

Cristiano Bettini

COME PROGETTAVANO  
I VELIERI

*La robustezza degli scafi*

Vol. III

*anteprima*  
*visualizza la scheda del libro su [www.edizioniets.com](http://www.edizioniets.com)*



Edizioni ETS



[www.edizioniets.com](http://www.edizioniets.com)

© Copyright 2020

Edizioni ETS

Palazzo Roncioni - Lungarno Mediceo, 16, I-56127 Pisa

[info@edizioniets.com](mailto:info@edizioniets.com)

[www.edizioniets.com](http://www.edizioniets.com)

Distribuzione

Messaggerie Libri SPA

Sede legale: via G. Verdi 8 - 20090 Assago (MI)

Promozione

PDE PROMOZIONE SRL

via Zago 2/2 - 40128 Bologna

ISBN 978-884676007-4

*“Quam ob rem Geometris munus haud ingratum  
me esse oblaturum confido, si egregium consensum  
interhaec duo principia toto coelo a se invicem diversa  
dilucide demonstravero”*

*[Per la qual cosa io confido di aver lasciato agli  
Studiosi un dono non ingrato, se avrò lucidamente ed  
universalmente dimostrato come egregiamente accorda-  
re questi due principi tra loro diversi]*

Eulero, in occasione della presentazione  
delle Equazioni cardinali della statica nel 1774



# Indice

|  |     |
|--|-----|
| Presentazione<br><i>Prof. V. Laudazi</i>                 | XI  |
| Presentazione<br><i>Amm. Isp. Capo (GN) A. Gauzolino</i> | XV  |
| Introduzione   | 1   |
| 1. Il legname per uso navale                             | 9   |
| 2. I contributi di Eulero alla progettazione navale      | 29  |
| 3. La nave come una trave                                | 45  |
| A. Gli sforzi  | 45  |
| B. Sforzi longitudinali                                  | 67  |
| C. Sforzi trasversali                                    | 97  |
| D. Sforzi locali   | 104 |
| E. Robustezza  | 104 |
| F. Quantizzare la resistenza strutturale                 | 116 |
| G. Collasso per fragilità o fatica                       | 127 |
| H. Carichi dinamici e di impatto                         | 128 |
| 4. Le strutture resistenti                               | 137 |
| A. Le strutture principali                               | 137 |
| B. I Giunti  | 143 |
| 5. Differenze tra Marine                                 | 165 |
| 6. L'apporto nello <i>yachting</i>                       | 181 |
| Epilogo. Tra due ere                                     | 215 |

APPENDICI

|   |     |
|---|-----|
| Appendice 1. Eulero e le equazioni indefinite della trave (1771)                                    | 221 |
| Appendice 2. Stato dell'arte della <i>teoria del trave-nave</i> nel XIX secolo                      | 229 |
| Appendice 3. Sollecitazioni su una sezione trasversale con il<br><i>principio del minimo lavoro</i> | 235 |
| Appendice 4. Le <i>ellissi di inerzia</i> : due applicazioni  | 240 |
| Appendice 5. Le strutture resistenti: alberature, puntali e carichi critici                         | 246 |
| Appendice 6. Le dimensioni sostenibili  | 250 |
| Appendice 7. Uso empirico dell'onda trocoidale e delle curve di Bonjean                             | 257 |
| Appendice 8. Forze di taglio e Momento flettente di una <i>barge</i> costiera                       | 267 |
| Appendice 9. Dal calcolo alla grafica   | 271 |
| Appendice 10. Repliche e restauri storici   | 276 |
| <br>  |     |
| Bibliografia (aggiuntiva ai Voll. I e II)   | 285 |
| Indice dei nomi   | 287 |
| Indice delle navi e degli yacht   | 291 |

## Indice delle schede

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| Cap. 1. | La stagionatura  | 13  |
|         | Principali caratteristiche meccaniche del legno            | 23  |
|         | Resistenza al fuoco  | 27  |
| Cap. 3. | Due dovuti riferimenti storici                             | 48  |
|         | Una particolarità del <i>carico critico</i>                | 53  |
|         | Il peso medio degli scafi vuoti                            | 58  |
|         | La trave come riferimento d'origine                        | 62  |
|         | Calcolo grafico delle deformazioni elastiche verticali     | 65  |
|         | La costruzione mista legno-ferro                           | 69  |
|         | Giunti di espansione                                       | 95  |
|         | Effetto dei colpi sulle murate                             | 132 |
| Cap. 4. | Sezioni delle travi di massima resistenza ( <i>auree</i> ) | 163 |
| Cap. 5. | Confronto tra due vascelli                                 | 178 |
| Cap. 6. | Sforzi e rapporti dimensionali                             | 191 |
|         | Solidità e rigidità  | 193 |
|         | Confronto tra legnami per sforzi locali                    | 199 |
| App. 6. | Le curve di Bonjean  | 257 |



# Presentazione

Nel presentare al lettore questo terzo e conclusivo volume sulla costruzione dei velieri, è mia opinione che l'intera opera possa considerarsi un vero e proprio trattato di progettazione delle strutture in chiave moderna.

La normativa attuale per le costruzioni detta le regole di progettazione distinguendo tra nuove strutture e strutture esistenti. Per queste ultime al punto 8.5 delle NTC 2018 si prevede la necessità, per la formulazione del modello strutturale, di una preventiva analisi storico critica della struttura, analisi puntualmente effettuata nei due volumi precedenti.

Richiede, poi, il rilievo geometrico-strutturale sia dell'insieme che delle singole parti componenti ed anche questo requisito è ravvisabile in tutto il primo volume nella descrizione delle varie tipologie di navi ed infine la caratterizzazione dei materiali, oggetto ampiamente trattato già nel primo capitolo di questo terzo volume. Il tutto accompagnato dalla valutazione del grado di conoscenza dell'opera da valutare, individuato da un fattore di confidenza che nel nostro caso possiamo assumere tranquillamente pari a 1.

Il testo continua con una valutazione progettuale vera e propria nei capitoli tre e quattro.

Le cognizioni strutturali sono state esplicitate lentamente partendo dall'osservazione e dalla descrizione degli eventi accaduti durante le navigazioni; esse sono state accompagnate dai vari tentativi di teorizzazione, collegati alla evoluzione di discipline rigorose di natura fisica e matematica.

Mentre nei primi due volumi dal punto di vista costruttivo si enfatizza l'uso della matematica, credo di poter affermare che in questo terzo volume l'Autore concluda l'opera affrontando aspetti tipici della Scienza delle Costruzioni.

