

**Università Politecnica delle Marche**



**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica**

**Valutazioni ed analisi sui metodi di incollaggio  
applicati alla cantieristica: Approfondimento  
su controlli non distruttivi**

**Evaluations and Analyses on Bonding  
Methods Applied to Shipbuilding: Focus  
on Non-Destructive Testing**

**Relatore**  
Michele Germani

**Studente**  
Dimitri Santarelli

**Matricola**  
S1109210

**A.A. 2025/2026**

“A Johnny Depp,  
per avermi fatto guardare il mare non solo come un orizzonte, ma come un’avventura”

## Sommario

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Indice delle figure .....                                                       | iii |
| Indice delle tabelle .....                                                      | iv  |
| Prefazione.....                                                                 | 1   |
| 1. Introduzione .....                                                           | 2   |
| 1.1 Evoluzione storica della costruzione navale .....                           | 2   |
| 1.1.1 Primi scafi in materiale vegetale .....                                   | 2   |
| 1.1.2 Giunzioni naturali .....                                                  | 2   |
| 1.1.3 Materiali legnosi .....                                                   | 3   |
| 1.1.4 Da materiali di origine naturale all'impiego di materiali metallici.....  | 4   |
| 1.2 L'introduzione di normative nel settore navale come linguaggio comune ..... | 5   |
| 1.3 Impiego di acciaio e alluminio negli yacht .....                            | 5   |
| 1.3.1 Descrizione dell'alluminio.....                                           | 5   |
| 1.3.2 Descrizione dell'acciaio.....                                             | 6   |
| 1.4 Corretto posizionamento del baricentro .....                                | 6   |
| 1.5 La saldatura come tecnica di giunzione strutturale .....                    | 7   |
| 1.5.1 Cos'è la saldatura e come funziona.....                                   | 7   |
| 1.5.2 Principali processi di saldatura utilizzati in ambito navale.....         | 8   |
| 1.5.3 Vantaggi della saldatura.....                                             | 9   |
| 1.5.4 Limiti della saldatura .....                                              | 9   |
| 2 Soluzioni moderne: I giunti bimetallici Triplate.....                         | 10  |
| 2.1 Introduzione ai giunti bimetallici.....                                     | 10  |
| 2.2 Struttura e composizione del Triplate .....                                 | 10  |
| 2.2.1 Composizione.....                                                         | 10  |
| 2.2.2 Struttura.....                                                            | 10  |
| 2.3 Processo produttivo mediante explosion bonding .....                        | 11  |
| 2.3.1 Configurazione di Stand-off.....                                          | 11  |
| 2.3.2 Accelerazione e Collisione.....                                           | 12  |
| 2.3.3 Effetto "Jet" e Pulizia Superficiale.....                                 | 12  |
| 2.3.4 Unione Atomica .....                                                      | 12  |
| 2.4 Differenti modalità di Bonding Explosion.....                               | 12  |
| 2.4.1 Cladding Atmosferico (in aria) .....                                      | 12  |
| 2.4.2 Cladding Sotto Vuoto (Triplate di Shockwave).....                         | 12  |
| 2.5 Proprietà Meccaniche.....                                                   | 12  |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6 Vantaggi del giunto bimetallico .....                                  | 13 |
| 2.7 Limiti e Precauzioni del Triplate .....                                | 13 |
| 2.8 Costo di applicazione del giunto .....                                 | 14 |
| 3. Applicazione degli adesivi strutturali nel settore dello yachting ..... | 15 |
| 3.1 Linee Guida Operative per un Incollaggio Strutturale Ottimale .....    | 15 |
| 3.1.1. la gestione delle condizioni ambientali .....                       | 15 |
| 3.1.2. la preparazione della superficie .....                              | 16 |
| 3.1.3 la tecnica di stesura dell'adesivo .....                             | 16 |
| 3.1.4 tipologie di cedimento .....                                         | 18 |
| 3.2 Costi di applicazione dell'adesivo strutturale .....                   | 19 |
| 4. Induzione e diverse tipologie di difetti nei provini .....              | 21 |
| 4.1 Surface preparation (preparazione superficie) .....                    | 21 |
| 4.2 Adhesive components mixing (coretto mescolamento dei componenti) ..... | 22 |
| 4.3 Air bubbles (bolle d'aria) .....                                       | 23 |
| 5. Ispezione e Controlli non distruttivi .....                             | 24 |
| 5.1 Raggi X (Metodo Radiografico) .....                                    | 24 |
| 5.2 Ultrasuoni (Metodo Ultrasonico) .....                                  | 25 |
| 5.3 Tomografia .....                                                       | 26 |
| 6. Analisi e risultati dei test .....                                      | 28 |
| 6.1 Analisi dei provini .....                                              | 28 |
| 6.2 Risultati dei test .....                                               | 33 |
| 7. Conclusioni .....                                                       | 34 |
| Bibliografia .....                                                         | 35 |
| Ringraziamenti .....                                                       | 36 |

# Indice delle figure

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -Dettaglio di fasci di canne legati con fibre vegetali .....                                                                                                                                                                                               | 2  |
| Figura 2 - Esempio di un'antica imbarcazione con lo scafo composto interamente da canne .....                                                                                                                                                                       | 2  |
| Figura 3 - Fibre vegetali allo stato grezzo.....                                                                                                                                                                                                                    | 3  |
| Figura 4 - Fibre vegetali dopo la lavorazione .....                                                                                                                                                                                                                 | 3  |
| Figura 5 - Esempio illustrativo di una nave militare greca, la Triremi. Il nome si riferisce al fatto che sono presenti tre file di rematori. ....                                                                                                                  | 3  |
| Figura 6 - Chiodo usato per collegare le tavole allo scheletro.....                                                                                                                                                                                                 | 4  |
| Figura 7 - Esempio dell'applicazione di un cavicchio in legno .....                                                                                                                                                                                                 | 4  |
| Figura 8 - Esempio di antica ingegneria del XVII secolo.....                                                                                                                                                                                                        | 5  |
| Figura 9 - Disegno tecnico del NL412-67m .....                                                                                                                                                                                                                      | 6  |
| Figura 10 - Rappresentazione del centro di spinta (C) e del baricentro (G) .....                                                                                                                                                                                    | 7  |
| Figura 11 - Rappresentazione del metacentro (M) e variazione di applicazione centro di spinta C con il rollio dell'imbarcazione.....                                                                                                                                | 7  |
| Figura 12 - Rappresentazione visiva della struttura e la composizione del triplate.....                                                                                                                                                                             | 11 |
| Figura 13 - Fotografia del giunto prima dell'installazione .....                                                                                                                                                                                                    | 11 |
| Figura 14 - Applicare un cordolo triangolare di circa 10 cm sul substrato originale precedentemente preparato.....                                                                                                                                                  | 16 |
| Figura 15 - Utilizzare carta siliconata (antiaderente), carta cerata o un foglio di polietilene per schiacciare il cordolo fino a circa la metà della sua altezza originaria .....                                                                                  | 17 |
| Figura 16 - Fissare la parte da testare utilizzando morsetti adeguati. Successivamente, servendosi di un cutter affilato, separare dal substrato i primi 3 cm del bordo d'attacco del cordolo .....                                                                 | 17 |
| Figura 17 - Afferrare la parte separata del cordolo con una pinza a becchi d'ago e ruotare lentamente il cordolo (applicando uno sforzo di pelatura) per separarlo dal substrato. Tagliare frequentemente l'adesivo sul fondo, fino a raggiungere il substrato..... | 17 |
| Figura 18 - test di trazione su un provino con stesura della colla perfettamente eseguita.....                                                                                                                                                                      | 18 |
| Figura 19 - Risultati di test di laboratorio sulle diverse tipologie di cedimento .....                                                                                                                                                                             | 19 |
| Figura 20 - Rappresentazione del rugosimetro .....                                                                                                                                                                                                                  | 21 |
| Figura 21 - Base e catalizzatore prima dell'applicazione.....                                                                                                                                                                                                       | 22 |
| Figura 22 - Rappresentazione delle bolle d'aria (indicate con le frecce) .....                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Figura 23 - Illustrazione del provino e dell'inserimento del pluriball.....                                                                                                                                                                                         | 24 |
| Figura 24 - strumento portatile a raggi x.....                                                                                                                                                                                                                      | 25 |
| Figura 25 - applicazione degli ultrasuoni su un provino metallico.....                                                                                                                                                                                              | 26 |
| Figura 26 - differenti slices del tomografo.....                                                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 27 - immagini e parametri dello strumento utilizzato .....                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| Figura 28 - diverse viste e individuazione delle bolle d'aria del provino A1.....                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Figura 29 - diverse viste e individuazione delle bolle d'aria del provino A2.....                                                                                                                                                                                   | 31 |
| Figura 30 - diverse viste del provino C1 .....                                                                                                                                                                                                                      | 32 |
| Figura 31 - diverse viste del provino C2.....                                                                                                                                                                                                                       | 33 |

# Indice delle tabelle

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Tabella 1 - valori dei campioni in alluminio..... | 28 |
| Tabella 2 - valori dei campioni in acciaio.....   | 29 |

# Prefazione

Nell'era moderna del settore navale, in particolare nell'industria dello yachting, è largamente diffuso l'impiego del triplate. Le imbarcazioni moderne, essendo fabbricate usando diversi materiali metallici, usufruiscono di un giunto bimetallico, denominato triplate. Esso consente mediante saldatura tradizionale di unire lo scafo in acciaio con i ponti sovrastanti in alluminio. L'impiego dell'acciaio e dell'alluminio permette di combinare le diverse proprietà meccaniche e fisiche di quest'ultimi, con l'obiettivo di ottimizzare le prestazioni strutturali delle moderne imbarcazioni. In particolare, si unisce l'elevata resistenza dell'acciaio con la leggerezza dell'alluminio, contribuendo alla riduzione del peso dell'imbarcazione e altri numerosi vantaggi.

Il triplate però implica l'uso della saldatura. Quest'ultimo comporta delle problematiche sia in fase di costruzione sia in quella di riparazione. Pur essendo una pratica collaudata e diffusa, presenta un aspetto negativo, che ci guiderà in quello che sarà l'oggetto della tesi, cioè valutare l'impiego di adesivi strutturali epossidici, come possibile alternativa ai sistemi di giunzione convenzionali e stabilire delle linee guida, così da definire una procedura normativa. L'uso di tali materiali rappresenta una soluzione promettente per le future applicazioni nel settore navale.

Il presente lavoro di tesi analizza l'evoluzione delle tecniche di giunzione, i materiali e i sistemi costruttivi impiegati nella costruzione navale, dalla antichità fino ai giorni nostri. Inoltre, vengono esaminate le principali tecnologie di saldatura, le difficoltà connesse alla realizzazione di giunzioni acciaio-alluminio e le soluzioni attualmente adottate mediante giunti bimetallici di transizione. Successivamente, l'attenzione viene rivolta agli adesivi strutturali epossidici.

