcazione dal rilievo fotogrammetrico durante le fasi di scavo. Campagna di scavo 2014. p. 79
- Tav. 3.1-3. Confronto tra le piante dell'imbarcazione rappresentate dal fotomosaico della tecnica del raddrizzamento e dall'ortofoto della tecnica fotogrammetrica. p. 84
- Tav. 3.1-4. Ortofoto della pianta e del prospetto dell'imbarcazione dal rilievo fotogrammetrico. Campagna di scavo 2015. p. 92
- Tav. 3.1-5. Pianta e sezioni trasversali. Campagna di scavo 2015. p. 93
- Tav. 3.1-6. Ortofoto della nuvola di punti completa del sito ottenuta tramite rilievo laser scanning. p. 99
- Tav. 3.1-7. Pianta esemplificativa delle essenze lignee. p. 116

Capitolo 3.2. Il rilievo della barca di Ercolano

- Tav. 3.2-1. Ortofoto della pianta scafo e della prua dell'imbarcazione ottenuta dal rilievo fotogrammetrico con la Nikon D3200. p. 128
- Tav. 3.2-2. Ortofoto della pianta dello scafo ottenuta dal rilievo fotogrammetrico con la GoPro Hero4 Session. p. 130
- Tav. 3.2-3. Ortofoto della decorazione di prua a forma di serpente ottenuta dal rilievo fotogrammetrico con uno Smartphone. p. 132
- Tav. 3.2-4. Ortofoto del timone ottenuta dal rilievo fotogrammetrico con uno Smartphone. p. 133

---

Tav. 3.2-5.	Ortofoto della nuvola di punti della barca e dell'intera sala museale ottenuta tramite rilievo laser scanning.	p. 137
-------------	--	--------

#### Capitolo 4.1. Applicazioni virtuali: la barca di Santa Maria in Padovetere a Comacchio

Tav. 4.1-1.	Cordoli del calafataggio e tavole di fasciame.	p. 156
Tav. 4.1-2.	Elementi longitudinali dello scafo.	p. 157
Tav. 4.1-3.	Modello per volumi ricostruiti e <i>mesh</i> e modello per volumi ricostruiti.	p. 158
Tav. 4.1-4.	Ricostruzione e rotazione ordinate ed elementi longitudinali interni.	p. 169
Tav. 4.1-5.	Diversi pescaggi dell'imbarcazione senza o con il carico e relative modifiche della posizione del timoniere e dell'inclinazione del remo-timone.	p. 179
Tav. 4.1-6.	Piano dei legni interno ed esterno in proiezione ortogonale.	p. 185
Tav. 4.1-7.	Piano di costruzione e linee d'acqua.	p. 186
Tav. 4.1-8.	Elementi trasversali (ordinate e staminali) e sezioni dello scafo in corrispondenza di questi.	p. 187
Tav. 4.1-9.	Rappresentazione grafica degli elementi esistenti, elementi ricostruiti sulla base di segni sullo scafo ed elementi ipotizzati.	p. 188
Tav. 4.1-10.	Fasi costruttive dell'imbarcazione.	p. 189

## **Bibliografia**

---

---

**Bibliografia**

Achille C., Monti C., *Nuove metodologie di rilievo*, in *Tecniche di rilevamento. Nuove frontiere delle tecnologie*, a cura di Genovese R. A., Napoli, 2001.

Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4, 2018.

Albertini N., Licari D., Brogni A., Barone V., *Natural data fruition: an interactive bridge between science and humanities*, «MapPapers», 1-IV, 2014, pp. 16-23.

Alfonso C., *The photogrammetric documentation of the hull*, in Beltrame C., Gelichi S., Miholjek I., *Sveti Pavao shipwreck. A 16th century venetian merchantman from Mljet, Croatia*, Oxford, Oxbow Books, 2014, p. 17-19.

Anichini F., Gattiglia G., *La storia nascosta nei dati*, «MapPapers», 1-IV, 2014, pp. 1-3.

Attilia L., Filippi F., *I colori dell'archeologia: la documentazione archeologica prima della fotografia a colori (1703-1948)*, Roma, Quasar, 2009.

Balista C., Berti F., 2017, *Carotaggi geoarcheologici e scavi nei pressi della Chiesa di santa Maria in Padovetere, anni 2006 e 2008*, Atti dell'Accademia delle Scienze di Ferrara, volume 94, pp. 93-134.