Infatti questa si articola in una pluralità di discipline che trattano temi spesso molto differenti tra loro, quali la tecnica delle costruzioni, la meccanica del continuo, la stabilità dell'equilibrio elastico, tutti argomenti presenti nel testo sia in forma esplicita che implicita. Tutte discipline trattate nei primi quattro capitoli.

Ricalcando la linea dettata nella presentazione dei due precedenti volumi, credo sia utile puntualizzare alcuni aspetti salienti dell'evoluzione in senso ingegneristico della Scienza delle Costruzioni e richiamare alcuni concetti di base di questa disciplina, contenuti nel testo.

Agli albori di essa troviamo senza dubbio il nome di Galileo. Non possiamo dimenticare che tutta la teorizzazione alla base della Scienza delle Costruzioni, ivi compresa la teoria delle navi, si basa sui principi della fisica stabiliti da Archimede. Ma non si può sottacere il grande ostacolo all'evoluzione delle tecniche costruttive rappresentato dalle convinzioni date per assolute di Aristotele e la difficoltà per demolire le convinzioni aristoteliche con l'introduzione del metodo sperimentale di questo grande italiano, che mise in crisi l'ipse dixit.

Mandato a Pisa per studiare medicina, preferì Euclide a Ippocrate. Scoprì l'isocronismo del pendolo e lo applicò alla misura del tempo e lo propose ai medici come strumento di diagnosi nello studio della regolarità delle pulsazioni delle arterie.

Da studente di medicina divenne innamorato della geometria rimanendo colpito dalle argomentazioni logiche di questa disciplina. Da qui i suoi assalti ad alcuni dei dogmi peripatetici cercando di appagare la propria ragione con l'osservazione e con l'esperienza.

Si rese in breve conto di alcune contraddizioni e proclamò come ridicola l'infallibilità attribuita ad Aristotele, iniziando così l'era della scienza.

Le sue meditazioni in geometria lo portarono alla intuizione del centro di gravità dei solidi, e a solo ventiquattro anni introdusse nei suoi dialoghi le due nuove scienze della meccanica e del moto locale. Pur avendo grande consenso nel mondo scientifico le sue innovazioni non furono indolori. Il primo passo contro di lui fu il discorso del domenicano Caccini che nella chiesa di Santa Maria Novella pronunciò un discorso contro le sue tesi iniziando con l'invettiva "*Viri Galilei, quid statis aspicientes in coelum?*".

Con lo studio delle discipline matematiche e l'introduzione del metodo sperimentale, Galileo può considerarsi il fondatore dell'ingegneria. Questa disciplina si avvale, infatti, della costruzione di modelli matematici sulla base di ipotesi teoriche da assoggettare sistematicamente a verifica sperimentale.

Non esiste Istituto Universitario di ingegneria che non sia dotato anche di un Laboratorio per la verifica sperimentale delle ipotesi di base e dei risultati.

La costruzione di un modello matematico per realizzare una costruzione di qualunque genere è essenziale per prevedere e caratterizzare le soluzioni attese, ma la formulazione delle equazioni integro-differenziali con le relative condizioni al contorno deve nascere da ipotesi di base da validare sperimentalmente.

Oggi lo studio della Scienza delle Costruzioni inizia con l'analisi del comportamento statico e dinamico del corpo rigido, oggetto della ben consolidata disciplina della meccanica razionale, in cui vengono definiti i concetti di base di tutta la meccanica (momento statico, baricentro, centro di spinta, equilibrio delle forze, quantità di moto, ecc.)

Segue lo studio del corpo deformabile, con la teoria dell'elasticità e della plasticità applicate ai concetti di trave, piastra, lastra, gusci, ecc.

Ma l'aspetto di maggiore interesse, nato a causa di improvvisi inspiegabili disastri strutturali, ha aperto l'indagine strutturale al campo della stabilità statica e dinamica.

I fenomeni di instabilità si manifestano in tutti i tipi di struttura, cioè nelle travi rettilinee e curve, nelle travi reticolari, nelle lastre piane e curve, nelle coperture, nei serbatoi, ogni qual volta si sia in presenza di azioni di compressione agenti in parti anche limitate di una struttura. Grandi strutture reticolari possono collassare per l'instabilità di una sola asta compressa.

Da un punto di vista generale gli ingegneri si sono resi conto subito che i fenomeni di instabilità nascono quando l'equilibrio tra le forze esterne e le tensioni interne di una qualsivoglia struttura implica una molteplicità di configurazioni ognuna nell'intorno dell'altra, il che avviene quando l'equilibrio permane in una configurazione variata rispetto a quella saggiata.

Da un punto di vista procedurale, assegnata la distribuzione delle forze esterne, se ne fa crescere gradatamente l'intensità e si saggia la configurazione raggiunta ad ogni *step* perturbandola. Se la configurazione variata non è in equilibrio torna a quella iniziale e l'equilibrio è da considerarsi stabile, in caso contrario la configurazione variata permane

in equilibrio, il che è indice di una molteplicità di configurazioni sotto gli stessi carichi. Il moltiplicatore dell'intensità dei carichi diviene critico e le sollecitazioni da applicare alla struttura devono mantenersi inferiori in intensità a quelle così raggiunte.

I metodi elaborati per individuare la condizione di equilibrio critica sono essenzialmente due: il criterio statico e quello energetico. Assegnata la configurazione di equilibrio da saggiare, essa viene leggermente modificata. Nella configurazione variata le forze esterne cambiano la posizione rispetto al corpo e generano nuove sollecitazioni che tendono ad alterare la configurazione, mentre all'interno nascono nuove tensioni che tendono a riportarla a quella precedente. Uguagliando le due tendenze si individua la configurazione critica.

Nel criterio energetico, quando si modifica la configurazione equilibrata si ha una variazione del lavoro interno che di solito aumenta e una variazione dell'energia potenziale di posizione delle forze esterne, che di solito diminuisce. Se l'energia totale del sistema rimane invariata si ha una condizione critica, indice di una pluralità di configurazioni.

Come detto, al crescere dell'intensità delle forze esterne la configurazione del sistema varia, rimanendo unica, fino a raggiungere quella critica in corrispondenza della quale può innescarsi il fenomeno dell'instabilità con un cambio improvviso di configurazione, che può anche innescare il collasso del sistema.

