

Progetto Ecosistema dell'innovazione ECS00000043
"Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem (iNEST)"
CUP J43C22000320006
BANDO PER IL FINANZIAMENTO DI PROGETTI DI RICERCA
DESTINATO A GIOVANI RICERCATORI

a valere sulle risorse del Piano Nazionale per la Ripresa e Resilienza (PNRR), M4C2 – Investimento 1.5. Creazione e rafforzamento di "Ecosistemi dell'innovazione per la sostenibilità", finanziato dall'Unione Europea, NextGenerationEU

RELAZIONE SCIENTIFICA

Nome e Cognome	Serena Bertagna
Dipartimento	Dipartimento di Ingegneria e Architettura
e-mail	sbertagna@units.it

TITOLO della RICERCA:

Soluzioni strutturali per l'introduzione di materiali plastici innovativi in campo nautico

DURATA del PROGETTO:

01/03/2024 – 31/10/2025

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA

Background e obiettivi

L'introduzione di materiali innovativi in grado di ridurre l'impatto ambientale nel settore della cantieristica navale rappresenta oggi uno dei temi di maggiore interesse per gli esperti del comparto. Tali materiali devono combinare proprietà fisiche e meccaniche adeguate all'uso previsto con caratteristiche di eco-sostenibilità, includendo la possibilità di riciclo a fine vita, un basso consumo energetico durante la produzione e un limitato sfruttamento delle risorse. Un ulteriore valore aggiunto deriva dalla possibilità di produrre questi materiali attraverso processi di riciclo di prodotti giunti al termine del loro ciclo di vita, in linea con l'approccio Green Shipbuilding.

La produzione e lo smaltimento di imbarcazioni realizzate con materiali compositi tradizionali comportano un elevato livello di inquinamento e difficoltà di gestione dei rifiuti, motivando numerosi studi finalizzati all'individuazione di alternative più sostenibili. In questo contesto, grande attenzione è rivolta a una nuova categoria di materiali plastici derivati da materiale riciclato, in particolare il polietilene ad alta densità (HDPE), che offre diverse soluzioni di riciclo e trova crescente applicazione nella costruzione di piccole

imbarcazioni. L'HDPE è già ampiamente utilizzato in settori come l'ingegneria chimica, la costruzione di serbatoi, la meccanica industriale, l'acquacoltura e il trattamento delle acque, grazie alla sua resistenza agli agenti chimici, alla corrosione e agli ambienti salini. In ambito nautico, la sua facilità di termoformatura, taglio e saldatura lo rende particolarmente adatto alla realizzazione di forme complesse, come le curvature degli scafi, che rispondono a requisiti idrodinamici specifici. Tale materiale è inoltre riciclabile sia in forma di filamento per tecnologie di Additive Manufacturing sia come materiale triturato per processi di termoformatura come il rotostampaggio e può derivare sia da materiale vergine sia da materiale riciclato proveniente da prodotti giunti a fine vita.

Gli elementi strutturali realizzati in HDPE si presentano principalmente come pannelli "single skin" o pannelli sandwich, questi ultimi caratterizzati da due sottili lamine con un nucleo alveolare sempre in HDPE, particolarmente indicati per la costruzione di sovrastrutture navali grazie alle caratteristiche autoportanti e di isolamento termo-acustico. Data la novità dell'applicazione dell'HDPE nella costruzione di strutture nautiche, si è reso necessario approfondire lo studio delle sue caratteristiche meccaniche e della resistenza in diverse condizioni operative. Recentemente, le società di classificazione navale RINA e Bureau Veritas hanno aggiornato le normative per definire i requisiti necessari alla classificazione degli scafi in HDPE, fornendo un quadro normativo di riferimento per l'uso di questo materiale.

La presente attività di ricerca si è inserita nel progetto finalizzato ad ampliare le conoscenze sull'uso dell'HDPE nelle costruzioni nautiche. In particolare, gli obiettivi principali sono stati:

1. Analizzare le caratteristiche meccaniche del materiale HDPE in diverse condizioni operative e di sollecitazione;
2. Valutare le proprietà strutturali dei pannelli "single skin" e sandwich utilizzati nella costruzione navale;
3. Fornire dati sperimentali utili per supportare la classificazione degli scafi in HDPE secondo le recenti normative RINA e Bureau Veritas;
4. Contribuire all'identificazione di soluzioni costruttive eco-sostenibili in grado di ridurre l'impatto ambientale della cantieristica navale, valorizzando l'impiego di materiali riciclati.

Metodologie applicate

La metodologia adottata si è articolata in più fasi, integrate tra loro, che hanno coinvolto l'analisi normativa, la selezione dei materiali, la modellazione parametrica e conseguente produzione dei provini, e l'esecuzione di una campagna sperimentale avanzata.

