

MINISTERO DELLA CULTURA

SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO PER IL FRIULI VENEZIA GIULIA

RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA

OGGETTO: Restauro del Relitto di Precenicco: lotto 1 – Trattamento chelante e di consolidamento

Viterbo, 25/10/2025

Il Progettista

PEDONE CRISTIAN
CONSERVAZIONE E RESTAURO DI BENI CULTURALI
Via Fratelli Bandiera, 5 - 01100 Viterbo
P. IVA: 02333830566 - C.F.: PDNCST95T04M082E
Tel. 3460389730 - e-mail cristianpedone95@hotmail.com



INDICE

1 Introduzione	3
2 Descrizione	3
3 Stato di conservazione.....	6
4 Interventi precedenti.....	8
5 Intervento di restauro	9
5.1 Trattamento chelante.....	9
5.2 Trattamento di consolidamento.....	11
5.3 Documentazione.....	12
6 Considerazioni finali	12
7 Bibliografia.....	14

1 Introduzione

Il progetto ha come obiettivo il restauro dell'imbarcazione di Precenico rinvenuta, nel settembre 2012, in occasione di un'assistenza archeologica prestata dalla cooperativa 'ArcheoLab' alle lavorazioni del 'Consorzio di Bonifica Bassa Friulana' finalizzate alla realizzazione di opere di difesa idraulica dell'abitato di Precenico (UD)¹. Il progetto di restauro è costituito da due parti denominate 'lotto 1' e 'lotto 2'; nella presente relazione verranno trattate le operazioni necessarie al completamento della porzione chiamata 'lotto 1', oggetto di appalto.

Il relitto è ricoverato all'interno di un magazzino dei Cantieri Marina San Giorgio, a San Giorgio di Nogaro (UD), via Fermi 21, dove dovranno avere luogo le operazioni descritte di seguito.

Il manufatto si trova adagiato su una struttura per il supporto realizzata in acciaio INOX AISI 1316 e immerso in acqua di rete all'interno di una vasca costituita da una struttura in legno rinforzata³ e resa impermeabile da un telone per silo.

Oggetto delle fasi di restauro descritte nella seguente relazione è l'intero relitto di Precenico, costituito sia dal corpo centrale, recuperato ancora in connessione anatomica, sia dagli elementi lignei disgiunti recuperati separatamente; e quindi di tutti gli elementi presenti all'interno della vasca che misura 11 x 2,5 metri.

2 Descrizione

Al fine di identificare le specie legnose con cui il relitto è stato costruito sono stati eseguiti prelievi di frammenti di legno dalle diverse componenti dell'architettura dell'imbarcazione e sono state effettuate analisi sia in fase di scavo⁴ sia successivamente, congiuntamente all'esecuzione delle analisi micromorfologiche⁵. La scelta degli elementi campionati è stata attentamente ponderata in modo da ottenere un campione rappresentativo delle specie legnose usate per la realizzazione dell'imbarcazione.

¹ 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

² Si veda: MINISTERO DELLA CULTURA SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO PER IL FRIULI VENEZIA GIULIA RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA - OGGETTO: Restauro del Relitto di Precenico: lotto 2 – Essiccazione.

³ Poiché durante il trattamento di consolidamento, con le aggiunte di materiale consolidante, il volume della soluzione aumenterà, la vasca che ospita il manufatto è stata dotata di opportuni rinforzi per renderla adatta a sostenere il peso della soluzione consolidante.

⁴ Analisi xilotomiche eseguite dall'impresa Dendrodata s.a.s., si veda: 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

⁵ Relazione del Dr. Benedetto Pizzo: "Relitto di nave medievale del fiume Stella – Restauro conservativo. Servizio di campionamento e analisi diagnostiche del degrado del legno del relitto medievale del fiume Stella", 2021.

Tutti i campioni esaminati appartengono a legno di latifolia. La maggior parte degli elementi, fra cui anche tre elementi di riparazione, è risultata essere in legno di quercia caducifolia⁶, al legno di olmo appartengono invece quattro delle dieci tavole di fasciame indagate, mentre tutte e cinque le caviglie esaminate sono state attribuite al legno di viburno, documentato per la prima volta in carpenteria navale proprio in questo relitto. Tutti i legni individuati sono variamente distribuiti in Europa e sono compatibili con l'area geografica di rinvenimento del relitto.

Il relitto, datato tra l'XI e il XIII secolo d. C. dalle analisi al C14⁷, si presenta quasi completamente in connessione anatomica, ad eccezione di un nucleo di elementi lignei disgiunti collassati all'esterno delle murate e sparpagliatisi tutt'attorno allo scafo.

Lo scafo si è conservato per tutta la sua lunghezza che è pari esattamente a 8 metri, mentre la larghezza massima misurata è di 1,60 metri.

L'imbarcazione non è provvista di una vera e propria chiglia, ma possiede una tavola centrale, denominata F1, di larghezza variabile⁸, e del medesimo spessore delle altre tavole del fondo⁹. Sulle tavole del fondo erano fissati trasversalmente le ordinate, di cui venti conservate ancora in connessione anatomica e due collassate sul fondo.