Infine, vengono presentate le attività sperimentali svolte in laboratorio, le metodologie adottate per la preparazione dei provini e i risultati ottenuti, al fine di valutare l'efficacia dell'adesivo e stabilire una possibile procedura normativa. Il potenziale impiego di questa tecnologia può essere considerato a tutti gli effetti come l'ultima frontiera nell'ingegneria navale.

# 1. Introduzione

## 1.1 Evoluzione storica della costruzione navale

Le prime imbarcazioni risalgono a diverse migliaia di anni fa e furono realizzate impiegando materiali naturali, principalmente legno, canne e fibre vegetali. Con lo sviluppo delle civiltà mediterranee come Egizi, Greci e Romani, il legno divenne il materiale strutturale predominante. Le prime imbarcazioni realizzate dall'uomo, facevano spesso ricorso, oltre al legno, a materiali di origine vegetale quali canne e fibre naturali.

### 1.1.1 Primi scafi in materiale vegetale

Le canne sono piante caratterizzate da fusti lunghi, leggeri e cavi all'interno. Grazie alla loro leggerezza, flessibilità e alla naturale galleggiabilità, esse venivano impiegate nella realizzazione delle primissime strutture navali, dove venivano legate grazie alle fibre vegetali, in fasci compatti per formare lo scafo dell'imbarcazione.



*Figura 1 -Dettaglio di fasci di canne legati con fibre vegetali*



*Figura 2 - Esempio di un'antica imbarcazione con lo scafo composto interamente da canne*

### 1.1.2 Giunzioni naturali

Le fibre vegetali, invece, sono filamenti ricavati da diverse specie vegetali, caratterizzati da una buona resistenza alla trazione. Questi materiali non venivano utilizzati come elemento strutturale principale, ma svolgevano un ruolo fondamentale nelle operazioni di assemblaggio e tenuta delle imbarcazioni. In particolare, le fibre venivano impiegate per legare tra loro elementi lignei o fasci di canne. Erano tecnologie primitive per sigillare le giunzioni tra le varie parti dello scafo, contribuendo alla sua impermeabilizzazione.



*Figura 3 - Fibre vegetali allo stato grezzo*



*Figura 4 - Fibre vegetali dopo la lavorazione*

### 1.1.3 Materiali legnosi

Le specie legnose utilizzate variavano in funzione delle caratteristiche richieste. Per la costruzione della imbarcazione venivano usati quercia, pino, cedro, olmo e abete. La quercia, ad esempio, veniva utilizzata per elementi strutturali portanti come la ciglia, ordinate e mandieri, cioè per lo scheletro dello scafo. Al contrario, per elementi secondari o parti un po' meno sollecitate, vengono impiegati il pino, un tipo di legno leggero, o anche il cedro, usati per il fasciame. Vengono usati l'olmo per le parti immerse come la ciglia e l'abete per gli alberi, ognuno di essi con proprietà e resistenze meccaniche diverse.

Con il progressivo sviluppo delle conoscenze cantieristiche, si affiliarono le tecniche costruttive, perfezionando così sia la selezione dei materiali sia le modalità di assemblaggio, fino alla realizzazione di imbarcazioni di dimensioni sempre maggiori destinate al commercio e alle attività militari.



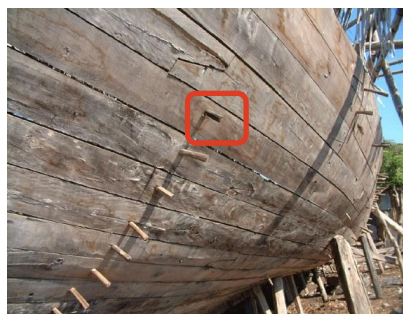
*Figura 5 - Esempio illustrativo di una nave militare greca, la Triremi. Il nome si riferisce al fatto che sono presenti tre file di rematori.*

#### 1.1.4 Da materiali di origine naturale all'impiego di materiali metallici

Un esempio molto calzante dell'aumento di stazza, con conseguente evoluzione dei sistemi di giunzione tra gli elementi strutturali, con l'introduzione di componenti metallici, sono i velieri. Lo scafo in legno era composto dalla chiglia, che si potrebbe descrivere come la spina dorsale dell'imbarcazione: un elemento strutturale che si sviluppa lungo tutta la lunghezza della nave, posta nella parte inferiore, a cui sono collegate le ordinate. Quest'ultime costituiscono le costole dello scafo, che contribuiscono a dargli la forma. Nella parte inferiore delle ordinate sono collocate i madieri, elementi che rafforzano la struttura. Le tavole del fasciame, cioè il rivestimento della nave, erano fissate alla struttura interna mediante elementi metallici. In particolare, iniziarono a diffondersi i chiodi e cavicchi. I cavicchi sono elementi cilindrici che potevano essere in ferro o in legno. Essi, infatti, vengono utilizzati per fissare il fasciame alle ordinate e garantire una maggiore resistenza alle sollecitazioni meccaniche e idrodinamiche. Tuttavia, tali sistemi presentavano ancora limiti legati alla durabilità e alla corrosione in ambiente marino. Con il progressivo sviluppo della costruzione navale industriale, l'attenzione si spostò sempre più verso sistemi di giunzione capaci di garantire continuità strutturale e maggiore efficienza nel trasferimento delle sollecitazioni, aprendo la strada all'introduzione della rivettatura nelle strutture metalliche e successivamente alla saldatura come tecnica predominante.



*Figura 6 - Chiodo usato per collegare le tavole allo scheletro*



*Figura 7 - Esempio dell'applicazione di un cavicchio in legno*



*Figura 8 - Esempio di antica ingegneria del XVII secolo*

## 1.2 L'introduzione di normative nel settore navale come linguaggio comune

I materiali e le tecnologie costruttive hanno subito una profonda evoluzione nel corso dei secoli, però il problema fondamentale della costruzione navale è rimasto sostanzialmente invariato. In particolare, realizzare una nave sicura e affidabile. Eventi come lo storico affondamento della nave allora più grande al mondo, il Titanic, ci portò vicino al concetto di stabilire delle regole che possano valere per tutti. Per assicurare l'incolumità delle persone a bordo, oggi giorno, i cantieri navali di tutto il mondo fanno riferimento alle norme. Le norme sono enti di classificazione che contribuiscono a garantire adeguati livelli di sicurezza, affidabilità e qualità costruttiva, definendo criteri comuni per la progettazione, la realizzazione e la verifica delle strutture navali. L'applicazione di standard condivisi consente inoltre di uniformare le procedure progettuali e costruttive, assicurando che le imbarcazioni soddisfino requisiti prestazionali, riconosciuti a livello internazionale. Un esempio di enti normativi sono il Rina e la Lloyd's Register.

## 1.3 Impiego di acciaio e alluminio negli yacht

Se nelle costruzioni lignee tradizionali tale esigenza veniva soddisfatta mediante legature, cavicchi e chiodature, nelle moderne costruzioni metalliche il problema si è evoluto assumendo nuove complessità, legate all'impiego simultaneo di materiali differenti. Più nello specifico, nel settore degli yacht di grandi dimensioni è frequente l'utilizzo di configurazioni multimateriale. Il significato di applicazione multilaterale vuol dire che per realizzare una imbarcazione, che a differenza di prima era composta interamente in legno, oggi lo scafo è realizzato in acciaio, per garantire un'elevata resistenza strutturale, mentre le sovrastrutture vengono costruite in alluminio, per ridurre il peso complessivo dell'imbarcazione. Realizzare le sovrastrutture in alluminio comporta vantaggi significativi, in termini di stabilità, consumi e prestazioni, ma introduce una problematica progettuale di particolare rilevanza. Questo perché nel caso del settore navale e anche in generale, la giunzione diretta tra acciaio e alluminio è complicata in quanto si crea un composto fragile. Prima di analizzare le problematiche legate alla giunzione tra acciaio e alluminio, è opportuno descrivere brevemente le caratteristiche dei due materiali.

### 1.3.1 Descrizione dell'alluminio

L'alluminio è un metallo caratterizzato da una densità notevolmente inferiore rispetto a quella dell'acciaio, pari a circa un terzo del suo valore. Nonostante ciò, le sue proprietà garantiscono una struttura molto robusta, leggera e rigida, rendendolo un materiale ideale, soprattutto per le barche a

vela dove è importante mantenere un elevato rapporto rigidità/peso. L'alluminio è anche molto duttile, quindi facilmente modellabile e lavorabile e anche altamente resistente agli urti, cioè tende a piegarsi e non a rompersi, in conseguenza ad un impatto. Questa caratteristica è particolarmente utile, ad esempio, per le imbarcazioni destinate a navigare nelle alte latitudini, dove le possibilità di urti con ghiaccio o altri oggetti galleggianti sono considerevoli. Negli yacht di grandi dimensioni invece è largamente impiegato nella realizzazione delle sovrastrutture, contribuendo a contenere il peso complessivo dell'imbarcazione e a mantenere il baricentro in posizione favorevole.

### 1.3.2 Descrizione dell'acciaio

L'acciaio è una lega metallica costituita principalmente da ferro e carbonio, con quest'ultimo generalmente presente in percentuali inferiori al 2%. A seconda delle proprietà richieste, possono essere aggiunti ulteriori elementi di lega, quali manganese, nichel, cromo e molibdeno, in grado di migliorarne la resistenza meccanica, la tenacità e la resistenza alla corrosione.

Grazie alle sue elevate proprietà strutturali, l'acciaio rappresenta ancora oggi uno dei materiali più utilizzati nella costruzione navale, soprattutto per la realizzazione dello scafo e delle strutture portanti. La sua elevata resistenza ai carichi statici e dinamici consente infatti di costruire imbarcazioni di grandi dimensioni, garantendo adeguati livelli di sicurezza e affidabilità. Inoltre, è necessario contenere i costi, infatti l'acciaio è più pesante, ma più economico dell'alluminio. Le tecniche di lavorazione sono ben sviluppate e relativamente comuni.