Balista C., Bonfatti L., Calzolari M., *Il paesaggio naturale e antropico delle Valli tra Spina e Comacchio e le sue trasformazioni dall'Età etrusca all'Alto Medioevo*, in *Genti del delta da Spina a Comacchio. Uomini, territorio e culto dall'antichità all'alto Medioevo*, Ferrara, 2007, pp. 19-32.

Balletti C., Ballarin M., Faccio P., Guerra F., Saetta A., Vernier P., *3D survey and 3D modelling for seismic vulnerability assessment of historical masonry buildings*, «Applied Geomatics», 10, 2018.

---

Balletti C., Guerra F., Fregonese L., Monti C., *Appunti di Fotogrammetria, dispense del Laboratorio di Fotogrammetria della Università Iuav di Venezia*, 2010.

Balletti C., Guerra F., Pilot L., *Integrazione di tecnologie 3D multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico*, X conferenza Nazionale ASITA, Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali ed Ambientali, 14-17 novembre, Fiera di Bolzano, Varese, Artestampa sas, 2006.

Batchvarov K. N., *Design and construction of a Black Sea Ottoman ship*, in *Between continents Proceedings of the Twelfth Symposium on Boat and Ship Archaeology*, Istanbul 2009, 2012, pp. 175-181.

Beltrame C., *La sutilis navis del Lido di Venezia. Nuova testimonianza dell'antica tecnica cantieristica "a cucitura" nell'Alto Adriatico*, in *Navalia. Archeologia e storia*, a cura di Cicliot F., Savona, The IntPropeller Club, 1996, pp. 31-53.

Beltrame C., *Imbarcazioni lungo il litorale alto-adriatico occidentale, in età romana. Sistema idroviario, tecniche costruttive e tipi navali*, in *Strutture portuali e rotte marittime nell'Adriatico di età romana*, Centro di Antichità alto-adriatiche, Trieste-Roma, Casa Bertoli Aquileia, 2001, pp. 431-449.

Beltrame, C., *Le sutiles naves romane lungo il litorale alto Adriatico. Nuove testimonianze e considerazioni tecnologiche*, «*Archeologia subacquea, studi, ricerche e documenti*», 3, 2002, pp. 353-79.

Beltrame C., *Archeologia marittima del Mediterraneo. Navi, merci e porti dall'antichità all'età moderna*, Roma, Carocci editore, 2012.

Beltrame C., *Documentare in archeologia navale*, in *Archeologia subacquea. Storia, organizzazione, tecnica e ricerche*, a cura di Gandolfi D., Quaderni della Scuola

---

Interdisciplinare delle Metodologie Archeologiche 3, Istituto Internazionale di Studi Liguri, Bordighera, 2017, pp. 159-174.

Beltrame C., Costa E., *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, 2016, pp. 253-266.

Beltrame C., Costa E., *3D survey and modelling of shipwrecks in different under water environments*, «Journal of Cultural Heritage», 29, 2018, pp. 82-88.

Beltrame C., Gaddi D., *Lo studio ricostruttivo della nave romana di Grado*. «L'archeologo subacqueo», XIV, 3, 2013.

Beltrame C., Gelichi S., Miholjek I. (a cura di), *Sveti Pavao shipwreck. A 16th Century Venetian Merchantman from Mljet, Croatia*, Oxford, Philadelphia, Oxbow Books, 2014.

Ben-Zeev A., Kahanov Y., Tresman J., Artzy, *The Ma'agan Mikhael ship. Volume III: a reconstruction of the hull*, Leon Recanati Institute for Maritime Studies, University of Haifa, 2009.

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

Berti F., (a cura di), *Fortuna Maris. La nave romana di Comacchio*, Firenze, Nuova alfa, 1990.

Berti F., *La nave di Valle Ponti*, in *Archeologia subacquea. Storia, organizzazione, tecnica e ricerche*, a cura di Gandolfi D., Scuola Interdisciplinare delle Metodologie Archeologiche – 3, 2017, pp. 207-214.

---

Bianchini M., *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma, 2008.

Blom, E., Vos, W.K., *De 'Woerden 7': Een Romeinse platbodem*, in Blom, E., Vos, W.K., eds., *Woerden-Hoochwoert. De opgravingen 2002-2004 in het Romeinse castellum Laurium, de vicus en van het schip de 'Woerden 7' (ADC Rapport 910)*, Amersfoort, 2008, 349-401.