1. Analisi normativa e progettazione geometrica: In fase preliminare, è stata condotta un'analisi approfondita degli standard internazionali ISO 527-1 e ASTM D638-14, che regolano le prove di trazione su materiali plastici. Questi riferimenti sono stati incrociati con le prescrizioni dei principali

enti di classificazione navale, in particolare RINA e Bureau Veritas, che hanno recentemente introdotto regolamenti specifici per l'impiego dell'HDPE nella costruzione di scafi. Le geometrie dei provini sono state definite sulla base di tali normative. In particolare, è stata adottata la forma “dog-bone” per i provini da trazione, con varianti progettate per testare giunti saldati (di testa e ad angolo) e connessioni imbullonate.

2. Selezione dei materiali: L'attenzione si è concentrata sui pannelli “single-skin”, formato commerciale largamente diffuso per applicazioni industriali e nautiche, grazie alla loro leggerezza, resistenza meccanica e facilità di lavorazione. I pannelli selezionati presentano una densità media di circa 0.98 g/cm^3 , valore che garantisce un buon compromesso tra peso ridotto e robustezza. Per la campagna sperimentale, sono stati selezionati due materiali distinti: HDPE vergine e HDPE riciclato. Le proprietà meccaniche dichiarate dai fornitori sono state raccolte per un confronto con i risultati derivanti dai test, al fine di verificarne l'attendibilità e la coerenza con le prestazioni effettive. Inoltre, sono stati analizzati i requisiti normativi stabiliti da Bureau Veritas e Registro Italiano Navale, che prevedono la definizione delle caratteristiche meccaniche tramite prove al limite di snervamento. È importante sottolineare che, secondo le regole attualmente in vigore, l'uso di HDPE riciclato non è ancora ammesso per applicazioni strutturali, aspetto che ha rappresentato uno dei principali motivi di approfondimento del presente studio.
3. Modellazione parametrica e produzione dei provini: Per la definizione e la produzione dei provini, è stato impiegato Grasshopper, un editor algoritmico integrato in Rhinoceros 3D. Questo strumento ha permesso di generare modelli tridimensionali parametrici, modificabili in tempo reale attraverso l'aggiornamento dei parametri geometrici principali (lunghezza, larghezza, spessore, raggio di raccordo). L'approccio parametrico ha consentito di ottimizzare i tempi di progettazione, ridurre gli errori e ottenere direttamente i file compatibili con macchine CNC per la fabbricazione dei provini.
4. Campagna sperimentale: La campagna sperimentale ha previsto prove di trazione e flessione, condotte con una macchina servo-idraulica Italsigma da 25 kN, calibrata secondo ISO 7500-1. Le prove di trazione sono state eseguite a velocità costante su provini di tipo “dog-bone”, mentre le prove di flessione, sia a tre che a quattro punti, sono state condotte su provini rettangolari, con deformazione misurata al centro della superficie inferiore. Durante le prove, sono state applicate tecniche avanzate di monitoraggio: la Digital Image Correlation (DIC) per misurare il campo di deformazione sulla superficie dei provini, e la termografia infrarossa (IRT) che ha monitorato la distribuzione della temperatura superficiale, evidenziando fenomeni di danneggiamento interno e localizzazione delle deformazioni.

5. Analisi dei dati: I dati di carico applicato e spostamento sono stati convertiti in curve sforzo-deformazione. Le quantità di interesse sono state il modulo di Young e la tensione a trazione massima. Per tali grandezze, sono stati calcolati media, deviazione standard ed errore standard per ciascun provino, consentendo un confronto diretto tra HDPE vergine, riciclato e giunti saldati.

Risultati raggiunti e discussione

L'attività sperimentale condotta, supportata da un elevato livello di ripetibilità dei test, ha permesso di ottenere una visione approfondita del comportamento meccanico dell'HDPE, sia nella sua forma vergine che riciclata, con particolare attenzione alla sua applicabilità nel settore della cantieristica navale. I risultati emersi dalle prove di trazione e flessione, integrate da tecniche avanzate di monitoraggio, hanno evidenziato ottime prestazioni del materiale in termini di duttilità, resistenza e stabilità del materiale, anche in condizioni di giunzione saldata.

Durante le prove di trazione, sia i provini in HDPE vergine che quelli in materiale riciclato hanno mostrato un'elevata capacità di deformarsi senza fratturarsi, mantenendo un comportamento plastico stabile e ripetibile. La deformazione permanente osservata dopo la rimozione del carico ha confermato la natura duttile del materiale, caratteristica particolarmente vantaggiosa per applicazioni in ambito marino, dove la capacità di assorbire energia senza cedimenti fragili è fondamentale.