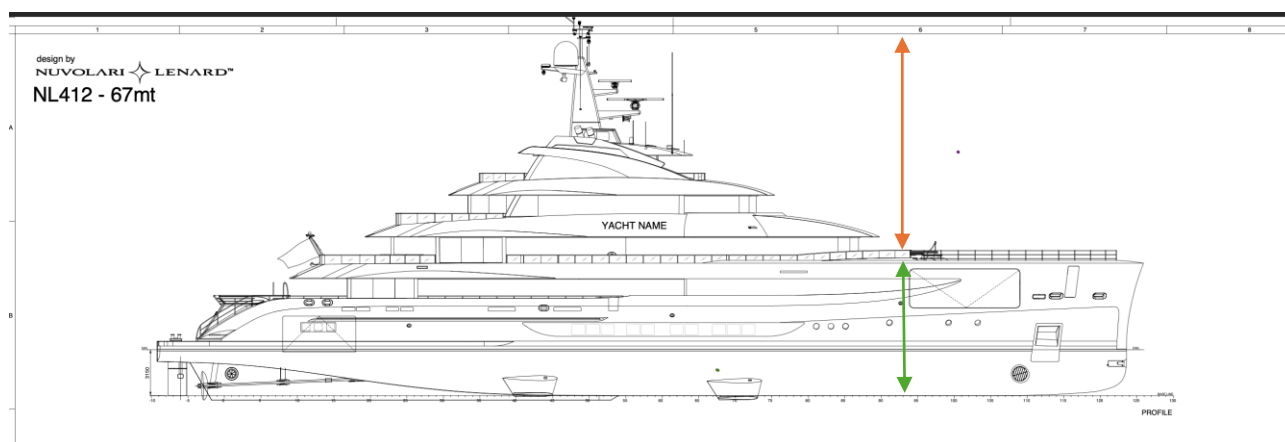


Figura 9 - Disegno tecnico del NL412-67m

## 1.4 Corretto posizionamento del baricentro

La configurazione con scafo in acciaio e i ponti in alluminio, favorisce la corretta posizione del baricentro, infatti influenza direttamente il comportamento della nave durante la navigazione. Per capire meglio il concetto di baricentro, possiamo fare un esempio. Prima però dobbiamo introdurre tre concetti fondamentali: il centro di spinta o spinta di galleggiamento (C), il metacentro (M) e l'altezza metacentrica.

- Il centro di spinta è la forza che esercita l'acqua sullo scafo, cioè la forza che manda l'imbarcazione verso l'alto.

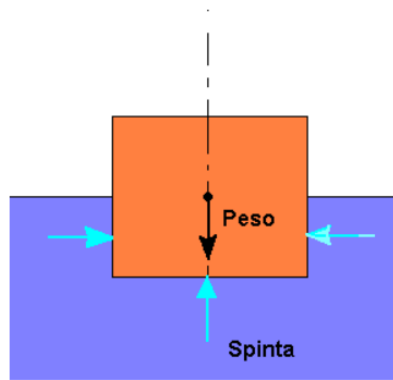


Figura 10 - Rappresentazione del centro di spinta (C) e del baricentro (G)

- Il metacentro è l'intersezione della retta d'azione del baricentro (G) con quella della spinta di galleggiamento.

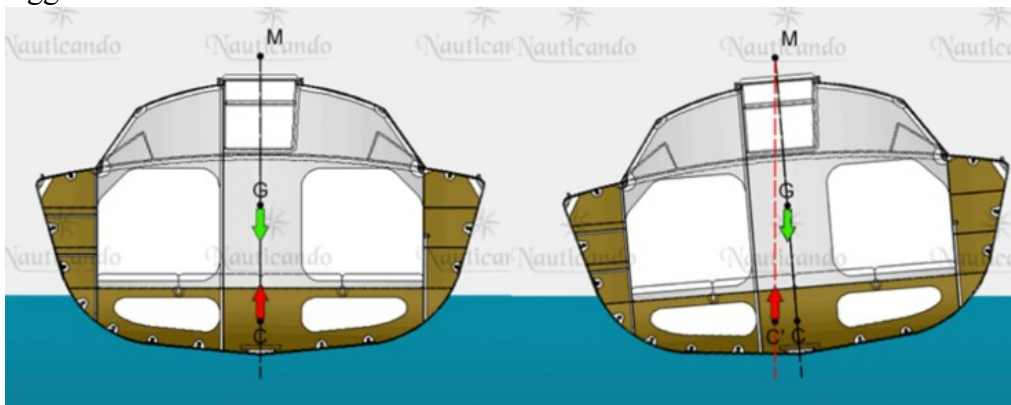


Figura 11 - Rappresentazione del metacentro (M) e variazione di applicazione centro di spinta C con il rollio dell'imbarcazione

- L'altezza metacentrica è la distanza tra (G) e (M).

Per la stabilità bisogna avere (M) sopra a (G) o anche distanza tra (G) ed (M) grande, con (M) però sempre al di sopra (G). Di conseguenza un abbassamento del baricentro comporta generalmente un miglioramento della stabilità della nave, aumentando così la capacità di opporsi alle inclinazioni generate dall'azione del vento e del moto ondoso o dagli spostamenti dei carichi a bordo. Per questo motivo, nella progettazione degli yacht moderni viene prestata particolare attenzione alla distribuzione dei pesi lungo l'intera struttura. Gli elementi più pesanti, quali motori, generatori, serbatoi e principali componenti strutturali, vengono generalmente collocati nelle zone più basse dello scafo, contribuendo a mantenere il baricentro in posizione favorevole.

## 1.5 La saldatura come tecnica di giunzione strutturale

### 1.5.1 Cos'è la saldatura e come funziona

La saldatura rappresenta uno dei principali processi di giunzione permanente impiegati nell'industria moderna e nella costruzione navale. Essa consente di collegare in modo stabile due o più componenti

metallici attraverso l'applicazione localizzata di energia termica, che provoca la fusione del materiale base e, quando necessario, del materiale d'apporto. Durante il raffreddamento e la successiva solidificazione del bagno fuso, si genera una connessione continua capace di trasferire le sollecitazioni meccaniche tra gli elementi uniti. Grazie alla capacità di realizzare strutture leggere, resistenti e prive di discontinuità significative, la saldatura ha progressivamente sostituito molte tecniche di giunzione tradizionali, come la rivettatura, diventando il metodo predominante nella costruzione di scafi, ponti, paratie e strutture portanti delle moderne imbarcazioni.

### 1.5.2 Principali processi di saldatura utilizzati in ambito navale

Nel settore navale vengono impiegati diversi procedimenti di saldatura. Le principali tecniche di saldatura utilizzate sono FCAW, MIG, TIG e SMAW saldatura ad arco con elettrodo rivestito. Ognuna si adatta a una diversa combinazione di materiali, tipi di giunto, condizioni del cantiere e velocità di produzione.

Saldatura ad arco con filo animato è una delle migliori scelte per l'acciaio strutturale navale perché funziona bene su sezioni spesse e in condizioni di cantiere navale all'aperto. I cantieri navali utilizzano ampiamente la saldatura FCAW per le sezioni dello scafo, le strutture del ponte e altri grandi assemblaggi in acciaio. Questo perché offre un'elevata velocità di deposizione, cioè consente di riempire le giunture lunghe più rapidamente rispetto ai processi più lenti e focalizzati sulla precisione. Inoltre offre ottime prestazioni all'aperto, in particolare gestisce meglio le condizioni ventose in banchina rispetto ai metodi con schermatura a gas. Infine è ideale per l'acciaio pesante e per la lavorazione di lamiere spesse, dove resistenza e produttività sono entrambe importanti.

GMAW o MIG: È la soluzione ideale per la fabbricazione navale quando sono necessarie saldature più rapide, cordoni di saldatura più puliti e una minore necessità di pulizia post-saldatura in un ambiente di officina controllato. Viene spesso utilizzata durante la prefabbricazione e l'assemblaggio leggero, soprattutto per sezioni più sottili e componenti in alluminio. Viene usata la saldatura MIG quando si vuole ottenere un aspetto della saldatura più pulito, si impiega meno tempo nella pulizia e nella rifinitura. In più riduce i tempi di consegna, mantenendo la produzione in movimento per i componenti ripetibili. In fine si ha un buon controllo sui materiali più leggeri cioè sui pannelli in alluminio e elementi strutturali più leggeri. La saldatura MIG non è sempre la scelta migliore per lavori all'aperto in ambienti ventosi e esposti agli agenti atmosferici, ma in officina può far risparmiare molto tempo.

GTAW o TIG: Viene utilizzato nei lavori navali quando la qualità della saldatura, la precisione e la resistenza alla corrosione sono più importanti della velocità. Viene impiegata la saldatura TIG su tubazioni in acciaio inossidabile, componenti in lega di nichel e altre giunzioni critiche dove una fusione inadeguata o la contaminazione possono trasformarsi in un grave problema in seguito. La saldatura TIG si distingue perché offre un controllo preciso dell'arco elettrico, molto utile per tubi a parete sottile e saldature di precisione. Successivamente un ulteriore vantaggio la qualità di saldatura. È più pulita e produce saldature precise e con pochi difetti su componenti critici. Migliora la compatibilità con leghe resistenti alla corrosione, comunemente utilizzato su acciaio inossidabile e materiali a base di nichel. La saldatura TIG richiede più tempo e maggiore abilità da parte dell'operatore.

Saldatura ad arco in metallo schermato rimane una scelta pratica per le riparazioni navali perché è portatile, flessibile e più facile da usare in aree difficili da raggiungere. Questo processo è comune

nella riparazione navale, nella manutenzione offshore e negli interventi di emergenza in condizioni non ottimali. Si conferma utile perché offre, una configurazione portatile ed si può portare in spazi ristretti e riparare le zone con maggiore facilità. Ancora, buona tolleranza per le condizioni della superficie, in grado di gestire lo sporco, ruggine e riparazioni sul campo meglio dei metodi di pulizia che si effettuano esclusivamente in officina. Comporta un elevato valore di riparazione ma funziona bene quando la velocità e l'accessibilità sono più importanti dell'aspetto estetico. Se il lavoro è urgente e l'allestimento deve rimanere semplice, la saldatura ad arco con elettrodo rivestito è ancora difficile da battere.

### 1.5.3 Vantaggi della saldatura

La diffusione della saldatura nella costruzione navale è dovuta ai numerosi vantaggi che essa offre rispetto ad altri sistemi di giunzione. Tra i principali si possono citare l'elevata resistenza meccanica delle connessioni, la continuità strutturale tra i componenti, la riduzione del numero di elementi di fissaggio. Inoltre, a livello economico, risulta più vantaggiosa la saldatura se paragonata ad altri sistemi di giunzione come (triplata e adesivi), che analizzeremo in seguito.

### 1.5.4 Limiti della saldatura

Nonostante i numerosi vantaggi, la saldatura presenta una importante limitazione nel settore dello yachting, sia nella fase costruttiva, sia nella fase di riparazione. L'elevato calore che sviluppa la saldatura può infatti danneggiare le zone circostanti. Per questo motivo ci cercherà di trovare delle alternative spostando l'attenzione verso gli adesivi strutturali epossidici, tecnologie nuove e sperimentali che introdurremo più avanti e che risulterà essere l'oggetto della tesi.

## 2 Soluzioni moderne: I giunti bimetallici Triplate

### 2.1 Introduzione ai giunti bimetallici

L'impiego simultaneo di acciaio e alluminio nelle moderne costruzioni navali offre importanti vantaggi in termini di resistenza strutturale e riduzione del peso. Tuttavia, le differenti proprietà fisiche e metallurgiche dei due materiali rendono particolarmente complessa la realizzazione di una giunzione diretta mediante saldatura convenzionale. Per superare tale problematica sono stati sviluppati i giunti bimetallici di transizione, tra i quali il sistema Triplate che rappresenta una delle soluzioni più diffuse nel settore navale.