Böcking, W., *Caudicaria - Römische Lastkähne*. Neue Schiffsfunde im Xantener Raum. «Antike Welt» 27, 1996, 209-215.

Bockius R., *Technological transfer from the Mediterranean to the Northern provinces*, in *Human Mobility and Technological Transfer in the Prehistoric Mediterranean*, a cura di Kiriati E. e Knappett C., British School at Athens Studies in Greek Antiquity, Cambridge University Press, 2016.

Boetto G., Uhač M., Koncani Uhač I., *The sewn boat of Zambratija (XII-X century BCE, Istria, Croatia)*, 2° Convegno nazionale Cultura navale e marittima, Genova, Italy, 2016.

Bonino M., *Tecniche costruttive navali insolite nei reperti di Cervia, Pomposa e Pontelagoscuro*, Atti del Convegno Internazionale di Studi sulle Antichità di Classe (Ravenna, 1967), Ravenna, 1968, pp. 209-217.

Bonino M., *Sewn boats in Italy: sutiles naves and barche cucite*, in *Sewn plank boats* (Atti del Convegno, Greenwich, 1984), a cura di McGrail S., Kentley E., Oxford, 1985, pp. 87-104.

Bonino M., *Navi mercantili e barche di età romana*, Roma, 2015.

Borgherini M., Guerra A., Modesti P., *Architettura delle facciate: le chiese di Palladio a Venezia. Nuovi rilievi, storia, materiali*, Venezia, Marsilio editori, 2010.

---

Borghini S., Carlanì R., *La restituzione virtuale dell'architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 71-79.

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

Bruseth J.E., Turner T.S., Feherenbach T.R., *From a watery grave: the discovery and excavation of La Salle's shipwreck, La Belle*, Paperback, 2006.

Brusic Z., Domjan M., *Liburnian boats – their construction and form*, in *Sewn plank boats* (Atti del Convegno, Greenwich, 1984), a cura di McGrail S., Kentley E., Oxford, 1985, pp. 67-85.

Cairolì Giuliani F., *Archeologia. Documentazione grafica*, Roma, De Luca Editore, 1986.

Camardo D., Court S., Guidobaldi M., Notomista M., *Ercolano e il mare*, «Archeo», 345, 2014, pp. 70-79.

Canciani, M., Gambogi, P., Romano, F.G., Cannat, G., Drap, P., *Low cost digital Photogrammetry for underwater archaeological Site survey and artefact isertion. The case study of the dolia wreck in Secche della Meloria – Livorno - Italia*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», Vol. XXXIV, Part 5/W12, 2003, pp. 95-100.

Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri W., *Misure, rilievo, progetto*, Bologna, Zanichelli editore, 2012, pp. 1-96.

Capulli M., *The Precenicco shipwreck: an 11th-13th century vessel from the river Stella I*, in *Baltic and beyond Proceedings of the 14 Isbsa*, Gdansk 2015, 2017.

---

Capulli M., Willis S., Asta A., *Il progetto Sutiles nel quadro delle attività di tutela e conoscenza delle tecniche di costruzione navale antica. Il caso del Veneto*, «NAVe. Notizie di Archeologia del Veneto», 3/2014, All’Insegna del Giglio, 2014, pp. 215-218.

Carandini A., *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, Einaudi Editore, Torino, 2001.

Casaban J.L., Radic Rossi I., Yamafune K., Castro F., *Underwater photogrammetry applications: the Gnalic shipwreck, 2013 (Croazia)*, in *Proceeding of IKUWA 2014*, 2014.

Castelletti, L., Maspero, A., Motella, S. and Rottoli, M., 1990, *Le corde e gli intrecci di fibra vegetale*, in *Fortuna Maris. La nave romana di Comacchio*, a cura di Berti F., Firenze, Nuova alfa, 1990, pp. 154–156.

Castro F.V., *The Pepper Wreck: a Portuguese Indiaman at the mouth of the Tag river*, Texas A&M University Press, College Station, 2005.

Castro F.V., *The Arade I Shipwreck: A Small Ship at the Mouth of the Arade River, Portugal*, in *Connected By the Sea Proceedings of the 10th Symposium on Boat and Ship Archaeology*, 2006, a cura di F. Hocker, A. Englert, Oxford, Oxbow Books, pp. 300-305.

Castro F., Capulli M., *A Preliminary report of recording the Stella I Roman River Barge, Italy*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 45.1, 2016, pp. 29-41.