Un aspetto particolarmente rilevante è emerso dal confronto tra HDPE vergine e riciclato: le differenze prestazionali tra i due materiali sono risultate minime, suggerendo che, almeno per alcune applicazioni, il materiale riciclato possa rappresentare una valida alternativa sostenibile senza compromettere la sicurezza strutturale. Inoltre, i risultati ottenuti sono stati pienamente compatibili con le specifiche dei fornitori e con i requisiti delle società di classificazione. Questo risultato apre interessanti prospettive per l'integrazione di materiali riciclati nella costruzione di imbarcazioni, in linea con i principi dell'economia circolare e della cantieristica verde.

Anche i provini saldati, realizzati con due diverse tecnologie (saldatura automatica e per estrusione), hanno evidenziato un comportamento meccanico coerente con quello del materiale base. In alcuni casi si sono verificate fratture localizzate, ma nella maggior parte dei test i giunti hanno mantenuto una buona integrità strutturale, dimostrando che, se correttamente eseguite, le saldature non compromettono significativamente le prestazioni del componente.

Le prove di flessione hanno ulteriormente confermato la capacità dell'HDPE di sopportare carichi distribuiti senza manifestare cedimenti improvvisi. I provini hanno mostrato una deformazione prevalentemente elastica, con un recupero parziale della forma originaria al termine del carico, comportamento che suggerisce una buona resilienza del materiale.

L'impiego di tecniche di misura avanzate, come la correlazione d'immagine digitale (DIC) e la termografia infrarossa (IRT), ha permesso di monitorare in tempo reale la distribuzione delle deformazioni e l'evoluzione termica durante i test. Questi strumenti hanno fornito informazioni preziose sulla localizzazione delle zone critiche e sull'attivazione di meccanismi di danneggiamento, contribuendo a una comprensione più profonda del comportamento del materiale sotto carico.

Nel complesso, i risultati ottenuti confermano che l'HDPE, sia vergine che riciclato, possiede caratteristiche meccaniche compatibili con i requisiti delle principali società di classificazione navale. Alcuni di questi enti sono stati coinvolti in un primo confronto basato sulla presentazione e discussione dei risultati ottenuti, al fine di mostrare le evidenze sperimentali e rafforzare la possibilità di estendere l'impiego di questo materiale a componenti strutturali e secondari delle imbarcazioni, promuovendo soluzioni costruttive più sostenibili e innovative.

ATTIVITA' DISSEMINATIVA e PARTECIPAZIONE A EVENTI o CONGRESSI

Partecipazione a convegni scientifici

1. Partecipazione al 26th Symposium (SORTA 2024), Zadar, Croatia, 2-5 October 2024.
2. Partecipazione al 21st International Conference on Ships and Maritime Research (NAV 2025), Messina, Italy, 18-20 June 2025.

RISULTATI DELLA RICERCA

Pubblicazioni presentate a convegni scientifici

1. S. Bertagna, N. Taucer Marchesi, V. Bucci, A. Marinò. On the Structural Response of Innovative Plastic Materials for Boatbuilding Applications. *Progress in Marine Science and Technology Volume 9: Theory and Practice of Shipbuilding*, Proceedings of the 26th Symposium (SORTA 2024), Zadar, Croatia, 2-5 October 2024. DOI: 10.3233/PMST240024.
2. S. Bertagna, N. Taucer Marchesi, V. Bucci, G. Brando, F. Distefano, V. Crupi, A. Marinò. Investigation on the Tensile Properties of Virgin and Recycled HDPE for Boatbuilding Applications Through Experimental Tests. *Progress in Marine Science and Technology Volume 10: Technology and Science for the Ships of the Future*, Proceedings of the 21st International Conference on Ships and Maritime Research (NAV 2025), Messina, Italy, 18-20 June 2025. DOI: 10.3233/PMST250118.
3. N. Taucer Marchesi, S. Bertagna, D. Padolecchia, V. Bucci, A. Marinò. Parametric Design of HDPE Testing Specimens for Boatbuilding Applications. *Progress in Marine Science and Technology Volume 10: Technology and Science for the Ships of the Future*, Proceedings of the 21st International Conference on Ships and Maritime Research (NAV 2025), Messina, Italy, 18-20 June 2025. DOI: 10.3233/PMST250120.

4. G. Brando, S. Bertagna, V. Crupi, F. Distefano, G. Epasto, A. Marinò. Experimental Techniques for the Assessment of the Mechanical Behaviour of HDPE Used in Boat Building. *Progress in Marine Science and Technology Volume 10: Technology and Science for the Ships of the Future*, Proceedings of the 21st International Conference on Ships and Maritime Research (NAV 2025), Messina, Italy, 18-20 June 2025. DOI: 10.3233/PMST250119.

Il Responsabile Scientifico