### 2.2 Struttura e composizione del Triplate

#### 2.2.1 Composizione

Il Triplate è un elemento prefabbricato, costituito da tre strati metallici permanentemente uniti tra loro. È composto da acciaio, puro alluminio e una lega di alluminio resistente alla corrosione. I tre strati sono Superlayer, Interlayer e Basematerial.

Superlayer: Corrosion-resistant aluminium AlMg4,5Mn

Interlayer: Pure Aluminium Al 99,5

Basematerial: Steel St52-3N

Il motivo di questa configurazione risiede dietro al fatto che le leghe di alluminio-magnesio (resistenti alla corrosione marina) sono troppo dure per formare un legame esplosivo forte e diretto con l'acciaio. Per questo motivo viene inserito uno strato intermedio di alluminio, commercialmente puro e più morbido (Al 99,5) tra lo strato di base in acciaio e lo strato superiore in AlMg4,5Mn. Questo "sandwich a tre strati omogeneamente uniti tramite esplosivo prende il nome di Triplate.

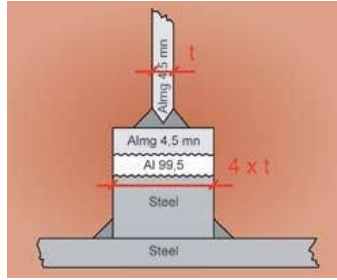
#### 2.2.2 Struttura

Larghezza (Standard Strip Width): Può essere variabile (Variable). Solitamente si consiglia che abbia x4 la larghezza della placca di alluminio.

Lunghezza (Standard Strip Length): max 3800 mm.

Spessore (Standard Strip Thickness): 28 mm or 34 mm.

È possibile anche avere giunti fatti su misura a descrizione del cliente (custom-made), tramite l'utilizzo del (water-jet cutting).



*Figura 12 - Rappresentazione visiva della struttura e la composizione del triplate*



*Figura 13 - Fotografia del giunto prima dell'installazione*

## 2.3 Processo produttivo mediante explosion bonding

L'interfaccia tra i diversi strati che compongono il Triplate viene realizzata attraverso il processo di explosion bonding, che si configura fondamentalmente come una saldatura a pressione a freddo (cold pressure welding). Il legame che si viene a creare tra l'acciaio e l'alluminio non è di natura meccanica, ma consiste in un vero e proprio legame atomico generato da una massiccia forza d'urto controllata. Il meccanismo di produzione si articola nelle seguenti fasi:

Configurazione di Stand-off

Accelerazione e Collisione

Effetto "Jet" e Pulizia Superficiale

Unione Atomica

Successivamente, verranno trattati molteplici aspetti legati al triplate, come il costo di applicazione nel settore navale, le differenti tipologie di bonding explosion, le proprietà meccaniche, i vantaggi e infine i limiti che esso comporta.

### 2.3.1 Configurazione di Stand-off

Le piastre metalliche vengono posizionate parallelamente, separate da uno spazio di distacco calcolato empiricamente (stand-off space) grazie all'inserimento di appositi blocchi di polistirolo.

### 2.3.2 Accelerazione e Collisione

Successivamente, lo strato superiore di esplosivo viene innescato. La detonazione accelera la piastra superiore verso quella inferiore a una velocità che dipende dalla tipologia e quantità di carica, nonché dal peso del metallo stesso.

### 2.3.3 Effetto "Jet" e Pulizia Superficiale

Nel punto d'impatto si genera una pressione estremamente elevata che porta i metalli a uno stato super-plastico. L'onda d'urto rompe gli ossidi superficiali e l'aria intrappolata e le particelle di ossido vengono quindi violentemente espulse davanti al fronte di avanzamento della detonazione sotto forma di un getto continuo (chiamato jet).

### 2.3.4 Unione Atomica

Le superfici dei metalli, così perfettamente pulite e prive di contaminazioni a livello microscopico, vengono pressate l'una contro l'altra con una forza tale da interbloccare localmente le rispettive strutture atomiche, creando una giunzione omogenea.

## 2.4 Differenti modalità di Bonding Explosion

Ci sono due modalità con cui può avvenire il processo di bonding explosion:

Cladding Atmosferico

Cladding Sotto Vuoto

### 2.4.1 Cladding Atmosferico (in aria)

Eseguito all'aria aperta, risente fortemente delle condizioni meteorologiche (umidità, temperature inferiori a 10 °C che riducono la duttilità) e produce un forte inquinamento acustico. L'aria presente tende a far intrappolare gli ossidi nel fronte d'onda, creando porosità e micro-vuoti visibili che agiscono come inneschi per cricche, delaminazioni e corrosione sotto stress meccanico.

### 2.4.2 Cladding Sotto Vuoto (Triplate di Shockwave)

Eseguito interamente all'interno di una camera a vuoto. L'assenza di aria elimina la necessità di un jet violento e permette di usare esplosivi meno aggressivi. Il risultato è una linea di giunzione fluida, quasi rettilinea e priva di onde marcate, che garantisce un legame denso al 100%, totalmente privo di porosità o agglomerati di ossido, e indipendente dalle variabili climatiche esterne.

## 2.5 Proprietà Meccaniche

Le proprietà meccaniche del Triplate sono le seguenti:

- 1) Resistenza al taglio (Basematerial-Interlayer):  $> 55 \text{ N/mm}^2$ .
- 2) Resistenza alla trazione (trough thickness):  $> 75 \text{ N/mm}^2$ .

In base ai test di trazione effettuati, la frattura non si verifica mai sul giunto stesso, bensì all'interno della zona di transizione dell'alluminio.

3) Test di piegatura (metallo base in compressione e trazione): I risultati sono certificati come accettabili.

4) Resistenza alla fatica: Se esposto a un milione di cicli di carico meccanico, il campione si rompe sempre nella zona dell'alluminio e non sulla giunzione metallica.

5) Resistenza elettrica: Un buon giunto claddato non mostra alcun aumento della resistenza elettrica attraverso la zona di transizione, poichè il legame è di tipo metallurgico (atomico).

## 2.6 Vantaggi del giunto bimetallico

I vantaggi del giunto sono elencati di seguito:

1) Giunzione atomica omogenea: Essendo prodotto tramite saldatura per esplosione sottovuoto, il Triplate garantisce un giunto denso al 100% e perfettamente omogeneo, privo di agglomerati di ossidi grossolani o porosità all'interfaccia acciaio-alluminio.

2) Prevenzione della corrosione galvanica: Sostituisce i metodi tradizionali di giunzione (come rivetti o bulloni) che tendono a far fessurare le strutture a causa dei diversi coefficienti di espansione termica, eliminando l'effetto fessura ed impedendo all'acqua marina di infiltrarsi.

3) Ottima formabilità e lavorabilità: Offre una duttilità superiore che rende facile la segatura e la formatura. Può essere piegato con un raggio minimo di piegatura laterale ridotto (fino a 5 volte la larghezza della striscia).

4) Qualità controllata e riproducibile: Il processo di produzione sottovuoto elimina le variabili legate alle condizioni atmosferiche (come umidità e temperature inferiori a 10 °C che nei processi all'aria aperta rischiano di causare delaminazioni).

5) Minore usura degli strumenti: La totale assenza di ossidi abrasivi nell'area di legame riduce drasticamente l'usura delle lame dei segchetti durante il taglio.

## 2.7 Limiti e Precauzioni del Triplate

Di seguito sono riportati i limiti del Triplate.

1) Sensibilità alle alte temperature (Il limite principale): Il limite critico di temperatura per la combinazione alluminio/acciaio è di 315 °C. Se si supera questa temperatura, si formano composti intermetallici fragili (cristalli di alluminio/ferro  $AlFe_3$ ) che riducono drasticamente sia le proprietà meccaniche che quelle elettriche (la resistenza elettrica aumenta vertiginosamente).

2) Restrizioni durante la saldatura: Durante le operazioni di saldatura è tassativo monitorare la temperatura affinché non superi i 315 °C. Di conseguenza:

- Il giunto di transizione non deve mai essere preriscaldato.
- È necessario limitare il diametro dei fili di apporto (max 1.2 mm per l'alluminio) e degli elettrodi (max 2.5 mm per l'acciaio) per ridurre al minimo l'apporto termico.
- Se sono necessarie più passate di saldatura, bisogna lasciare raffreddare ciascuna passata per evitare il surriscaldamento.

3) Limiti di taglio termico: Le strisce di Triplate non devono mai essere tagliate utilizzando attrezzature da taglio termico (es. ossitaglio o plasma), ma solo tramite sistemi meccanici come seghe circolari, seghe a nastro o sistemi di taglio a getto d'acqua (waterjet).

4) Limiti di piegatura verticale: Nelle piegature verticali, sia con l'alluminio in trazione che in compressione, il raggio di curvatura minimo deve essere limitato a 300 mm.

5) Zone non saldabili nei giunti testa a testa: Nelle saldature testa a testa tra strisce, un'area di 3 mm sopra e sotto l'interfaccia alluminio/acciaio non deve essere saldata; questo spazio vuoto deve essere poi sigillato meccanicamente (martellato) o riempito con sigillanti/epossidici per garantire l'impermeabilità.

6) Inoltre, nel settore dello yachting gli spazi e le manovre di saldatura sono angusti e scomodi, che rendono difficile la procedura.

## 2.8 Costo di applicazione del giunto

Per poter calcolare il costo totale del triplate, verrà usato lo scafo (C146) come riferimento sul quale eseguire questa piccola ricerca. Il costo andrà calcolato in base a quanto giunto triplate verrà utilizzato e il costo della manodopera.

Per poter accoppiare lo scafo in acciaio con la parte sovrastante, lo scafo C146 necessita di 195m di giunzione. Il valore del triplate è di 68€/m. Di conseguenza per 195m il costo è di 13260€.

Nel conto finale aggiungiamo il costo di manodopera. Di solito per installare 195m di triplate sono necessari più o meno 5gg lavorativi, con turni di lavoro di 10h e con un salario di 40€/h, un conto approssimativo si aggira intorno ai 2000€ per lavoratore. In totale quindi 15260€.

### 3. Applicazione degli adesivi strutturali nel settore dello yachting

L'introduzione di tecnologie d'avanguardia, quali gli adesivi strutturali, rappresenta una potenziale svolta evolutiva nel settore della cantieristica navale, con particolare riferimento al comparto dello yachting di lusso. Tuttavia, la transizione da metodologie tradizionali, come l'impiego dei giunti di transizione tipo triplate, a sistemi di giunzione chimica richiede un'attenta valutazione di molteplici fattori critici.

In primo luogo, la salvaguardia della sicurezza in mare rimane il requisito prioritario e imprescindibile per i cantieri costruttori. Trattandosi di una tecnologia non ancora capillarmente consolidata né pienamente standardizzata dalle normative vigenti nel settore navale, emerge la stringente necessità di definire linee guida rigorose e protocolli operativi chiari, atti a garantire l'affidabilità strutturale a lungo termine.