Castro F., Fonseca N., Vacas T., Sauer A., *Numerical models and the dynamic interpretation and reconstruction of medieval and early modern shipwrecks*, «CMAC News and Reports», 2/1, 2010.

G. Ceraudo, *Introduzione all’aerofotogrammetria applicata all’archeologia*, Latina, Il grande Blu, p. 9.

---

Cesarano M., Corti C., *Sacro e profano. Le recenti ricerche nell'area archeologica di S. Maria in Padovetere a Comacchio (IV-IX secolo)*,

Charlin G., Gassend J-M., Lequément R., *L'épave antique de la baie de Cavalière (Le Lavandou, Var)*, «Archaeonautica», 2, Edition du CNRS, 1978, pp. 9-94.

Chevalier Y., Santamaria C., *L'épave de l'Anse Gerbal à Port-Vendres*, «Rivista di Studi Liguri», 37, 1972, pp. 7-32.

Coates J., McGrail S., Brown D., Gifford E., Grainge G., Greenhill B., Marsden P., Rankov B., Tipping C., Wright E., *Experimental boat and ship archaeology: principles and methods*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 24/4, pp. 293-301.

Cochetti F., *Progetto Caracalla Full Immersion Audio-video guida delle Terme di Caracalla*, «Technology for all», 2018.

Coralini A., Vecchietti E., *L'archeologia attraverso un 3D virtual model*, in *Ut natura ars. Virtual Reality e archeologia*, Atti della Giornata di Studi (Bologna, 22 aprile 2002), a cura di A. Coralini, D. Scagliarini Corlaita, Imola, Universitu Press Bologna, 2007, pp. 17-40.

Costa E., *Il trabaccolo Marin Faliero. Studio e restituzione grafica dello scafo*, in *Navis 5. Archeologia, storia, etnologia navale*. Atti del I Convegno nazionale, Cesenatico, 13-14 Aprile 2012, 2014.

Costa E. *3-D reconstruction of the hull*, in *Sveti Pavao shipwreck. A 16th century venetian merchantman from Mljet, Croatia*, a cura di Beltrame, C., Gelichi, S., Miholjek, I., Oxford, Oxbow Books, 2014, pp. 22-24.

Costa E., Beltrame C., Guerra F., *Potentialities of 3D reconstruction in Maritime Archaeology*, in *Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications*

---

*and Quantitative Methods in Archaeology*, a cura di Giligny F., Djindjian F., Costa L., Moscati P., Robert S., Oxford, 2015, pp. 549-556.

Crumlin - Pedersen O., *Viking Age Ships and Shipbuilding in Hedeby/Haithabu and Schleswig*, «SBN», 2, Schleswig & Roskilde, 1997.

Crumlin-Pedersen O., *The Skuldelev Ships I*, «Ships and boats of the north», 4.1, Roskilde, 2002.

Crumlin - Pedersen O., *Ten golden years for maritime archaeology in Denmark, 1993-2003*, «Maritime Archaeology. Newsletter from Roskilde», 20, 2003, pp. 4-43.

De Carolis E., *I legni carbonizzati di Ercolano: storia delle scoperte e problematiche conservative*, «Archeologia uomo territorio», 17, 1998, pp. 43-57.

De Felice G., Sibilano M.G., Volpe G., *Ripensare la documentazione archeologica: nuovi percorsi per la ricerca e la comunicazione*, «Archeologia e Calcolatori», 19, 2008, pp. 271-291.

De Maio A., *Dalla Realtà al Virtuale: tecnologie innovative per lo studio e la valorizzazione del patrimonio culturale*, «Technology for all», 2018.

De Weerd M.D., *Roemerzeitliche Transportschiffe und Einbaeumeaus Nigrum Pullum/Zwammerdam (Z.-H.)*, «Studien zu den Militaergrenzen Roms», 2, 1977, pp. 187-198.

Demesticha, S., Skarlatos, D., Neophytou, A., *The 4th century B.C. shipwreck at Mazotos, Cyprus: new techniques and methodologies in the 3D mapping of shipwreck excavations*, «Journal of Field Archaeology», 39.2, 2014, pp. 134-150.

---

Dostal, C.M., *Laser scanning as a methodology for the 3D digitization of the archaeological ship timbers: a case study using the World Trade Center shipwreck*, Texas A&M University, 2017.