Dalla misura dello spazio compreso tra ciascun'ordinata, nonché dai segni lasciati dai fori delle caviglie sull'asse che costituisce la chiglia, è possibile affermare che in origine il numero complessivo delle ordinate fosse di ventiquattro. Ogni madiere presenta uno o due fori di biscia; per quanto riguarda le dimensioni lo spessore dei madieri è risultato costante¹⁰, mentre per le altezze si è rilevato un lieve aumento in prossimità delle estremità¹¹. La maggior parte degli staminali è andata perduta, ciononostante i fori delle caviglie di fissaggio hanno lasciato testimonianza sulle tavole del fasciame sia della loro presenza, sia della posizione occupata¹². Si è potuto osservare così l'inversione dello staminale a partire dal madiere centrale e soprattutto il fatto che ve ne fosse solo uno per ordinata¹³. Come è noto nella costruzione navale ogni ordinata è di norma composta da un madiere e due staminali¹⁴, più eventualmente due scalmi per le imbarcazioni di maggiori dimensioni, in ogni caso comunque le ordinate presentano una simmetria bilaterale. Nel relitto di Precenico invece l'ordinata si presenta composta da un madiere e un solo

⁶ *Q. robur*.

⁷ CAPULLI 2018, pp. 303-316, CAPULLI 2017, pp. 131-134.

⁸ Larghezza compresa tra 16 e 19 cm.

⁹ Ovvero 3/3,5 cm.

¹⁰ Circa 9 cm.

¹¹ Si va da 8,5 cm per i madieri centrali, fino a raggiungere 13 per il secondo madiere. In questa circostanza si indica l'altezza del secondo madiere nonostante quella del primo sarebbe stata maggiore poiché quest'ultimo è mancante.

¹² 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

¹³ CAPULLI 2018, pp. 303-316.

¹⁴ POMEY 2005, pp. 110-115.

staminale che alternativamente si trova sul lato destro o di sinistra dello scafo, mentre la curvatura dal lato senza staminale è assicurata dal madiere stesso che si allunga verso l'alto con una forma asimmetrica a 'L'. Si tratta di una testimonianza unica a oggi nel panorama europeo e che trova parziali confronti solo con alcuni dei relitti del Mediterraneo orientale¹⁵. Cosa altrettanto singolare è il fatto che, mentre il sistema di giunzione dei madieri e degli staminali alle tavole del fondo o del fasciame era realizzato tramite caviglie in legno, il legame tra madiere e staminale è più debole essendo costituito esclusivamente da un chiodo in ferro non passante.

Sopra i madieri M12, M13 e M14 si trova il massiccio della scassa. Si tratta di una struttura che serviva ad ospitare il piede dell'albero, distribuendone le sollecitazioni in senso longitudinale rispetto all'asse dell'imbarcazione. La scassa è costituita da un solo elemento ligneo¹⁶, opportunamente sagomato sulla faccia inferiore per immorsarsi sui madieri. Inoltre, per rendere più forte la struttura e distribuire meglio le sollecitudini dell'albero, il massiccio della scassa era sostenuto da un innalzamento del madiere centrale ai due lati. La posizione della scassa esattamente a metà imbarcazione ne determina con certezza la funzione di sostegno di un albero da vela; se si fosse trovato invece in prossimità di una delle due estremità avrebbe potuto sostenere una grossa bitta per l'alaggio.

Oltre all'ossatura nel relitto di Precenico si sono preservate tutte le tavole del fondo, due per lato rispetto alla chiglia, e le prime delle murate laterali, sempre in numero di due per lato¹⁷.

La lieve differenza di altezza della stella rispetto ai madieri centrali conferma, al di là di quanto questo fosse già stato detto dal sito di rinvenimento, che l'imbarcazione fosse stata costruita per un uso prevalente in acque interne, anche se non esclusivamente fluviale; infatti seppur in assenza di chiglia, la forma dello scafo e la presenza della scassa dell'albero ne suggeriscono un utilizzo anche in ambiente lagunare e verosimilmente perfino di piccolo cabotaggio¹⁸.

Per quanto riguarda l'architettura di questa imbarcazione è da notare come sia del tutto evidente che non sia stata costruita con la tecnica detta 'su guscio', questo perché le tavole del fondo e del fasciame non sono state assemblate le une alle altre in modo da formare un guscio portante, allo stesso tempo però si differenzia dalla tipologia 'su scheletro'; in questo caso infatti si avrebbero le ordinate composte da un madiere e due staminali, e non un solo staminale per ordinata che in maniera alternata si trova su un lato o l'altro dello scafo, affiancato a un madiere che è di tipo asimmetrico. Ciò consentiva di fissare le tavole sul lato lungo dei madieri, mentre gli staminali, che completavano l'ordinata nel lato corto del madiere, potevano essere messi in opera successivamente. La prova di questa sequenza costruttiva sembra essere

¹⁵CAPULLI 2018, pp. 303-316.

¹⁶Lungo 75 cm.

¹⁷ 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

¹⁸ CAPULLI 2018, pp. 303-316, 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

data proprio dalla debole giunzione osservata tra i madieri e gli staminali che non avrebbe consentito la messa in opera di una ordinata pre-eretta¹⁹. Tale sistema di giunzione è possibile solo perché lo staminale ha in questo caso mera funzione di rinforzo e non costituisce la parte di una ordinata portante.

Il relitto pertanto appartiene alla tipologia *bottom-based*²⁰ con un impiego di madieri asimmetrici che non conosce confronti a livello europeo²¹.