In secondo luogo, l'analisi dei costi, che riveste un ruolo determinante nella scelta strategica di adottare questo nuovo approccio ingegneristico.

Il questo capitolo, insieme a quelli successivi, si propone di introdurre e approfondire tali tematiche, analizzando i requisiti di sicurezza, le sfide normative e le implicazioni economiche legate all'adozione degli adesivi strutturali.

#### 3.1 Linee Guida Operative per un Incollaggio Strutturale Ottimale

Per garantire l'efficacia di un giunto strutturale e consentire lo sviluppo di un legame a livello molecolare (il cosiddetto "molecular weld"), è fondamentale seguire un protocollo rigoroso che minimizzi i rischi di contaminazione e difetti di applicazione. Il processo si articola nelle fasi:

- la gestione delle condizioni ambientali
- la preparazione della superficie
- la tecnica di stesura dell'adesivo
- tipologie di cedimento

##### 3.1.1. la gestione delle condizioni ambientali

L'incollaggio non può essere eseguito in condizioni ambientali casuali. Devono essere rispettati i seguenti limiti fisici:

- Temperatura: L'intervallo termico ideale per l'applicazione e la polimerizzazione deve essere compreso tra i 5°C - 60°C. Se la temperatura scende sotto i 10°C, sia la base che il solidificante devono essere preriscaldati prima della miscelazione per ridurre la viscosità e facilitare l'omogeneizzazione.
- Umidità Relativa: L'umidità dell'aria deve essere rigorosamente inferiore all'85%.

- Punto di Rugiada: Per evitare la formazione di micro-condensa invisibile sulla superficie del metallo (che comprometterebbe irrimediabilmente l'adesione), la temperatura del substrato deve essere superiore di almeno 3°C rispetto al punto di rugiada calcolato.
- Agenti Atmosferici: È vietato applicare il prodotto in presenza di pioggia, neve o in ambienti con forte presenza di polveri in sospensione.

### 3.1.2. la preparazione della superficie

La qualità dell'incollaggio dipende direttamente dall'area di contatto effettiva e dalla rugosità del metallo. Si distinguono due livelli di preparazione:

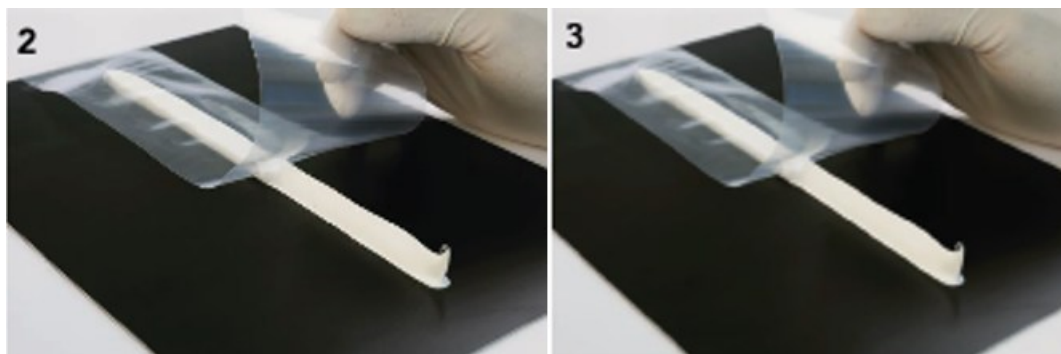
- Preparazione Ottimale (Sabbiatura): È la procedura raccomandata per i giunti strutturali soggetti a carichi pesanti o ciclici. Prevede una prima sgrassatura con solventi puri che non lasciano residui, seguita da una sabbiatura per ottenere un profilo di rugosità minimo di 75 micron. La polvere residua deve essere rimossa e l'adesivo deve essere applicato prima che inizi qualsiasi fenomeno di ossidazione.
- Preparazione Minima (Utensili Meccanici): In casi di accessibilità limitata, è tollerata la pulizia meccanica secondo alcuni standard, garantendo comunque un profilo di rugosità minimo di 25 micron.

### 3.1.3 la tecnica di stesura dell'adesivo

L'azienda produttrice della colla in questione indica l'esatta metodologia per la sua corretta applicazione. In questo modo si possono evitare l'inclusione di bolle d'aria all'interno del giunto (che agirebbero come concentratori di sforzo e inneschi di cricca), le immagini seguenti evidenziano la corretta metodologia di stesura:



*Figura 14 - Applicare un cordolo triangolare di circa 10 cm sul substrato originale precedentemente preparato*



*Figura 15 - Utilizzare carta siliconata (antiaderente), carta cerata o un foglio di polietilene per schiacciare il cordolo fino a circa la metà della sua altezza originaria*

Lasciare polimerizzare il cordolo per 7 giorni nelle stesse condizioni in cui è stato applicato il giunto di incollaggio effettivo, prima di procedere alla valutazione dell'adesione



*Figura 16 - Fissare la parte da testare utilizzando morsetti adeguati. Successivamente, servendosi di un cutter affilato, separare dal substrato i primi 3 cm del bordo d'attacco del cordolo*



*Figura 17 - Afferrare la parte separata del cordolo con una pinza a becchi d'ago e ruotare lentamente il cordolo (applicando uno sforzo di pelatura) per separarlo dal substrato. Tagliare frequentemente l'adesivo sul fondo, fino a raggiungere il substrato*



*Figura 18 - test di trazione su un provino con stesura della colla perfettamente eseguita*

### 3.1.4 tipologie di cedimento

Cedimento Adesivo (Adhesion failure): si verifica quando l'adesivo si stacca in modo pulito dal substrato.

Cedimento del Substrato (Substrate failure): si verifica quando è il substrato stesso a lacerarsi (o la vernice/primer a distaccarsi).

Cedimento Coesivo (Cohesive failure): rappresenta la condizione ottima (ideale) e si verifica quando a lacerarsi è l'adesivo stesso.

È inoltre possibile una combinazione di queste modalità di cedimento.

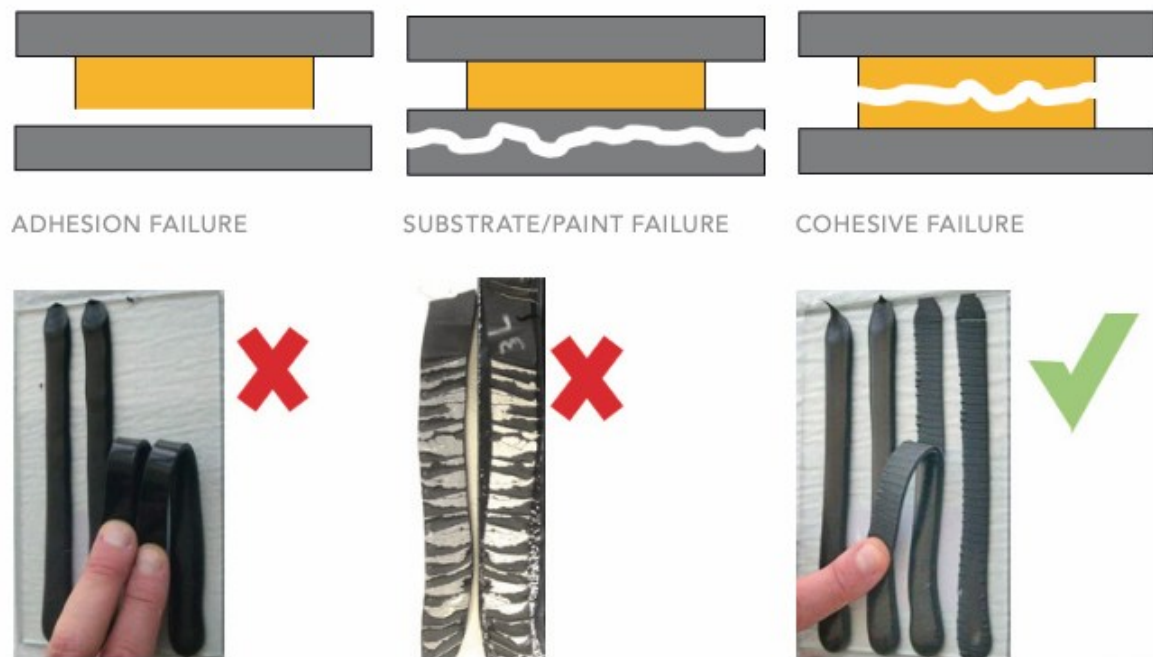


Figura 19 - Risultati di test di laboratorio sulle diverse tipologie di cedimento

### 3.2 Costi di applicazione dell'adesivo strutturale

Capire se adottare questa nuova tecnologia oppure continuare ad approcciare quella già esistente dipende dal costo totale che essa comporta. È necessario calcolare il costo di approvvigionamento dell'adesivo, il costo in fase di installazione e un aspetto altrettanto importante, il tempo necessario per completare l'operazione. Per poter calcolare l'eventuale vantaggio economico dell'adesivo o del triplate, viene usato lo stesso scafo (C146). Nel precedente capitolo sono stati calcolati i costi relativi al triplate, ora ci concentriamo sull'adesivo strutturale.

- Il costo di approvvigionamento dell'adesivo in questione sarebbe di 550€/L
- Questo passaggio è leggermente più articolato. Prima di procedere bisogna tenere conto che questo in tipo di scafo (C146) ci sono 195m di giunzione in totale. Per poter trovare quanti litri di colla servono per questa operazione di giunzione, bisogna prima calcolare il volume. L'azienda che produce questo adesivo strutturale riferisce che lo spessore della colla in fase di applicazione deve essere di 2mm. Per trovare la larghezza necessaria, così da rendere la giunzione tra acciaio e alluminio sicura, abbiamo usato lo spessore del bimetallo (25mm), la tensione di snervamento del bimetallo (75MPa) e tensione di rottura della colla (37,0MPa).

$$\text{Larghezza} = 25 \times 75 \div 37,0 = 50,6\text{mm}$$

Quindi il volume è dato: Lunghezza x Larghezza x Spessore =  $195\text{m} \times 0,0506\text{m} \times 0,002\text{m} = 0,019734 \text{ m}^3$  per convertirli in litri moltiplichiamo per mille e si ha 19,734L. Quindi in totale si ha  $550 \times 19,734 = 10854\text{€}$

Un altro aspetto importante è il costo di installazione. Questo passaggio viene effettuato dal personale dell'azienda che produce l'adesivo ed ha un costo che è di un ordine di grandezza superiore se paragonato alla saldatura.