Drap, P., *Underwater Photogrammetry for Archaeology*, in *Special applications of photogrammetry*, a cura di D. Silva, 2012.

Drap P., Merad D., Hijazi B., Gaoua L., Motasem Nawaf M., Saccone M., Chemisky B., Seinturier J., Sourisseau J-C., Gambin T., Castro F., *Underwater Photogrammetry and Object Modeling: A Case Study of Xlendi Wreck in Malta*, «Sensor», 15 (12), 2015, pp. 30351-30384.

Drap, P., Seinturier, J., Long, L., *Archaeological 3D modelling using digital photogrammetry and expert system. The case study of Etruscan amphorae*, in Proceedings of the VI Infographie Interactive et Intelligence Artificielle International Conference, 2003.

Eric M., Kovacic R., Berginc G., Pugelj M., Stopinsek Z., Solina F., *The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites*, in Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress 2013, 28 Oct - 1 Nov, Marseille, France, IEEE, 2013, vol. 2.

Fangi G., *Note di fotogrammetria*, CLUA, Ancona, 1997.

Fratus de Balestrini E., Ballarin M., Balletti C., Buttolo V., Gottardi C., Guerra F., Mander S., Pilot L., Vernier P., *Survey methods for earthquake damages in the "Camera degli sposi" of Mantegna (Mantova)*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL, 5/W2, 2013, pp. 265-270.

---

Gaspari A., *A cargo ship of Mediterranean sewn construction from Lipe and its place in research into continental shipbuilding in the Roman period*, in *The Ljubljanica – A river and its past*, a cura di Turk P., Istenic J., Knific T., Nabergoj T., Ljubljana, 2009.

Gassend J.-M., Liou B., Ximénés S, *L'épave 2 de l'anse des Laulorns (Martigue, Bouches-du-Rhone)*, «Archeonautica» 4, 1984, pp. 75-106.

Gianfrotta P.A., Pomey P., *Archeologia subacquea. Storia, tecniche, scoperte e relitti*, Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 1980.

Gonizzi Barsanti S., Remondino F., Visintini D., *3D surveying and modeling of archaeological sites – some critical issues*, «Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science», II-5/W1, 2013, pp. 145-166.

Grandi E., *Un delta in movimento. Il caso di Comacchio tra tarda antichità e alto medioevo*, in *Costruire territorio / costruire identità: lagune archeologiche a confronto tra antichità e medioevo*, a cura di Gelichi S., «Reti Medievali Rivista», 16.2, Florence, 2015, pp. 1-31.

Grattan D.W., Clarck R.W., *Waterlogged wood*, in *Conservation of marine archaeological objects*, a cura di C. Pearson, Butterworths & Co. Ltd., 1987, p. 55-67.

Green J., *Maritime archaeology. A technical handbook*. Second edition, San Diego, California, Elsevier Academic Press, 2004.

Green J., Matthews, S., Turanli T., *Underwater archaeological surveying using PhotoModeler, virtual mapper: Different applications for different problems*, «International Journal of Nautical Archaeology», 31.2, 2002, pp. 283-292.

Grieco G., *Modeling La Belle: A Reconstruction of a Seventeenth-Century Light Frigate*, Texas A&M University, College Station, 2003.

Groot De T., Morel J.-M.A.W., *Hetschipuit de Romeinsetijd De Meern 4 nabijboerderij de Balijsche, LeidscheRijn, gemeente Utrecht: waardestellendonderzoeknaar de kwaliteit van hetschip en hetconserverendvermogen van hetbodemmilieu*, «Amersfoort», 38, 2007, pp. 33.

Guyon M., *Méthodologie d'une fouille d'épaves en milieu terrestre*, «Archeonautica», 16, CNRS Éditions, 2010, pp. 25-34.

Haalebos, J.K., *EenRomeinsschipteWoerden, Lelystad, Rijksdienstvoor de Ijsselmeerpolders*, in *Flevobericht*, 280, a cura di Reinders H.R., Lelystad, 1987, pp. 25-28.

Henderson J., Pizarro O., Johnsons-Roberston M., Mahon I., *Mapping Submerged Archaeological Sites using StereoVision Photogrammetry*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 42.2, 2013, pp. 243-56.

Holt P., *An assessment of quality in underwater archaeological surveys using tape measurements*, «International Journal of Nautical Archaeology», 32(2), 2003, pp. 246-251.