3 Stato di conservazione²²

Tutte le analisi utili a determinare le condizioni di degrado del legno del relitto del fiume Stella in vista della sua conservazione e di seguito riportate sono state eseguite dall'Istituto per la BioEconomia del CNR. L'Istituto ha effettuato la valutazione dello stato di conservazione seguendo le metodiche normalmente utilizzate per la caratterizzazione del legno archeologico imbibito, ed in particolare secondo la norma UNI 11205:2007²³ che prevede che sul materiale venga eseguita una caratterizzazione micromorfologica del degrado, misurato il contenuto d'acqua e la densità basale, calcolata la densità basale residua, e valutata la composizione chimica residua delle pareti cellulari. Inoltre, sempre dallo stesso Istituto sono state condotte prove di penetrazione tramite un penetrometro sperimentale.

La caratterizzazione micromorfologica ha evidenziato una struttura molto degradata, tanto che la maggior parte dei campioni²⁴ sono stati classificati in classe 4²⁵. In molti casi, infatti, la parete cellulare delle fibre è apparsa fortemente degradata dall'attività batterica. In qualche caso nella sezione radiale sono state

¹⁹ CAPULLI 2018, pp. 303-316, 3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella, POMEY 2012, pp. 235- 314.

²⁰ HOCKER 2004, pp. 65-93.

²¹ CAPULLI 2018, pp. 303-316.

²² Per maggiori informazioni si veda la relazione del Dr. Benedetto Pizzo ricercatore del CNR-IBE: "Relitto di nave medievale del fiume Stella – Restauro conservativo. Servizio di campionamento e analisi diagnostiche del degrado del legno del relitto medievale del fiume Stella" del 11 novembre 2021 alla redazione della quale hanno collaborato Nicola Macchioni, Elisa Pecoraro, Lorena Sozzi, Simona Lazzeri.

²³ UNI 11205:2007 Beni Culturali – Legno di interesse archeologico ed archeobotanico – Linee guida per la caratterizzazione

²⁴ 12 su 18 campioni sono stati classificati in classe 4, 4 campioni in classe 3/4, due campioni in classe 3 e 1 in classe 2/3.

²⁵ La classificazione dello stato di degrado a livello anatomico è stata operata secondo le seguenti classi:

Classe 0 - Assenza di degrado.

Classe 1 - Degrado quasi del tutto inesistente. Sono presenti solo alcuni segni di attacco alla parete cellulare, ma in quantità estremamente rara.

Classe 2 - Degrado ad un livello iniziale e quindi con alcune cellule degradate contornate da altre sane. Le pareti attaccate dai microrganismi sono parzialmente erose e in alcuni casi il degrado può interessare l'intera parete. Chiari segni di attacco biotico sono presenti in sezione radiale.

Classe 3 - Risultano maggiori in quantità le cellule degradate rispetto a quelle sane. Frequenti le pareti del tutto erose con la scomparsa del lume cellulare interno. In sezione radiale le pareti presentano sia segni di attacco fungino ma sono anche indistintamente degradate e appaiono "granulose".

Classe 4 - Grande difficoltà ad ottenere le sezioni perché i campioni sono fortemente decoesi. Oltre al degrado delle pareti sono chiaramente visibili frequenti distacchi delle pareti dalla lamella mediana.

riscontrate delle ife fungine; questo implica che in questi elementi il degrado sta ancora procedendo. Sempre dalle analisi micromorfologiche è emersa la probabile presenza di inclusi di ferro. La presenza di ferro nei legni del relitto può certamente essere associabile al materiale ferroso costitutivo, è possibile altresì che il ferro provenga anche dalla struttura metallica di sostegno all'interno della quale il relitto è stato conservato per diverso tempo. Tale struttura mostrava in maniera evidente la presenza di ferro in forma ossidata che potrebbe essere passato in soluzione e quindi nel legno.

Le indagini fisiche sono state svolte con il fine di calcolare il massimo contenuto d'acqua dei campioni (MWC, %), la densità basale (DB, g/cm³) e la densità basale residua (DBR, %). Il massimo contenuto di acqua (MWC) si determina tramite il rapporto percentuale tra il peso dell'acqua evaporata in stufa e quello del legno anidro. Il valore del massimo contenuto d'acqua è considerato uno dei parametri più importanti per la caratterizzazione del degrado del legno archeologico saturo d'acqua, in quanto, in condizioni di costante imbibizione, il volume di parete cellulare eliminato dagli agenti di degrado viene sostituito dall'acqua; quindi maggiore è la quantità percentuale di acqua e maggiore è il livello di degrado. Questo parametro mostra dei limiti qualora il reperto sia andato incontro a collassi delle cellule: con il verificarsi di questo fenomeno si ha un minore spazio disponibile per l'acqua a fronte di un maggior degrado reale. La densità basale (DB) è data dal rapporto tra la massa del campione essiccato ed il suo volume allo stato imbibito; anche questo parametro è un buon indicatore del livello di degrado in quanto misura la quantità di sostanza secca presente nel campione allo stato di massima imbibizione. Infine la densità basale residua (DBR) è il rapporto percentuale tra la densità basale misurata e quella dello stesso legname non degradato. Le analisi fisiche hanno confermato, per i legni che costituiscono il relitto, un degrado mediamente avanzato²⁶ oltre ad una certa variabilità nello stato di conservazione del legno. Questa circostanza è particolarmente evidente nel materiale prelevato dal madiere M15²⁷, che è uno di quelli in cui è stata rilevata la presenza delle ife.