Ma la variazione di configurazione può essere indotta anche da cause esterne, come nel caso degli scafi. Lo stesso metacentro può essere definito come la posizione limite del baricentro compatibile con equilibrio indifferente tra più configurazioni variate dell'imbarcazione.

È vitale per l'ingegneria individuare un metodo per riconoscere se una configurazione è prossima a quella critica o lontana da essa. Quello più affidabile consiste nel perturbare dinamicamente la configurazione valutando la risposta in frequenza della struttura che risulta sempre più modesta man mano che ci avviciniamo a quella critica, fino ad azzerarsi.

Tornando al testo che stiamo esaminando e volendo caratterizzare le origini della costruzione delle navi, un altro autore, per molti versi accostabile a Galileo è Robert Hooke, celebre meccanico e matematico inglese, nato nel 1635 nell'isola di Wight. Uomo di cultura universale, famoso architetto (Si deve a lui la ricostruzione di Londra dopo il devastante incendio del 1666) frequentò la scuola di Westminster dedicandosi alle matematiche. Si dedicò con successo all'osservazione degli astri, alla definizione e determinazione della longitudine, allo studio dei terremoti, ai segnali trasmissibili col telegrafo e a una moltitudine di esperimenti atti alla caratterizzazione dei materiali.

Altri nomi importanti, di cui si discute nel testo, sui quali, quindi, non mi dilungo, sono quelli di Eulero, cui si deve l'individuazione del fenomeno dell'instabilità con l'analisi del caso dell'asta caricata di punta, Menabrea e Castigliano, Saint Venant.

L'analisi dei singoli contributi al progresso della Scienza delle Costruzioni loro dovuti è necessariamente soggettivo per cui non mi pronuncio.

Nel testo inteso come guida alla progettazione troviamo la caratterizzazione del materiale per uso navale, insieme alle cause del suo deterioramento.

Per quanto attiene al piano teorico vengono analizzati estesamente i contributi di Eulero, con l'introduzione del metacentro, punto caratteristico dello scafo essenziale per valutare la stabilità e sono riportate le equazioni di equilibrio con dovizia di particolari.

Viene anche caratterizzata la modellazione della nave analizzandone la robustezza

longitudinale e trasversale, commentando anche l'effetto di shock improvvisi dovuti a carichi dinamici o a impatto.

Un cenno particolare va rivolto alle appendici, che trattano temi di vario interesse, appetibili per lettori specificamente interessati.

A conclusione di questa presentazione voglio osservare che l'intera opera è godibile dallo storico, per l'interessante punto di vista dell'evoluzione degli eventi diverso da quello usuale, dall'appassionato di questioni marinaresche in generale, ma anche da chiunque si metta in mare e voglia rendersi conto delle forze in gioco quando naviga in condizioni di mare difficili che comportino elevate inclinazioni, per avere la coscienza del certo raddrizzamento oppure il giustificato timore di un possibile ribaltamento dell'imbarcazione.

Vincenzo Laudazi  
Professore emerito di *Scienza delle Costruzioni* presso l'Accademia Navale

## Presentazione

Questo è il terzo libro, che completa il complesso e sempre affascinante argomento della *architettura navale* ed in particolare del progetto dei velieri, che dà il titolo a questi interessantissimi volumi.

Leggere o anche scorrere i tre libri dell'Amm. Cristiano Bettini è come fare un viaggio nel tempo non solo tecnico ma anche storico e di costume.

Da un punto di vista strettamente tecnico, la trattazione condotta dall'Amm. Bettini non si ferma ai velieri ma arriva anche ai giorni nostri, con riferimenti sempre puntuali e precisi a fatti ed a scienziati, a partire da Pitagora, passando da Eulero – Bernoulli, Timoshenko e arrivando alle più moderne tecniche di progetto strutturale, quali il calcolo e dimensionamento delle strutture con il metodo degli elementi finiti, indicato con FEM (*Finite Elements Method*).

La storia della navigazione e della costruzione di navi inizia migliaia di anni fa, quando gli uomini incominciarono ad avventurarsi in mare, per motivi di commercio o più spesso per conquiste e aggressioni. La ricchezza delle nazioni dipendeva in gran parte dalla capacità di andare per mare e di resistere alle avversità naturali. Naturalmente ci furono molti disastri navali, con le navi che affondavano perché si rompevano oppure si capovolgevano.

Il progetto complessivo delle navi, anzi dei velieri, si modificava e si adeguava alle esperienze che mano a mano venivano acquisite e, conseguentemente, questo continuo aggiornamento ed accrescimento di conoscenza costituiva un punto di forza importante per le nazioni che si avventuravano in mare e che dal mare traevano ricchezza.

Fino alla metà dell'800, l'ingegneria navale come oggi comunemente definita, non esisteva. Vi erano invece due distinte professionalità: una prossima a quella dell'odierno ufficiale macchinista, formata nelle scuole, e l'altra quella del costruttore, a cui si perveniva attraverso l'esperienza e l'apprendistato. Ancora dopo il 1860, in Inghilterra ci si lamentava perché scienza ed arte della costruzione navale venivano tramandate in ambito familiare, da padre in figlio, e costudite gelosamente come segreti.

Un argomento che trovo affascinante, ben evidenziato nel libro, riguarda la conoscenza e l'uso corretto da parte dei costruttori del materiale più importante per la costruzione delle navi: il legno. Per esempio, l'*agraria boschiva* era una materia di studio, insieme a fisica, matematica geometria, manovra delle navi ecc. del Collegio istituito a Venezia con decreto del 1810 per la formazione dei Cadetti della Regia Marina. Per inciso, tra gli allievi del Collegio vi fu anche l'Amm. Tegetthoff, Comandante della Squadra Navale Austriaca nella battaglia di Lissa del 20 luglio 1866.

Spesso, riguardo al progetto navale, diversi autori pongono la domanda: si tratta di "arte o di scienza"? Nei libri dell'Amm. Bettini questo connubio continua ad essere presente e, con estrema chiarezza, si conferma ancora una volta che la *scienza* e l'approccio

matematico hanno contribuito sicuramente a rendere più sicure le navi e ad ottimizzarne il progetto ma che la loro realizzazione continua a richiedere un apporto importante di esperienza che deriva da consolidata pratica e conoscenza acquisita sul campo, o per meglio dire sul mare.