Indruszewski G., Farin G., Razdan A., Simon A., VanAlfen D., Rowe J., *Application of 3D Modeling in Ship Reconstruction and Analysis: Tools and Techniques*, in *Enter the Past. The E-way into the four Dimensions of Cultural Heritage*, CAA, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceeding of the 31st conference (Vienna, April 2003), Oxford, 2004, pp. 263-270.

Jones T., Nayling N., Tanner P., *Digitally reconstructing the Newport Medieval Ship: 3D designs and dynamic visualisations for recreating the original hull form, loading factors, displacement, and sailing characteristics*, Underwater archaeology proceedings, Advisory council on under water archaeology, 2013, pp. 123-130.

---

Koncani Uhač I., Boetto G., Uhač M. a cura di, *Zambratija – Prapovijesnusivani brod / Prehistoric sewn boat / Una barca cucita preistorica / Un bateau cousu préhistorique. Catalogue of the exhibition*, Pula, 2017.

Leatherdale J.D., Turner D.J., *Underwater photogrammetry in the North Sea*, «The photogrammetric record», 11, 62, 1983, pp.151-167.

Lemée C., *The renaissance shipwrecks from Christianshavn*, «Ships and boats of the north», 6, Roskilde, 2006.

Longo E., *Ricerca scientifica e tecnologia al servizio del visitatore*, «Technology for all», 2018.

Loureiro V., Alves J.G., *The Arade I Shipwreck: Preliminary Results of the 2004 and 2005 Field Seasons*, «International Journal of Nautical Archaeology», 37(2), 2008, pp. 273-282.

Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J., *Close-range photogrammetry and 3D imaging*, 2<sup>nd</sup> edition, Walter de Gruyter GmbH, Berlin / Boston, 2014.

Marlier S. a cura di, *Arles-Rhone 3, Un chaland gallo-romain du Ier siècle après Jésus-Christ*, «Archeonautica» 18, 2014.

Martorelli M., Pensa C., Speranza D., *Digital photogrammetry for documentation of Maritime Heritage*, «Journal of Maritime Archaeology», 9, 2014, pp. 81-93.

McCarthy J., *Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community*, «Journal of Archaeological Science», 43, 2014, pp. 175-185.

McGrail S., *Romano-Celtic boats and ships: characteristic features*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 24.2, 1995, pp. 139-145.

Medas S., *La navigazione tardo-antica in Adriatico. L'iconografia navale e la peculiarità della tradizione nautica*, «CuPAUAM», 42, 2016, pp. 143-166.

Medri M., *Manuale di rilievo archeologico*, Bari: GLF editori Laterza, 2003.

Meschini A., *Tecnologie digitali e comunicazione dei beni culturali. Stato dell'arte e prospettive di sviluppo*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 14-24.

Pakkanen J., *Combining intensive total station drawing and photogrammetry in archaeological fieldwork documentation*, in *Building bridges*. Abstract book of the 23<sup>th</sup> annual Meeting of the European Association of Archaeologists, a cura di J. Bazelmans and Klinkhamer Group, Maastricht, 2017, p. 95.

Palombini A., *Raccontare storie, raccontare Storia. La divulgazione del patrimonio nel solco delle tecniche narrative*, «MapPapers», 1-IV, 2014, pp. 3-4.

Parker A.J., *Ancient shipwrecks of the Mediterranean & Roman provinces*, Oxford, Tempus reparatum, 1992.

Pavia C., *Roma antica in 3 dimensioni: storia e tecnica della fotografia stereoscopica in ambito architettonico*, Gangemi editore, 2005.

Pescarin S., Fanini B., Ferdani D., Lucci Baldassari G., Calori L., *Archeologia virtuale, realismo, interattività e performance: dalla ricostruzione alla fruizione on line*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 62-70.

Pferdehirt B., *Das schiff 6 aus Mainz, Roemerzeitlicheschiffsfunde in der datenbank*, in NAVIS I, a cura di A. Mees, B. Pferdehirt, Mainz, 2002, pp. 100-102.

---

Pierdicca R., *Musei e Open Space per conoscere e far conoscere dai bene culturali aumentati allo spazio sensibile*, «Technology for all», 2018.

Pintucci A., Vecchione A., *3D recording VS tradition: a filed archaeologist point of view*, in *Building bridges*. Abstract book of the 23<sup>th</sup> annual Meeting of the European Association of Archaeologists 2017, a cura di J. Bazelmans and Klinkhamer Group, Maastricht, 2017, p. 97.