Le prove di penetrazione hanno consentito di constatare una differenziazione tra gli elementi, per cui sia gli elementi di fasciame sia la scassa risultano degradati in maniera omogenea, mentre la condizione dei madieri è risultata estremamente diversificata.

Le variabilità emersa soprattutto per i madieri con le valutazioni dei parametri fisici non ha trovato riscontro nella misura della composizione chimica, dalla quale emerge per il materiale analizzato uno stato di conservazione omogeneamente degradato. Questa discrepanza non deve sorprendere troppo nel caso di matrici complesse ed eterogenee come quella del legno imbibito di provenienza archeologica, ma conferma il fatto noto che per avere una corretta diagnosi del degrado è importante eseguire sempre diversi tipi di

²⁶ Valore medio di MWC pari a 523%.

²⁷ I campioni prelevati da M15 hanno mostrato una zona esterna con MWC pari a 282% e una zona interna rispetto allo scafo con MWC pari 775%.

valutazioni. In ogni caso, sia la misura dei parametri fisici sia le analisi chimiche non hanno permesso di evidenziare con chiarezza nessun legame specifico tra livelli di degrado e specie legnose²⁸.

Le analisi eseguite, oltre ad incrementare le conoscenze sul relitto in esame, tracciano senz'altro delle linee guida nella determinazione dei futuri trattamenti.

Un elemento importantissimo emerso dalle indagini è la presenza di ferro nelle strutture del legno che renderà indispensabile eseguire un trattamento con agenti chelanti per rimuovere quanto più possibile gli ioni ferro dal relitto prima del consolidamento.

Inoltre si evidenzia la necessità di utilizzare una miscela di polietilenglicole (PEG) ad elevato peso molecolare, questi PEG infatti sono meno igroscopici di quelli a basso peso molecolare e con il loro utilizzo si andrebbero a limitare i problemi di degrado addizionale a carico del legno dati dalla permanenza del ferro e in presenza di condizioni di esposizione e/o conservazione non adeguatamente ed efficacemente controllate. Il PEG ad alto peso molecolare, congiuntamente alle motivazioni esposte sopra, si rende necessario anche in funzione di un altro importante elemento emerso durante le analisi, ossia l'elevato valore di degrado dei legni. Questo tipo di PEG richiede però tempi più lunghi per una buona penetrazione soprattutto per raggiungere le concentrazioni elevate necessarie all'essiccazione all'aria. Per ovviare a questo inconveniente si dovrà ricorrere a trattamenti a caldo che hanno il vantaggio di far diminuire la viscosità della miscela consolidante e far aumentare la solubilità del consolidante stesso. I trattamenti a caldo saranno, quindi, in grado di aumentare la quantità di materia che riesce ad essere trasferita all'interno del legno riducendo i tempi di trattamento e migliorandone la resa.

4 Interventi precedenti

Il relitto era stato inizialmente ospitato in una struttura in ferro, in seguito sostituita con una idonea in acciaio INOX AISI 1316. Durante le fasi di sostituzione della struttura è stata eseguita una mappatura preliminare dei chiodi in ferro, da affiancare a quella effettuata dai tecnici incaricati del rilievo del relitto, isolando gli stessi chiodi con silicone. Sempre durante questa fase si sono svolte le operazioni di pulitura del bene con acqua corrente, spazzole morbide e pennelli.

In seguito è stato eseguito un trattamento chelante costituito di due cicli eseguiti ciascuno mediante immersione in soluzione di EDTA bisodico all'1% in acqua demineralizzata della durata di un mese. A termine del trattamento il relitto è stato nuovamente immerso in acqua di rete previo lavaggio dello stesso, della struttura di supporto e del rivestimento della vasca.

²⁸ Relazione del Dr. Benedetto Pizzo: "Relitto di nave medievale del fiume Stella – Restauro conservativo. Servizio di campionamento e analisi diagnostiche del degrado del legno del relitto medievale del fiume Stella", 2021.

A seguito del trattamento è stato analizzato un campione della soluzione di estrazione mediante test colorimetrico²⁹. L'analisi ha riportato scarsissima presenza di ioni ferro nella soluzione di estrazione (circa 1ppm) evidenziando la necessità di eseguire ulteriori cicli di chelazione. Va fatto presente che prima di effettuare questo trattamento gli elementi metallici del relitto non erano stati estratti, ma solamente coperti con del silicone e questo ne ha molto probabilmente compromesso la riuscita.

5 Intervento di restauro

Il relitto è costituito da legno completamente imbibito ed è attualmente conservato immerso in una vasca di acqua di rete. L'intervento sarà costituito da diverse fasi: per il 'lotto 1', oggetto della presente relazione, sono previsti la desalinizzazione e il consolidamento del reperto ancora in immersione tramite la sostituzione dell'acqua libera con il materiale consolidante disciolto in acqua; mentre il 'lotto 2'³⁰ prevede la successiva essiccazione controllata in modo di mantenere la stabilità dimensionale e di evitare i ritiri e le deformazioni che possono verificarsi durante la fase di essiccazione grazie alla solidificazione del consolidante all'interno della struttura lignea.

5.1 *Trattamento chelante*

Il trattamento chelante è finalizzato all'estrazione e rimozione del ferro presente all'interno della struttura del legno poiché, se presente al termine del restauro, potrebbe provocare, in condizioni espositive con valori elevati di umidità relativa, lo sviluppo di zone con pH fortemente acido all'interno del legno. L'insorgere di problemi conservativi legati alla presenza del ferro sono stati oggetto di numerosi studi, ed è stata accertata la funzione catalizzatrice che il ferro ha nei processi di ossidazione della cellulosa e nel degrado dei polimeri del polietilenglicole (PEG) usato come consolidante³¹.

Allo stato attuale sono già stati eseguiti due cicli di chelazione, ma l'analisi eseguita sulla soluzione di estrazione ha evidenziato la necessità di tentare ulteriori estrazioni. Per favorire la riuscita dei prossimi cicli di estrazione si vede necessaria la preventiva rimozione di tutti gli elementi in ferro.

Il relitto andrà dunque sollevato dalla vasca e posizionato a terra, a questo punto andranno rimossi i chiodi e le parti di legno adiacenti ad essi ed interessate più gravemente dalla presenza di prodotti di corrosione.

²⁹ L'analisi è stata eseguita mediante Kit colorimetrico Idrimeter per il ferro, Carlo Erba.

³⁰ Si veda: MINISTERO DELLA CULTURA SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO PER IL FRIULI VENEZIA GIULIA RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA - OGGETTO: Restauro del Relitto di Precenico: lotto 2 – Essiccazione.

³¹ HOCKER 2012, p. 180. Per maggiori informazioni sull'argomento si veda: JESPERSEN 1987, pp. 141-152; MACLEOD 1990, pp. 119-132, MACLEOD 1996, pp. 331-349. GHISALBERTI 2001, pp. 281- 307; GODFREY 2001, pp. 439-470; SANDSTRÖM 2001 pp. 55-89; GUILMINOT 2002, pp. 2199-2208; SANDSTRÖM 2002, p. 893; SANDSTRÖM 2003; HALL ROTH 2004, pp. 171-179; SANDSTRÖM 2004, pp. 181-199; FORS 2006, pp. 399-415; GODFREY 2011, pp. 697-713; HOCKER 2012, pp. 175-182; DEDIC 2013, pp. 308-313; RÉMAZEILLES 2013, pp. 297-307; WAGNER 2016, pp. 1103-1123; HOCKER 2018.

Per estrarre i chiodi sarà necessario incidere la zona limitrofa alle teste dei chiodi perché i prodotti di corrosione penetrati nel legno lo rendono estremamente duro. Per eseguire quest'operazione bisognerà usare vari strumenti come pinzette, bisturi a lama mobile e bisturi a lama fissa.

In seguito alla rimozione di ciascun chiodo sarà necessario ripristinare il vincolo mediante perni in materiale inerte, ad esempio polimetilmetacrilato tipo Plexiglass®, in modo da mantenere in posizione le varie parti del relitto durante il restauro. Ogni chiodo estratto andrà nominato, mappato e conservato separatamente, in modo di conoscere sempre l'esatta posizione nel relitto di ciascun chiodo.

Durate tutta la durata di tali operazioni sarà necessario mantenere bagnato il relitto con l'ausilio di spruzzatore a pressione e di porzioni di tessuto non tessuto imbevuto. I tempi di permanenza al di fuori della vasca devono essere comunque ridotti all'indispensabile perché è noto che stress provocati dall'evaporazione e dall'imbibizione causano danni alle strutture del legno.

Durante la fase di estrazione dei chiodi sarà possibile preparare la vasca per il primo ciclo di estrazione del ferro. Bisognerà sostituire l'acqua di rete con una soluzione di EDTA bisodico all'1% in acqua demineralizzata tamponato a pH 6 con idrossido di sodio³². Sarà necessario aggiungere poco per volta l'idrossido di sodio, e controllare sempre di volta in volta il pH con un piaccametro in modo che sia possibile fermarsi al raggiungimento del pH desiderato. Per favorire l'azione estrattiva dei bagni dovranno essere installate 3 pompe da laghetto da 12000l/h³³ che possano tenere in agitazione costante la soluzione. Per ridurre la quantità di soluzione e allo stesso tempo mantenere un volume adeguato a coprire interamente il relitto si può riempire lo spazio della vasca non occupato dal relitto con materiale inerte ad esempio con taniche riempite di ghiaia.

A questo punto sarà possibile iniziare i cicli del trattamento chelante. Bisogna tener presente che la durata dei cicli, il loro numero e il termine del trattamento sono elementi che dovranno essere determinati dalle misure effettuate per quantificare gli ioni di ferro estratti e per rilevare la conduttività. La soluzione chelante dovrà essere sostituita quando i valori della conduttività e degli ioni di ferro misurati avranno cessato di aumentare di valore nel tempo o lo faranno in maniera estremamente lenta. Il trattamento sarà considerato concluso quando i due parametri saranno cresciuti molto lentamente o non saranno cresciuti affatto, in ogni caso i valori dovranno essere bassi. Un altro parametro che dovrà essere tenuto strettamente sotto controllo durante questa operazione è il pH: questo tende ad aumentare progressivamente con il procedere dell'estrazione ed è necessario evitare che raggiunga valori eccessivamente basici, rischiosi per la conservazione dei manufatti, pertanto non dovrà superare pH 7,5.

³² Per i 15'000 litri di acqua contenuti nella vasca del relitto saranno necessari 150 kg di EDTA bisodico e potrebbero essere necessari fino a 60 kg di idrossido di sodio per ciascun ciclo di chelazione.

³³ In numero di 3: Pompa da laghetto 12000l/h 100W tipo SunSun CTP-12000 SuperECO 12000l/h 100W per circolazione e filtrazione acqua.

Durante tutto il tempo del trattamento, per limitare la proliferazione degli organismi fotosintetici, la vasca dovrà essere coperta con teli oscuranti.

Al termine del trattamento chelante il relitto andrà risciacquato per due volte con acqua distillata, a seguito andrà nuovamente immerso in acqua di rete dal volume tale da coprirlo interamente.

5.2 Trattamento di consolidamento

Al termine del trattamento chelante si dovrà predisporre la vasca per poter cominciare il trattamento consolidante. Per evitare che insorgano attacchi biologici e controllare quelli eventualmente in atto, durante tutto il tempo del consolidamento, la vasca dovrà essere coperta con teli oscuranti in modo da limitare la proliferazione degli organismi fotosintetici. Tuttavia questa accortezza non risolverà completamente il problema e, se non si agisse parallelamente in altro modo, si rischierebbe che la crescita micro-biologica possa progredire in maniera eccessiva durante il lungo tempo del consolidamento. Bisognerà quindi aggiungere all'acqua nella quale è immerso il relitto un'adeguata quantità di biocida³⁴ atta a costituire una soluzione all'1,5%, avendo prima la premura di prelevare la stessa quantità di acqua dalla vasca in modo da mantenere il volume invariato.

A questo punto si potrà cominciare il trattamento consolidante che dovrà essere eseguito con una miscela di polietilenglicole (PEG) a diverso peso molecolare secondo una procedura che da tempo è utilizzata presso il 'Laboratorio Materiali Organici' dell'ICR.

Alla soluzione di biocida verrà aggiunto, ogni mese, un quantitativo di PEG pari al 10% in peso del totale dell'acqua utilizzata per il bagno. Il PEG dovrà essere aggiunto per non meno di sette volte, perciò il procedimento di consolidamento ha una durata di circa sette mesi, considerando che il trattamento si ritiene concluso circa 30 giorni dopo l'ultima aggiunta. Al termine del trattamento si arriverà ad aver aggiunto, in totale, non meno del 70% di PEG in peso dell'acqua utilizzata per il bagno. Tuttavia si anticipa sin da subito che, dato l'elevato valore di degrado del legno, potrà essere necessaria un'ulteriore aggiunta di PEG, fino al raggiungimento della percentuale dell'80%³⁵. Durante le fasi di consolidamento, infatti, la Direzione Lavori valuterà unitamente al restauratore abilitato, e in possesso dello specifico settore di competenza³⁶, a quale percentuale giungere per il corretto consolidamento dei legni del relitto; il

³⁴ 225 litri di biocida tipo PREVENTOL® RI50 o equivalente.

³⁵ Il presente progetto di restauro prevede la fornitura di una quantità di PEG necessaria al raggiungimento del 70%; in caso la Direzione Lavori valuterà necessario un'ulteriore somministrazione di PEG, verrà disposta un'apposita variante al progetto che preveda la relativa aggiunta di materiale.

³⁶ 6: "materiali e manufatti tessili, organici e pelle".

restauratore dovrà avvalersi anche di idonea strumentazione³⁷ atta a valutare il buon andamento del consolidamento con misurazioni costanti durante tutto il periodo del consolidamento.

L'intero quantitativo di PEG da immettere di volta in volta dovrà essere distribuito nell'arco di due giornate per permettere allo stesso di disciogliersi nella soluzione in maniera omogenea. Le prime tre volte in cui si immetterà PEG nella soluzione si utilizzerà PEG 1500, un PEG a peso molecolare più basso di quello che verrà usato nelle successive quattro aggiunte per il quale si utilizzerà PEG 4000.

Il PEG 1500 è in grado di entrare e propagarsi all'interno delle strutture del legno grazie alle dimensioni ridotte delle sue molecole. Il PEG 4000 ha lo scopo di assicurare il necessario supporto tridimensionale di adeguata rigidità atto a sostenere i legni ormai indeboliti a livello strutturale.

Appena prima della quarta immissione di PEG sarà necessario installare dei riscaldatori ad immersione³⁸ in modo da diminuirne la viscosità della soluzione ed aumentare la capacità di penetrazione del consolidante alle elevate concentrazioni.

Durante tutto il trattamento consolidante si dovranno mantenere in funzione le pompe da laghetto già utilizzate per il trattamento chelante. Le pompe avranno la funzione di: facilitare l'assorbimento del PEG da parte del legno; movimentare la soluzione, in modo da assicurarne che mantenga caratteristiche omogenee all'interno della vasca; velocizzare lo scioglimento del PEG in acqua, soprattutto alle concentrazioni più elevate. Per assicurarne il corretto funzionamento le pompe andranno pulite periodicamente, si consiglia di eseguire la pulizia una volta al mese facendo lavorare le pompe in un contenitore con acqua pulita per circa un'ora, si suggerisce di eseguire anche la pulizia della superficie dei riscaldatori a immersione.

5.3 Documentazione

Dovrà essere eseguita un'accurata documentazione grafica e fotografica dello stato di fatto, delle tecniche esecutive e di tutte le fasi del lavoro, a corredo di tale documentazione dovrà essere redatta una relazione finale.

6 Considerazioni finali

Le operazioni descritte, i materiali indicati e le prescrizioni riportate nella presente relazione potranno subire eventuali modifiche o variazioni in corso d'opera, sotto indicazione e supervisione della Direzione Lavori.

³⁷ Rifrattometro o densimetro correttamente tarato.

³⁸ Numero 6 riscaldatori per acquario da 800W tipo HYGGER Riscaldatore per Acquario da 800W Temperatura Regolabile con LCD Esterno.

Si è deciso di non computare, per il momento, lo smaltimento della soluzione consolidate risultante dall'intervento e di conservarla in modo da poter valutare successivamente la possibilità di reimpiegarla quale valida risorsa³⁹ nell'ambito di un altro intervento di consolidamento per legno bagnato. Qualora in seguito si decidesse per lo smaltimento⁴⁰ della soluzione risultante questa avrà avuto il tempo di evaporare riducendo di volume e aumentando di densità rendendo così più semplici e più economiche le operazioni necessarie a quest'ultima opzione.

Per la compilazione del computo metrico estimativo i prezzi di riferimento sono stati il Prezzario DEI anno 2025, il Prezzario regionale dei lavori pubblici regione Veneto anno 2025⁴¹ e il Prezzario regionale dei lavori pubblici regione Friuli Venezia Giulia anno 2025⁴²; per i costi non presenti né nei prezzari indicati né nei prezzari delle regioni limitrofe sono state eseguite delle analisi di mercato e compilati nuovi prezzi. Sempre ai fini della redazione del computo metrico estimativo il trasporto e la consegna dei materiali più ingombranti è stato stimato una volta; inoltre alcune strumentazioni⁴³ sono state conteggiate come da acquistare, e non da noleggiare, perché ritenuto vantaggioso per lo svolgimento delle lavorazioni specialistiche.

³⁹ In merito al suo riutilizzo della soluzione consolidante si rimanda all'articolo: L.N. Mikkelsen, J. Frydendhal, J.B.Jensen, N.B. Pederson Recycling of used PEG solutions by vacuum drying in Atti del Convegno ICOM CC Wet Organic Archaeological Materials, 2023 Mainz.

⁴⁰ Trattandosi di materiali specialistici per poter ottenere una quotazione di smaltimento sarà necessario far eseguire un'analisi di classificazione del materiale. Alla data attuale il costo stimato di tale analisi corrisponde a 350,00 € + IVA.

⁴¹ <https://www.regione.veneto.it/web/lavori-pubblici/prezzario-regionale>

⁴² <https://www.regione.fvg.it/rafvfg/cms/RAFVG/infrastrutture-lavori-pubblici/lavori-pubblici/FOGLIA7/>

⁴³ Pompe da laghetto, tubi da irrigazione, telo per laghetto, riscaldatori ad immersione, etc.

7 Bibliografia

3. SABAP FVG - Relazione archeologica Relitto fiume Stella.

Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, (D. Lgs. n.112/98 art. 150 comma 6), Elaborati del Gruppo di lavoro (D.M. 25.7.2000)

Capulli, M. (2017). The Preceniccio Shipwreck. An 11th–13th-century vessel from the river Stella. In *Baltic and beyond. Change and continuity in shipbuilding* (pp. 131-134). National Maritime Museum, Gdańsk.

Capulli, M. (2018). Anaxum Project, Archeologia e storia di un paesaggio fluviale: ricerca e didattica. In *Il patrimonio culturale sommerso: ricerche e proposte per il futuro dell'archeologia subacquea in Italia*, Udine, 303-316.

DEDIC 2013: D. DEDIC, T. IVERSEN, M. EK, *Cellulose degradation in the Vasa: the role of acids and rust* in "Studies in conservation", 2013, 58.4, pp. 308-313.

FORS 2006: Y. FORS, M. SANDSTRÖM, *Sulfur and iron in shipwrecks cause conservation concerns* in "Chemical Society Reviews", 2006, 35.5, pp. 399-415.

GHISALBERTI 2001: E. L. GHISALBERTI, I. M. GODFREY, K. KILMINSTER, V. L. RICHARDS, E. WILLIAMS, *The analysis of acid-affected Batavia timbers* in *Proceedings of the 8th ICOM Group on wet organic archaeological materials conference, Stockholm, 11-15 June 2001*, 2001, pp. 281-307.

GODFREY 2001: I. GODFREY, K. KASI, V. RICHARDS, *Iron removal from waterlogged leather and rope recovered from shipwreck sites* in *Proceedings of the 8th ICOM Group on wet organic archaeological materials conference, Stockholm, 11-15 June 2001*, 2001, pp. 439-470.

GODFREY 2011: I. M. Godfrey, V. Richards, M. Cha, *The post-treatment deterioration of marine archaeological wood—where to now*, in *Asia-Pacific regional conference on underwater cultural heritage. Manila, Philippines 2011*, pp. 697-713.

GUILMINOT 2002: E. GUILMINOT, F. DALARD, C. DEGRIGNY, *Mechanism of iron corrosion in water—polyethylene glycol (PEG 400) mixtures* in "Corrosion science", 2002, 44.10, pp. 2199-2208.

HALL-ROTH 2004: I. HALL-ROTH, L. MALMBERG, *Save the Vasa—an Introduction* in *Proceedings of the 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Copenhagen, 2004*, pp. 171-179.

HOCKER 2004: HOCKER F. M. (2004). Bottom-based shipbuilding in Northwestern Europe. In F. M. Hocker, C. A. Ward (eds.), *The philosophy of shipbuilding: conceptual approaches to the study of wooden ships*, (pp. 65-93). College Station, Texas.

HOCKER 2012: E. HOCKER, G. ALMKVIST, M. SAHLSTEDT, *The Vasa experience with polyethylene glycol: A conservator's perspective* in "Journal of cultural heritage", 2012, 13.3, pp. 175-182.

HOCKER 2018: E. HOCKER, *Preserving Vasa*, Stockholm, 2018.

JESPERSEN 1987: K. JESPERSEN, *Precipitation of iron-corrosion products on PEG-treated wood* In *Conservation of wet wood and metal: proceedings of the ICOM conservation working groups on wet organic archaeological materials and metals*, 1987, pp. 141-152.

MACLEOD 1990: I. D. MACLEOD, P. BROOKE, V. RICHARDS, *Iron corrosion products and their interactions with waterlogged wood and peg* in *Proceedings of the 4th ICOM-Group on wet organic archaeological materials conference*, 1990, pp. 119-132.

- MACLEOD 1996: I. D. MACLEOD, V. L. RICHARDS, *The impact of metal corrosion products on the degradation of waterlogged wood recovered from historic shipwreck sites in Proceedings of the 6th ICOM group on wet organic archaeological materials conference, York, 9-13 September 1996*, 1996, pp. 331-349.
- MIKKELSEN 2023: MIKKELSEN, L., FRYDENDAHL, J., JENSEN, J. B., & PEDERSEN, N. B. (2023). Recycling of used PEG solutions by vacuum drying. In *Wet Organic Archaeological Materials 2023*.
- MINISTERO DELLA CULTURA SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO PER IL FRIULI VENEZIA GIULIA RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA - OGGETTO: Restauro del Relitto di Precenico: lotto 2 – Essiccazione
- POMEY 2005: POMEY, P. (2005). P. POMEY, E. RIETH. *L'archéologie navale*, Parigi.
- POMEY 2012: POMEY, P., KAHANOV, Y., & RIETH, E. (2012). Transition from Shell to Skeleton. In *Ancient Mediterranean Ship-Construction: analysis, problems, and future research*. International journal of nautical archaeology, 41(2), (pp. 235-314).
- Relazione del Dr. Benedetto Pizzo: “Relitto di nave medievale del fiume Stella – Restauro conservativo. Servizio di campionamento e analisi diagnostiche del degrado del legno del relitto medievale del fiume Stella”, 2021.
- RÉMAZEILLES 2013: C. RÉMAZEILLES, K. TRAN, E. GUILMINOT, E. CONFORTO, P. REFAIT, *Study of Fe (II) sulphides in waterlogged archaeological wood* in “Studies in Conservation”, 2013, 58.4, pp. 297-307.
- SANDSTRÖM 2001: M. SANDSTRÖM, F. JALILEHVAND, I. PERSSON, U. GELIUSD, P. FRANK, *Acidity and Salt Precipitation on the Vasa in Proceedings 8th ICOM-CC WO AM Conference Stockholm 11-15 June 2001*, pp. 67-89. 237
- SANDSTRÖM 2001: T. SANDSTRÖM, I. HALL-ROTH, A. KARLSSON, *Salt precipitation on Vasa timbers: an introduction to a problem in Proceedings of the 8th ICOM Group on wet organic archaeological materials conference, Stockholm, 11-15 June 2001*, 2001, pp. 55-66.
- SANDSTRÖM 2002: M. SANDSTRÖM, F. JALILEHVAND, I. PERSSON, U. GELIUS, P. FRANK, I. HALL-ROTH, *Deterioration of the seventeenth-century warship Vasa by internal formation of sulphuric acid* in “Nature”, 2002, 415.6874, p. 893.
- SANDSTRÖM 2003: M. SANDSTRÖM, Y. FORS, I. PERSSON, *The Vasa's New Battle: Sulfur, Acid and Iron*. National Maritime Museums [Statens maritima museer] 2003.
- SANDSTRÖM 2004: M. SANDSTRÖM, Y. FORS, F. JALILEHVAND, E. DAMIAN, U. GELIUS, *Analyses of sulfur and iron in marine-archaeological wood in Proceedings of the 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, Copenhagen, 2004*, pp. 181-199.
- WAGNER 2016: L. WAGNER, G. ALMKVIST, T. K. BADER, I. BJURHAGER, L. RAUTKARI, E. K. GAMSTEDT, *The influence of chemical degradation and polyethylene glycol on moisture-dependent cell wall properties of archeological wooden objects: a case study of the Vasa shipwreck* in “Wood Science and Technology”, 2016, 50.6, pp. 1103-1123.