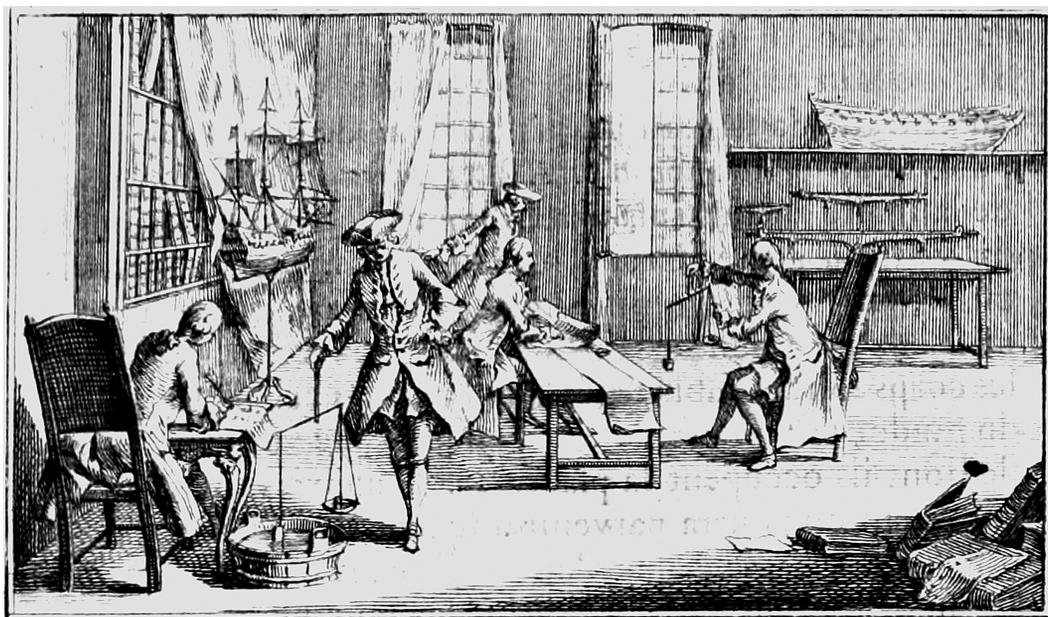
Quanto illustrato e presentato nei tre volumi *Come progettavano i Velieri* ha richiesto da parte dell'Amm Bettini un impegno di molti anni, svolto nel tempo libero dai suoi impegni lavorativi, sia in ambito Marina Militare che in ambito Difesa, dove ha ricoperto ruoli di vertice.

L'Amm Bettini ha raccolto, studiato, valutato e alla fine sintetizzato una mole incredibile di dati, notizie, informazioni spesso "nascoste" nelle librerie delle Università o delle Marine militari europee e non solo.

Si è trattato di un lavoro notevole, ben strutturato e ottimamente organizzato, che costituisce un punto di riferimento sicuro per chi si avventura nel mondo del progetto navale ed è comunque una piacevole lettura anche per chi non ha studiato Scienze delle Costruzioni ma è "semplicemente" un appassionato di mare, di navi e della storia dell'umanità.

Complimenti sinceri all'amico Cristiano e buona lettura.

Ammiraglio Ispettore Capo (ris.)  
*Capo di Corpo del "Corpo del Genio Navale" dal 2008 al 2013*  
Alberto Gauzolino



## Introduzione

Nei due volumi precedenti abbiamo visto come non vi fosse prima del '600 nella cultura navale una chiara separazione tra progettazione e costruzione; nei due secoli successivi non potremmo trovare, per l'argomento della **robustezza strutturale** dello scafo, una collocazione adeguata se non a cavallo delle due. Infatti il problema, che ha natura sia statica che dinamica ed è oggi collocato pienamente in area progettuale, doveva allora essere comunque ben presente fin dai primi passi del progetto nella mente sia di chi pensava come di chi costruiva un vascello ma non lo troviamo in modo così differenziato per il semplice fatto che non esistevano materiali alternativi al legno. In realtà anche la stessa tracciatura in scala reale, che abbiamo descritto nel Vol. I, si divideva in due fasi principali: la tracciatura vera e propria *in sala a tracciare* (*lofting*) e la sagomatura e smussatura delle *dime* sulle linee tracciate (*moulding + bevelling*), la prima più prossima alla progettazione, la seconda alla costruzione.

La robustezza dello scafo non era affidata al singolo progettista ma dipendeva da scelte governative inserite in *Ordinanze* (*Ordonnances, Establishments, Ordenanzas*), normalmente emesse, a partire dal 1650 circa, dai rispettivi ammiragliati nazionali con organi ispettivi appositi, che dettagliavano dimensionamento e posizione dei diversi componenti di una nave; da esse discendevano anche quelle delle differenti possibili giunzioni tra componenti e gli irrobustimenti longitudinali e trasversali, realizzati con elementi in legno o metallo, che divennero sempre più importanti o critici al crescere delle dimensioni;

erano questi infatti che nei secoli avevano limitato la crescita progressiva degli scafi, pena la compromissione della loro robustezza parziale o generale e dunque la capacità di permanere a lungo in mare, condizionando anche la durata del ciclo di vita, che a sua volta richiedeva una programmazione di base per l'aggiornamento delle flotte, almeno nelle Marine maggiori.

Per completare la storia iniziata con i primi due volumi, che ha richiesto anche qui una certa indicialità per rimanere nel contesto epocale e che ho cercato di rendere quanto più accessibile, è quindi necessario addentrarci anzitutto, seppur in modo sintetico, nella cultura del legno che permeava il campo navale dalle origini fino a tutto il XVIII sec. e oltre, ed i cui riverberi... per fortuna, sono giunti intatti fino a noi, o perlomeno a quella parte di chi connette le costruzioni in legno ad un fascino antico che ancora questo tipo di realizzazioni porta con sé nell'andar per mare, fatto anche della diversa sonorità dell'onda che impatta su uno scafo in legno e del profumo stesso che questo materiale mantiene nel corso degli anni. Ricordo ancora che una prima sensazione di quanto questo sia vero, la provai quando dopo oltre 40 anni, portando a nudo per il restauro lo scafo verniciato del mio *Dragone* (I-2) norvegese del 1949 in *pitch-pine*, sentii emanare ancora fortissimo il profumo intatto di questa preziosa conifera nordica<sup>1</sup>.