Pix4D, Pix4Dmapper, Version 4.1, User manual, 2017.

Plinio il Vecchio, *NaturalisHistoriae*, XXIV, 40.

Poveda P., *Hypothetical Reconstruction of the Dramont E Shipwreck*, in (ed.) *Between Continents*, Proceedings of the 12th international symposium on boat and ship archaeology, Istanbul 2009 (ISBSA12), a cura di Gunsenin N., 2012, pp. 331-336.

Pulak C., Ingram R., Jones M., *Eight Byzantine shipwrecks from the Theodosian harbour excavations at Yenikapi in Istanbul, Turkey: an introduction*, «The international journal of nautical Archaeology», 44.1, 2015, pp. 39-73.

Pupillo D., *Economia, produzioni e commerci nel Delta di età romana*, in *Genti del delta da Spina a Comacchio. Uomini, territorio e culto dall'antichità all'alto Medioevo*, Ferrara, 2007, pp. 213-232.

Ravn M., *Recent Advances in Post-Excavation Documentation: Roskilde Method*, in *Between Continents*: Proceedings of the 12th international symposium on boat and ship archaeology, Istanbul 2009, a cura di N. Gunsenin, 2012, p. 316.

Remondino F., *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, «Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale», 2011, p. 90-98.

---

Remondino F., Menna F., *Image-based surface measurement for close-range heritage documentation*, «International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science», 37 (B5-1), 2008, pp. 199-206.

Remondino F., Rizzi A., *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites – techniques, problems and examples*, «AppliedGeomatics», 2(3), 2010, pp. 85-100.

Remondino F., Spera M.G., Nocerino E., Menna F., Nex F., *State of the art in high density image matching*, «Photogrammetric Record», 29, 146, 2014, pp. 144-166.

Repola L., Tusa S., Leidwanger J., Cerrato A., Signoretti D., Memmolo R., *Three-dimensional underwater survey: representing the past with new tools for musealization*, 1st International Conference on Metrology for Archaeology, Benevento, Italy, October 22-23, 2015.

Rieth E., *Des bateaux et des fleuves. Archéologie de la batellerie du Néolithique au Temps modernes en France*, Paris, Editions Errance, 1998.

Rieth E., Guyon M., *Les épaves Gallo-Romaines*, «Archaeonautica», 16, CNRS Editions, Paris, 2010, pp. 35-104.

Rizza G., *Dalla scoperta dell'Antico all'archeologia moderna*, in *Il mondo dell'archeologia*, Treccani editore, 2002.

Rosso A., *Introduzione all'archeologia delle acque*, Savio print, 1987, p. 61.

Rucco A.A., *Dalle 'carte' alla terra. Il paesaggio comacchiese nell'alto medioevo*, in *Costruire territori / costruire identità: lagune archeologiche a confronto tra antichità e medioevo*, a cura di Gelichi S., «Reti Medievali Rivista», 16.2, Florence, 2015, pp. 197-229.

---

Rucco A.A., Mozzi P. Ninello E., *Indagini nell'area di S. Maria in Padovetere in Valle Pega*, in *Comacchio nell'alto Medioevo. Il paesaggio tra topografia e geoarcheologia*, a cura di A. A. Rucco, Florence, 2015, 95-104.

Rule N., *The direct survey method (DSM) of underwater survey and its application underwater*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 18.2, 1989, pp. 157-162.

Scopigno R., Cignoni P., Montani C., *High quality digital acquisition and virtual presentation of three-dimensional models*, «Archeologia e Calcolatori», Supplement 1, 2007, pp. 163-179.

Sgreganzoli M., Vassena G.P.M., *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Volume 1, Starrylink Editrice, 2007, p. 1-95.

Sigurdsson H., Carey S., Cornell W., Pescatore T., *The eruption of Vesuvius in A.D. 79*, «National Geographic Research», 1/3, 1985, pp. 332-387.

Steffy R., 1982. *The Herculaneum boat project. Final report.*

Tanner P., *Digital reconstruction and analysis of the Newport ship*, in *Newport Medieval ship project. Specialist report: reconstructing the hull shape*, Newport city council, Cyngordinas Casnewydd, 2013.

Tanner P., *The testing and analysis of hypothetical ship reconstruction*, in *Baltic and beyond. Continuity and change in shipbuilding*, a cura di Litwin, J. & W. Ossowsky, 2018, pp. 143-150.