## 4. Induzione e diverse tipologie di difetti nei provini

Nell'ambito navale, in particolare nel settore dello yachting, per poter introdurre nuove tecnologie, in particolare gli adesivi strutturali come possibile sostituzione del giunto bimetallico, nelle zone strutturali portanti e della saldatura nelle zone secondarie, bisogna identificare i "failure modes" più comuni a cui gli incollaggi sono soggetti. L'induzione controllata di difetti all'interno dei provini è una pratica fondamentale. Creare quindi difetti specifici e riproducibili in ambienti controllati permette di ricreare le diverse condizioni operative che si verificano nel cantiere e valutare così l'affidabilità del provino. Inoltre, per poter controllare in maniera adeguata e sicura, si ha bisogno di metodi di ispezione e controlli non distruttivi che introdurremo in seguito. Andiamo ad approfondire alcuni di questi difetti volutamente indotti in laboratorio:

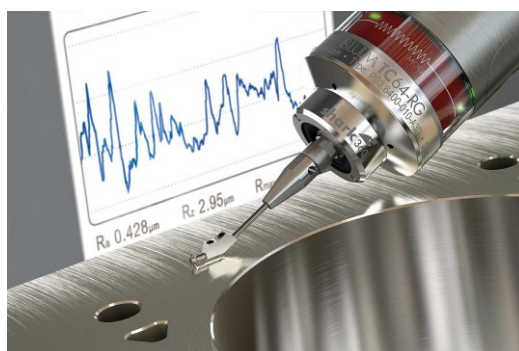
Surface preparation

Adhesive components mixing

Air bubbles

### 4.1 Surface preparation (preparazione superficie)

Una corretta preparazione della superficie è essenziale per ottenere incollaggi forti e affidabili. L'interfaccia tra adesivo e substrato può essere controllata attraverso l'uso del rugosimetro. È uno strumento essenziale che serve a rilevare la rugosità superficiale di un materiale, ovvero le microirregolarità presenti sulla superficie. Il concetto che si nasconde dietro al funzionamento è semplice, infatti si basa sul rilievo del profilo superficiale mediante uno stilo o tastatore che scorre sulla superficie da analizzare. Le variazioni verticali (asperità) vengono convertite in segnale elettrico e poi elaborate digitalmente per calcolare i parametri di rugosità.



*Figura 20 - Rappresentazione del rugosimetro*

## 4.2 Adhesive components mixing (coretto mescolamento dei componenti)

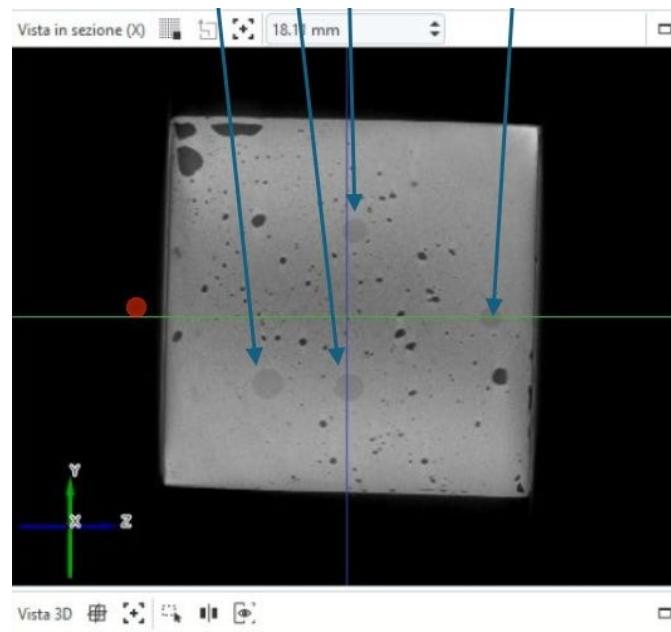
Se i componenti non sono mescolati bene o nelle giuste proporzioni, la reazione chimica che serve a far indurire la colla non avviene in modo completo. Di conseguenza, l'adesivo non raggiungerà mai la durezza e la resistenza meccanica previste dal produttore. Così il giunto incollato diventerà il punto debole di tutta la struttura, cedendo a carichi molto inferiori rispetto al normale. Il corretto mixaggio può essere verificato tramite test di durezza sull'adesivo.



*Figura 21 - Base e catalizzatore prima dell'applicazione*

### 4.3 Air bubbles (bolle d'aria)

Le bolle d'aria sono dei vuoti interni di aria, che rimangono intrappolati all'interno della colla. Di conseguenza, invece di avere un legame solido e continuo, in quel punto c'è il "vuoto". Questo tipo di difetto è pericoloso principalmente perché si crea una concentrazione degli sforzi. Cioè quando il provino viene tirato o piegato, per testarne la resistenza, le forze non si distribuiscono in modo uniforme. La bolla d'aria agisce come un "punto di rottura prefissato". Lo sforzo si accumula tutto attorno alla bolla, che diventa il punto perfetto in cui la colla inizia a spaccarsi. Inoltre, si ha una riduzione dell'area utile. Più precisamente, l'area di contatto viene ridotta a causa delle bolle, che riducono drasticamente la resistenza totale del giunto.



*Figura 22 - Rappresentazione delle bolle d'aria (indicate con le frecce)*

## 5. Ispezione e Controlli non distruttivi

Nei test effettuati, andremo a inserire solo uno dei tre tipi di difetti elencati precedentemente, le bolle d'aria, come voluto dall'azienda. Per poter simulare un tale difetto, come prima cosa, abbiamo diviso il provino in 25 sezioni di forma quadrata e all'interno di quattro di essi abbiamo inserito del pluriball. Una volta posizionata nel provino la colla strutturale, non è più possibile controllare le condizioni di quest'ultimo. È necessario quindi eseguire ispezioni e controlli non distruttivi. Il punto cruciale di questa tesi consiste nel cercare di trovare il metodo di ispezione più efficace, così che, durante la fase di applicazione dell'adesivo strutturale, si abbia la sicurezza che l'incollaggio sia stato fatto a regola d'arte. Come possibili soluzioni abbiamo i raggi X, gli ultrasuoni e la tomografia.



Figura 23 - Illustrazione del provino e dell'inserimento del pluriball

### 5.1 Raggi X (Metodo Radiografico)

L'esame radiografico è un metodo di controllo non distruttivo volumetrico che si basa sull'impiego di radiazioni elettromagnetiche penetranti (nello specifico i Raggi X) in grado di attraversare i corpi da esaminare. Per i materiali compositi si utilizzano generalmente raggi X a bassa energia. I raggi X non possono essere visti, sentiti o ascoltati, non possiedono carica né massa, non sono influenzati da campi elettrici o magnetici e si propagano generalmente in linea retta (anche se possono subire diffrazione).

Funzionamento:

- Generazione ed emissione: Una sorgente emette il fascio di raggi X che viene diretto verso il pezzo da esaminare.

- **Attenuazione differenziale:** Quando i raggi attraversano la materia, subiscono un assorbimento (attenuazione) che dipende dalle caratteristiche fisiche del mezzo, come lo spessore e la densità del materiale.
- **Rilevazione dell'immagine:** Le radiazioni che riescono a oltrepassare il pezzo colpiscono un rilevatore posizionato sul lato opposto. Questo rilevatore può essere una lastra sensibile (pellicola convenzionale con una risoluzione spaziale di 2  $\mu\text{m}$ ) oppure uno schermo fluorescente per la radiografia digitale (con risoluzione spaziale di 200  $\mu\text{m}$ ).
- **Identificazione del difetto:** Se all'interno del pezzo è presente una discontinuità o un difetto (come un vuoto, una porosità o un'inclusione), in quel punto il materiale opporrà una resistenza diversa al passaggio dei raggi (un minore o maggiore assorbimento). Sul rilevatore, il difetto verrà evidenziato visivamente sotto forma di zone diversamente annerite.



*Figura 24 - strumento portatile a raggi x*

## 5.2 Ultrasuoni (Metodo Ultrasonico)

Il metodo ultrasonico è un controllo non distruttivo che si basa sulla generazione, propagazione e ricezione di onde elastiche/acustiche ad alta frequenza (generalmente comprese tra 0,5 e 10 MHz, ben al di sopra della soglia udibile dall'orecchio umano) all'interno dei materiali da controllare. È un esame ampiamente impiegato per il rilievo di difetti interni come vuoti, cricche, inclusioni, soffiature o cavità di ritiro. Il funzionamento di tale metodo è il seguente:

- **Generazione delle onde:** L'apparecchio genera impulsi elettrici ad alta frequenza che vengono inviati a un cristallo con proprietà piezoelettriche contenuto all'interno di una sonda (trasduttore). Per effetto piezoelettrico inverso, il cristallo vibra trasformando l'energia elettrica in onde acustiche/meccaniche.
- **Accoppiamento e propagazione:** Per far sì che le onde passino dalla sonda al pezzo senza disperdersi nell'aria, si interpone sulla superficie un liquido accoppiante (chiamato couplant, come gel, olio o acqua). L'onda si propaga così all'interno del materiale a una velocità costante che dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla densità del mezzo stesso.
- **Riflessione (Eco):** Le onde viaggiano nel materiale in modo rettilineo fino a quando non incontrano una variazione di impedenza acustica, causata da una discontinuità geometrica (come la parete di fondo del pezzo) o da un difetto interno. Quando l'onda urta questa discontinuità viene riflessa indietro verso la sonda sotto forma di eco.
- **Ricezione e visualizzazione:** La sonda riceve l'eco di ritorno e il cristallo piezoelettrico compie l'effetto inverso, ritrasformando la vibrazione meccanica in un segnale elettrico. Questo segnale

viene inviato all'apparecchio (tubo a raggi catodici o schermo digitale) che mostra i risultati principalmente su un grafico spazio-tempo (chiamato A-Scan). L'operatore può così determinare:

- La profondità del difetto, misurando il tempo impiegato dall'onda per andare e tornare (tempo di volo).
- L'entità/dimensione del difetto, valutando l'altezza (ampiezza) dell'eco riflesso sullo schermo.



*Figura 25 - applicazione degli ultrasuoni su un provino metallico*

## 5.3 Tomografia

Il termine tomografia deriva dal greco *témnó* (tagliare) o *tómos* (nel senso di "strato") e *gráphó* (scrivere). Si tratta di un metodo di controllo radiografico avanzato che indica il metodo di rappresentare il campione in esame in strati (fette o slice), a differenza della radiografia convenzionale che proietta e ricostruisce l'oggetto tridimensionale su un unico piano bidimensionale. Di seguito viene illustrato il funzionamento:

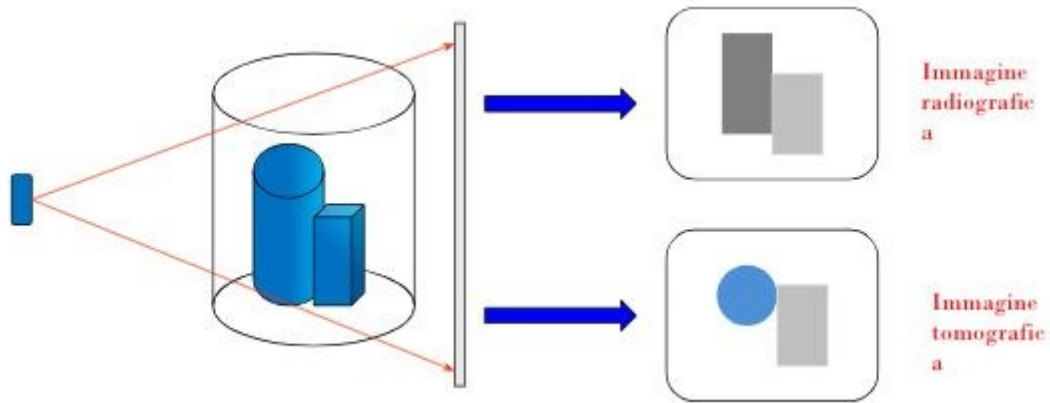
- Scansione angolare: Per ottenere l'immagine tomografica, il campione in esame (o il sistema di rivelazione) viene fatto ruotare. Durante questa rotazione, lo strumento acquisisce tante proiezioni radiografiche quanti sono gli angoli di rotazione impostati.
- Ricostruzione matematica: Tutte le proiezioni geometriche ottenute durante la rotazione vengono elaborate e unite tramite algoritmi sofisticati basati su software di calcolo.
- Scomposizione in Slice: Il risultato finale della composizione è la ricostruzione di una slice (una sezione trasversale) del campione. Ogni singola slice ha una sua precisa altezza che dipende dall'elemento sensibile del rivelatore (detector) e dal campo di vista (Field Of View, FOV).
- I voxel: Per la ricostruzione dell'immagine digitale su computer, vengono impiegate matrici di ricostruzione quadrate formate da  $N \times N$  elementi. Ciascuna di queste singole microaree tridimensionali viene espressa in voxel (pixel volumetrici). Il voxel è costituito da un parallelepipedo la cui altezza equivale allo spessore dello strato (slice) e il cui lato di base è calcolato in funzione del diametro del campo di vista e del numero di elementi della matrice.

Applicazione e utilità nei controlli:

La tomografia è fondamentale perché permette di superare la sovrapposizione delle strutture tipica delle lastre radiografiche standard. Nei controlli sui materiali consente di mappare l'interno del pezzo visualizzando:

- La corretta distribuzione della matrice polimerica.

- La presenza di difetti complessi come la porosità diffusa.
- L'integrità di geometrie interne nascoste, come nel caso delle strutture a nido d'ape.



*Figura 26 - differenti slices del tomografo*

## 6. Analisi e risultati dei test

### 6.1 Analisi dei provini

Per eseguire i test sono stati adeguatamente preparati due provini in alluminio e altri due provini in acciaio, con spessori diversi. Le placche misurano 100mm x 100mm. Nei laboratori dell'università sono stati eseguiti dei test, inserendo come difetto le bolle d'aria (4 pluriball) e rilevati tramite l'uso del tomografo.

Il tomografo utilizzato ha le seguenti caratteristiche:

Zeiss CT scanner METROTOM 1500



- Tensione/Potenza tubo = 30-225 kV/ 500 W
- Corrente max tubo = 1000  $\mu$ A
- Distanza sorgente/detector = max 1500 mm
- Range di misura = max 300 x 300 mm
- Risoluzione min = 6  $\mu$ m
- Numero pixels detector = 2048 x 2048

Figura 27 - immagine e parametri dello strumento utilizzato

Nella seguente tabella sono stati inseriti i parametri per i campioni in alluminio

| parametri            | valore        |
|----------------------|---------------|
| Tensione             | 190 kV        |
| Corrente             | 380 $\mu$ A   |
| Integration time     | 1000 ms       |
| Medie                | 5             |
| Gain                 | 4             |
| Filtro               | 1 mm rame     |
| Voxel size           | 66.71 $\mu$ m |
| Numero di proiezioni | 2050          |

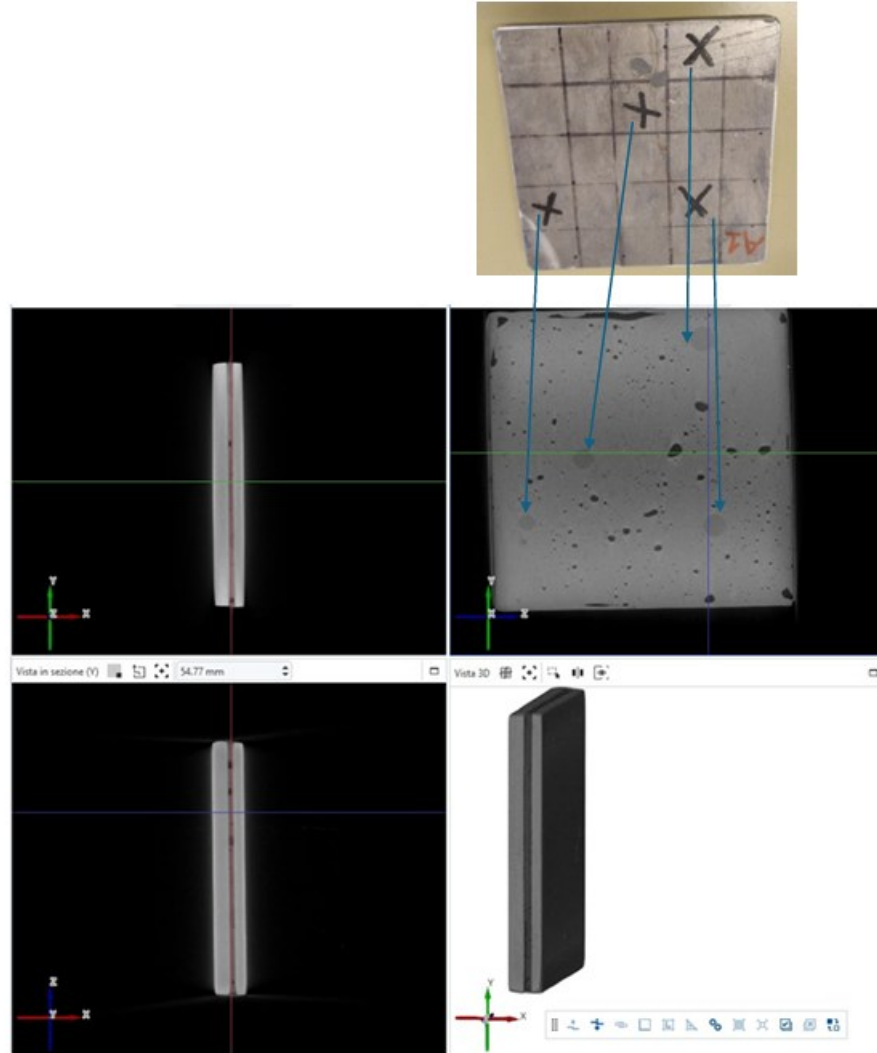
Tabella 1 - valori dei campioni in alluminio

Nella tabella successiva ci sono i parametri per i campioni in acciaio

| <b>parametri</b>     | <b>valore</b> |
|----------------------|---------------|
| Tensione             | 200 kV        |
| Corrente             | 402 $\mu$ A   |
| Integration time     | 1000 ms       |
| Medie                | 5             |
| Gain                 | 4             |
| Filtro               | 1 mm rame     |
| Voxel size           | 66.71 $\mu$ m |
| Numero di proiezioni | 2050          |

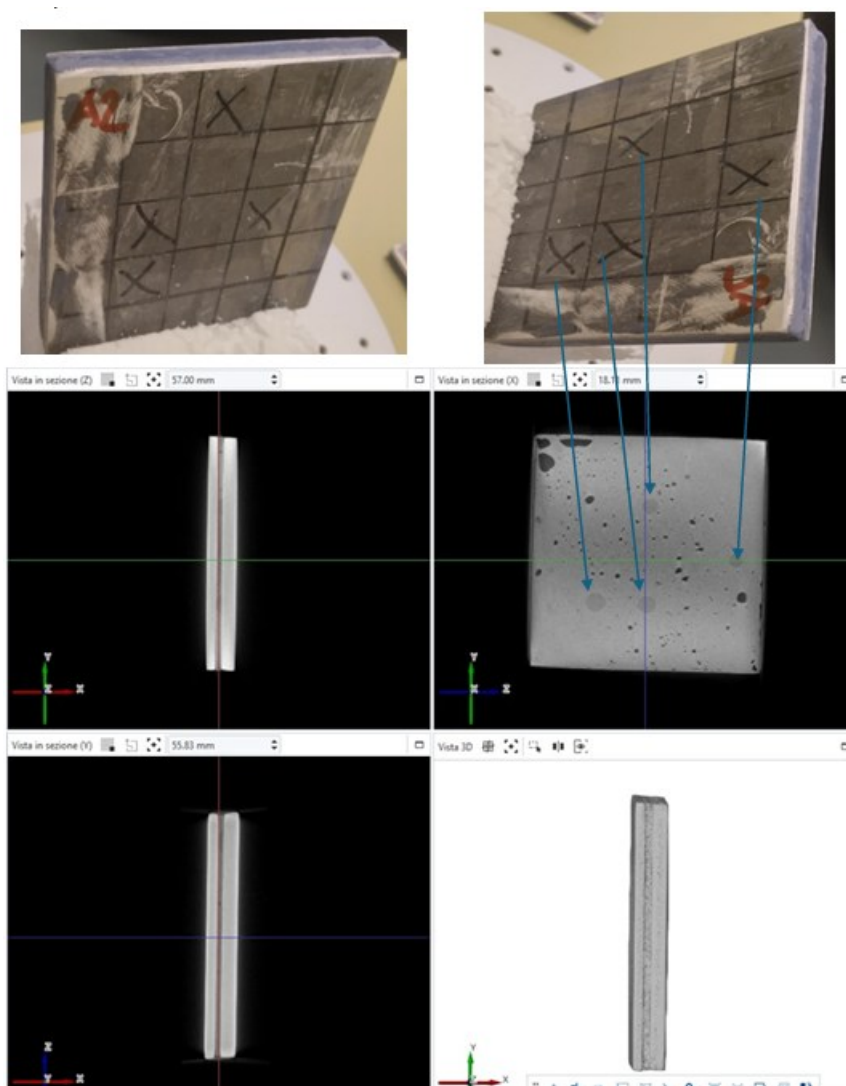
*Tabella 2 - valori dei campioni in acciaio*

Le X disegnate nel provino indicano i punti dove sono stati posizionati i 4 pluriball che simulano l'intrappolamento di aria. Il provino in alluminio 5083 (A1) ha uno spessore di 6mm. Nell'immagine successiva sono riportate le diverse viste e si possono individuare anche ad occhio nudo le bolle d'aria, ovvero le macchie circolari indicate dalle frecce azzurre.



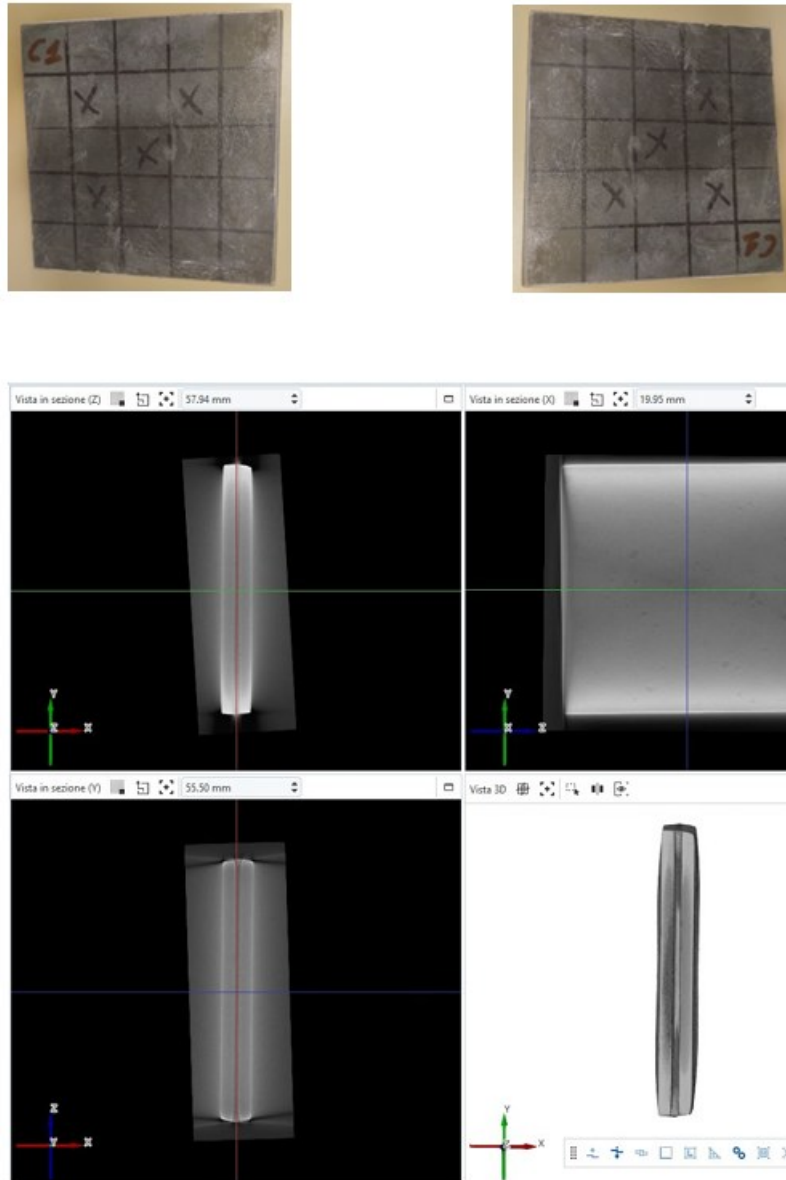
*Figura 28 - diverse viste e individuazione delle bolle d'aria del provino A1*

Nella successiva immagine viene raffigurato il secondo campione in alluminio 5083 (A2), che ha uno spessore di 6mm come il provino precedente ma con i difetti inseriti in punti diversi.



*Figura 29 - diverse viste e individuazione delle bolle d'aria del provino A2*

Proseguendo con i test, passiamo ai campioni in acciaio AH36. Il primo provino è il C1, ha spessore 4 mm e presenta delle differenze rispetto a quelli precedenti, in particolare non sono visibili con facilità le bolle d'aria inserite.



*Figura 30 - diverse viste del provino C1*

L'ultimo provino (C2) ha spessore 4mm come il provino C1 e si può subito capire che presenta le stesse caratteristiche di quello precedente.

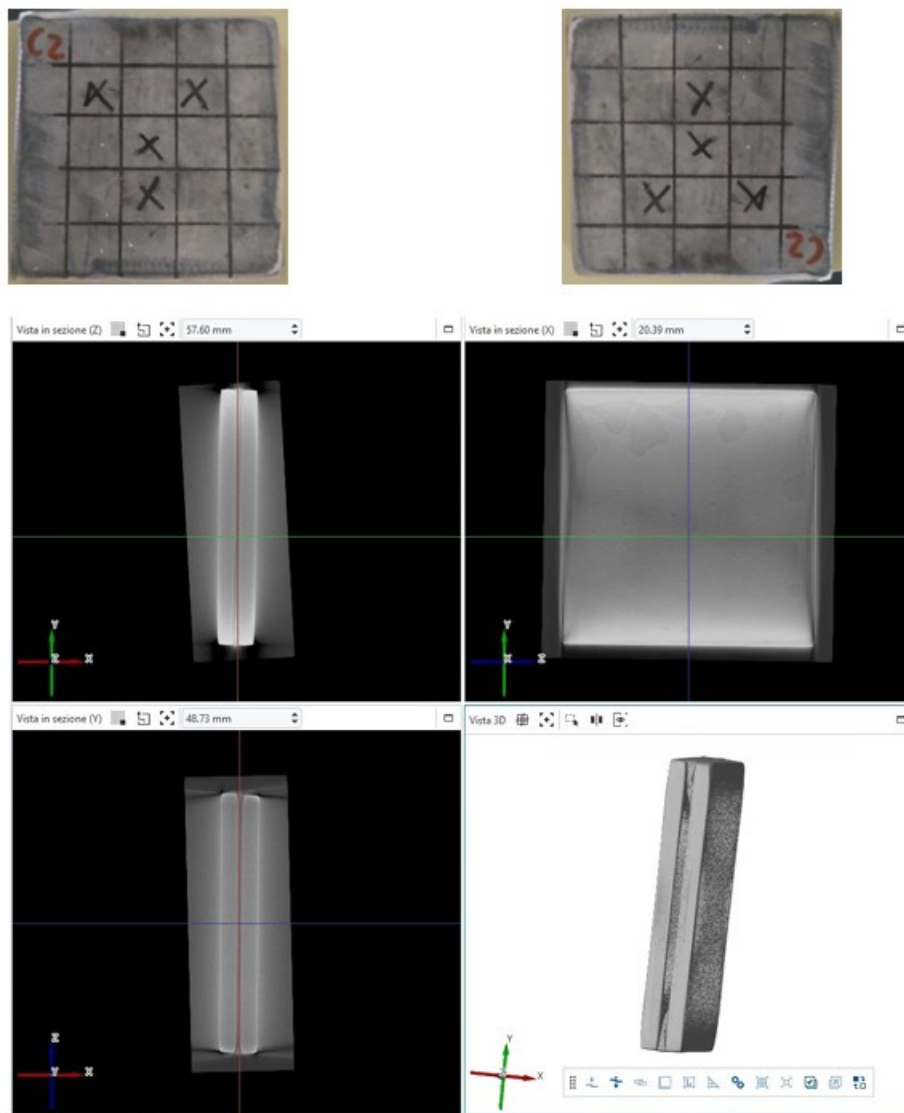


Figura 31 - diverse viste del provino C2

## 6.2 Risultati dei test

Una volta conclusi i test eseguiti nei laboratori dell'università, per quanto riguarda l'analisi dell'ispezione dei provini, si può concludere che di base sui campioni in alluminio i difetti indotti si riescono a distinguere bene dalla porosità, mentre nell'acciaio questa differenza non è visibile.

## 7. Conclusioni

Questo elaborato di tesi ha analizzato l'evoluzione della cantieristica navale, evidenziandone le principali problematiche e confrontando le soluzioni attualmente adottate, come il Triplate, con alternative sperimentali, tra cui l'impiego di adesivi strutturali.

Dal punto di vista economico, il Triplate risulta più vantaggioso: l'intero processo di installazione può essere gestito internamente dal personale del cantiere. Al contrario, l'applicazione degli adesivi strutturali richiede l'intervento di tecnici specializzati dell'azienda fornitrice, con un conseguente e drastico aumento dei costi. Tuttavia, in termini di tempistiche, l'incollaggio strutturale garantisce una maggiore rapidità di esecuzione, un aspetto di cruciale importanza nel settore dello yachting.

Nello studio sono stati esaminati anche i test di laboratorio condotti per valutare la reale applicabilità di questi adesivi in ambito navale. Trattandosi di una tecnologia sperimentale e priva di specifiche normative di riferimento, è infatti indispensabile verificarne in primo luogo l'affidabilità e la sicurezza.

Le analisi tomografiche effettuate sui provini in acciaio hanno evidenziato una notevole difficoltà nel distinguere le bolle d'aria dalla naturale porosità del materiale. Tali risultati non consentono attualmente di validare l'uso dell'adesivo strutturale come sostituto definitivo del Triplate. Saranno quindi necessarie ulteriori campagne di test per garantire la totale sicurezza di questa pratica in vista di future applicazioni.

# Bibliografia

- [1] M. Panessa, "Perizie su imbarcazioni: perché utilizzare tecniche ad ultrasuoni", Panessa Perito Nautico, 20 set. 2024.  
<https://www.panessa.it/perizie-su-imbarcazioni-perche-utilizzare-tecniche-ad-ultrasuoni/>
- [2] B. Kenaston, "Navigare in sicurezza attraverso un rilevatore di difetti per la riparazione e i controlli degli yacht", Evident IMS, 10 ago. 2021.  
<https://ims.evidentscientific.com/it/insights/smooth-sailing-with-a-flaw-detector-for-yacht-repair-and-surveys>
- [3] YesWelder, "Saldatura per l'industria navale: tecniche chiave, materiali e tendenze del settore", YesWelder Blog, 24 mar. 2026.  
<https://wholesale.yeswelder.com/it/blog/welding-for-the-marine-industry/>
- [4] Casa della Saldatura, "Saldatura nel settore nautico", Casa della Saldatura, s.d.  
<https://www.casadellasaldatura.it/saldatura-nel-settore-nautico/>
- [5] C. Gatti, "Le prime navi della storia furono battezzate sul Nilo", Mare Nostrum, 9 gen. 2015.  
<https://www.marenostrumrapallo.it/navi-egizie/>

# Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi e che mi hanno accompagnato durante il mio percorso universitario.

Un particolare ringraziamento va al mio relatore, il Professor Michele Germani, per la disponibilità, la competenza e i preziosi consigli che mi ha fornito durante lo sviluppo di questo lavoro. Il suo supporto è stato fondamentale per la riuscita di questa tesi.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno costante, la fiducia e i sacrifici che mi hanno permesso di affrontare e completare questo percorso. Senza il loro aiuto nulla di tutto questo sarebbe stato possibile.

Un pensiero speciale va ai miei amici Luciano, Gianluca, Luigi e Francesco, Giulia e Elisa, compagni di avventure, studio e momenti indimenticabili. La loro amicizia, il loro sostegno e la loro presenza hanno reso questi anni universitari molto più belli e significativi.

Desidero dedicare un ringraziamento particolare a mio nonno Remo, saldatore presso il Cantiere Navale di Ancona. Avevamo tante cose in comune e anche se non ha preso parte direttamente a questo lavoro, in qualche modo, una parte di questa tesi appartiene anche a lui.

Infine, ringrazio tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine durante questi anni e hanno contribuito alla mia crescita personale e professionale.

A tutti voi, il mio più sincero grazie.