Il legno non è infatti un materiale inerte, come molti dei materiali odierni di costruzione, né lo diventa dopo i vari trattamenti cui è sottoposto prima della lavorazione, ma un corpo vivo che pur con la migliore stagionatura, cioè con un processo di stabilizzazione ottenuto dalla perdita indotta di liquidi, mantiene molte delle caratteristiche originali, con i suoi innumerevoli pregi e diverse sue debolezze. Sono proprio queste ultime che hanno portato ad una selezione e specializzazione dei vari tipi di legno per alcune delle parti del corpo dello scafo, nonché delle alberature. La stessa *Scienza delle costruzioni*, come vedremo, trova avvio con questo materiale e tutta l'esperienza maturata nei secoli viene ancora pienamente considerata, anche perché pressoché irripetibile, a parte formulazioni più recenti di questo materiale come ad esempio il *compensato marino*, il *legno lamellare*, il *legno acetilato* (cioè trattato con anidride acetica), volti ad inertizzarlo il più possibile.

Le cause di decadimento del legno in mare erano numerose e riguardavano tutti i materiali, non solo il legno, a contatto con l'acqua di mare e la stessa atmosfera marina umida e salmastra, prodotte da un'azione sia corrosiva che erosiva dovuta soprattutto al *cloruro di sodio* (NaCl), che compone, tra il 70 e l'80% in peso, l'acqua di mare. A ciò si aggiungeva il decadimento *a fatica* delle fibre del legno e delle giunzioni, sottoposte a continue sollecitazioni dal movimento dello scafo in acqua.

Il modo più abbordabile ideato per esaminare gli effetti delle sollecitazioni meccaniche (soprattutto sforzi di *trazione* e *compressione*, che si compongono nella *flessione* verticale, secondariamente sforzi di *taglio* e *torsione*) sulla resistenza e robustezza *primaria*<sup>2</sup> della dimensione più sensibile dello scafo, quella longitudinale, divenne allora, con una

<sup>1</sup> Questo fenomeno ha una sua ragione precisa, legata sia alla presenza persistente di tannino, resine e olii, sia alla chimica stessa della *lignina*, composto aromatico (è un polimero organico) che legandosi all'ossigeno emana un forte profumo a base di vaniglia.

<sup>2</sup> Si usa distinguere oggi tra resistenza *primaria* (affrontata con la teoria della trave), quella *secondaria* (riguarda le travi longitudinali rinforzate comprese fra due paratie) ed una *terziaria* (risposta alle sollecitazioni di una striscia di fasciame compresa fra due elementi longitudinali e due trasversali contigui).

teoria di inizio '800 ma compiutamente delineatasi solo dal 1870, quello di associare la stessa nave, considerandola inizialmente come un blocco unico omogeneo, ad una *trave*, riportando il problema ad un'ingegneria civile già ricca di modelli strutturali studiati. Questa brillante idea tuttavia non poteva fermarsi alla sua enunciazione; che tipo di trave? È quanto vedremo nel testo, fino ad arrivare a quella contemporanea, più precisamente *trave cava in parete sottile, irrigidita da rinforzi verticali, longitudinali e trasversali*: un modello strutturale ben studiabile meccanicamente, in cui una dimensione (la lunghezza) è prevalente sulle altre due, come trattato dalla *scienza delle costruzioni*, che detterà le norme principali sia per lo studio resistenziale del *trave-nave* che per il dimensionamento delle strutture portanti interne, del fasciame e dei ponti, oltre che per le alberature<sup>3</sup>. Si trattava di applicare casi particolari della *teoria dell'elasticità* in campo lineare per l'analisi del comportamento meccanico delle travi, sollecitate in molti modi.

Il cosiddetto *trave-nave* era naturalmente una approssimazione, da perfezionare, iter progettuale durante, a seconda della tipologia della nave: infatti in ogni sezione trasversale di questa, a partire da quella fondamentale, la *sezione maestra*, le componenti strutturali interne (soprattutto longitudinali e trasversali) che contribuiscono alla robustezza longitudinale, sono diverse a seconda della destinazione d'uso della nave; un sistema impostato come rigido cioè, ma da trattare con la statica e la dinamica dei sistemi elastici per verificarne le eventuali deformazioni da sforzo o fatica (auspicabilmente entro i *limiti di elasticità* dei materiali) subite dalle strutture sotto ripetuti stress, che non sono, come vedremo, trascurabili. Era necessario nel nostro caso accettare spesso l'assunzione che il corpo elastico fosse *isotropo* (cioè con proprietà elastiche uguali in tutte le direzioni), cosa non vera sia per il legno, materiale fibroso direzionale per sua natura, sia per la disomogeneità strutturale complessiva del *trave-nave* come assemblaggio di materiali lignei diversi e poi ligneo-metallici.

Scrivendo O. Belluzzi nel 1941 “*La teoria dell'elasticità conserva nello studio il rigore matematico ma deve limitarsi a casi di solito molto semplici e schematici, i soli per i quali si riesce a determinare la soluzione. La scienza delle costruzioni invece rinuncia spesso a tale rigore poco fecondo, pur di risolvere in modo utile i problemi della pratica. Ciò si consegue introducendo ipotesi più o meno approssimate per ridurre i casi reali, di solito assai complessi, a schemi opportunamente modificati; oppure estendendo a casi analoghi più complessi l'uso di risultati ottenuti mediante la teoria dell'elasticità per casi semplici: ad es. accettando anche per travi leggermente curve o di sezione lentamente variabile i risultati ottenuti per le travi prismatiche*”<sup>4</sup>. E sull'elasticità aggiunge: “... la teoria dell'elasticità parte da alcune ipotesi fondamentali e svolge le sue ricerche matematiche senza più preoccuparsi del comportamento reale dei corpi, che spesso si scosta notevolmente da tali ipotesi. Invece la Scienza delle costruzioni non perde mai il contatto con la realtà, chiedendo all'esperienza continue conferme dei suoi risultati; pronta a semplificare ulteriormente le sue teorie quando ciò ap-

<sup>3</sup> Il dimensionamento definito alle origini (alla base anche delle classificazioni delle navi nei vari *Registri di classificazione*) avveniva su *base statistico-deduttiva* (o *probabilistica* o *evoluzionistica*); si raccoglievano cioè le informazioni in modo statistico e se ne deduceva il tipo di costruzione: questo metodo poteva però portare da un lato a dei sovradimensionamenti (ad esempio in mancanza di un metodo di analisi delle notizie e dati raccolti), dall'altro all'erronea comprensione del fenomeno desunto dai statistici stessi, con conclusioni spesso sbagliate. Il metodo *statistico-deduttivo* venne quindi considerato superato e nell'immediato dopoguerra (e fino alla metà degli anni '50) si è così ricorsi ad un metodo detto *deterministico*, più strettamente connesso alla *scienza delle costruzioni*.

<sup>4</sup> O. Belluzzi, *Scienza delle Costruzioni*, Vol. I, Ed. Zanichelli, Bologna, 1941, 1966.

*paia lecito, ma pronta anche a tener conto di nuovi elementi, quando l'esperienza ne mostri la necessità; anche a costo di complicare, pur di conseguire la necessaria approssimazione percentuale. Così ad es. nello studio dei fenomeni di instabilità dell'equilibrio essa è più esatta della teoria dell'elasticità, perché tiene conto di infinitesimi di ordine superiore, senza i quali tali fenomeni sfuggirebbero all'indagine".* Ecco l'importanza delle ricerche sperimentali su molti materiali lignei e sulle loro forme migliori, cui faccio cenno nel Cap. I, che trovano il loro fuoco nel XVIII secolo, per determinarne le caratteristiche meccaniche e le tensioni interne. *"Queste ultime ricerche non solo servono per controllare i risultati teorici, ma costituiscono talvolta l'unico mezzo possibile d'indagine, quando la teoria risulti impotente a risolvere certi problemi".*

Naturalmente ciò valeva soprattutto per i secoli che stiamo trattando, meno oggi grazie alle nuove possibilità di indagine sui materiali e sulla potenza di elaborazione automatica di dati e calcoli.

Inoltre il calcolo poteva risultare abbastanza agevole in condizioni di acqua calma, mentre considerando il moto ondosso è necessario applicare il metodo di calcolo anche al momento flettente d'onda<sup>5</sup>, separando i carichi statici dai dinamici, i quali dipendono dalle accelerazioni che agiscono su ogni massa di bordo e sono i principali responsabili del degrado dello scafo per *fatica*, in aggiunta ai possibili danni localizzati su scafo e albeature causati dall'impatto con onde formate (*slamming*, vedi Scheda Vol. I).

Meno considerato e per questo anche meno consolidato risulta complessivamente l'esame della robustezza trasversale, in particolare di alcune sezioni trasversali ordinarie o rinforzate, necessarie sia a ridurne la campata sia per assicurare l'indeformabilità sostanziale delle forme sotto l'effetto dei carichi agenti trasversalmente, materia oggi studiata con la *teoria dei telai*, in cui è necessaria la schematizzazione dei vincoli per evitare i movimenti del corpo rigido del tratto di nave considerato<sup>6</sup>. A questa possiamo associare anche l'esame dell'effetto dei carichi dinamici e di impatto soprattutto sulle fiancate, e del collasso a fatica, che ho inserito nello stesso capitolo.

In realtà dal punto di vista teorico anche lo studio della robustezza longitudinale può essere frazionato e parti del corpo nave si possono studiare dal punto di vista statico, a seguito delle modifiche strutturali interne ad alcune aree dello scafo apportate da Seppings (vedasi App. 7 nel Vol. II), come un *elemento reticolare*, composto da una sommatoria di corpi reticolari resi rigidi da *aste* (tese o compresse) collegate tra loro in corrispondenza dei *nodi*, in modo da formare un insieme indeformabile ove va ricercato l'equilibrio nei *punti nodali*<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> I carichi (*loads*) agenti su di una nave sono di difficile schematizzazione poiché in larga parte dipendenti dall'azione del mare; oltre a questo, le forze variano anche secondo il modo in cui la nave è condotta. La struttura della nave è di per sé complessa, di geometria particolare (generalmente non esprimibile in modo analitico) ed in questo differisce dal tipo di travi considerate dall'ingegneria civile.

<sup>6</sup> Prima dell'avvento dei computer per valutare la robustezza trasversale si utilizzavano metodi iterativi, per tipologie di navi, che consentivano di ottenere risultati che approssimavano bene quelli reali per navi ad un ponte ma meno per navi più complesse, come quelle passeggeri.

<sup>7</sup> Il metodo più naturale, considerato in scienza delle costruzioni, di calcolo degli sforzi nelle *aste* consiste nell'imporre contemporaneamente l'equilibrio di tutti i *nodi*, ognuno dei quali è soggetto agli sforzi delle *aste* in esso concorrenti. Nella seconda metà dell'800 il matematico Cremona propose un metodo di risoluzione grafica dell'equilibrio dei *nodi*, basato sul poligono di equilibrio di ogni nodo e sovrapposizione finale di tutti i poligoni di equilibrio (*diagramma cremoniano*), antesignano ed ancora considerato in alternativa al procedimento analitico.

Sebbene ad un “osservatore lontano” la similitudine con la meccanica di una trave nelle sue diverse configurazioni sembri plausibile, a questa si è giunti ancora una volta sulla base degli studi dei matematici settecenteschi Bernoulli ed Eulero<sup>8</sup>, che si aggiunge ad altri contributi importanti di quest’ultimo per il settore navale, cui ho dedicato un breve capitolo. Solo ai primi del ’900 la teoria di trave di Timoshenko, ingegnere di origine russo-ucraina, portò alla sostituzione con un modello di trave più generale e completo di quello di Eulero<sup>9</sup> ma solo sotto certe condizioni, cui accennerò. Tuttavia, quando l’ “osservatore lontano” si avvicina al prodotto complesso rappresentato dal corpo di un veliero, si rende conto di come l’elevata discontinuità strutturale interna di uno scafo costringa ad un esame molto più dettagliato ed attento di tutta la struttura, non più rappresentabile solo come un lungo elemento scatolare vuoto irrigidito da rinforzi, prima di trattarne le risultanze matematiche. È così che progressivamente si è giunti dalla seconda metà degli anni ’50 all’abbinamento e frequente sostituzione con lo studio di strutture complesse, non riconducibili a travi e sospinto dall’ingegneria aerospaziale, tramite il cosiddetto *metodo degli elementi finiti* (FEM, *Finite Elements Method*), evoluzione della *modellazione ad elementi reticolari*, che consente di esaminare il comportamento di strutture e macchinari anche molto complessi, scomponendoli e suddividendoli in tanti piccoli elementi più facilmente calcolabili<sup>10</sup> con elevata precisione, tramite la potenza di calcolo di un computer<sup>11</sup>. La risultante della scomposizione del progetto in tanti piccoli solidi geometrici è una griglia che prende il nome di *mesh* e la soluzione al problema è la somma dei calcoli svolti per ogni singolo elemento.

Comunque il metodo di approssimazione con una trave caricata per il solido nave, attraversa quasi due secoli e, sotto certe condizioni, mantiene tutt’oggi la sua validità e fu di riferimento per tutte le Marine nel periodo a cavallo tra XVIII e XIX secolo, trasferendosi naturalmente anche allo studio della robustezza dei grandi yacht dell’epoca. Su queste basi gli architetti e designer di allora apportarono varie modifiche sia alla struttura esterna che agli elementi resistenziali interni agli scafi, che portano ancora i loro rispettivi nomi, come Seppings e Slade, Sané e Rolland, Romero Landa e Retamosa, per citarne alcuni. Oggi disponiamo dei Regolamenti emessi periodicamente dalle Marine e dagli istituti di classificazione sul dimensionamento delle componenti dello scafo di vascelli e velieri, più raramente del razionale per ogni scelta per i Regolamenti/Ordinanze più antichi, chiamati *Establissements*, *Ordonnances*, *Ordenanzas*; ne consegue che il processo di comprensione delle logiche costruttive del passato per conferire la dovuta robustezza, non può essere che inverso e le valutazioni basarsi sulle proprietà tecnologiche del legno sotto sforzo e sotto stress impulsivo, accertate con indicatori contemporanei, compresa la velocità di propagazione in esso dell’onda sonora per i fenomeni impulsivi, come l’impatto di un proietto sferico d’artiglieria. Il mio modo di procedere inverso si è basato

<sup>8</sup> L’elaborazione del 1771 si riferisce a elementi di un materiale virtuale perfettamente elastico e infinitamente resistente e considera trascurabili le deformazioni taglianti.

<sup>9</sup> La teoria della trave Eulero-Bernoulli può essere considerata un caso particolare della teoria di Timoshenko, considerando trascurabili le deformazioni taglianti.

<sup>10</sup> Si tratta di una tecnica numerica per ricercare soluzioni approssimate di problemi descritti da *equazioni differenziali alle derivate parziali*, riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche.

<sup>11</sup> Per la precisione anche Timoshenko, negli anni 1907-1911 in cui insegnava al Politecnico di Kiev, fece ricerche sulla variante precedente del *metodo degli elementi finiti* di calcoli elastici, il cosiddetto *metodo di Rayleigh*, fisico inglese di Cambridge.

su due filoni complementari: una ricostruzione, dai dimensionamenti reali pervenutici, dell' applicazione sui vascelli delle conoscenze fisico-matematiche del XVIII e primo XIX secolo, ed il riferimento ad alcune costruzioni di repliche storiche e restauri, in cui i calcoli sono stati, almeno in parte, verificati; ciò consente anche un miglior confronto con il dimensionamento delle unità mercantili in legno, che da metà '800 giunge fino agli anni '20 del '900.

Rispetto alle teorie sulla stabilità dello scafo ed alla resistenza al moto, gli studi efficaci per la sua robustezza in generale trovano compiutezza più tardi e per questo intercettano un periodo tecnologico navale diverso, quello dell'avvento del vapore e dell'elica, delle costruzioni in ferro e delle prime corazzate (*iron-clad*), che costringe ad un ripensamento totale della progettazione, che comporta ulteriori complicazioni. Se dal punto di vista velico le modifiche comportano un peggioramento delle prestazioni nei vascelli, lamentato dai comandanti, mentre i clipper arrivano all'apogeo, dal punto di vista tecnologico apre ad un interessante periodo di transizione, di cui esamineremo gli aspetti principali.

In merito ai criteri di resistenza ed elasticità del materiale, trattandosi di quella delle varie fibre lignee, cioè soprattutto delle cellulose e della lignina presenti, ho considerato il metodo più tradizionale delle *tensioni ammissibili* (MTA), che esamina il comportamento del materiale nel campo elastico anziché quello *semiprobabilistico agli stati limite* (MSL), oggi necessario per i comportamenti delle strutture nel campo plastico<sup>12</sup>. In questo ambito il contributo illuministico principale, sviluppato su base sperimentale sui legnami da costruzione, si rifà ai nomi di uomini di scienza come de Coulomb, van Musschenbroek, Girard e lo stesso Duhamel du Monceau, ingegnere navale già visto nel Vol. I.

Per ricostruire la condizione dei vascelli del XVIII sec., tra i molti dati e rapporti utilizzabili, quelli riferiti ai vascelli che parteciparono nel 1805 alla battaglia di Trafalgar sono tra i più dettagliati ed utili per comprendere la condizione reale di navi che in quel momento avevano, nelle tre flotte partecipanti alla battaglia, un'età media di poco meno di 20 anni tra quelle *di linea* (le francesi erano le più recenti) e quindi già provate e indebolite da anni di navigazione e scontri. In particolare le due *flagship* spagnola e britannica, il *Santissima Trinidad* e il *Victory* avevano nel 1805 analoga età di servizio, circa 35 anni. Tra le fregate una nave significativa, già presa a riferimento nel primo volume, è il *Bellona* da 74 cannoni dell'omonima Classe, progetto finale e di successo di unità similari precedenti, risultata più resistente al processo di inarcamento (*hogging*) dello scafo, tipico e progressivo con l'età, soprattutto prima delle modifiche strutturali apportate da Seppings nel 1811. Naturalmente possiamo avvalerci per questo anche delle poche altre unità salvate dal disarmo, come le fregate britanniche *Triconmalee* del 1802 e l'*Unicorn* del 1824 della classe *Leda* (oggi entrambe navi museo in UK), o l'USS *Constitution* del 1798 (oggi ormeggiata a Boston e considerata ancora in servizio, come il *Victory* in Gran Bretagna), navi già trattate nel Vol. II; per la resistenza degli scafi ai colpi d'artiglieria è invece significativo attingere ai dati emergenti dal resoconto del terribile scontro tra l'USS *Chesapeake* e l'HMS *Shannon* nel 1813, anch'esso già trattato in una Scheda dedicata del Vol. II. Da queste navi ho potuto estrarre numerosi informazioni tecniche, a conferma dei metodi costruttivi descritti da costruttori o architetti come Cano, Deane, Chapman, Jose Juan, Duhamel de Monceau o riportati dalle *Ordinanze* costruttive disposte da ogni

<sup>12</sup> In campo civile il DM 14.9.2005, *Norme tecniche sulle costruzioni*, ha disposto l'uso esclusivo del MSL per la verifica delle strutture.

nazione, a partire dalle prime spagnole del 1607 (*Ordenanzas*), periodicamente aggiornate per adeguarsi alla crescita progressiva delle dimensioni degli scafi ed alle maggiori prestazioni richieste o attese.

Un capitolo ad hoc è dedicato, come nei primi due volumi, allo *Yachting*. L'approccio classico del *trave-nave* in questo campo è stato più limitato, soprattutto per gli scafi medio-piccoli, in genere essendo applicato quando il rapporto *Lunghezza/Altezza di costruzione* è pari a 12 o più, che è rintracciabile in scafi maggiori di 30 metri. Ciononostante molti importanti *yacht designer* lo hanno utilizzato per verifica delle forze in campo (di tensione, compressione e taglio) e per questo può essere interessante vederne i lineamenti principali; in particolare è utile quando si lavora con materiali anisotropici come il legno ed alcuni moderni *compositi*, dove l'orientazione delle fibre influenza la capacità di sopportare carichi da parte delle strutture.

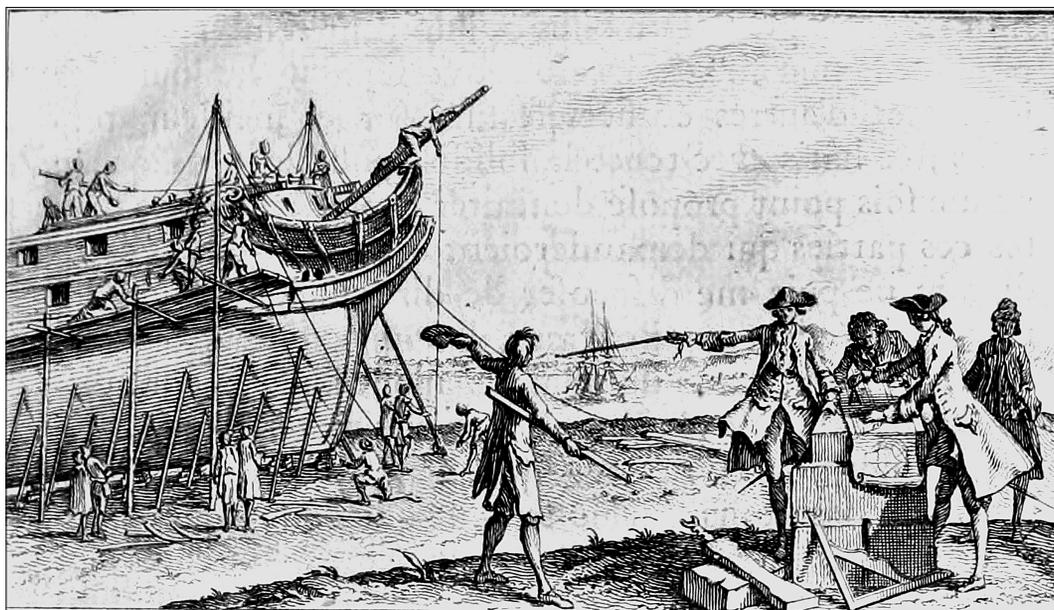
Nelle Appendici ho ripreso argomenti più di nicchia, da alcune espansioni di argomenti matematici e fisici trattati nel testo, ad un esempio numerico applicato ad una chiatra costiera, alle dimensioni longitudinali dei vascelli sostenibili con una struttura lignea e, per concludere, sul restauro e sulla realizzazione in *replica* di grandi velieri storici.

Rispetto ai due primi volumi, questo potrebbe sembrare più tecnico nonostante l'intento divulgativo di fondo (quando il lettore ravvisi qualche formula di troppo, può passare direttamente alle conclusioni sull'argomento...), ma si consideri che dalla realizzazione e non solo dal progetto, cioè dalla robustezza complessiva di quell'enorme e complicato manufatto composto in legno che era lo scafo di un veliero e di un vascello in particolare, dipendeva la vita quotidiana e in molti casi la sopravvivenza o meno di molte centinaia di uomini d'equipaggio; questi normalmente del progetto sapevano molto poco ma conoscevano bene ogni angolo della propria nave, sapevano riconoscere la qualità dei legni ed i metodi costruttivi impiegati ed erano in grado di valutarne la robustezza, il comportamento e lo stato di efficienza dei materiali utilizzati per le diverse componenti dello scafo, poiché da questi dipendeva la loro esistenza, come tutte la copiosa e affascinante narrativa e documentazione dell'era velica conferma: un inizio di disallineamento del fasciame più alto delle murate nella zona a centro nave, di lesioni longitudinali iniziali nelle tavole in prossimità delle chiodature, un insistente scricchiolio tra giunti, un rumore insorgente tra timone e *dragante* (uno dei punti deboli delle poppe), un rumore sordo o un cambio di odori in sentina, più acidi o muffati, erano indizi che venivano presto colti a bordo, che potevano preludere a danni più gravi. Non solo quindi documenti tecnici costruttivi e relazioni da parte dei comandanti, che dopo ogni navigazione dovevano redigere rapporti dettagliati sul comportamento della propria nave, ma una narrazione a più voci, densa di esperienze umane e arricchita da considerazioni tecniche e marinaresche, oggi preziose per ricostruzioni verosimili.

Si trattava della volontà dei Comandanti di descrivere e ricordare agli altri una diversità ed un coraggio elitario che si consideravano centrali nelle società dell'epoca ma poco immaginabili altrimenti o la loro consapevolezza di essere al centro di storie uniche e memorabili? Era forse il desiderio anche di narratori quasi anonimi che non si disperdesse la traccia di vite ed esperienze faticosissime e spesso tragiche? Molte e diverse potevano essere le motivazioni più intime e sottaciute alla base di queste storie, in cui lo sviluppo degli eventi, le relazioni umane e le descrizioni di funzionalità tecniche di bordo si interconnettevano così strettamente nelle narrazioni, che la propria vita e quella della nave diventano quasi indistinguibili.

Per questa ragione l'auspicio minimo di questi scritti, che corrisponde anche alla mia massima gratificazione, è che questa storia di uomini, navi, arsenali e cantieri, di uomini di scienza e di uomini di mare, di intelligenza e fatica, di vite reali e di progressi che sono ancora alla base della moderna *architettura navale*, nata nell'epopea della vela, non vada perduta e come tale la passo a chi avrà voglia di leggerla e passarne memoria, come si usava nel passato, una *traditio lampadis*.

Cristiano Bettini 



Edizioni ETS  
Palazzo Roncioni - Lungarno Mediceo, 16, I-56127 Pisa  
info@edizioniets.com - www.edizioniets.com  
Finito di stampare nel mese di gennaio 2021