Valentini M. P, Cano J. G., *A controversial alternative conservation case: reburial of the Zencity shipwreck, Buenos Aires*, in Ikuwa V, pp. 335-336.

---

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

Yamafune K., Torres, R., Castro F., *A proposed methodology for recording and reconstructing shipwreck sites underwater using computer-vision photogrammetry*, in *Baltic & Beyond*, Proceedings of Isbsa 14, Gdansk, 2018.

Zmaic Kralj V., Beltrame C., Miholjek I., Ferry M., *A Byzantine shipwreck from Cape Stoba (Mljet, Croatia). An interim report*, «The International Journal of Nautical Archaeology», 45, 2016, pp. 42-58.

Zhukovsky M.O., Kuznetsov V.D., Olkhovsky S.V., *Photogrammetric techniques for 3-d underwater record of the antique time ship from Phanagoria*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», vol. XI-5/w2.

3DFLOW 3DF Zephir, User manual, Version 4.0, 3DF Zephir Free / Lite / Pro / Aerial, 2013.

#### Tesi consultate

Ballarin M., *Fotogrammetria aerea low-cost in archeologia*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, Relatore Francesco Guerra, 2016.

Carlos A. MonroyCobar, *A digital approach to the reconstruction of ancient sunken ships*, Relatore Richard Furuta, 2010.

De Silla F., *Laser scanner e fotogrammetria digitale di ultima generazione: tecniche diverse per il rilievo ad alta definizione dell'architettura. Un caso studio: il ninfeo di*

*Villa Mondragone*, Tesi magistrale, Università Tor Vergata, Relatore Rodolfo Strollo, Correlatore Roberto Gabrielli, 2012/2013.

Girelli V.A., *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Bologna, Relatore Gabriele Bitelli, 2007.

Menna F., *Metodologie e tecniche per la modellazione tridimensionale inversa*, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Napoli Parthenope, Relatore Salvatore Troisi, 2009.

Varinlioglu G., *Recording the nautical archaeology: virtual museum of underwater cultural heritage*, İhsan Doğramacı Bilkent University, Relatore BülentÖzgüç, 2011.

Studente: **Elisa Costa**    Matricola: **962619**

Dottorato: **Storia delle Arti**

Ciclo: **XXXI**

Titolo della Tesi: **Tecniche di rilievo digitale per la documentazione e la fruizione di imbarcazioni lignee**

**Abstract in italiano:**

Scopo della presente ricerca sono l'analisi critica delle recenti metodologie di rilievo e l'applicazione di tecnologie digitali tridimensionali nel campo della documentazione, dello studio e della divulgazione di imbarcazioni lignee, sottolineando l'importanza dell'impiego di queste tecniche di rilievo nell'affiancare e migliorare il lavoro dell'archeologo navale.

Il filo conduttore che attraversa i capitoli della tesi è il rilievo. La prima parte è introdotta da una breve analisi del rilievo, passando attraverso all'esposizione analitica di alcune delle principali tecniche esistenti e concludendosi con la descrizione dei procedimenti operativi svolti per il rilievo dei due relitti, scelti come casi studio. La seconda parte è legata ai diversi risultati che si possono ottenere sulla base dei rilievi tridimensionali, dimostrando, attraverso gli studi analitici e ricostruttivi, l'importanza attribuita alle tecnologie digitali; il fine ultimo del rilievo e del modello virtuale ottenuto è rappresentato da due aspetti che si scindono e si integrano allo stesso tempo: la finalità scientifica e l'aspetto didattico e divulgativo.

**Abstract in inglese:**

The aim of this research is the critical analysis of recent methods of survey and the application of three-dimensional digital technologies for documentation, study and dissemination of wooden boats, underlining the importance of the use of these techniques in supporting and improving the work of naval archaeologists.

The thread through the chapters of the thesis is the survey. The first part is introduced by an historical analysis of survey, passing through the presentation of some of the main existing documentation techniques and concluding with the description of the operative procedures carried out for the survey of the two wrecks chosen as case studies. The second part is linked to the different results that can be obtained from three-dimensional surveys,

demonstrating the importance attributed to digital technologies through the analytical and reconstructive studies. Two different and integrated aspects represent the ultimate aim of the survey and of the virtual model obtained: the scientific purpose and the didactic and dissemination aspect.

Firma dello studente: