

UNIVERSITÀ
DI PAVIA

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente

Corso di Laurea Magistrale in Conservazione della Biodiversità, Didattica e
Comunicazione Scientifica

Direttore: Silvio Seno

**STUDIO DELLE PERFORMANCE TECNICHE ED ECOLOGICHE
DELLA FIBRA DI COCCO IN AMBIENTE MARINO**

Relatrice:

Prof.ssa Agnese Marchini

Correlatori:

Dr. Salvatore Coco

Dott.ssa Manuela Bordiga

Tesi Sperimentale

di *Mirea Nazzari*

matr. 524951

Anno Accademico 2023/24

SOMMARIO

1. RIASSUNTO	3
2. INTRODUZIONE	5
2.1. Geosintetici e Geotessili: generalità e applicazioni	5
2.2. La Fibra di Cocco: Origine, Composizione e Proprietà	10
2.2.1. Applicazione della Fibra di Cocco nell'industria	13
2.2.2. Applicazioni in Ambiente Marino della fibra di cocco	15
3. SCOPO DEL LAVORO	17
4. MATERIALI E METODI	18
4.1. Analisi del reclutamento <i>biofouling</i> nei pannelli in fibra di cocco	18
4.1.1. Area di Studio e Metodo di Campionamento	19
4.1.2. Studio della Comunità sessile	20
4.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra in ambiente acquatico marino	21
4.2.1. Analisi al SEM	22
4.2.1.1. Preparazione dei campioni per l'analisi al SEM	22
4.2.1.2. Procedura di analisi	23
4.2.2. Prove di Trazione	24
4.2.2.1. Preparazione dei provini: Fibre di Cocco	24
4.2.2.2. Preparazione dei provini: Pannelli in fibra di cocco	24
4.2.2.3. Svolgimento delle Prove di Trazione	25
4.3. Valutazione della fibra di cocco come Acidificante Ambientale	27
4.3.1. Preparazione dell'apparato sperimentale	26
4.3.2. Procedura sperimentale	28
4.4. Elaborazione dei dati e approccio statistico	29
4.4.1. Capacità di reclutamento <i>biofouling</i> del substrato in fibra di cocco	29
4.4.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra in ambiente marino	29
4.4.2.1. Analisi al SEM	29
4.4.2.2. Prove di trazione	30
4.4.3. Effetto Acidificante della fibra	33
5. RISULTATI	35
5.1. Reclutamento <i>biofouling</i> stagionale del substrato in fibra di cocco	35
5.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra pre e post trattamento in mare	41
5.2.1. Analisi al SEM	41
5.2.2. Prove di trazione: Fibre di Cocco	45

5.2.3. Prove di trazione: Pannelli in fibra di cocco	54
5.3. Valutazione della fibra di cocco come Acidificante Ambientale	56
6. DISCUSSIONI	59
7. CONCLUSIONI	66
8. BIBLIOGRAFIA	67
9. SITOGRAFIA	76
10. RINGRAZIAMENTI	77

1. RIASSUNTO

L'incremento della domanda di geotessili e la maggiore consapevolezza ambientale hanno portato alla necessità di ricercare nuove fibre naturali utilizzabili in alternativa a quelle sintetiche. La fibra di cocco risulta una tra le più versatili, mostrando caratteristiche idonee all'applicazione in diversi ambiti: ad oggi è già ampiamente utilizzata in agricoltura, nel settore dell'ingegneria civile e nell'industria tessile. Tuttavia, il suo impiego in mare è ancora limitato e, di conseguenza, le informazioni relative alle sue performance in questo ambiente scarseggiano.

Questo studio indaga le prestazioni della fibra di cocco in ambiente marino, valutando tre aspetti: (i) la capacità di reclutamento *biofouling* del substrato, (ii) la resistenza della fibra e (iii) il potenziale di acidificazione dell'ambiente. Per investigare questi aspetti, è stata condotta una serie di esperimenti sul campo (i) e in laboratorio (ii e iii), in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR dell'Università di Pavia e l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS di Trieste. Per le analisi è stato utilizzato un geotessile non tessuto in fibra di cocco. Un esperimento in-situ di reclutamento di *biofouling* (i) è stato effettuato presso il porticciolo turistico di Marina del Fezzano (SP). La caratterizzazione fisico-meccanica della fibra (ii) è avvenuta mediante confronto dell'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) delle fibre non trattate (T_0) e trattate mediante immersione in mare di 7 mesi (T_1), in associazione a prove di trazione uniassiale, effettuate sia sul geotessile sia sulle singole fibre T_0 e T_1 . Per ambedue le condizioni T_0 e T_1 , le fibre sono state studiate separatamente in base alla categoria dimensionale ($< 200 \mu\text{m}$ - *fini*, $201 - 300 \mu\text{m}$ - *medie*, $> 301 \mu\text{m}$ - *spesse*). Infine, il geotessile è stato sottoposto ad una valutazione del potenziale di acidificazione in ambiente controllato (iii), ricreando un ambiente marino a temperatura costante e diverse concentrazioni di fibra (*control* - CTRL; *low fiber* - LF; $2 \text{ pannelli} = 392 \text{ cm}^2 / 2 \text{ L}$; *high fiber* - HF; $4 \text{ pannelli} = 784 \text{ cm}^2 / 2 \text{ L}$).

Per quanto riguarda il reclutamento del *biofouling* (i), Le analisi SIMPER hanno evidenziato un grado medio-alto di similarità tra i pannelli in fibra di cocco nel reclutamento del *biofouling* in termini di abbondanza e presenza/assenza, rispettivamente del 60,58% e 75,37%. In tutto sono state identificate 40 specie, appartenenti ai seguenti phyla: Annelida (41,24%), Bryozoa (24,07%), Tunicata (21,42%), di cui il 72,73% coloniali, Porifera (9,56%), Cnidaria (2,65%), di cui l'86,67% coloniali, Crustacea (0,53%) e Mollusca (0,53%). Le specie non indigene (NIS) sono state riscontrate con abbondanze inferiori (23,36%) rispetto alle specie native.

Il modello di regressione lineare elaborato per valutare la variazione del diametro delle fibre, ricavato al SEM (ii), è emerso un effetto marginalmente significativo della condizione ($T_0 - T_1$) (ANOVA, $F_{1,54} = 2.996$; $p = 0,089$). Quando ottenuto dai risultati è in contrasto con precedenti studi che hanno dimostrato l'aumento del diametro delle fibre fino al 34% in seguito all'assorbimento di acqua.

Dalle prove di trazione uniassiale sono state ricavate le curve relative alle fibre, che mostrano un andamento approssimativamente bilineare, ed è stato ricavato il Modulo di Young (GPa) per ogni set di provini: *fini*: T_0 ($2,39 \pm 0,81$), T_1 ($1,98 \pm 0,73$); *medie*: T_0 ($1,62 \pm 0,56$), T_1 ($1,17 \pm 0,85$); *spesse*: T_0 ($1,13 \pm 0,60$), T_1 ($0,58 \pm 0,27$). I risultati ottenuti dal modello di regressione lineare che valuta la variazione del modulo elastico hanno mostrato un effetto altamente significativo della categoria dimensionale (*ANOVA*, $F_{2,84} = 30,328$; $p < 0,001$) ed un effetto significativo della condizione (*ANOVA*, $F_{1,84} = 11,073$; $p = 0,001$): nello specifico, viene sottolineata una riduzione della rigidità delle fibre all'aumentare del diametro e dopo il trattamento in mare. Anche per il geotessile in fibra di cocco è stato ricavato il Modulo di Young ($1,65 \pm 0,84$ MPa), il quale indica una maggiore elasticità rispetto ad altri materiali sintetici, come il polipropilene (PP).

Dai risultati del modello di regressione lineare misto che valuta la variazione pH dell'acqua in relazione alla concentrazione di fibra (iii), sono emersi effetti altamente significativi della condizione (*ANOVA*, $F_{2,31} = 315,222$; $p < 0,001$) e del tempo (*ANOVA*, $F_{4,31} = 30,335$; $p < 0,001$). Inoltre, l'interazione tra i due fattori è risultata statisticamente significativa (*ANOVA*, $F_{8,31} = 3,373$; $p = 0,010$): una maggiore concentrazione di fibra influenza maggiormente il pH. Nell'ottica di un futuro utilizzo in mare, sono necessari ulteriori studi per verificare il potenziale impatto dell'effetto acidificante della fibra in ambienti marini, che potrebbe essere trascurabile, considerando il rimescolamento dovuto alle correnti e lungo la colonna d'acqua, il naturale potere tampone del mare e la capacità della fibra di incrementare lo sviluppo di alghe e microalghe.

In conclusione, la fibra di cocco si conferma essere una valida alternativa alle fibre sintetiche, presentando diversi vantaggi, quali la sostenibilità ambientale, la grande disponibilità, economicità e versatilità. La fibra di cocco ha mostrato performance soddisfacenti anche in mare, suggerendo che questa possa essere idonea allo sfruttamento in questo ambiente. Tuttavia, per ottimizzarne le prestazioni sarebbe necessario approfondire gli studi in merito, al fine di individuare le migliori tipologie di fibre nei rispettivi campi di utilizzo.

2. INTRODUZIONE

2.1. Geosintetici e Geotessili: generalità e applicazioni

Secondo la norma ISO 10318-1:2015, con il termine geosintetico (*geosynthetic*, GSY) si intende un prodotto del quale almeno una componente è rappresentata da un polimero naturale o sintetico, sotto forma di lastra, striscia o struttura tridimensionale. I geosintetici presentano generalmente un'elevata resistenza alla degradazione chimica e biologica, buona flessibilità e non risultano corrosivi, proprietà che li rendono idonei a diverse applicazioni; negli ultimi anni, il loro impiego in ingegneria civile ha subito un significativo aumento, anche grazie ai costi non eccessivi e alla semplicità di trasporto e installazione e posizionamento (Markiewicz *et al.*, 2022).

La suddetta norma suddivide i geosintetici in quattro categorie: (i) geotessili (*geotextile*, GTX), (ii) prodotti associati ai geotessili (*geotextile-related product*, GTP), (iii) barriere geosintetiche (*geosynthetic barrier*, GBR) e (iiii) geocompositi (*geocomposite*, GCO).

I geotessili sono i GSY maggiormente utilizzati nell'industria (Prambauer *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020). Sono definiti come materiali planari e permeabili, composti da fibre, filamenti o altri elementi naturali o sintetici (ISO 10318-1:2015) ed hanno molteplici funzioni, quali: separazione, filtrazione, drenaggio, rinforzo (Prambauer *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020). La funzione di separazione (**Fig. 2.1**) evita che due materiali aventi proprietà differenti si miscelino tra di loro perdendo l'integrità strutturale. Ad esempio, se su un terreno a grana fine vengono poste delle pietre, queste tenderanno col tempo a penetrare nel terreno sottostante andando ad alterare la compattezza di quest'ultimo; allo stesso modo, il terreno fine tenderà a miscelarsi con le pietre diminuendo la loro capacità di drenaggio. A questo scopo, i geotessili vengono impiegati tra i binari di scorrimento, sotto le discariche, le strade e le aree pedonali (Wu *et al.*, 2020).

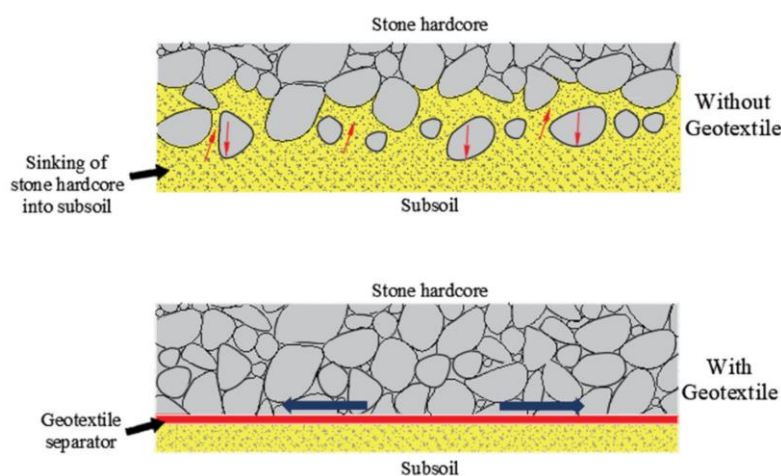


Figura 2.1. Suolo ricoperto da pietre per edilizia: confronto tra assenza a presenza di un geotessile con funzione di separazione (immagine da Wu *et al.*, 2020).

La funzione di filtrazione (**Fig. 2.2**) permette di evitare la perdita di particelle fini trasportate dall'acqua, che può provocare il collasso del terreno. A questo scopo, i geotessili sono ampiamente utilizzati nell'ingegneria geotecnica, in particolare nei sistemi di drenaggio, sulle coste e le rive dei fiumi per prevenire l'erosione e il crollo delle sponde (Wu *et al.*, 2020).

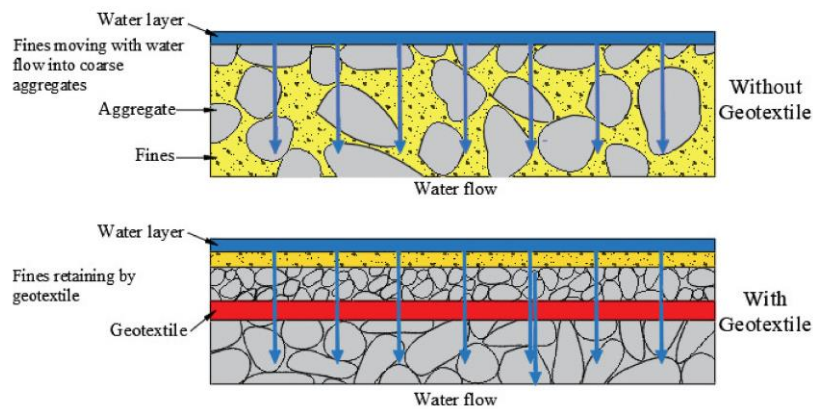


Figura 2.2. Fondale ricoperto da pietre di un sistema artificiale di drenaggio: confronto tra assenza a presenza di un geotessile con funzione di filtrazione (immagine da Wu *et al.*, 2020).

I geotessili presentano una buona conduttività dell'acqua, che viene raccolta e rilasciata lentamente. Grazie a questa caratteristica, possono essere impiegati in diverse opere di drenaggio (**Fig. 2.3**) (Wu *et al.*, 2020).

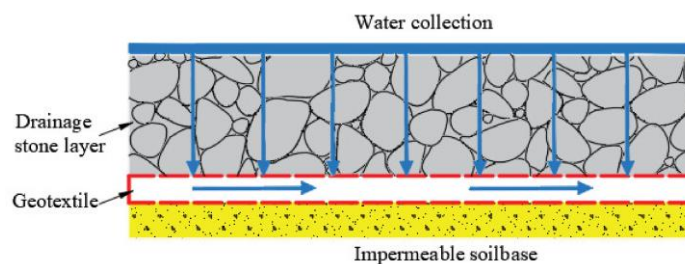


Figura 2.3. Utilizzo di un geotessile impermeabilizzante in un sistema artificiale di drenaggio (immagine da Wu *et al.*, 2020).

Infine, la funzione più comune svolta dai geotessili nell'ingegneria geotecnica è quella di rinforzo. Le proprietà determinanti in questo campo sono quelle meccaniche: modulo di trazione, resistenza alla trazione e attrito superficiale. Attualmente, vengono utilizzati nella costruzione di strade asfaltate e non asfaltate, ferrovie e muri, oltre che per il rinforzo di argini e pendii con terreno morbido (**Fig. 2.4**). (Prambauer *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020).

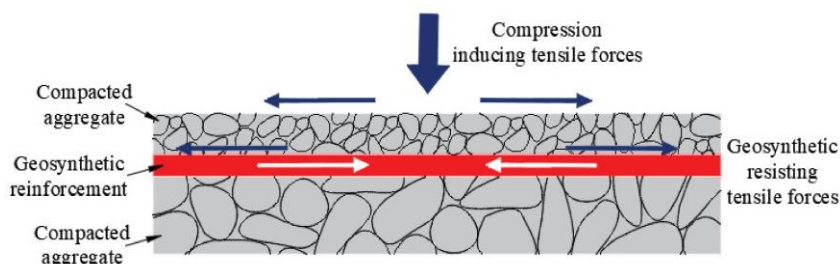


Figura 2.4. Utilizzo di un geotessile nella pavimentazione stradale con funzione di rinforzo (immagine da Wu *et al.*, 2020).

I geotessili vengono suddivisi a loro volta in: geotessili non tessuti (*nonwoven geotextile*, GTX-NW), geotessili a maglia (*knitted geotextile*, GTX-K) e geotessili tessuti (*woven geotextile*, GTX-W). I geotessili tessuti (**Fig. 2.5 - A**) sono caratterizzati dall'intreccio, generalmente ad angolo retto, di due o più insiemi di elementi; i geotessili a maglia (**Fig. 2.5 - B**) derivano dall'intreccio di uno o più elementi; infine, i geotessili non tessuti (**Fig. 2.5 - C**) sono costituiti da elementi orientati in modo ordinato o casuale, uniti tramite processi meccanici, termici o chimici (ISO 10318-1:2015). Presentano maggiore estensibilità e minore rigidità rispetto ai geotessili tessuti (Wang, 2001; Rawal *et al.*, 2010).

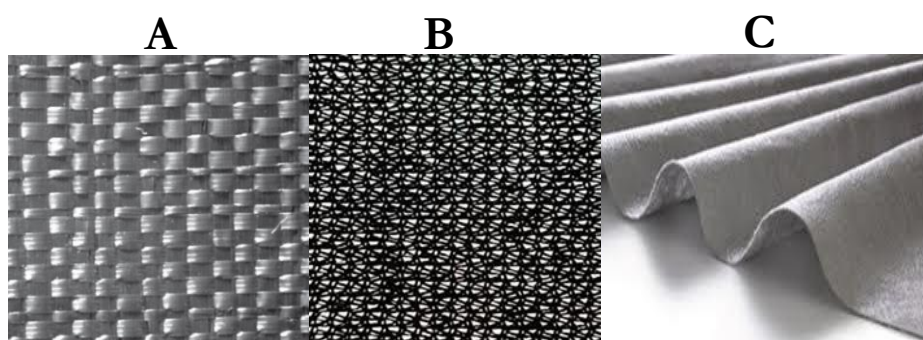


Figura 2.5. Aspetto generico di un geotessile tessuto (A), un geotessile a maglia (B) ed u geotessile tessuto (C) (immagine da Wang, 2001).

Gran parte dei geotessili non tessuti viene prodotta attraverso il processo di agugliatura (**Fig. 2.6**), che permette di ottimizzarne la resistenza (Ishikawa, *et al.*, 2019).

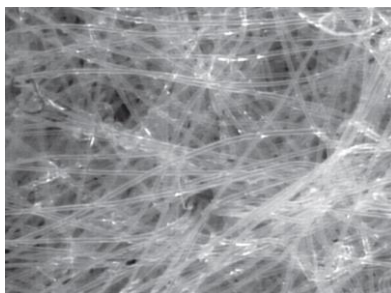


Figura 2.6. Risultato del processo di agugliatura (immagine da Wang, 2001).

I geotessili non tessuti sono i più diffusi (Wang, 2001; Rawal *et al.*, 2010; Prambauer *et al*, 2019); sono maggiormente impiegati con funzioni di filtrazione e drenaggio, grazie alle loro proprietà, quali porosità e permeabilità (Prambauer *et al*, 2019). Questi ultimi sono utilizzati preferibilmente per il controllo dell'erosione e il rinforzo di argini e strutture di contenimento (Tanasă *et al.*, 2022).

Il principale polimero sintetico impiegato per la produzione di geotessili è il polipropilene (PP), seguito da poliestere (PL), poliammidi (PA), cloruro di polivinile (PVC), polietilene (PE) e polietilene tereftalato (PET) (Prambauer *et al*, 2019; Hasan, 2020). Questi polimeri generalmente non permangono per lungo tempo nell'ambiente e hanno una bassa biodisponibilità a causa del loro

elevato peso molecolare, ma in particolari condizioni ambientali possono andare incontro a processi di degradazione che portano alla formazione di microplastiche. Inoltre, possono contenere additivi tossici potenzialmente dannosi per l'ambiente (Wiewel & Lamoree, 2016; Prambauer *et al.*, 2019).

In contrapposizione all'utilizzo delle fibre sintetiche, si è riscontrata la necessità di utilizzare materiali alternativi ecologicamente sostenibili. In questo contesto, hanno trovato ampio utilizzo le fibre naturali, come la juta, il sisal, il lino, la canapa, l'abaca, il ramìe e il cocco (Hasan, 2020); la fibra di kenaf e le foglie di palma sono attualmente oggetto di studio, senza aver trovato ancora settori applicativi (Vishnudas *et al.*, 2006; Chattopadhyay & Chakravarty, 2009; Ghosh *et al.*, 2009; Álvarez-Mozos *et al.*, 2014; Prambauer *et al.*, 2019). L'utilizzo delle fibre naturali è vantaggioso in termini economici e di sostenibilità ambientale (Mohanty *et al.*, 2000; Faruk *et al.*, 2012; Gokarneshan, 2023). Rispetto ai polimeri sintetici, presentano una maggiore grammatura (g m^{-2}) e una buona capacità di assorbimento dell'acqua, che può aumentarne ulteriormente la massa (Prambauer *et al.*, 2019). Sono molto variabili sia in termini di lunghezza del singolo filamento, sia di diametro. Dimensioni, angolo microfibrillare, composizione chimica, età e metodi con cui sono state estratte le fibre influenzano le proprietà meccaniche delle stesse (Mohanty *et al.*, 2000).

Le principali componenti delle fibre naturali (**Fig. 2.7**) sono cellulosa, emicellulosa e lignina (Mohanty *et al.*, 2000). Un elevato contenuto di cellulosa fornisce alle fibre un'elevata resistenza meccanica iniziale, ma al contempo potrebbe causare l'invecchiamento precoce del materiale, influenzandone le performance nel lungo periodo (Mohanty *et al.*, 2000; Prambauer *et al.*, 2019). Diversi studi hanno evidenziato che la cellulosa, rispetto alla lignina, è meno soggetta alla degradazione fotochimica dovuta ai raggi ultravioletti; al contrario il calore degrada più velocemente cellulosa ed emicellulosa (Rowell, 1985; Mohanty *et al.*, 2000). Inoltre, le sostanze cerosi presenti nelle fibre naturali tendono ad influenzarne le proprietà, in particolare l'adesione e la bagnabilità (Mohanty *et al.*, 2000).

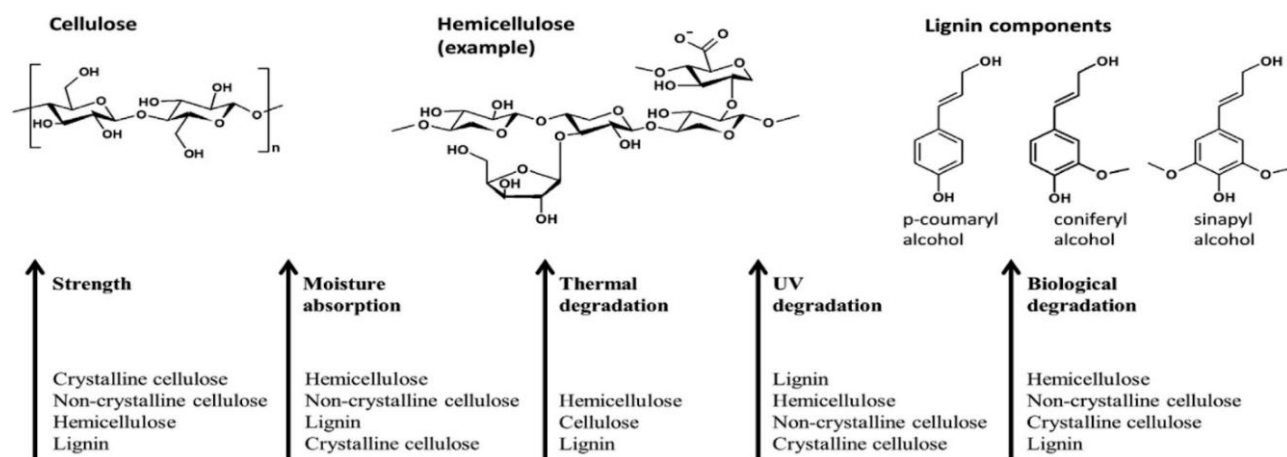


Figura 2.7. L'immagine mostra il confronto tra composizione chimica e proprietà di cellulosa, emicellulosa e lignina (Prambauer *et al.*, 2019).

Nonostante le caratteristiche vantaggiose delle fibre naturali e la loro versatilità di utilizzo, in molti settori industriali si predilige l'uso di geotessili composti da fibre sintetiche. Dalla letteratura scientifica si evince che solo una piccola parte dei geotessili utilizzati nei vari campi industriali viene prodotta con fibre naturali, nonostante sia stato stimato che, insieme ai biopolimeri, potrebbero sostituire le fibre sintetiche per circa il 50% delle applicazioni (**Tab. 2.1**) (Gupta, 1991; Mitra, 2002; Methacanon *et al.*, 2010; Wiewel, & Lamoree, 2016; Prambauer *et al.*, 2019).

Tabella 2.1. Confronto tra le caratteristiche del polipropilene e di alcune delle principali fibre naturali utilizzate per la produzione dei geotessili (Bledzki *et al.*, 1996; Mohanty *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2006; Yao & Zhong, 2007; Faruk *et al.*, 2012; Prambauer *et al.*, 2019). Il Modulo di Young è una stima dell'elasticità longitudinale.

	JUTA	COCCO	SISAL	PP
Modulo di Young (Gpa)	13 - 26,5	4 - 6	9,4 - 22	8
Resistenza alla trazione (Mpa)	393 - 773	131 - 175	468 - 640	400
Allungamento a rottura %	1,16 - 1,5	15 - 40	3 - 7	15 - 35
Cellulosa %	61 - 71,5	43	67 - 78	/
Lignina %	12 - 13	40 - 45	8 - 11	/
Emicellulosa %	13,6 - 20,4	0,15 - 0,25	12	/
Prezzo (€ m⁻²)	0,25 - 0,85	0,76 - 1,9	0,25 - 0,4	0,85 - 2,5
Durata (yrs)	1- 2	3	1	> 20
Densità (g cm⁻³)	1,3 - 1,45	1,15 - 1,2	1,45 - 1,5	0,91

2.2. La Fibra di Cocco: Origine, Composizione e Proprietà

La fibra di cocco viene ricavata dal frutto della Palma da cocco (*Cocos nucifera* L., 1753) (**Fig. 2.8**), pianta tipica delle regioni tropicali, appartenente alla famiglia *Arecaceae* e al gruppo delle monocotiledoni (Varma *et al.*, 1984; Pham, 2016; Ignacio & Miguel, 2021).



Figura 2.8. A: piante della specie *Cocos nucifera* L. in ambiente naturale; B: dettaglio si possono osservare le noci di cocco (immagine da Chan & Elevitch, 2006).

Esistono due varietà principali della Palma da cocco: la varietà “*alta*”, che inizia a produrre le noci di cocco dopo 6 - 10 anni dalla germinazione, rimanendo produttiva fino a 80-120 anni, e la varietà “*nana*”, che inizia a produrre 1 - 3 anni prima; sono inoltre presenti diverse varietà ibride (Chan & Elevitch, 2006; Ekanayake *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2010; Pham, 2016; Ignacio & Miguel, 2021). Generalmente, una sola pianta può produrre fino a 70 - 150 frutti all’anno (Pham, 2016). Il frutto, la noce di cocco (**Fig. 2.9**), presenta un esocarpo impermeabile e un mesocarpo costituito da fibra densa, responsabile della sua buona galleggiabilità; queste caratteristiche hanno permesso alla Palma da cocco di diffondersi naturalmente anche via mare, raggiungendo anche remote isole oceaniche (Ignacio & Miguel, 2021).

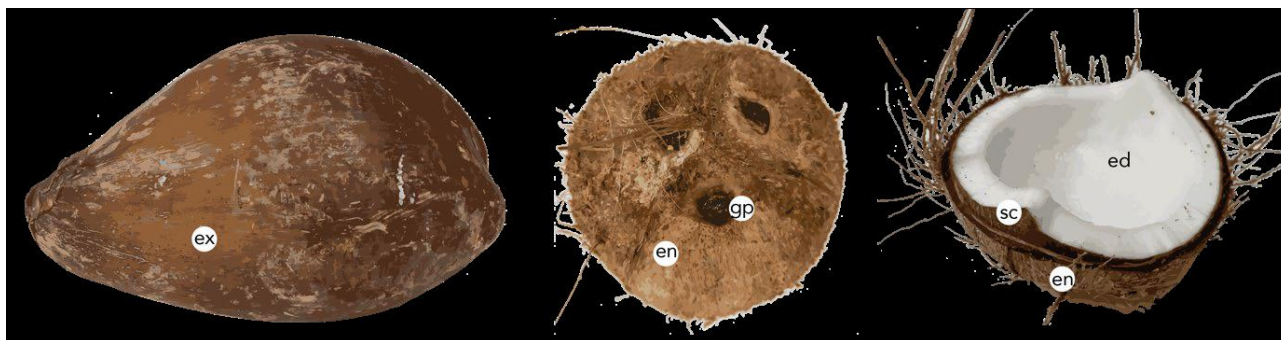


Figura 2.9. Morfologia della noce di cocco: esocarpo (ex); endocarpo (en) e poro di germinazione (gp) in una noce di cocco decorticata; endocarpo (en), mantello (sc) ed endosperma (ed) (immagine da Beveridge *et al.*, 2022).

Questa pianta viene coltivata in più di 90 Paesi, tra i quali i maggiori esponenti sono concentrati in Asia e nella Regione del Pacifico (Pham, 2016). Si adatta a diverse tipologie di suolo, richiedendo limitato uso di fertilizzanti rispetto ad altre colture (Henrietta *et al.*, 2022). Viene utilizzata per ottenere una grande varietà di prodotti, tra cui l'olio di cocco, utilizzato a scopi alimentari e cosmetici (Jayasekara & Amarasinghe, 2010; Pham, 2016). Il processo di estrazione dell'olio fornisce come sottoprodotto la fibra di cocco (**Fig. 2.10**) (Faruk *et al.*, 2012).



Figura 2.10. Fibra di cocco estratta dal frutto della Palma da cocco (immagine da Okpala *et al.*, 2021).

La resa e la qualità delle fibre dipendono dalla varietà della pianta, oltre che dalla maturazione del frutto e dalle condizioni locali (Mishra & Basu, 2020). Le fibre possono essere suddivise in due categorie: le fibre *bianche*, tipiche di noci di cocco acerbe, sono caratterizzate da maggiore flessibilità e minore resistenza; le fibre *marroni*, che si trovano nelle noci di cocco mature, sono più resistenti e meno flessibili (Razak *et al.*, 2023). Inoltre, fibre della stessa tipologia possono avere diverse dimensioni: generalmente presentano un diametro di circa 100 - 450 μm e una lunghezza di 50 - 300 mm (Satyanarayana *et al.*, 1982; Ghosh *et al.*, 2009). Questa grande variabilità rende difficoltosa la preparazione di prodotti uniformi e sottili (Ghosh *et al.*, 2009).

L'estrazione delle fibre dal mesocarpo può avvenire manualmente o meccanicamente, in base alla tipologia di fibra e alla destinazione d'uso. Le fibre *bianche*, solitamente, vengono estratte con metodo manuale tradizionale; viceversa, per le fibre *marroni* viene utilizzata l'estrazione meccanica (Mishra & Basu, 2020). Inizialmente, essendo un sottoprodotto di altre lavorazioni, non veniva posta particolare attenzione alla qualità della fibra, che dipende anche dal metodo di estrazione (Faruk *et al.*, 2012; Mishra & Basu, 2020). Negli ultimi anni, l'aumento della produzione di geotessili a base di fibre naturali ha portato alla crescita della domanda di fibra di cocco e, di conseguenza, un maggior controllo della qualità (Jayasekara & Amarasinghe, 2010).

La fibra di cocco è una fibra lignocellulosica (Varma *et al.*, 1984), contenente quantità variabili di cellulosa (32 - 43%), lignina (40 - 45%), emicellulosa (0,15 - 0,25%), pectine (3 - 4%) e componenti idrosolubili (Varma *et al.*, 1986; Mohanty *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2006; Yao & Zhong, 2007; Faruk *et al.*, 2012; Prambauer *et al.*, 2019). Presenta un pH tendenzialmente acido di circa 4,9 - 6,9 e una conducibilità elettrica di circa 0,3 - 5,97 mS cm^{-1} ; entrambi variano significativamente in base alla varietà di Palma da cocco (Evans *et al.*, 1996; Abad *et al.*, 2002).

Ogni fibra, definita come fibra tecnica (**Fig. 2.11**), è composta da numerose fibre elementari con un lume interno e da uno spazio vuoto centrale, chiamato lacuna (Tran *et al.*, 2015).

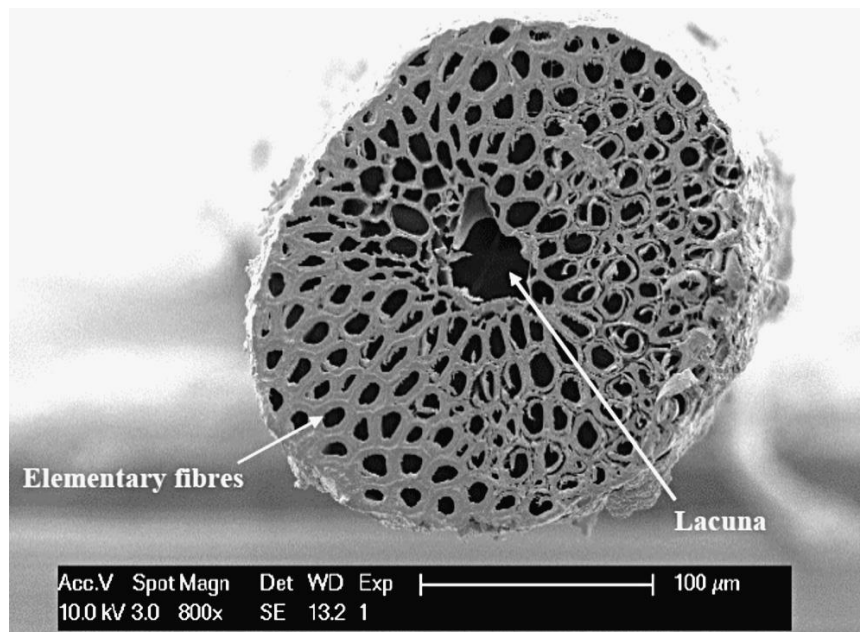


Figura 2.11. Fotografia al microscopio a scansione elettronica (Scanning Electron Microscope, SEM) della sezione trasversale di una fibra tecnica, che mostra la lacuna e le fibre elementari (immagine da Tran, *et al.*, 2015).

Le fibre elementari (**Fig. 2.12**) presentano due strati di parete cellulare composti da microfibrille avvolte elicoidalmente su loro stesse e unite tra di loro grazie a una lamella centrale (Varma *et al.*, 1984; Tran *et al.*, 2015). Le microfibrille presentano un diverso orientamento, in relazione alla fibra, nelle due pareti: gli angoli microfibrillari nella parete primaria e secondaria corrispondono rispettivamente a 45° e 90° (Tran *et al.*, 2015).

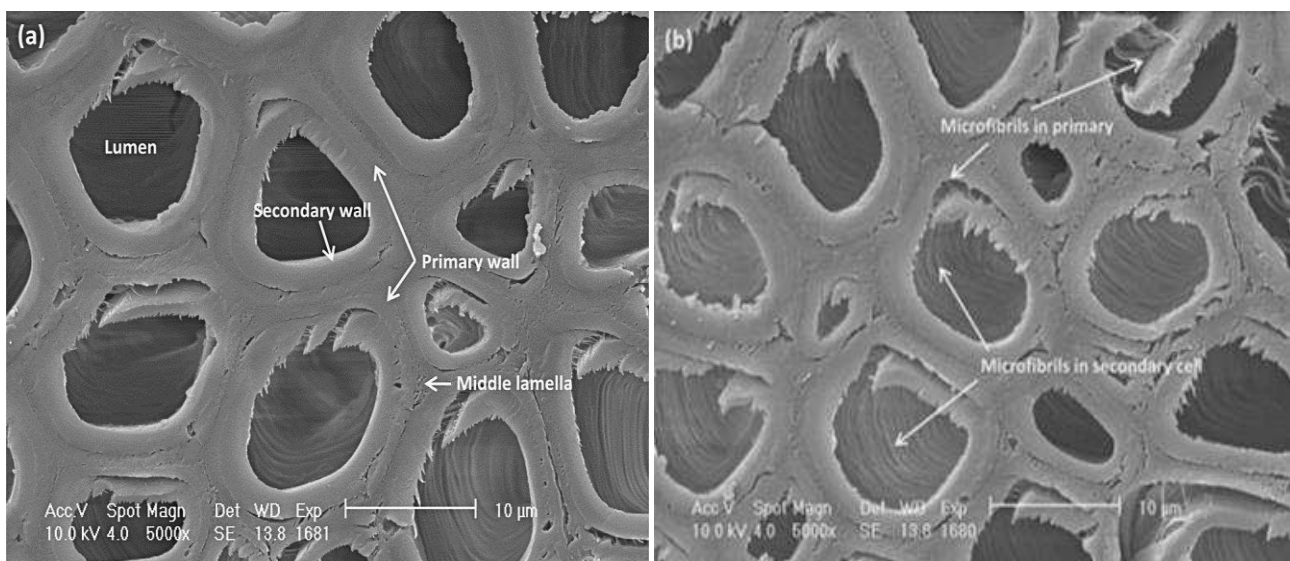


Figura 2.12. Fotografie al SEM di fibre elementari che compongono una fibra tecnica: lume, parete primaria e secondaria, lamella centrale (a); microfibrille (b) (immagine da Tran *et al.*, 2015).

In letteratura viene riportato che, rispetto ad altre fibre naturali, la fibra di cocco possiede una minore resistenza alla trazione e un maggior allungamento a rottura, probabilmente in relazione al basso contenuto di cellulosa e all'elevato angolo microfibrillare (Mohanty *et al.*, 2000).

La fibra di cocco ha una densità pari a $1,15 - 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (Mohanty *et al.*, 2000; Faruk *et al.*, 2012). A livello superficiale presenta dei pori di diametro $3 - 5 \mu\text{m}$ (Fig. 2.13), con una percentuale di porosità del 22 - 30% (Tran *et al.*, 2015); può assorbire una quantità d'acqua pari a 150% del suo peso secco (Ghosh *et al.*, 2009), con un aumento del diametro fino al 34% (van Dam *et al.*, 2006; Mishra & Basu, 2020).

L'elevato contenuto di lignina rende la fibra altamente resistente alla degradazione microbica (Sumi *et al.*, 2018). La degradazione ad opera del calore si verifica in diverse fasi: inizialmente evaporano acqua e altre sostanze volatili ($120 - 150^\circ\text{C}$), con perdite di peso del 7-8%; in seguito vengono degradate l'emicellulosa ($190 - 310^\circ\text{C}$) e la cellulosa ($290 - 380^\circ\text{C}$) e infine la lignina ($225 - 600^\circ\text{C}$) (Alvarez & Vázquez, 2004; Tomczak *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007; Rosa *et al.*, 2009; Marques *et al.*, 2014).

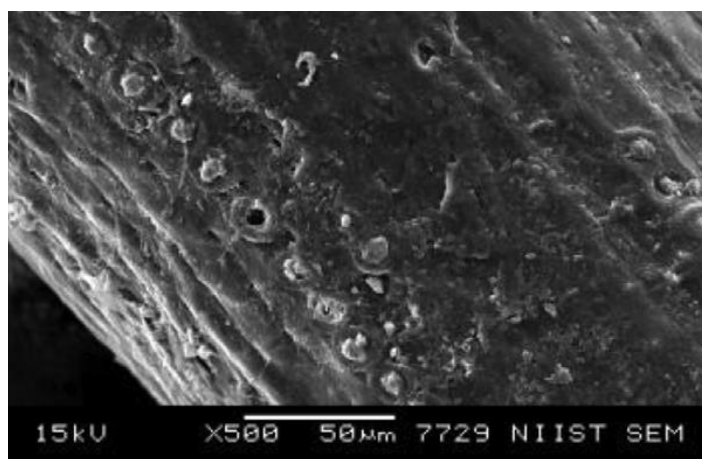


Figura 2.13. Fotografia al SEM di una fibra tecnica, sulla cui superficie sono visibili alcuni pori (immagine da Sumi *et al.*, 2018).

Fenomeni come l'irradiazione UV e alcuni trattamenti chimici provocano un peggioramento delle proprietà meccaniche sopracitate (Varma *et al.*, 1984), mentre l'avanzare della degradazione provoca l'incremento della capacità di assorbimento (Vishnudas *et al.*, 2012).

2.2.1. Applicazione della Fibra di Cocco nell'industria

La fibra di cocco, oltre ad essere economica e biodegradabile, è ampiamente disponibile nelle regioni tropicali di origine (Varma *et al.*, 1984). Inoltre, possiede diverse caratteristiche che la rendono idonea a molteplici applicazioni industriali, tra cui la produzione di geotessili. Questa fibra risulta infatti leggera (Tran *et al.*, 2015), resistente alla degradazione batterica e fungina (Hasan *et al.*, 2021), non

facilmente infiammabile (Mohanty *et al.*, 2005; Ayrilmis *et al.*, 2011; Hasan *et al.*, 2021), resistente all'umidità, al calore (Ayrilmis *et al.*, 2011; Hasan *et al.*, 2021) e agli urti (Pritchard *et al.*, 2000); risulta inoltre più resistente di altre fibre naturali alla degradazione in acqua salata ed è stato osservato che l'esposizione ad un ambiente salino e l'alternanza di condizioni umide e asciutte non provocano un peggioramento significativo della resistenza alla trazione (Sumi *et al.*, 2018).

Tuttavia, come per le altre fibre naturali, la durata della fibra di cocco dipende anche da fattori ambientali come la tipologia di substrato, la pendenza, la vegetazione e le condizioni climatiche (Marques *et al.*, 2014; Sumi *et al.*, 2016). Sumi *et al.* (2018) hanno dimostrato che il pH di una soluzione acquosa influenza la resistenza alla trazione dei geotessili a base di fibra di cocco, evidenziando che un pH acido o alcalino influenza maggiormente le performance della fibra rispetto a una condizione neutra. Al contrario, i cicli termici di gelo-disgelo non hanno provocato particolari variazioni delle proprietà meccaniche.

Per le sue proprietà e caratteristiche, la fibra di cocco presenta un'elevata versatilità, trovando applicazione in diversi settori (Manik *et al.*, 2023). Viene utilizzata per la produzione di una grande varietà di prodotti, quali: filati, stuoie, corde, tappeti, materassi, sacchi, spazzole, pannelli per isolamento termico e acustico, mattoni edili, imballaggi, geocompositi e geotessili tessuti o non tessuti (Ghosh *et al.*, 2009; Rencoret *et al.*, 2013; Mishra & Basu, 2020; Hasan *et al.*, 2021; Arora *et al.*, 2022). Particolarmente vantaggioso può essere il suo utilizzo nel cemento armato in aree soggette all'attività sismica (Yadav & Singh, 2019; Manik *et al.*, 2023). Inoltre, viene sfruttata per la produzione di bioetanolo (Cabral *et al.*, 2016; Mishra & Basu, 2020) e per l'assorbimento di metalli pesanti, quali piombo, zinco (Conrad, 2008; Mishra & Basu, 2020) e cromo esavalente (Tan *et al.*, 1993; Mishra & Basu, 2020).

I geotessili, a seconda della varietà di cocco utilizzata per la loro produzione, trovano diverse applicazioni nei settori edile, civile e agricolo (Beena, 2013). Tra le più frequenti, vi sono la protezione del suolo dall'erosione (Ghosh *et al.*, 2009; Mishra & Basu, 2020), la protezione dei corsi d'acqua e la stabilizzazione degli argini ferroviari e autostradali (Beena, 2013).

Nel campo dell'ingegneria civile, soprattutto in paesi con ampia disponibilità di fibra di cocco (es. India e Sri Lanka), i geotessili vengono utilizzati per la separazione in strade non asfaltate e aree di stoccaggio, la filtrazione dei sistemi fognari, la bonifica di aree degradate (Beena, 2013) e il rinforzo stradale, al fine di aumentare la capacità portante (Subaida *et al.*, 2009).

Nel settore agricolo, il processo di agugliatura conferisce al geotessile una maggior compattezza ed efficienza nella ritenzione dell'umidità. A conseguenza di ciò, il geotessile in fibra di cocco conferisce le condizioni ottimali per la crescita e la copertura vegetale, necessaria per rinforzare il terreno (Mishra & Basu, 2020), favorita anche dalla buona durata nel tempo della fibra (Ghosh *et al.*, 2009).

2.2.2. Applicazioni in Ambiente Marino della fibra di cocco

Malgrado le caratteristiche e le proprietà della fibra di cocco sembrano essere idonee all'utilizzo in ambienti umidi-acquatici, è ancora limitato il suo utilizzo industriale in questo ambito. Più diffuso è invece il suo utilizzo per la gestione e la tutela delle coste: uno studio condotto dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Prevenzione e la Ricerca Ambientale) ha dimostrato l'efficacia delle biostuoie in fibra di cocco per la costruzione di barriere frangivento a conservazione degli ambienti dunali (Breccianoli & Onori, 2008). Le potenziali applicazioni della fibra di cocco in ambiente marino sono molteplici, ad esempio, nel settore dell'ingegneria navale risulta essere una buona alternativa ai materiali tradizionali per la costruzione di ponti, telati e paratie (Manik *et al.*, 2023). Nello studio di Annunciato *et al.* (2005) è stata dimostrata l'efficacia della fibra come materiale di prevenzione e/o azione per l'assorbimento di sversamenti accidentali di petrolio greggio. L'incorporazione della fibra all'interno del calcestruzzo permette una migliore prestazione delle strutture esposte a condizioni alternate di umidità e aridità, in quanto conferisce al materiale una maggiore resistenza alla compressione; è stato osservato che una quantità limitata di fibra (1,2%) può contenere i danni provocati dall'acqua di mare (Ramli *et al.*, 2013).

In Mar Mediterraneo è stato recentemente utilizzato il sistema R.E.C.S.® (*Reinforced Erosion Control System*) (**Fig. 2.14**) per il trapianto di *Posidonia oceanica* (L.) Delile, 1813, che prevede l'ancoraggio di talee su geocompositi in fibra di cocco e reti metalliche (Piazzi *et al.*, 2021; Robello *et al.*, 2024). Nonostante si tratti di un metodo innovativo con ancora scarsi dati sperimentali disponibili, i primi risultati suggeriscono che sia vantaggioso: i costi di trapianto sono bassi e i tempi sono brevi, le strutture non sono permanenti, facilitano l'ancoraggio della pianta e favoriscono lo sviluppo della comunità bentonica (Piazzi *et al.*, 2021).



Figura 2.14. Trapianto di *Posidonia oceanica* (L.) all'Isola d'Elba tramite il sistema R.E.C.S.® (immagine da Piazzi *et al.*, 2021).

Sono ancora pochi i dati che riguardano le proprietà selettive della fibra di cocco sulle comunità macrozoobentoniche marine. In Australia, Morris *et al.* (2018) riportano che (**Fig. 2.15**), pannelli in fibra di cocco posizionati su barriere rocciose nel porto di Sydney, Australia, non hanno favorito lo sviluppo di specie non indigene (NIS) e nel tempo è stata osservata una diminuzione di queste a favore delle specie native. Tuttavia, i risultati ottenuti potrebbero essere correlati a un andamento stagionale; come suggeriscono gli autori, sarà necessario indagare in modo più approfondito le performance ecologiche di questo substrato prima di passare all'utilizzo su larga scala.



Figura 2.15. Esempio di struttura sperimentale per reclutamento di biofouling, il riquadro tratteggiato indica la posizione del pannello in fibra di cocco (immagine da Morris *et al.*, 2018).

3. SCOPO DEL LAVORO

La fibra di cocco è un materiale naturale già ampiamente utilizzato in ambiente terrestre, soprattutto in agricoltura, giardinaggio, ingegneria edile e civile. Nonostante la noce di cocco si sia adattata a resistere per lunghi periodi in ambiente marino, sono ancora poche le informazioni sulle performance in questo ambiente della fibra da essa ricavata. Lo scopo di questo lavoro è di approfondire le performance tecniche ed ecologiche della fibra di cocco in ambiente marino, con l'intento di fornire informazioni utili al suo impiego in tali contesti. I risultati ottenuti permetteranno di contribuire alla ricerca di materiali ecosostenibili e a basso costo, da poter utilizzare in alternativa alle fibre sintetiche in ambito portuale, navale ed alieutico.

4. MATERIALI E METODI

In questo studio sono state condotte diverse analisi finalizzate ad approfondire gli aspetti (i) ecobiologico, (ii) fisico-meccanico e (iii) chimico della fibra di cocco legati alle sue performance in ambiente marino. Nello specifico, la prima fase dello studio mira ad indagare la selettività del substrato in fibra di cocco in termini di reclutamento *biofouling*. In secondo luogo, in assenza di protocolli scientifici consolidati per la valutazione del degrado in ambiente marino, è stata studiata la resistenza della fibra prima e dopo un lungo periodo di immersione, nell'ottica di un suo futuro utilizzo prolungato in mare. Infine, dato il suo pH tendenzialmente acido (Evans *et al.*, 1996; Abad *et al.*, 2002), è stato valutato il potenziale effetto acidificante della fibra in ambiente controllato di laboratorio.

Per le analisi è stato utilizzato un geotessile non tessuto in fibra di cocco, acquistato presso l'azienda Pokugiardini in formato 15 m x 2 m (**Fig. 4.1**), con uno spessore variabile di circa 1 cm e una densità di 1000 g m⁻². Secondo quanto specificato dal distributore, le fibre che compongono il pannello sono al 100% naturali e prive di sostanze chimiche. Per le tre fasi dello studio, sono stati ritagliati dal geotessile pannelli di diverse dimensioni e forme, in base alle esigenze.



Figura 4.1. Geotessile non tessuto in fibra di cocco prodotto dell'azienda Pokugiardini, utilizzato nella presente tesi.

4.1. Analisi del reclutamento *biofouling* nei pannelli in fibra di cocco

Dalla letteratura scientifica è stato dimostrato che i substrati naturali e tridimensionali favoriscano la biodiversità delle comunità sessili rispetto a quelli artificiali e bidimensionali (Johnson *et al.*, 2003; Kostylev *et al.*, 2005; Morris *et al.*, 2018). Uno degli obiettivi di questo studio è stato osservare la capacità del substrato in fibra di cocco di reclutare *biofouling* in aree marine antropizzate. Le aree portuali, come quella indagata nello studio, sono particolarmente vulnerabili all'introduzione di

specie aliene potenzialmente invasive, trasportate attraverso le acque di zavorra e le incrostazioni degli scafi (Costello *et al.*, 2022); per questo motivo, nelle analisi è stata posta particolare attenzione all'identificazione di specie non indigene (NIS). Per ovviare il problema della stagionalità messo in luce in precedenti studi (Morris *et al.*, 2018), sono state campionate sia le comunità invernali che quelle estive, al fine di confrontarle.

4.1.1. Area di Studio e Metodo di Campionamento

Per valutare la selettività dei pannelli in fibra di cocco sono stati condotti studi nel Mar Ligure, presso Marina del Fezzano (44°04'09'' N 09°49'09'' E), all'interno del golfo di La Spezia (SP). L'area di indagine, situata nel porticciolo turistico, è soggetta ad un'elevata influenza antropica (Gasparini *et al.*, 2009; Tamburini *et al.*, 2021).

Per il campionamento sono stati utilizzati in totale 20 pannelli con dimensioni di 14 x 14 cm ricavati dal geotessile. Il metodo qui adottato si ispira al protocollo SERC (*Smithsonian Environmental Research Center*) (Edgewater, MD, Stati Uniti), già utilizzato in diversi studi per il monitoraggio delle NIS nelle comunità *biofouling* portuali (Gartner *et al.*, 2016; Simkanin *et al.*, 2016; Marraffini *et al.*, 2017; Tracy *et al.*, 2017; Chang *et al.*, 2018; Jurgens *et al.*, 2018; Newcomer *et al.*, 2018, 2019; Carlton, 2019; Torchin *et al.*, 2021; Tamburini *et al.*, 2021). Il protocollo prevede l'immersione di un pannello in PVC, in questo caso coperto da fibra di cocco, ancorato a un mattone forato e agganciato per mezzo di una cima ai pontili portuali. I pannelli sono stati fissati mediante fascette di plastica (**Fig. 4.2**), per garantire una maggiore stabilità. A differenza del protocollo SERC, che prevede il posizionamento del pannello sperimentale in posizione orizzontale per simulare la parte inferiore dello scafo delle imbarcazioni, in questo studio i pannelli sono stati posizionati verticalmente, simulando la posizione delle banchine portuali. L'unità sperimentale è composta da un mattone forato portante 2 pannelli, posizionati e fissati lateralmente (**Fig. 4.2**).

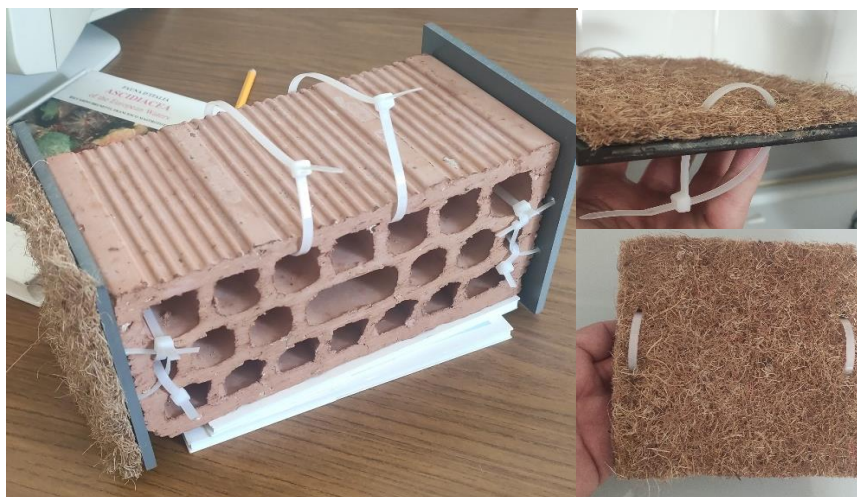


Figura 4.2. Fotografie delle diverse fasi di preparazione delle unità sperimentali da posizionare in mare.

Ad ogni pannello è stato assegnato un codice comprensivo del luogo (SP, La Spezia), del mattone su cui è stato posizionato (1 - 5) e del lato del mattone (A - B). Le unità sperimentali sono rimaste immerse per un periodo di 3 mesi: 10 pannelli sono stati posizionati a ottobre 2023 e ritirati a gennaio 2024, mentre gli altri 10 sono rimasti in immersione da aprile a luglio 2024. Concluso il periodo di immersione, i mattoni sono stati ritirati e conservati in etanolo al 70%.

4.1.2. Studio della Comunità sessile

L'analisi delle comunità di *biofouling* insediate è stata svolta presso il laboratorio di ecologia dell'Università di Pavia. Previa accurata rimozione degli organismi vagili, messi da parte per altri studi, l'indagine sulla comunità sessile è stata svolta mediante l'utilizzo di uno stereomicroscopio, con l'ausilio di due schede: una lista di tutte le specie presenti con le relative abbondanze e/o numero di individui osservati e una scheda per il *point-count*. Quest'ultima analisi consiste nel posizionamento di una griglia (**Fig. 4.3**), avente 7 righe (A - G) e 7 colonne (1 - 7), sul pannello e nella determinazione delle specie presenti alle intersezioni; al termine, per ogni pannello, viene scelto in modo casuale e campionato un ultimo punto, per un totale di 50 punti rilevati ($7 \times 7 + 1$).

In caso di compresenza di più specie nello stesso punto sono state appuntate fino a un massimo di tre specie, tenendo conto dell'ordine di stratificazione: il primo livello rappresenta la specie pioniera, mentre l'ultimo è occupato dalla specie che per ultima ha colonizzato il pannello. I dati annotati sulle schede sono stati trascritti in un foglio di lavoro Excel.

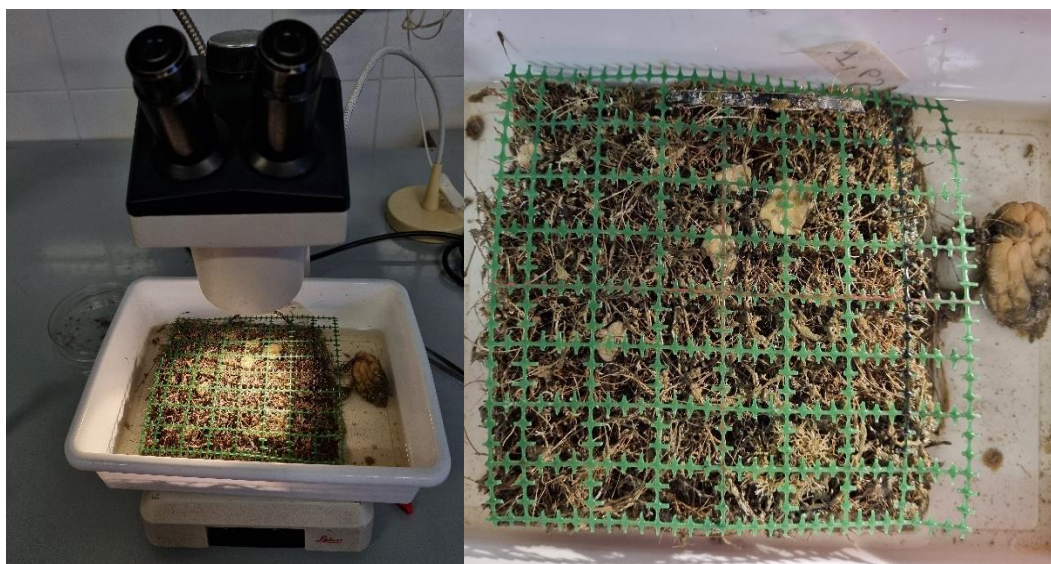


Figura 4.3. Fotografie scattate durante l'analisi quantitativa col metodo del *point-count* di un pannello in fibra di cocco mediante stereomicroscopio.

4.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra in ambiente acquatico marino

Lo scopo di questa fase dello studio è stato di indagare il comportamento meccanico della fibra, mediante prove di trazione, e le eventuali modalità di degradazione/danneggiamento superficiale dopo diversi mesi di immersione in mare, tramite un'analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM). Le indagini sono state condotte presso il Laboratorio Arvedi (Centro Interdipartimentale di Studi e Ricerche per la Conservazione del patrimonio culturale - CISRiC) dell'Università di Pavia, in collaborazione con il Dr. Alessandro Girella e presso il *MATerial Mechanics LABoratory* (Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia), in collaborazione con i professori Simone Morganti e Ferdinando Auricchio.

Dal geotessile in fibra di cocco sono stati ritagliati diversi pannelli (14 x 14 cm), parte dei quali sono stati utilizzati per le prove di trazione; gli altri pannelli sono serviti per estrarre manualmente le singole fibre. Nell'ottica di un prolungato utilizzo in mare delle fibre e data la mancanza di un protocollo standard per valutarne il danno in questo ambiente, il disegno sperimentale relativo ad esse è stato elaborato tenendo conto di due fattori: la categoria dimensionale ed il trattamento in mare (**Fig. 4.4**).

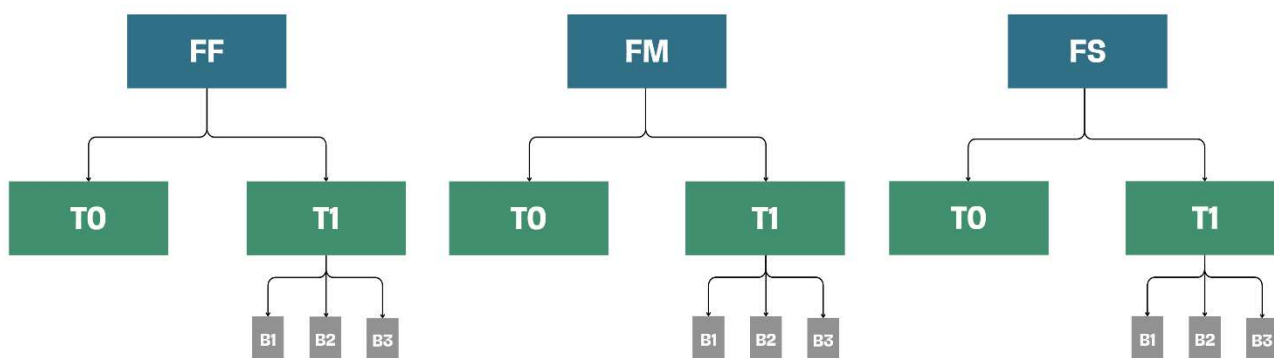


Figura 4.4. Schema del disegno sperimentale per la caratterizzazione meccanica delle fibre di cocco in ambiente marino: 3 categorie dimensionali (fibre fini - FF, fibre medie - FM, fibre spesse - FS); 2 condizioni (fibre non trattate - T0, fibre trattate in mare T1). Le fibre T1 sono state suddivise in 9 bottiglie, 3 per categoria dimensionale (B1, B2, B3), contenenti 30 fibre ciascuna.

Dunque, ai fini dello studio, le fibre sono state catalogate approssimativamente in base alla dimensione in *fini* - FF (circa 80 - 200 μm), *medie* - FM (circa 201 - 300 μm) e *spesse* - FS (circa 301 - 600 μm). La suddivisione è stata effettuata allo stereomicroscopio e confermata successivamente tramite microscopio elettronico a scansione (SEM). Al fine di valutare le performance delle fibre in ambiente marino, metà delle fibre estratte sono state immerse per un periodo di 7 mesi (ottobre 2023 - maggio 2024) nel porto di Fezzano, situato nel golfo di La Spezia (SP). Per ogni categoria dimensionale sono state preparate 3 bottiglie di vetro (**Fig. 4.5**), contenenti ognuna 30 fibre. Per limitare colonizzazioni biologiche macroscopiche sulle fibre, che avrebbero potuto alterare i risultati delle analisi, all'apertura di ogni bottiglia è stato montato un filtro artigianale, composto da carta con spessore di 11 μm e tessuto elastico con maglie di dimensioni inferiori a 1 mm. I risultati delle indagini

svolte sulle fibre esposte 7 mesi in mare (T_1) sono stati confrontati con fibre naturali, non esposte (T_0), al fine di evidenziare eventuali variazioni significative nella resistenza alla trazione o nelle condizioni della superficie.



Figura 4.5. Esempio di recipiente utilizzato per il trattamento di immersione in mare delle fibre di cocco estratte dal geotessile.

4.2.1. Analisi al SEM

Per osservare l'eventuale presenza di danneggiamenti, fratture e/o dilatazioni superficiali delle fibre di cocco sottoposte ad immersione in ambiente marino, sono state effettuate analisi al microscopio elettronico a scansione (*Scanning Electron Microscope* - SEM) del Laboratorio Arvedi, sia in fase T_0 (fibre naturali) che in fase T_1 (post immersione).

4.2.1.1. Preparazione dei campioni per l'analisi al SEM

In totale, sono state analizzate 60 fibre, 10 per ognuna delle 3 categorie dimensionali (*fini, medie e spesse*), in entrambe le condizioni (T_0 e T_1). Per quanto riguarda le fibre trattate in mare, per evitare la possibile influenza della singola bottiglia sono state prelevate casualmente dalle tre bottiglie della stessa condizione. Le porzioni centrali delle fibre sono state ritagliate in funzione della dimensione del supporto di analisi del SEM, detto *stub*, ovvero un dischetto di alluminio con un diametro di 12 mm. Su ogni *stub* sono stati fissati 5 frammenti di fibre (**Fig. 4.6**), mediante un apposito nastro biadesivo conduttivo a base di carbonio. Lo stesso nastro biadesivo è stato utilizzato per fissare alle due estremità le fibre, per mantenerle ben aderenti alla superficie del supporto ed evitare distaccamenti parziali.

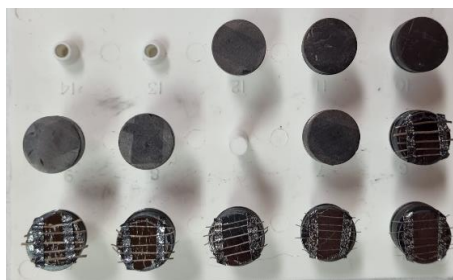


Figura 4.6. Preparazione degli stubs per le analisi al SEM sulle fibre di cocco; su ogni supporto sono state posizionate 5 fibre.

Per rendere la superficie dei campioni conduttiva agli elettroni usati dal SEM, gli *stubs* sono stati ricoperti da uno strato nanometrico di pura grafite. Il processo è stato effettuato con un carbon coater © Cressington 208 Carbon High Vacuum (*Cressington Scientific Instruments*, n.d.).

4.2.1.2. Procedura di analisi

Per le analisi è stato utilizzato il FEG-SEM (*Field Emission Gun Scanning Electron Microscope*), modello Mira3-XMU, prodotto da © TESCAN (Brno, Repubblica Ceca) (**Fig. 4.7**). Le analisi morfologiche sono state effettuate in modalità operativa di “*alto vuoto*”, con una tensione di accelerazione degli elettroni di 5kV ad una distanza di lavoro di 15 mm. Tutte le immagini sono state acquisite tramite il detector SE (*Secondary Electron Detector*). Per ogni *stub* è stata raccolta un’immagine “panoramica” a basso ingrandimento, tale da visualizzarne l’intera superficie. Per le singole fibre sono state scattate foto a basso ingrandimento, per osservare la maggior parte della superficie, a medio ingrandimento, in modo da esaminare una porzione della fibra e ad alto ingrandimento, per visionarne i dettagli. L’ingrandimento è stato impostato in funzione della dimensione della fibra analizzata. Dalle immagini a basso ingrandimento è stato ricavato il diametro. Questo, è stato calcolato dalla media di due misurazioni per ogni fibra, data la naturale variabilità di spessore all’interno di ognuna. Le misure del diametro delle fibre naturali e trattate sono state riportate in un foglio di lavoro Excel.



Figura 4.7. Fotografia scattata presso il Laboratorio Arvedi del Laboratorio Arvedi del Centro Interdipartimentale di Studi e Ricerche per la Conservazione del patrimonio culturale (CISRiC) dell’Università di Pavia che mostra il microscopio elettronico a scansione utilizzato per l’analisi superficiale delle fibre.

4.2.2. Prove di Trazione

Le proprietà meccaniche della fibra di cocco sono state studiate tramite prove di trazione, un metodo standard finalizzato a comprendere il comportamento di un materiale sottoposto a un carico uniassiale. Le prove sono state effettuate presso il laboratorio Mate - Lab (*MATerial Mechanics LABoratory*) sia sul geotessile sia sulle singole fibre. Queste ultime sono state valutate in due differenti condizioni: naturali (T_0) e sottoposte a trattamento di immersione in mare per 7 mesi (T_1).

4.2.2.1. Preparazione dei provini: Fibre di Cocco

Per ogni categoria dimensionale (*fini, medie, spesse*) sono state prelevate 15 fibre per la condizione T_0 e 15 per la condizione T_1 . Anche in questo caso le fibre trattate in mare (T_1), per ovviare il problema di una possibile influenza della singola bottiglia, sono state prelevate casualmente dalle 3 bottiglie di ogni categoria. Al fine dello svolgimento delle prove, per rendere ottimale la presa degli afferraggi e ridurre al minimo le probabilità di scivolamento del provino, sono state testate diverse modalità di lavoro; la più efficace è risultata la seguente: le estremità delle fibre sono state fissate con colla istantanea tra due foglietti di carta vetrata (**Fig. 4.8**). Come avvenuto per i pannelli, è stata fissata una distanza standard (l_0) di 3 cm, che verrà mantenuta tra i due afferraggi.



Figura 4.8. Metodologia operativa scelta per la preparazione delle fibre: le estremità vengono fissate tra due foglietti di carta vetrata utilizzando colla istantanea.

4.2.2.2. Preparazione dei provini: Pannelli in fibra di cocco

Per ricavare i provini, i pannelli sono stati suddivisi in quattro quadranti di uguali dimensioni. Ogni quadrante è stato sagomato ad osso di cane (**Fig. 4.9**), tipica forma utilizzata nelle prove di trazione, definendo una larghezza centrale (b) standard di 2 cm. Con un pennarello sono stati segnati i limiti superiore e inferiore, distanti tra loro 3 cm, come riferimento per il posizionamento dei due afferraggi della macchina (l_0). Prima dello svolgimento delle prove, per ogni provino è stato misurato lo spessore (s). In totale sono stati ricavati 15 provini, più alcuni utilizzati per definire la metodologia ottimale per i test di trazione.

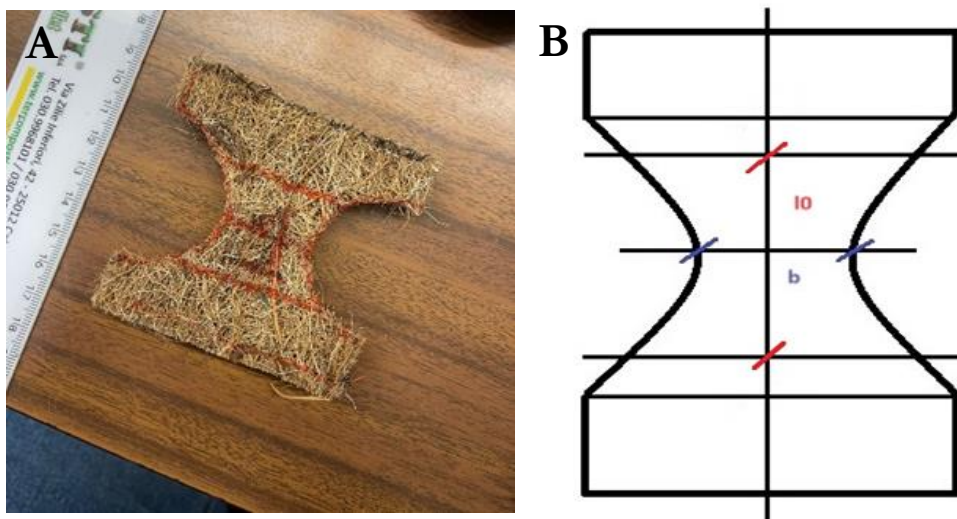


Figura 4.9. **A:** provino numerato pronto per il test di trazione; al centro del provino, in rosso, si possono osservare 3 linee: le due esterne sono servite per il posizionamento degli afferraggi e distano esattamente 3cm l'una dall'altra, mentre quella centrale è stata utilizzata per la misurazione della larghezza centrale del provino (b). **B:** rappresentazione grafica di un provino sagomato ad osso di cane, dove b (in blu) indica la larghezza centrale e l_0 (in rosso) indica la distanza predefinita tra gli afferraggi, ovvero 3 cm.

4.2.2.3. Svolgimento delle Prove di Trazione

Le prove di trazione uniassiale sono state svolte mediante *MTS Insight Testing Systems* (**Fig. 4.10**), con il metodo di “*trazione semplice*”. La macchina è dotata di una traversa mobile e di una cella di carico di 250 N. Sono stati utilizzati due afferraggi pneumatici controllati con un pedale, su ognuno dei quali vengono fissate due piastre parallele (**Fig. 4.10**). Come spiegato in precedenza (si vedano i paragrafi 4.2.1.1. e 4.2.1.2.), tra gli afferraggi è stata mantenuta una distanza standard di 3 cm in tutte le prove.

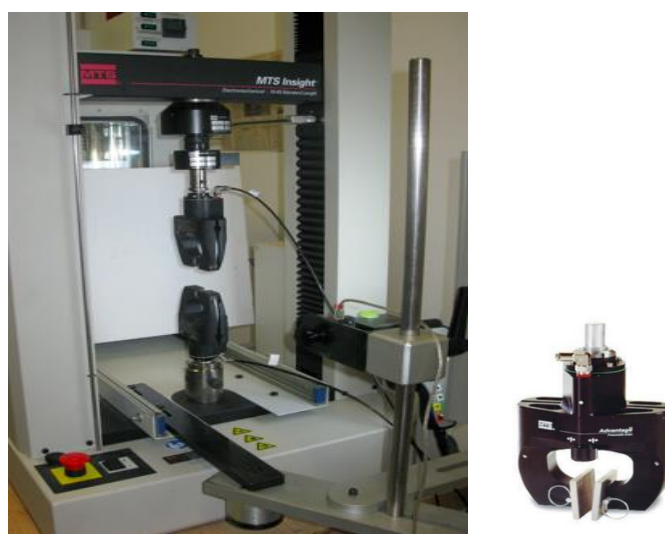


Figura 4.10. Macchina utilizzata per le prove di trazione uniassiale e afferraggi pneumatici (foto da: Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia).

Per ogni set di 15 provini, sono stati svolti tre test di trazione (5 provini per test) a diverse velocità di spostamento della traversa: 2 mm min^{-1} , 4 mm min^{-1} , 6 mm min^{-1} . Sono state considerate valide solamente le prove che hanno prodotto una corretta rottura nella sezione centrale del provino (**Fig. 4.11**); tutti i provini che hanno prodotto una rottura a ridosso degli afferraggi sono stati scartati e la stessa prova è stata ripetuta su un altro campione.

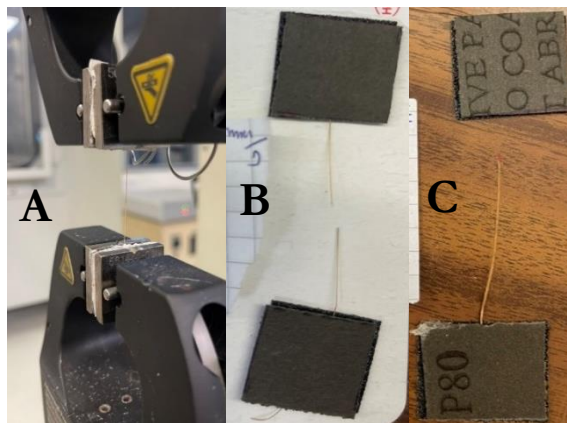


Figura 4.11. *A: posizionamento di un provino per il test di trazione; B: esempio di rottura corretta; C: esempio di rottura errata.*

Su un foglio di calcolo Excel sono state annotate le informazioni ed osservazioni utili di ogni provino, la velocità di esecuzione del test e, nel caso di pannelli, lo spessore (s). In associazione con la macchina è stato utilizzato un sistema di controllo RT3-ST, che dispone di un software che restituisce per ogni prova un file di testo di 3 colonne: *Time* (s), *Crosshead* (mm) e *Load* (N), rispettivamente tempo, allungamento della traversa e forza applicata dal carico. Il numero di righe varia in base alla quantità di dati acquisiti.

4.3. Valutazione della fibra di cocco come Acidificante Ambientale

Questa fase del lavoro ha avuto lo scopo di comprendere i potenziali effetti di acidificazione dell'acqua di mare da parte della fibra, che per natura presenta un pH tendenzialmente acido compreso tra 4,9 e 6,9 (Evans *et al.*, 1996; Abad *et al.*, 2002). Le analisi sono state svolte in laboratorio, ricreando in ambiente controllato le condizioni di un ambiente marino, in assenza di ricambio di acqua. Sono stati utilizzati in totale 18 pannelli in fibra di cocco ritagliati dal geotessile, con dimensioni di 14 x 14 cm (superficie di un pannello: 196 cm²). Lo studio è stato svolto presso la sede di Trieste dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS), in collaborazione con la Dott.ssa Bordiga Manuela e la Dott.ssa De Vittor Cinzia.

4.3.1. Preparazione dell'apparato sperimentale

Al fine di ridurre al minimo la carica batterica, che avrebbe potuto falsare i risultati relativi al pH, tutti i pannelli di geotessile sono stati sterilizzati in stufa a 120 °C per 30 min. Inoltre, l'acqua marina e la strumentazione utilizzata sono state autoclavate prima dell'esperimento. La preparazione dell'unità sperimentale è avvenuta lavorando sotto cappa a flusso laminare, per mantenere la condizione di sterilità. Per ridurre ulteriormente la proliferazione batterica sono stati aggiunti degli aeratori per acquari, precedentemente lavati con alcol e risciacquati con acqua distillata.

In totale sono state allestite 9 beute, 3 per ogni condizione riportata di seguito: alto contenuto di fibra (*high fiber* - HF; 4 pannelli = 784 cm² / 2L H₂O), basso contenuto di fibra (*low fiber* - LF; 2 pannelli = 392 cm² / 2L H₂O) e controllo con sola acqua (*control* - CTRL; 2L H₂O). Dall'inizio dell'esperimento sono state effettuate 5 misurazioni del pH, in 3 repliche per ogni beuta: T₀ (dopo un'ora dall'inizio dell'esperimento); T₁₅ (15 giorni); T₃₀ (30 giorni); T₆₀ (60 giorni) e T₉₀ (90 giorni) (Fig. 4.12).

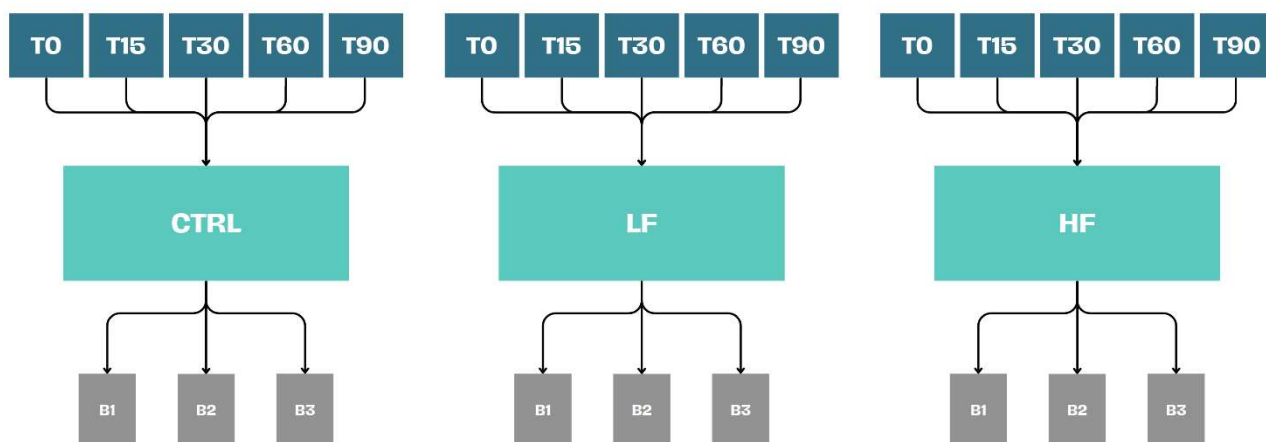


Figura 4.12. Schema del disegno sperimentale per l'analisi del potenziale effetto acidificante della fibra di cocco in ambiente marino chiuso: 3 condizioni (*control* - CTRL, *low fiber* - LF, *high fiber* - HF); 3 beute per condizione (B1, B2, B3), sulle quali sono state effettuate 3 misurazioni ai tempi T₀ (dopo 1h dall'inizio dell'esperimento); T₁₅ (15 gg.); T₃₀ (30 gg.); T₆₀ (60 gg.) e T₉₀ (90 gg.).

4.3.2. Procedura sperimentale

Le beute sono state poste in una camera termostata a 20°C (**Fig. 4.13**) e mantenute per un totale di 3 mesi a temperatura costante. Per limitare il più possibile il contatto con l'ambiente esterno, le beute sono state chiuse con tappi di cotone ricoperti da fogli di alluminio, entrambi previa sterilizzazione. Ogni beuta è stata dotata di un tubo in entrata per l'insufflazione continua di aria, in modo da controllare l'eventuale proliferazione batterica. Questo accorgimento si è reso necessario poiché l'attività batterica avrebbe consumato ossigeno, influenzando il pH.



Figura 4.13. Unità sperimentale all'interno della camera termostata, presso la sede dell'OGS a Trieste.

La raccolta dei campioni di acqua è stata effettuata attraverso un tubo supplementare; i dati relativi pH sono stati acquistati con l'ausilio di un pHmetro, situato in una camera termostata a 20°C. La temperatura è stata monitorata mediante un termometro. I dati ricavati sono stati trascritti in un foglio di lavoro Excel.

4.4. Elaborazione dei dati e approccio statistico

4.4.1. Capacità di reclutamento biofouling del substrato in fibra di cocco

La comunità *biofouling* è stata analizzata calcolando le abbondanze relative percentuali per ogni phylum, nei singoli pannelli. Per i phyla Tunicata e Cnidaria sono state calcolate separatamente le abbondanze relative complessive degli individui solitari e delle colonie. Inoltre, è stata svolta un'indagine sull'abbondanza di specie alloctone presenti sul geotessile.

Tramite il software Excel è stata elaborata una tabella pivot riassuntiva. Utilizzando il software Primer 6.0, è stata eseguita l'analisi SIMPER (*Similarity Percentage*) sui dati di abbondanza e di presenza/assenza, che permette di valutare la similarità tra i campioni analizzati.

Purtroppo, i campioni dell'esperimento condotto nei mesi estivi sono stati quasi completamente persi e non è stato possibile raccogliere una quantità di dati sufficiente per effettuare un confronto statistico tra le due stagioni. È stato svolto un confronto qualitativo con le comunità *biofouling* note per l'area dalla letteratura (Tamburini *et al.*, 2021; Tamburini *et al.*, 2022; Santos-Simón *et al.*, 2024).

4.4.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra in ambiente marino

4.4.2.1. Analisi al SEM

Utilizzando il software Rstudio, per valutare l'eventuale variazione di diametro nelle fibre T_1 rispetto alle fibre T_0 e confermare la suddivisione delle fibre in base al criterio dimensionale, essendo stata effettuata mediante stereomicroscopio e senza l'utilizzo di strumenti appositi, è stato elaborato un modello di regressione lineare (*Linear Model - LM*) a due fattori con interazione. Il modello analizza l'effetto della condizione e della categoria dimensionale sul diametro. Il fattore "condizione", basato sul trattamento in mare, presenta 2 livelli: T_0 - fibre non trattate, T_1 - fibre trattate in mare. Il fattore "categoria", basato sul diametro, presenta 3 livelli: *fibre fini* - FF (circa 80 - 200 μm), *fibre medie* - FM (circa 201 - 300 μm) e *spesse* - FS (circa 301 - 600 μm). Il dataset utilizzato è costituito da 6 gruppi di campioni (FF T_0 , FM T_0 , FS T_0 , FF T_1 , FM T_1 , FS T_1), ognuno dei quali presenta 10 repliche. La significatività statistica delle differenze tra i gruppi è stata valutata tramite un'analisi della varianza a due fattori di classificazione (*Two-way ANOVA*), previa verifica delle assunzioni, quali normalità dei dati, omoschedasticità, normalità dei residui e media di questi significativamente diversa da zero. L'ipotesi alternativa formulata (H_1) include un effetto significativo delle due variabili indipendenti testate (condizione, categoria) sulla variabile dipendente (diametro); al contrario, l'ipotesi nulla (H_0) sostiene che, in caso venga osservata una variazione nel diametro, questa sia

attribuibile al caso. L'ipotesi alternativa viene sostenuta dai risultati di precedenti studi, che dimostrano la capacità delle fibre di cocco di assorbire grandi quantità di acqua e di incrementare le proprie dimensioni (van Dam *et al.*, 2006; Mishra & Basu, 2020), rischiando di alterare le condizioni di superficie e danneggiando la fibra.

In aggiunta all'analisi sul diametro, tramite osservazione visiva delle fotografie scattate al SEM, sono state confrontate le condizioni delle fibre T_0 con le fibre T_1 , con l'obiettivo di rilevare eventuali fenomeni di deterioramento superficiale.

4.4.2.2. Prove di trazione

Tramite il software Matlab (*Matrix Laboratory*), estrapolando i dati dei file di testo di ogni provino, sono state elaborate le curve *Load - Crosshead*. Queste, hanno la funzione di rappresentare graficamente l'andamento di una prova di trazione, mostrando la relazione tra la Forza applicata al provino (y), espressa in Newton, e lo Spostamento subito (x), espresso in mm. Dai valori noti sono stati ricavati lo Sforzo o Tensione nominale (σ) e la Deformazione (ε), tramite le formule:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Nella formula per il calcolo dello Sforzo (σ), F indica la forza applicata (*Load*), mentre A_0 rappresenta la sezione trasversale iniziale del provino su cui agisce il carico. Per quanto riguarda le fibre, A_0 è stata ricavata con la formula πr^2 , utilizzando il valore medio del diametro di ogni categoria, da cui è stato ricavato il raggio medio (r). Per i pannelli, l'area iniziale è stata calcolata moltiplicando la lunghezza centrale (b) per lo spessore (s). Nella formula per il calcolo della Deformazione (ε), Δl rappresenta lo spostamento della traversa (*Crosshead*), mentre l_0 indica la distanza iniziale tra gli afferraggi, fissata a 30 mm.

Successivamente, sono state elaborate le curve *Stress - Strain*, le quali descrivono la relazione tra lo sforzo (y) e la deformazione (x). Al fine di eliminare il disturbo o "rumore" presente nei dati originali, è stata applicata la tecnica del calcolo della media mobile (*Moving Average*) con un intervallo di acquisizione di 0,1 per le fibre (**Fig. 4.14**) e variabile da 0,15 a 0,4 punti per i pannelli (**Fig. 4.14**), che permette di ridurre le fluttuazioni preservando l'andamento delle curve.

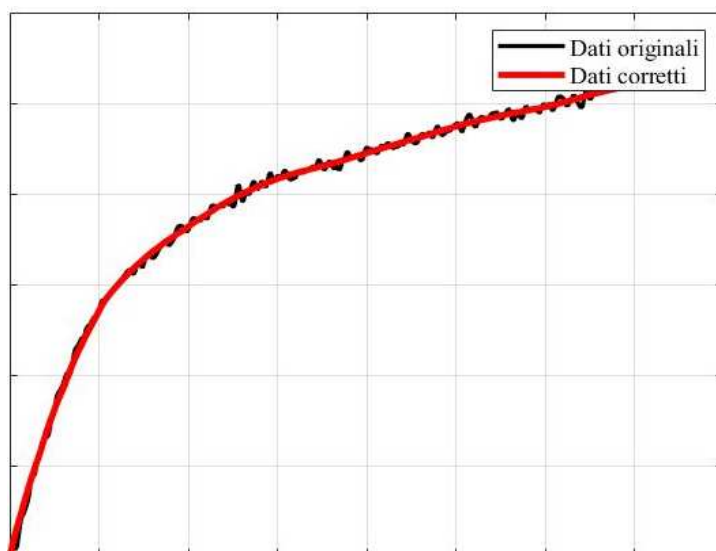


Figura 4.15. Esempio di correzione del “rumore” mediante il calcolo della media mobile. In nero sono rappresentati i dati originali ricavati da una prova svolta su una fibra; in rosso viene mostrata la curva corretta

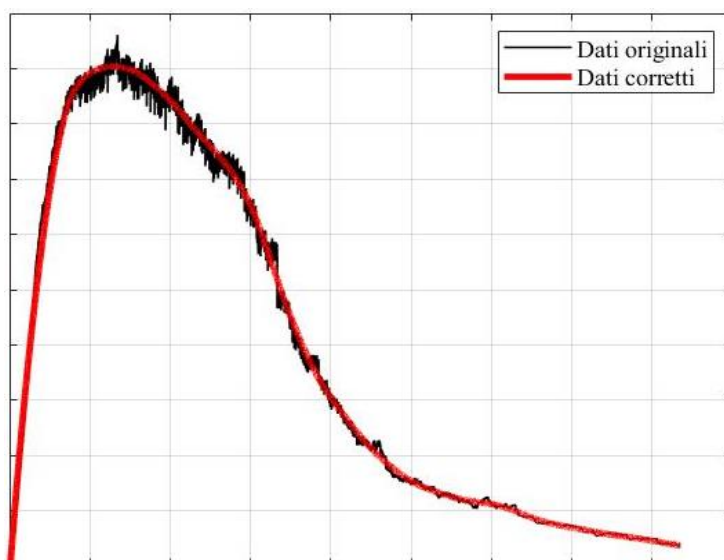


Figura 4.15. Esempio di correzione del “rumore” mediante il calcolo della media mobile. In nero sono rappresentati i dati originali ricavati da una prova svolta su un pannello; in rosso viene mostrata la curva corretta.

Per studiare l’andamento generale delle curve, è stata ricavata la curva media rappresentativa di ogni set di 15 provini (pannelli, fibre T₀ e fibre T₁). Eventuali campioni con andamento anomalo rispetto alla media non sono stati presi in considerazione per la rappresentazione della curva media. In seguito, per ogni curva, sono stati studiati i tratti ad andamento lineare. Tutte le curve sono state troncate al valore massimo di y, che per le fibre corrisponde al punto di rottura. Calcolando il punto di gomito di ogni curva (**Fig. 4.16**), ovvero il punto in cui cambia significativamente il comportamento del materiale, è stato possibile ricavare due rette rappresentative dell’andamento bilineare delle curve (**Fig. 4.17**).

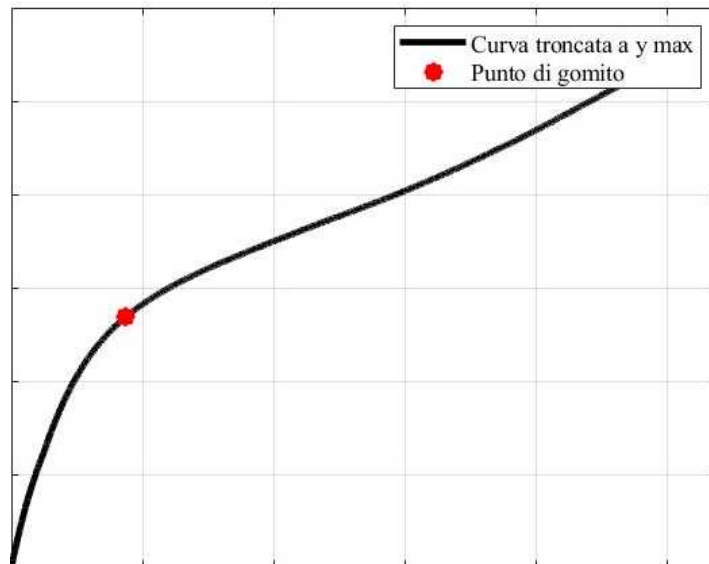


Figura 4.16. Esempio di calcolo del punto di gomito su una curva ricavata da una prova su una fibra.



Figura 4.17. Esempio di calcolo delle due rette rappresentative dell'andamento bilineare di una curva ricavata da una prova su una fibra.

Il coefficiente angolare delle rette ricavate corrisponde al modulo elastico o Modulo di Young (E), che esprime la rigidezza di un materiale; all'aumentare del valore di E , diminuisce l'elasticità e quindi la capacità di deformazione. Il modulo elastico viene descritto dalla formula seguente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Per quanto concerne le fibre, in seguito alla valutazione dell'andamento generale delle curve, sono stati calcolati entrambi i Moduli relativi ai due tratti lineari presenti, considerando quindi le rette precedente e successiva al punto di gomito. Per i pannelli, è stato calcolato unicamente il modulo

elastico relativo al tratto lineare iniziale, corrispondente al coefficiente angolare della retta precedente al punto di gomito.

Le analisi statistiche volte a valutare la variazione del modulo elastico (E) sono state svolte tramite il software Rstudio. Per prima cosa è stato effettuato un test di correlazione di Pearson, per valutare la relazione tra i moduli elastici relativi al primo ed al secondo tratto delle curve ricavate dalle fibre. Per verificare l'eventuale variazione di resistenza della fibra di cocco in base alla dimensione e in seguito ad un trattamento in mare di 7 mesi, è stato elaborato un modello di regressione lineare (*Linear Model - LM*) a due fattori con interazione, che analizza l'effetto della condizione e della categoria dimensionale sulla rigidità del materiale, espressa dal Modulo di Young (E). Il fattore "condizione", basato sul trattamento in mare, presenta 2 livelli: T_0 - fibre non trattate e T_1 - fibre trattate in mare. Il fattore "categoria", basato sul diametro, presenta 3 livelli: *fibre fini* - FF (circa 80 - 200 μm), *fibre medie* - FM (circa 201 - 300 μm) e *spesse* - FS (circa 301 - 600 μm). Come accennato in precedenza, non essendo stata osservata alcuna differenza evidente tra le prove svolte a velocità differenti (2 mm min^{-1} , 4 mm min^{-1} , 6 mm min^{-1}), il fattore "velocità" non è stato preso in considerazione per l'analisi. Il dataset è composto da 6 gruppi di campioni (FF T_0 , FM T_0 , FS T_0 , FF T_1 , FM T_1 , FS T_1), ognuno dei quali presenta 15 repliche. Previa verifica delle assunzioni, quali normalità dei dati, omoschedasticità, normalità dei residui e media di questi significativamente diversa da zero, le eventuali differenze tra i gruppi sono state valutate tramite un'analisi della varianza a due fattori di classificazione (*Two-way ANOVA*). L'ipotesi alternativa (H_1), afferma che le due variabili indipendenti testate nel modello (condizione e categoria) abbiano un effetto significativo sulla variazione di modulo elastico delle fibre; l'ipotesi nulla (H_0), postula che un'eventuale variazione osservata sia attribuibile al caso. L'ipotesi alternativa è stata formulata sulla base di precedenti studi, che hanno dimostrato la variabilità delle proprietà meccaniche caratterizzanti le fibre naturali in base alla loro dimensione (Mohanty *et al.*, 2000), e nell'ottica di un futuro utilizzo in mare prolungato della fibra di cocco.

4.4.3. Effetto Acidificante della fibra

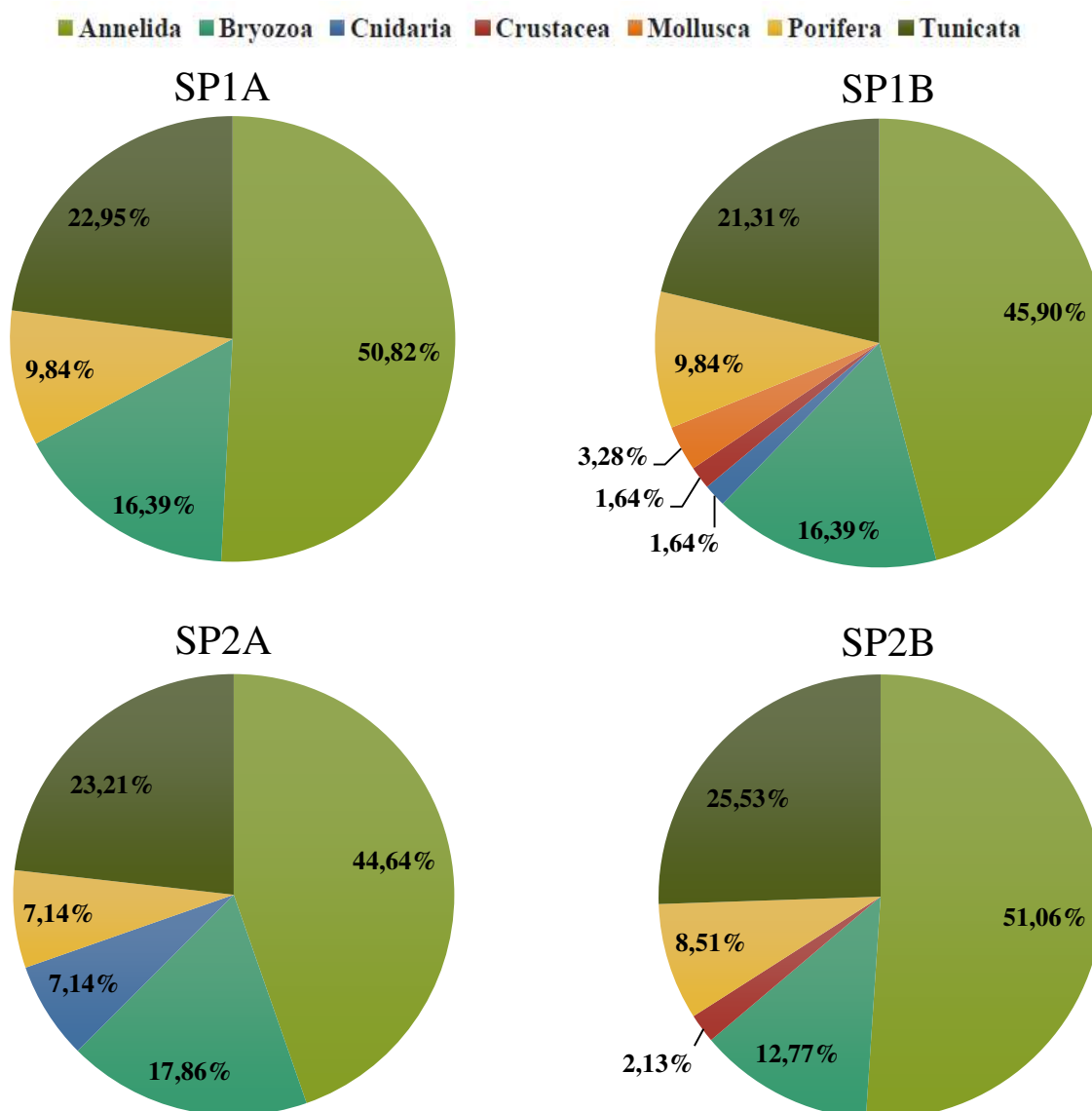
Tramite il software Rstudio sono state eseguite le analisi statistiche per valutare l'eventuale effetto acidificante della fibra di cocco in ambiente marino, elaborando un modello di regressione lineare misto (*Linear Mixed Model - LMM*) a due fattori fissi con interazione ed un fattore random. Esso valuta l'effetto dei fattori "condizione" e "tempo" sulla variabile di risposta, ovvero il pH. Il fattore "condizione", basato sulla presenza di diverse concentrazioni di fibra in acqua, presenta 3 livelli: *control* - CTRL (2L H_2O), *low fiber* - LF (2 pannelli = 392 cm^2 / 2L H_2O), *high fiber* - HF (4 pannelli

= 784 cm² / 2L H₂O). Il fattore “tempo”, che rappresenta le misurazioni effettuate nel corso dei 3 mesi di esperimento, presenta 5 livelli: T₀ (1h dall’inizio dell’esperimento), T₁₅ (15 gg.), T₃₀ (30 gg.), T₆₀ (60 gg.), T₉₀ (90 gg.). La variabilità attribuibile alla singola beuta (fattore a 9 livelli, 3 per ogni condizione: *beuta control 1* - CB1; *beuta control 2* - CB2; *beuta control 3* - CB3; *beuta low fiber 1* - LFB1; *beuta low fiber 2* - LFB2; *beuta low fiber 3* - LFB3; *beuta high fiber 1* - HFB1; *beuta high fiber 2* - HFB2; *beuta high fiber 3* - HFB3) è stata considerata come effetto random. Per ovviare il problema della pseudoreplicazione dei dati, le 3 misurazioni effettuate nello stesso momento e sulla stessa beuta sono state condensate calcolandone la media. Il dataset finale è composto da 9 campioni (C: CB1 - CB2 - CB3; LF: LFB1 - LFB2 - LFB3; HF: HFB1 - HFB2 - HFB3), per ognuno dei quali sono presenti 5 misurazioni del pH nel tempo (**Fig. 4.12**). In seguito alla verifica delle assunzioni, per valutare le differenze tra i gruppi, è stata effettuata un’analisi della varianza mista (*mixed ANOVA*) di tipo III, che applica la correzione di Satterthwaite per stimare i gradi di libertà. L’ipotesi alternativa (H1), formulata sulla base di precedenti studi relativi al pH della fibra di cocco che la descrivono come tendenzialmente acida (Evans *et al.*, 1996; Abad *et al.*, 2002), afferma che la fibra possa avere un effetto acidificante in ambienti marini chiusi. L’ipotesi nulla (H0), al contrario, afferma che le variazioni di pH non siano influenzate dalla fibra, ma invece dovute al caso.

5. RISULTATI

5.1. Reclutamento *biofouling* stagionale del substrato in fibra di cocco

A causa della perdita dei pannelli durante la stagione estiva non è stato possibile effettuare un confronto con quella invernale; è stata quindi studiata unicamente quest'ultima. La comunità invernale reclutata dai pannelli di geotessile in fibra di cocco è rappresentata da specie vegetali (alghe) e animali, sia vagili che sessili (*biofouling*). Dallo studio delle comunità sessili sono state identificate 40 specie, appartenenti a 7 phyla (**Tab. 5.1**): Annelida (2 famiglie), Bryozoa (8 famiglie), Cnidaria (3 famiglie), Crustacea (1 famiglia), Mollusca (2 famiglie), Porifera (3 famiglie) e Tunicata (4 famiglie). Per alcuni organismi appartenenti al phylum Tunicata, a causa delle condizioni del campione o delle dimensioni degli organismi, non è stato possibile determinare un livello tassonomico più basso dell'ordine Stolidobranchia. La **Fig. 5.1** mostra, per ogni pannello, le abbondanze relative riscontrate per i phyla presenti.



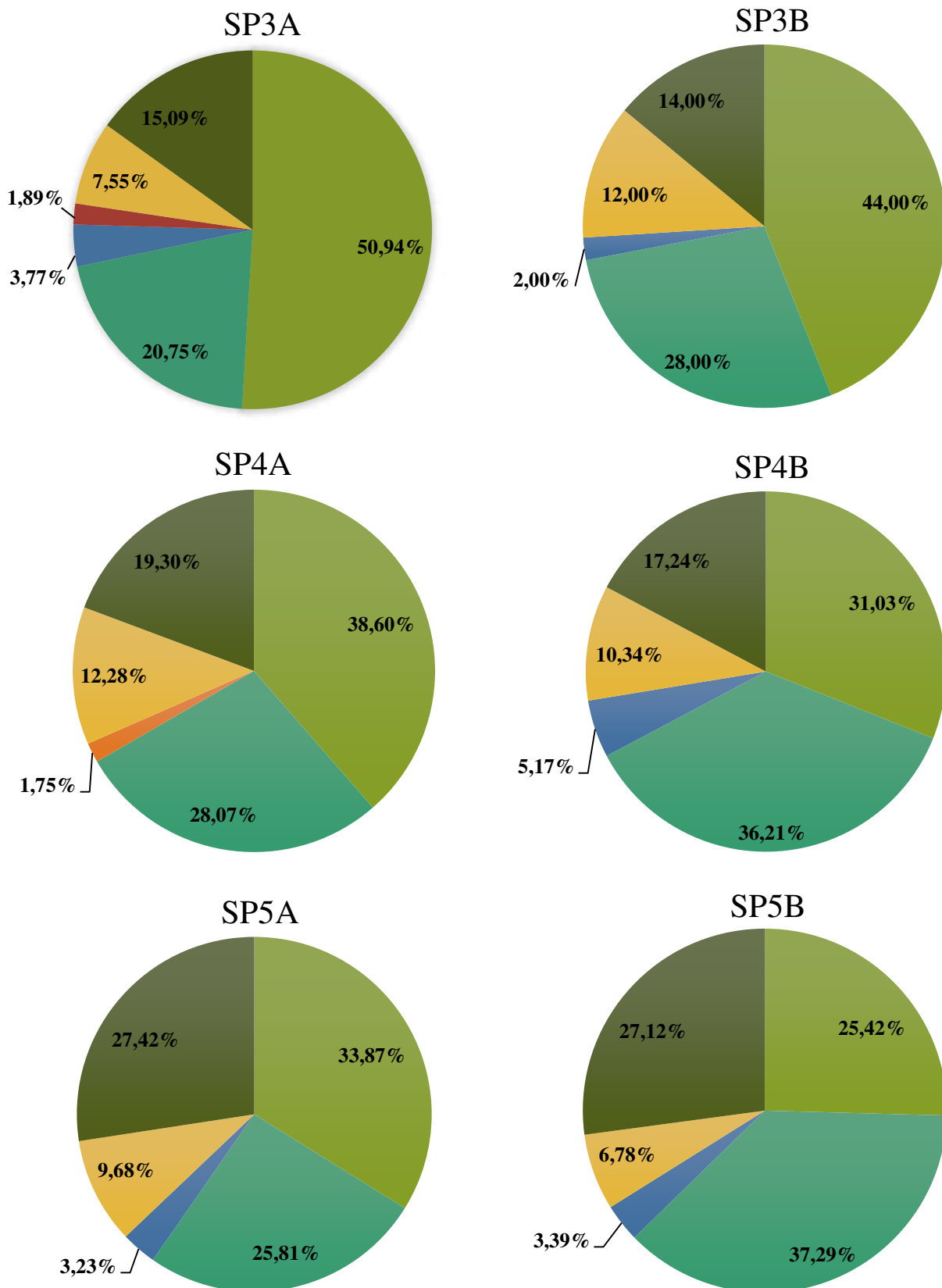


Figura 5.1. Grafici a torta rappresentativi della comunità invernale: abbondanze relative dei phyla rilevati nei 10 pannelli. Il codice utilizzato per la denominazione di ogni pannello contiene informazioni sul luogo di campionamento (SP - La Spezia), sul mattone su cui è stato posizionato (1-5) e sul lato di quest'ultimo su cui si trova il pannello (A/B).

Dall'abbondanza relativa complessiva (**Fig. 5.2**), ottenuta sommando le abbondanze relative dei 10 pannelli, il phylum Annelida risulta quello più abbondante (41,24%), rappresentato da due famiglie: Serpulidae e Sabellidae. Seguono i phyla Bryozoa (24,07%), Tunicata (21,42%) e Porifera (9,56%). Infine, meno abbondanti e non presenti in tutti i pannelli, vi sono i phyla Cnidaria (2,65%), Crustacea (0,53%) e Mollusca (0,53%).

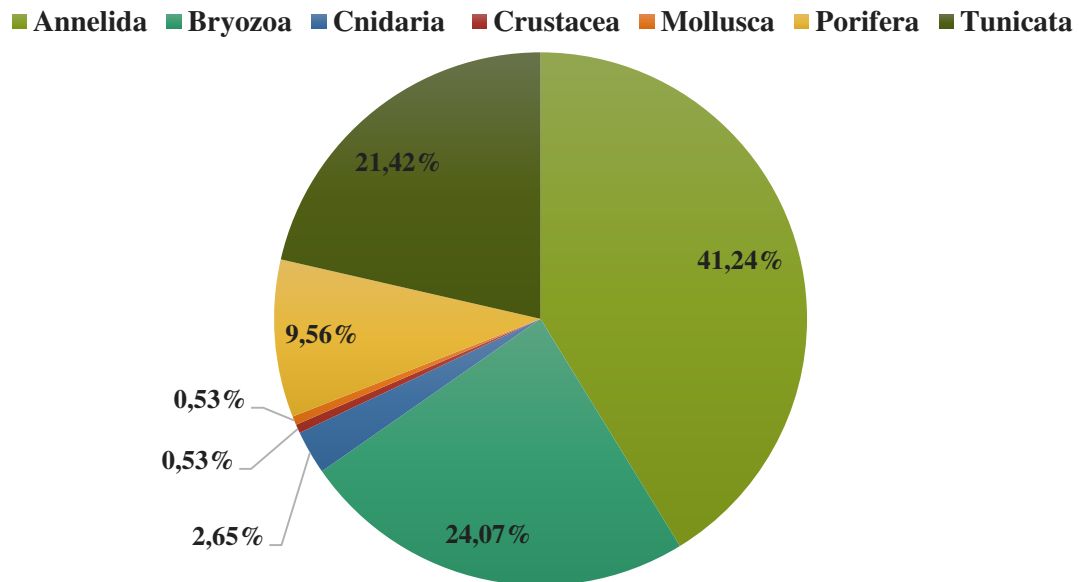


Figura 5.2. Grafico a torta rappresentativo delle abbondanze complessive dei phyla rilevati nella comunità invernale.

Sia per il phylum Tunicata sia per il phylum Cnidaria è stata osservata una maggiore abbondanza complessiva di organismi coloniali rispetto a quelli solitari (**Fig. 5.3**), con rispettive percentuali del 72,73% e dell'86,67%.

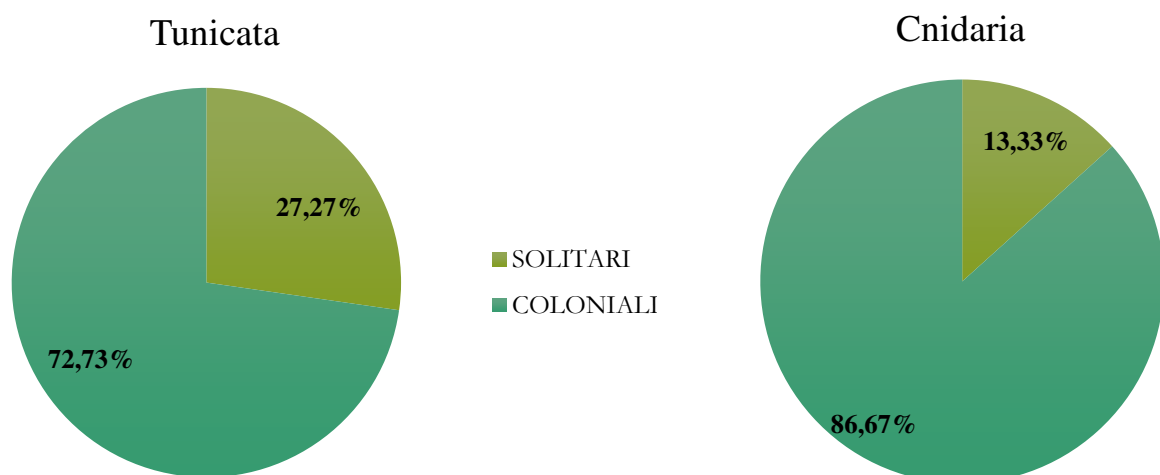


Figura 5.3. Grafici a torta rappresentativi delle abbondanze relative complessive degli organismi coloniali e solitari all'interno dei phyla Tunicata e Cnidaria.

Tabella 5.1. Elenco dei taxa identificati sui pannelli di cocco, con le relative abbondanze complessive: + (<1%), ++ (1-5%), +++ (6-10%), ++++ (>10%).

PHYLUM	FAMIGLIA	SPECIE	ABBONDANZA
Annelida	Sabellidae	<i>Branchiomma luctuosum</i>	+
		<i>Branchiomma</i> sp.	++
		<i>Sabella</i> sp.	+++
	Serpulidae	<i>Hydroides dirampha</i>	++
		<i>Hydroides elegans</i>	+++
		<i>Janua</i> sp.	++
		<i>Pileolaria</i> sp.	++
		<i>Salmacina</i> sp.	+++
		<i>Serpula</i> sp.	++
Bryozoa	Aeteidae	<i>Aetea</i> sp.	+
	Bugulidae	<i>Bugula neritina</i>	++
		<i>Bugulina fulva</i>	++
	Candidae	<i>Scrupocellaria bertholetii</i>	+
		<i>Scrupocellaria reptans</i>	+
		<i>Tricellaria inopinata</i>	+
	Celleporidae	<i>Celleporaria brunnea</i>	+
		<i>Turbicellepora magnicostata</i>	+
	Crisiidae	<i>Crisia denticulata</i>	++
		<i>Crisia eburnea</i>	+
		<i>Crisia</i> sp.	+
		<i>Filicrisia</i> sp.	+++
	Electridae	<i>Conopeum reticulum</i>	+
	Schizoporellidae	<i>Schizoporella errata</i>	++
	Watersiporidae	<i>Watersipora subtorquata</i>	++
Cnidaria	Actiniidae	<i>Anemonia sulcata</i>	+
	Campanulariidae	<i>Obelia</i> sp.	++
	Eudendriidae	<i>Eudendrium</i> sp.	+
Crustacea	Balanidae	<i>Amphibalanus amphitrite</i>	+
Mollusca	Anomiidae	<i>Anomia ephippium</i>	+
	Mytilidae	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	+
Porifera	Amphoriscidae	<i>Paraleucilla magna</i>	++
	Clathrinidae	<i>Clathrina</i> sp.	++
	Syconidae	<i>Sycon</i> sp.	++
Tunicata	Asciidiidae	<i>Asciidiella scabra</i>	+
	Cionidae	<i>Ciona robusta</i>	++
	Didemnidae	<i>Didemnum</i> sp.	++
		<i>Diplosoma</i> sp.	+++

Styelidae	<i>Botrylloides</i> sp.	++
	<i>Botryllus schlosseri</i>	++
	<i>Styela plicata</i>	++
Stolidobranchia		++

Tutti i pannelli (**Fig. 5.4**) hanno mostrato un'abbondanza di specie non indigene (NIS) minore rispetto alle specie native, compresa tra il 16,39% e il 31,15%. L'abbondanza complessiva di NIS, ottenuta sommando le abbondanze relative dei 10 pannelli, è pari al 23,36%.



Figura 5.4. Percentuale relativa di specie non-indigene (NIS) rispetto alle specie native osservate su ogni pannello.

Considerando i singoli phyla (**Fig. 5.5**), la maggiore abbondanza di NIS è stata riscontrata nei Porifera (42,59%), rappresentata esclusivamente dalla specie *Paraleucilla magna*. Seguono gli Annelida (33,91%), per il quale sono state rilevate specie appartenenti ai generi *Hydroides* (*H. elegans*, *H. dirampha*) e *Branchiomma* (*B. luctuosum*), e i Tunicata (19,84%), con le specie *Ciona robusta* e *Styela plicata*. Nel phylum Bryozoa è stata osservata una minor abbondanza di NIS (4,41%), rappresentate da *Celleporaria brunnea* e *Tricellaria inopinata*. Per quanto concerne i phyla Cnidaria, Crustacea e Mollusca, tra tutte le specie identificate non è emersa la presenza di NIS.

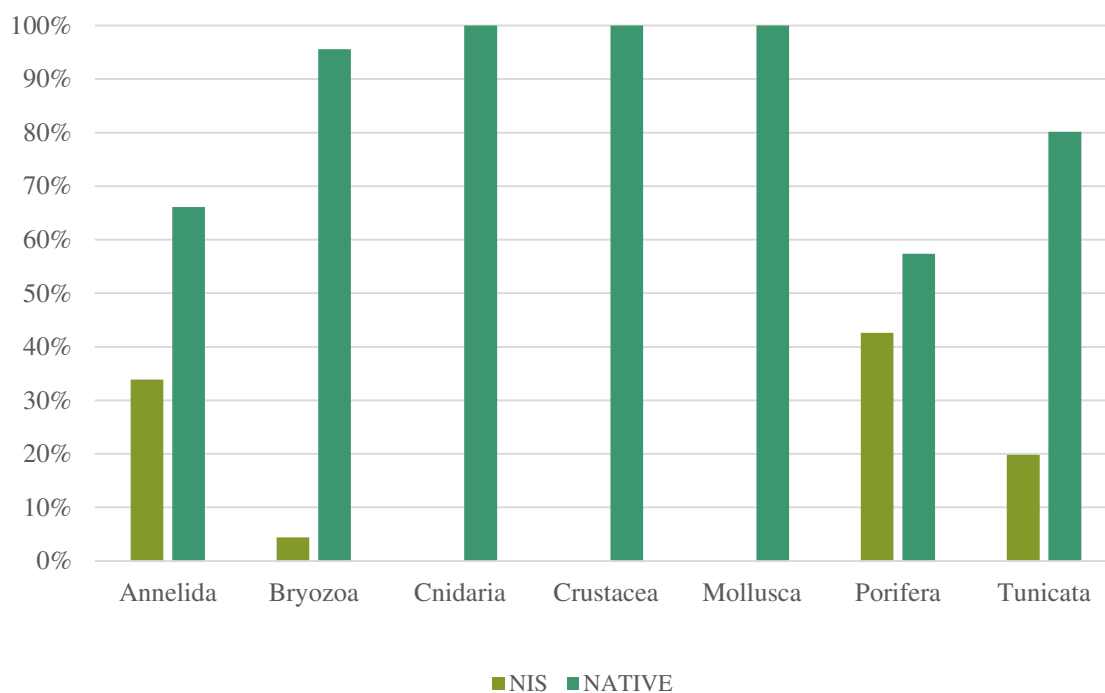


Figura 5.5. Percentuale relativa di specie non-indigene (NIS) rispetto alle native riscontrate per i diversi phyla.

Dai risultati delle analisi SIMPER relative ai dati di abbondanza e di presenza/assenza, è stata riscontrata rispettivamente una similarità del 60,58% e del 75,37% tra pannelli, segno che la comunità ha una struttura perlopiù omogenea.

5.2. Caratterizzazione Fisico-Meccanica della fibra di cocco pre e post trattamento in mare

5.2.1. Analisi al SEM

Grazie alle immagini acquisite mediante SEM, ottenute ad ingrandimenti variabili per le singole fibre, è stata osservata la superficie delle fibre in ambedue le condizioni: T_0 , ovvero non trattate, e T_1 , sottoposte a immersione in mare di 7 mesi. In generale, non sono state evidenziate particolari differenze di qualità superficiale in relazione al trattamento (**Fig. 5.6**). Sia nelle fibre T_0 (**Fig. 5.7**) che nelle fibre T_1 (**Fig. 5.8**) è stata osservata una superficie a tratti irregolare, con rilievi evidenti e fratture. Inoltre, sulle fibre T_1 è stata riscontrata la presenza di microrganismi marini, tra cui alcuni frustuli di diatomee.

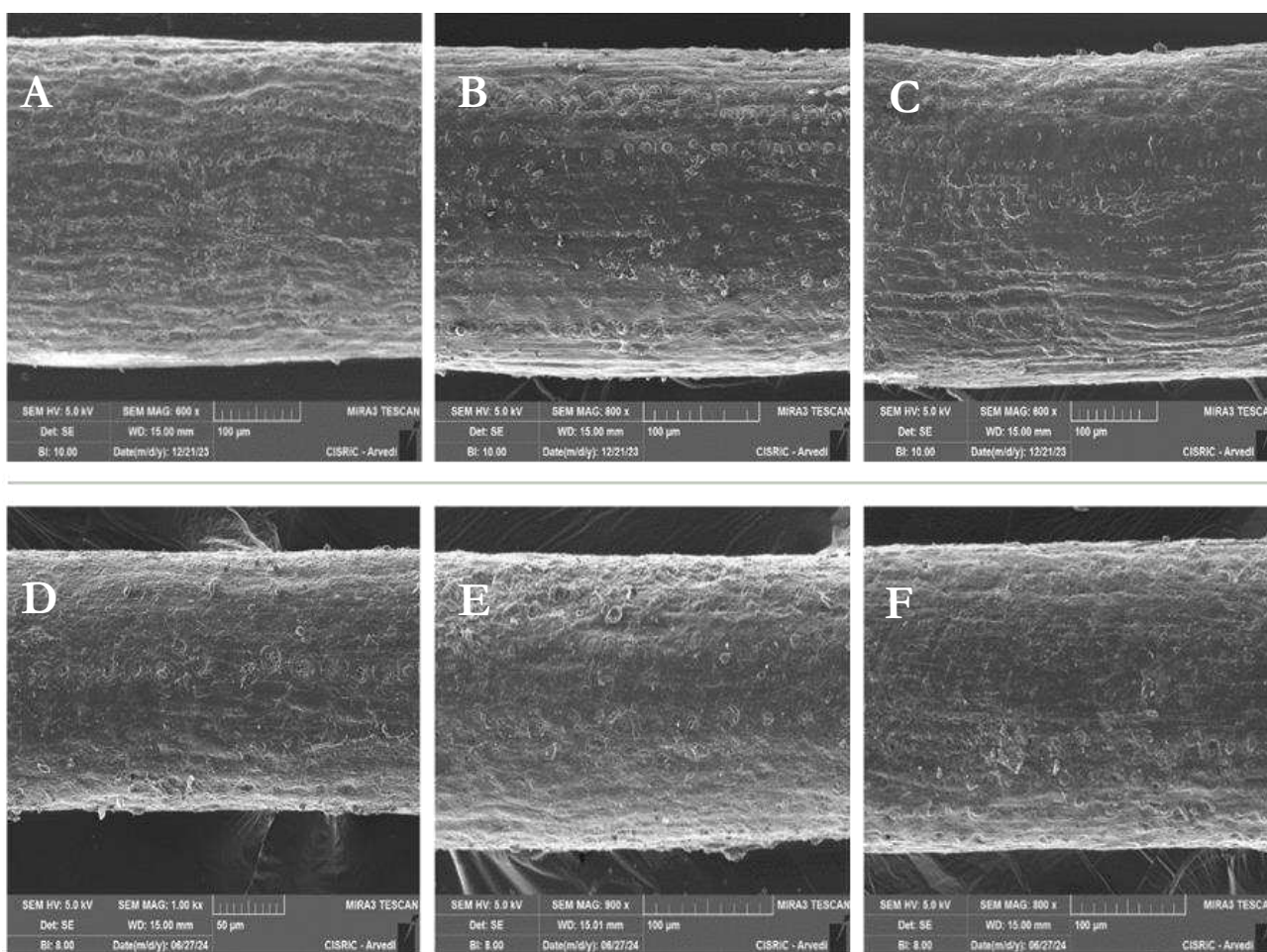


Figura 5.6. Immagini al SEM della superficie ordinaria delle fibre T_0 (A, B, C) e T_1 (D, E, F), acquisite ad ingrandimenti variabili per le singole fibre.

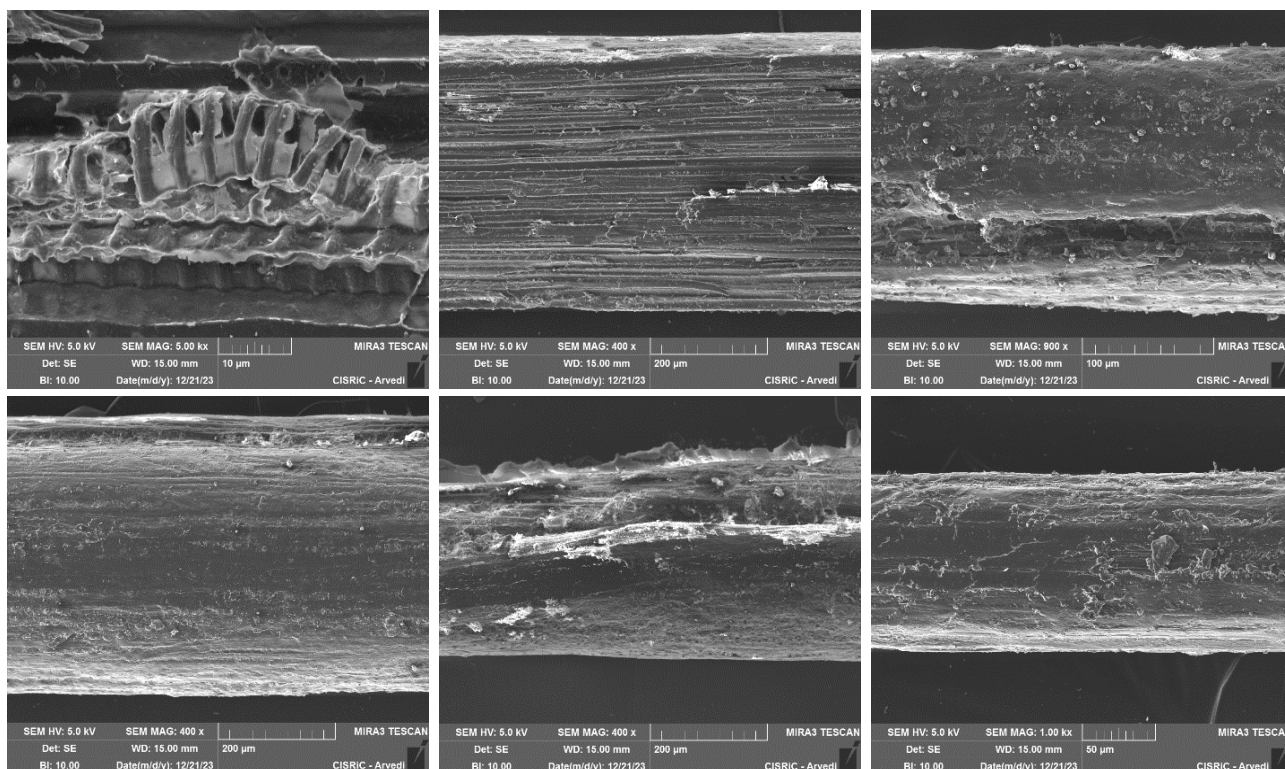


Figura 5.7. Immagini al SEM di fibre T_0 che mostrano alcune irregolarità presenti sulla superficie.

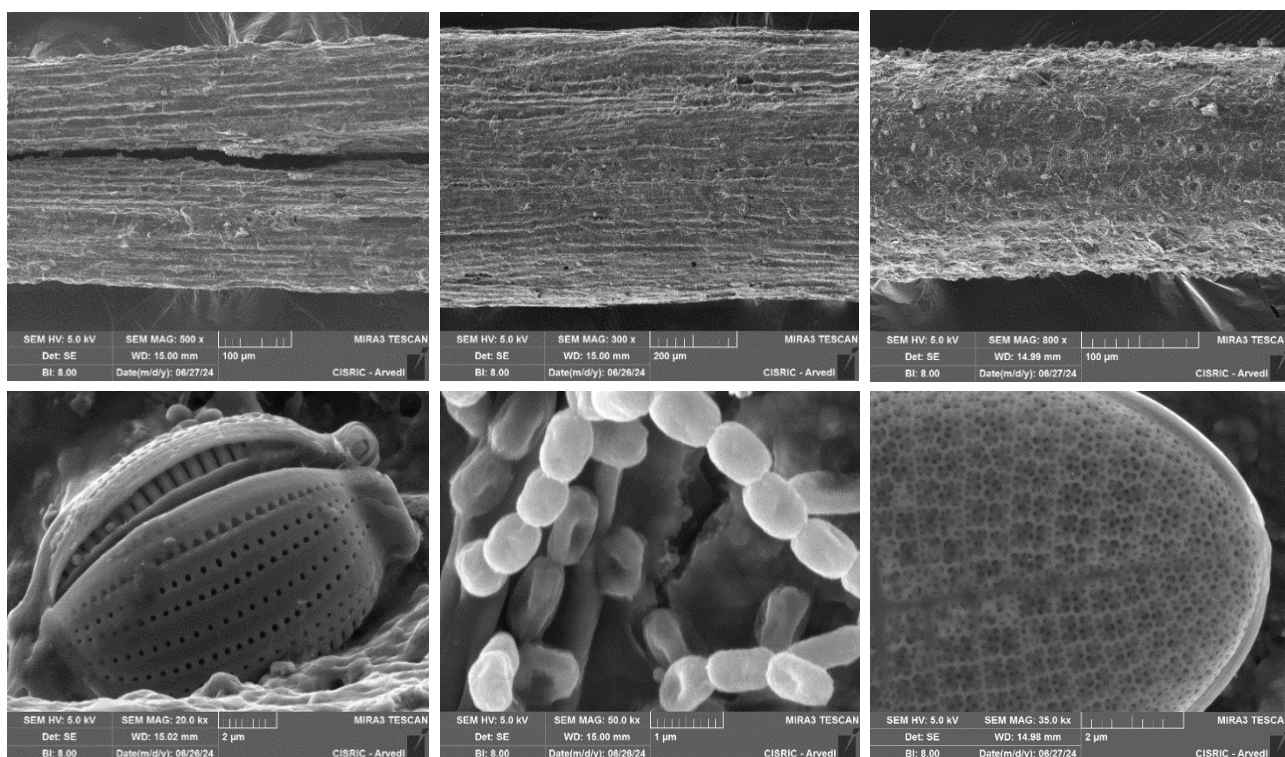


Figura 5.8. Immagini al SEM di fibre T_1 che mostrano alcune irregolarità e diversi microrganismi sulla superficie.

L'analisi al SEM ha permesso, inoltre, di effettuare le misurazioni del diametro delle fibre (**Fig. 5.11**) e di confermare la classificazione dimensionale effettuata allo stereomicroscopio; dai risultati è emersa una forte variabilità di diametro tra diverse fibre appartenenti alla stessa categoria dimensionale (*fini - medie - spesse*) (**Tab. 5.9**). Inoltre, in quasi tutti i campioni, la variazione di

spessore è stata osservata anche tra due tratti differenti della stessa fibra, con una differenza massima di 172 μm .

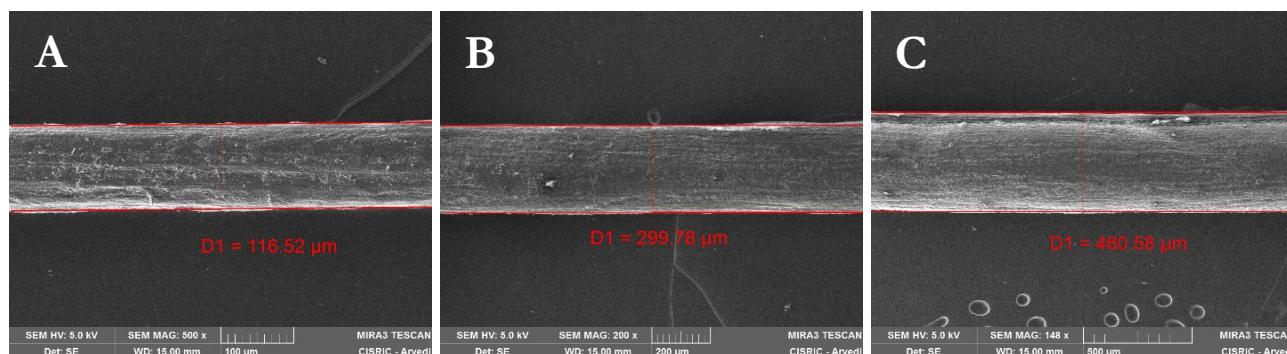


Figura 5.9. Immagini al SEM che mostrano la misurazione del diametro di 3 fibre, una per ogni categoria dimensionale: fine (A), media (B), spessa (C).

Per quanto riguarda le fibre *fini* (FF), sono stati riscontrati valori compresi tra 84,64 e 183,40 μm nella condizione T_0 e tra 153,07 e 274,60 μm nella condizione T_1 . Le misurazioni delle fibre *medie* (FM) hanno prodotto valori compresi tra 181,77 e 360,44 μm nella condizione T_0 e tra 206,38 e 348,45 μm nella condizione T_1 . Infine, nelle fibre *spesse* (FS) sono stati registrati valori compresi tra 347,71 e 572,42 μm nella condizione T_0 e tra 354,06 e 626,47 μm nella condizione T_1 . Come si evince dalla **Tab 5.2**, nella quale vengono riportate le medie delle misurazioni per categoria dimensionale e condizione, i risultati mostrano un leggero aumento di diametro nella condizione T_1 che, considerando la deviazione standard, sembrerebbe trascurabile nelle fibre appartenenti alle categorie *medie* e *spesse*; nelle fibre *fini*, tuttavia, il trattamento in mare potrebbe essere determinante per l'incremento di diametro osservato.

Tabella 5.2. Diametro medio ($\pm$ deviazione standard) per ogni set di campioni, quali: fibre fini non trattate (FF T_0), medie non trattate (FM T_0), spesse non trattate (FS T_0), fini trattate in mare (FF T_1), medie trattate in mare (FM T_1), spesse trattate in mare (FS T_1).

	FF	FM	FS
T₀	136,49 $\pm$ 31,28	271,82 $\pm$ 55,18	460,07 $\pm$ 64,69
T₁	213,84 $\pm$ 34,66	277,42 $\pm$ 52,40	490,27 $\pm$ 92,79

La variazione di diametro osservata è stata valutata tramite l'elaborazione di un modello di regressione lineare con interazione, effettuando un'ANOVA a due fattori di classificazione: la categoria (*fini - medie - spesse*) e la condizione ($T_0 - T_1$). Le assunzioni del modello, quali normalità dei dati, omoschedasticità, normalità dei residui e media di questi significativamente diversa da zero, sono state soddisfatte. Il modello spiega l'81% della variabilità del diametro (*Multiple R - squared* = 0,81) osservata nelle fibre. La classificazione delle fibre secondo il criterio dimensionale è stata confermata: come atteso, l'effetto principale della categoria sul diametro è risultato altamente significativo ($F_{2,54} = 112,516$; $p < 0,001$). È stato osservato, inoltre, un effetto marginalmente significativo del trattamento ($F_{1,54} = 2,996$; $p = 0,089$). L'effetto dell'interazione non è risultato

statisticamente significativo ($F_{2,54} = 1,854$; $p = 0,166$). Dai risultati del modello statistico elaborato, espressi nel dettaglio in **Tab. 5.3**, il diametro delle fibre non sembra generalmente aumentare da T_0 a T_1 , sebbene sia emerso un apparente effetto dell'immersione in mare nelle fibre di tipo *fine*.

Tabella 5.3. Risultati del modello di regressione lineare con interazione che valuta l'effetto della condizione e della categoria sulla variazione di diametro osservata nelle fibre. Nell'intercetta del modello si trovano le fibre fini non trattate ($FF T_0$). I coefficienti stimati nella prima colonna corrispondono agli effetti principali della categoria (FM - fibre medie; FS - fibre spesse), del trattamento (T_1 - fibre trattate in mare) e dell'interazione tra i due fattori ($FM T_1$ - fibre medie trattate in mare; $FS T_1$ - fibre spesse trattate in mare) sul diametro. "SE" indica l'errore standard; "t" indica il rapporto tra la stima e l'errore standard; "p" indica il livello di significatività osservato.

	Stima (μm)	SE	t	p
FF T_0 (intercetta)	136,49	18,60	7,34	1,17e-09
T_1	65,90	26,31	2,51	0,02
FM	135,33	26,31	5,14	3,84e-06
FS	312,08	26,31	11,86	< 2,00e-16
FM : T_1	-49,09	37,21	-1,32	0,19
FS : T_1	-69,73	37,21	-1,87	0,07

A conferma di quanto osservato in precedenza, la **Fig. 5.10** mostra i risultati ottenuti dal modello, suddivisi sulla base della categoria dimensionale e della condizione, che mostrano la variazione osservata nelle fibre *fini*.

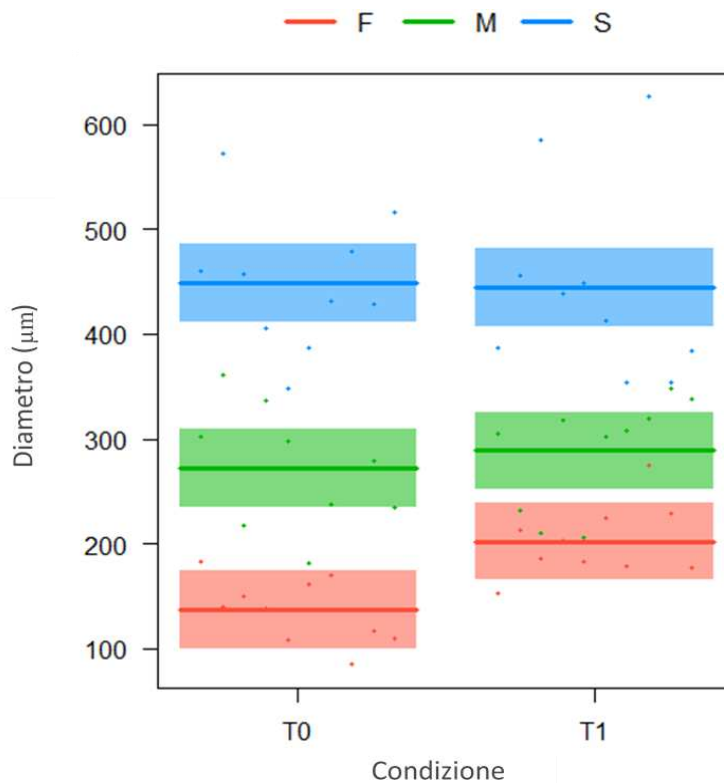


Figura 5.10. Risultati del modello di regressione lineare con interazione che valuta l'effetto della condizione e della categoria sulla variazione di diametro osservata nelle fibre. Confronto tra gli intervalli interquartili (IQR) relativi al modello elaborato: valori del diametro delle fibre fini (F), medie (M), e spesse (S) alle condizioni T_0 e T_1 ; la linea centrale rappresenta la mediana (Q_2).

5.2.2. Prove di Trazione: Fibre di cocco

La rigidità delle fibre di cocco è stata valutata tramite lo svolgimento di test di trazione su provini T_0 (fibre non trattate) e T_1 (fibre trattate in mare), suddivisi nelle 3 categorie dimensionali: *fini* - FF (circa 80 - 200 μm), *medie* - FM (circa 201 - 300 μm) e *spesse* - FS (circa 301 - 600 μm) (si veda paragrafo 4.2: **Fig. 4.4**). La metodologia scelta per la preparazione dei provini, utilizzati nei test di trazione uniassiale, ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti per la maggior parte dei campioni. In pochi casi è stato necessario ripetere il test scartando il campione a causa di una rottura a ridosso degli afferraggi o grave scivolamento del provino. In totale, sono state effettuate 90 prove valide (15 provini per tipologia di fibra: FF T_0 , FM T_0 , FS T_0 , FF T_1 , FM T_1 , FS T_1).

In primo luogo, sono state elaborate le curve *Load (N) - Crosshead (mm)*, calcolate sulla base dei dati estratti al termine delle prove. Esse studiano la relazione tra la forza del carico e lo spostamento della traversa del macchinario. In generale, tutte le curve presentano un evidente “rumore di fondo”, il quale è stato corretto mediante la tecnica della media mobile (*Moving Average*), che permette una migliore visualizzazione dell’andamento delle curve eliminando le fluttuazioni superflue.

Analizzando alcuni provini T_0 e T_1 , sono stati osservati degli evidenti cedimenti nelle curve, corrispondenti a variazioni nette dei valori di *Load* (y) rispetto all’andamento (**Fig. 5.11 - A**); la possibilità di scivolamento del provino è stata esclusa, dato il rigoroso controllo effettuato al termine delle prove. Inoltre, valutando le condizioni dei provini al termine delle prove, sono state osservate diverse rotture di fibre elementari, componenti della fibra tecnica (**Fig. 5.11 - B**).

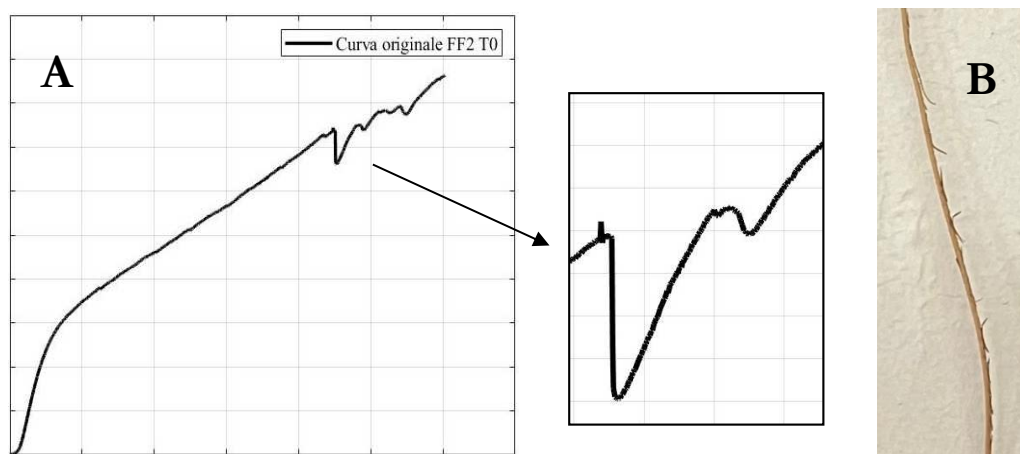


Figura 5.11. Risultati delle prove di trazione. **A:** esempio di cedimento nella curva originale del campione n° 2 appartenente al set di campioni delle fibre fini T_0 ; **B:** evidenza di rottura delle fibre elementari che compongono la fibra tecnica.

Quasi tutte le curve ricavate dalle fibre T_0 e T_1 , per le 3 categorie dimensionali (*fini*, *medie*, *spesse*), sono caratterizzate da un andamento approssimativamente bilineare, presentando un primo tratto lineare di rigidità precedente al punto di gomito, ovvero il punto dove cambia significativamente l’andamento della curva, e un secondo tratto lineare successivo al punto di gomito. Il secondo tratto

termina in concomitanza del punto di rottura che, diversamente da quanto osservato nei pannelli, è ben definito. Tuttavia, per una rappresentazione più chiara, tutte le curve sono state troncate allo stesso valore di x (*Crosshead, Strain*), non viene quindi rappresentato il reale punto di rottura delle fibre, superfluo ai fine dello studio. Alcune curve sembrano presentare valori anomali rispetto alla norma (**Fig. 5.12**). Tuttavia, le uniche curve che mostrano un andamento differente dalla media, ovvero rappresentato da un unico tratto lineare, sono quelle ricavate da fibre *bianche* appartenenti al gruppo delle fibre *fini* trattate in mare (FF T₀).

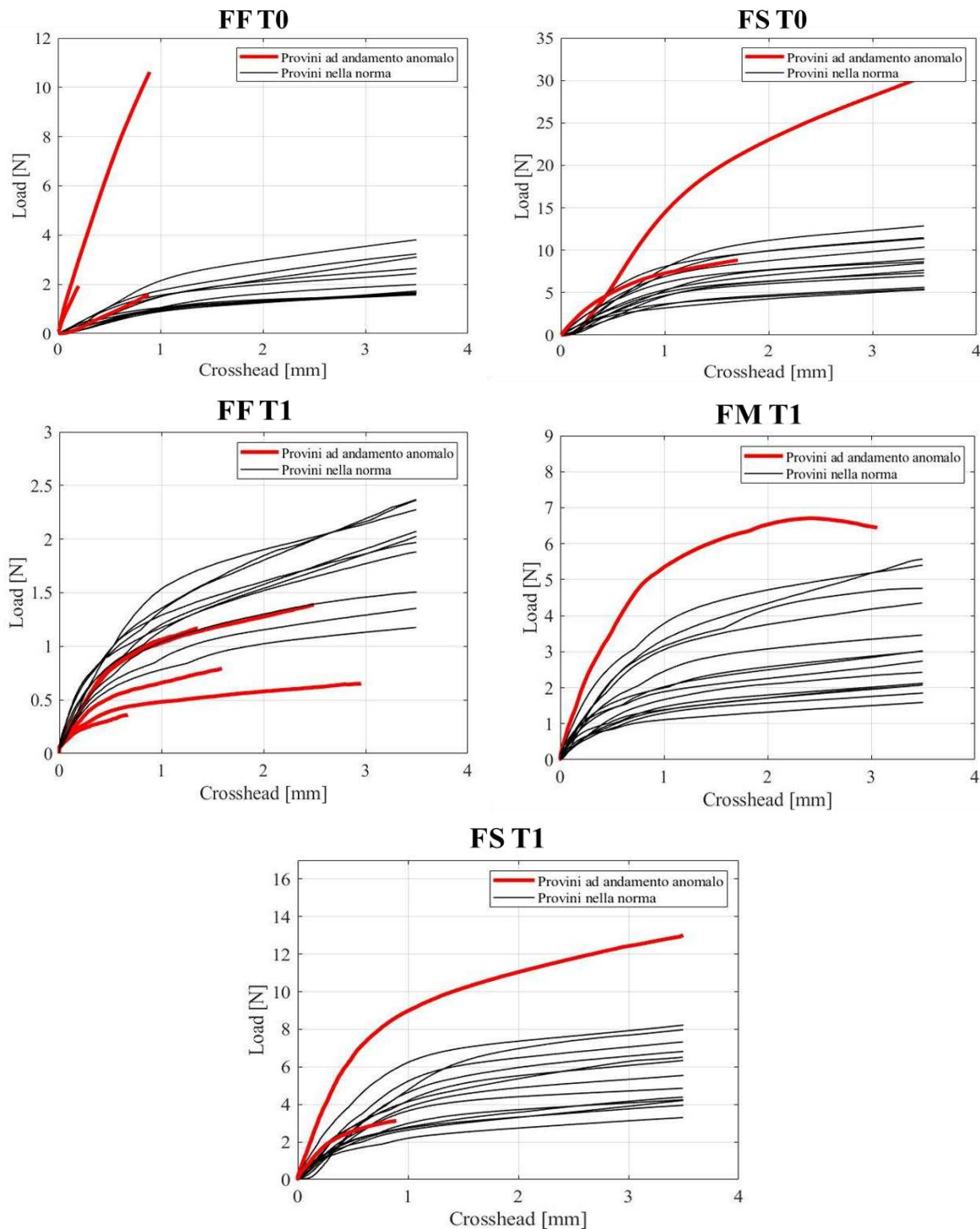


Figura 5.12. Risultati delle prove di trazione: curve Load - Crosshead ricavate dalle fibre FF T₀, FS T₀, FF T₁, FM T₁, FS T₁; in rosso vengono evidenziate le fibre con valori anomali rispetto alla media.

Confrontando le curve ricavate alle tre differenti velocità di spostamento della traversa (2, 4 o 6 mm min⁻¹) utilizzate per le prove, non sono state evidenziate particolari differenze (**Fig. 5.13**). Di conseguenza, questa variabile non è stata presa in considerazione per le analisi successive.

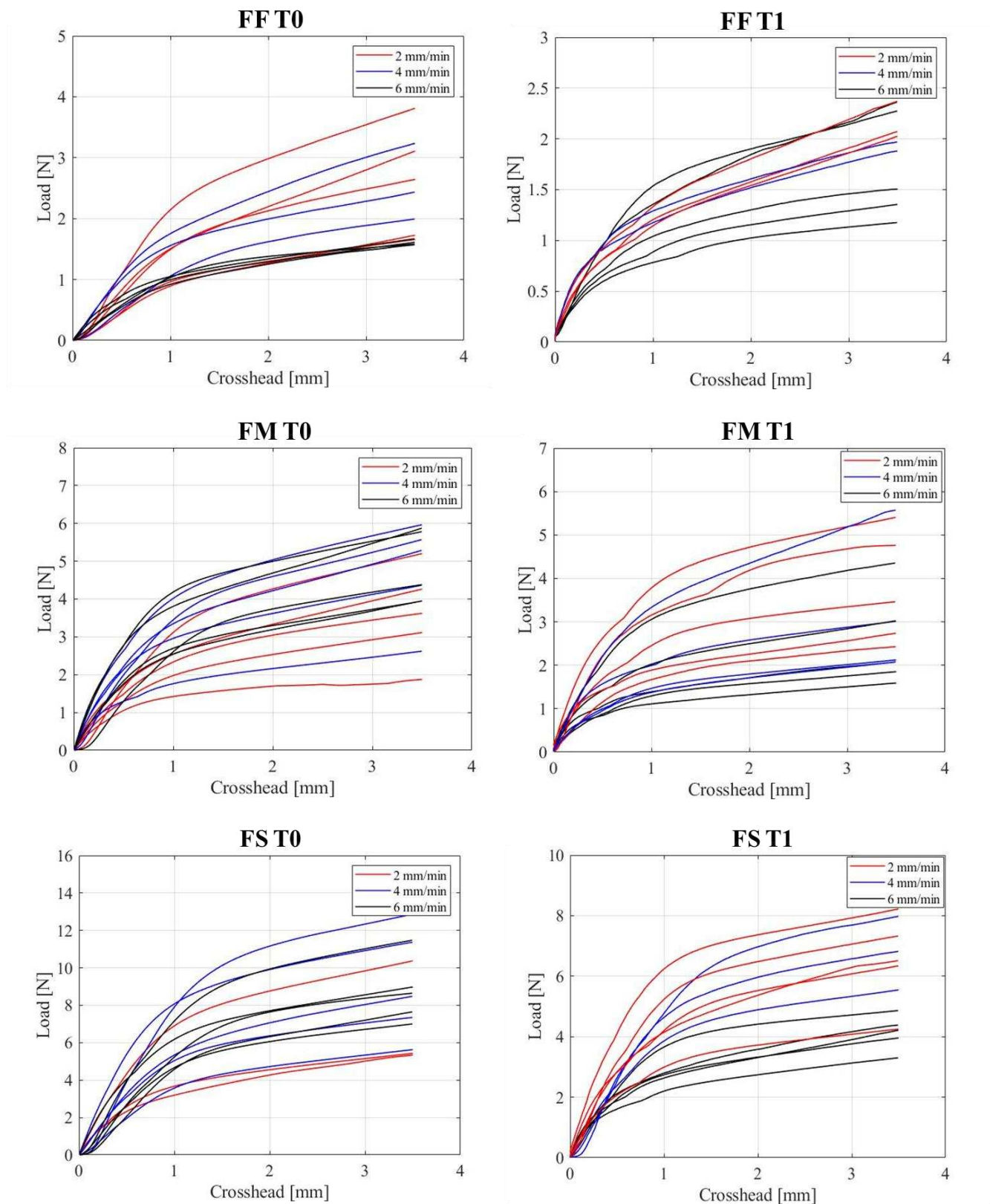


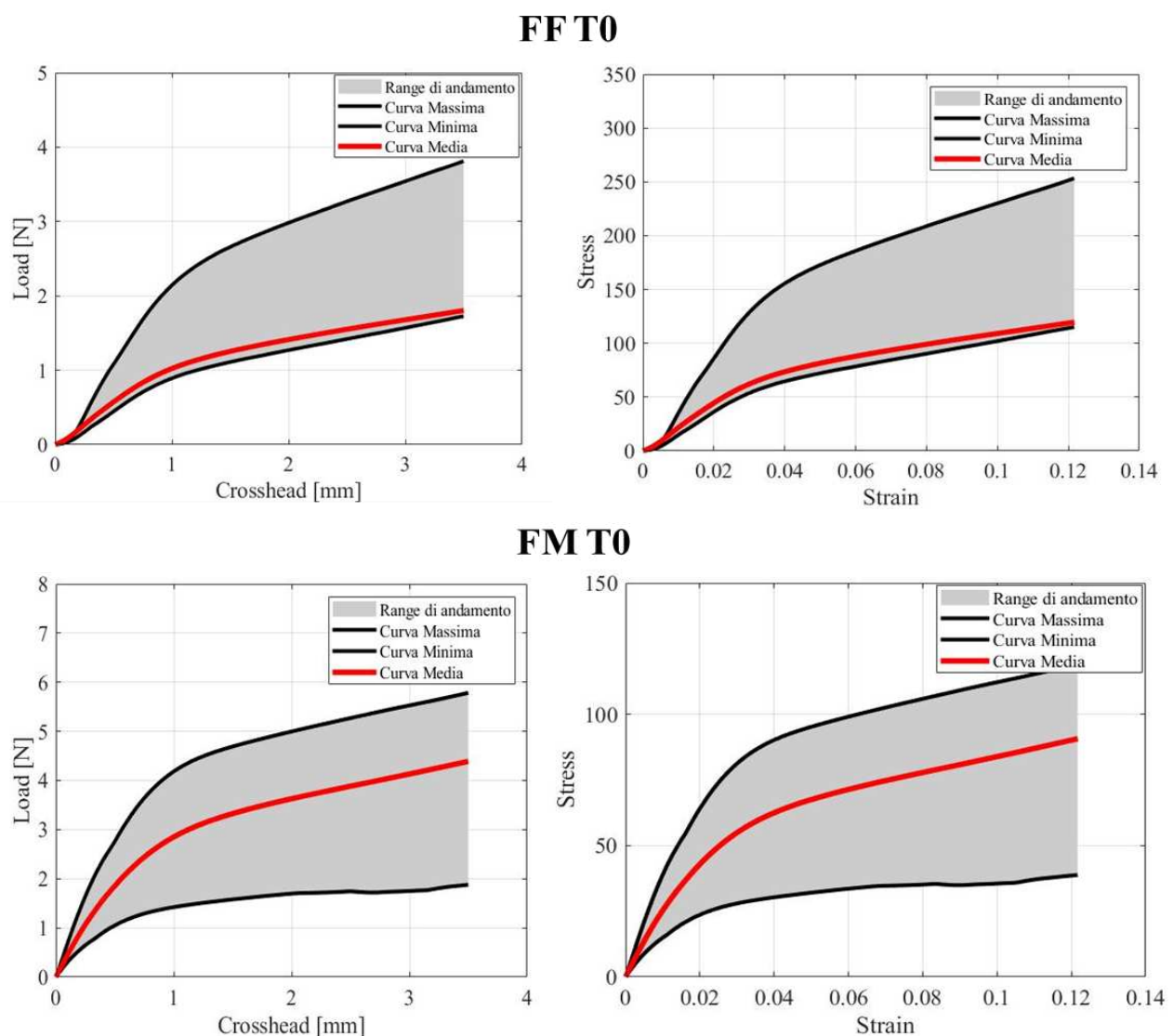
Figura 5.13. Risultati delle prove di trazione: curve Load (y) - Crosshead (x) e Stress (y) - Strain (x) ricavate dalle fibre differenziate per velocità di spostamento della traversa del macchinario: 2 mm min⁻¹ (rosso), 4 mm min⁻¹ (blu), 6 mm min⁻¹ (nero); FF T₀, FM T₀, FS T₀, FF T₁, FM T₁, FS T₁. I provini con andamento anomalo sono stati esclusi da questa rappresentazione grafica.

Al fine dello svolgimento dei calcoli, data l'impossibilità di misurare il diametro di ogni campione, per entrambe le condizioni ($T_0 - T_1$) sono state utilizzate misure standard approssimative (**Tab. 5.4**) in base categoria dimensionale (*fini - medie - spesse*).

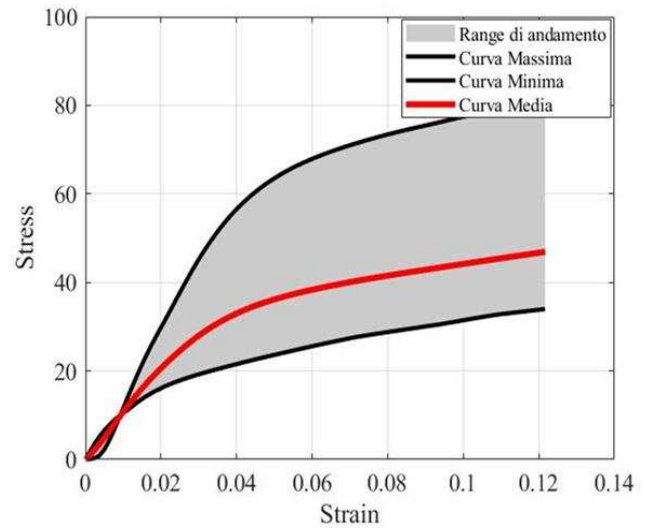
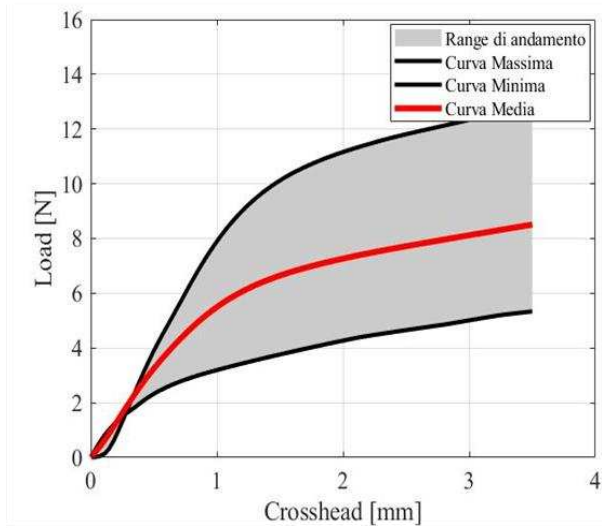
Tabella 5.4. Misure standard iniziali utilizzate per il calcolo delle curve *Stress - Strain*, per le diverse categorie di fibre: *fini (FS), medie (FM) e spesse (FS)*.

	FF	FM	FS
Diametro (mm)	0,140	0,251	0,451
Area della sezione trasversale (mm²)	0,015	0,049	0,159

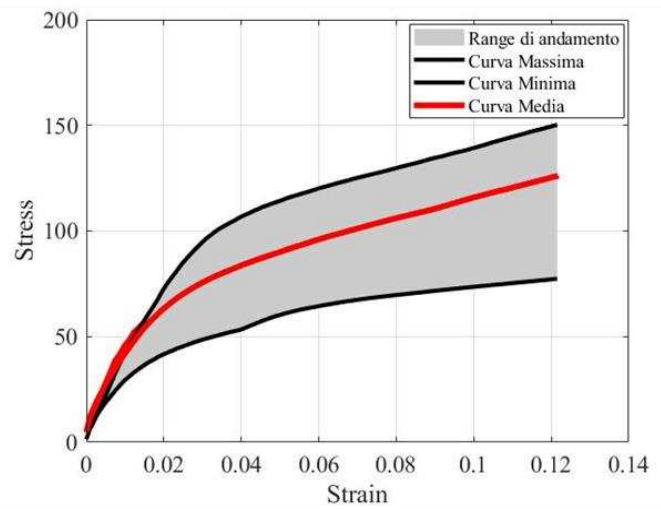
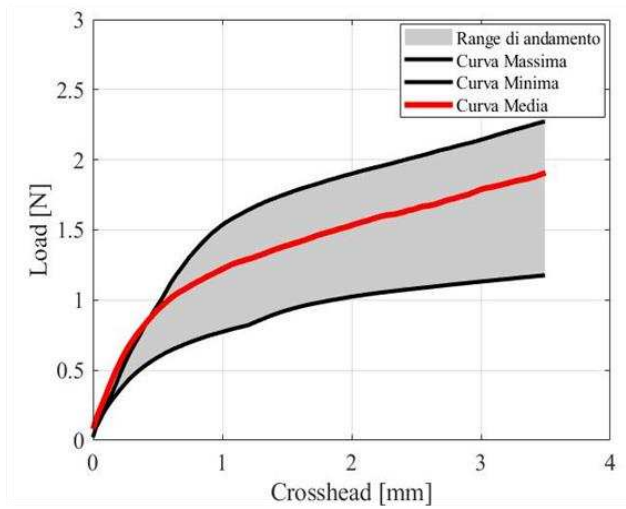
Dalle curve *Load - Crosshead*, state calcolate le curve *Stress - Strain*, utili alla comprensione del comportamento meccanico del materiale, che descrivono la relazione tra lo Sforzo o Tensione nominale (σ) a cui viene sottoposto il provino e la sua e la Deformazione (ϵ). In **Fig. 5.14** vengono rappresentati i range di andamento delle curve *Load - Crosshead* e delle corrispettive curve *Stress - Strain*, per ogni set di campioni.



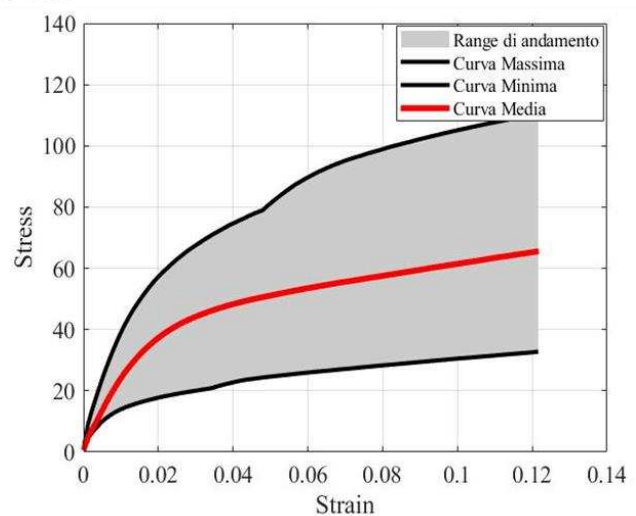
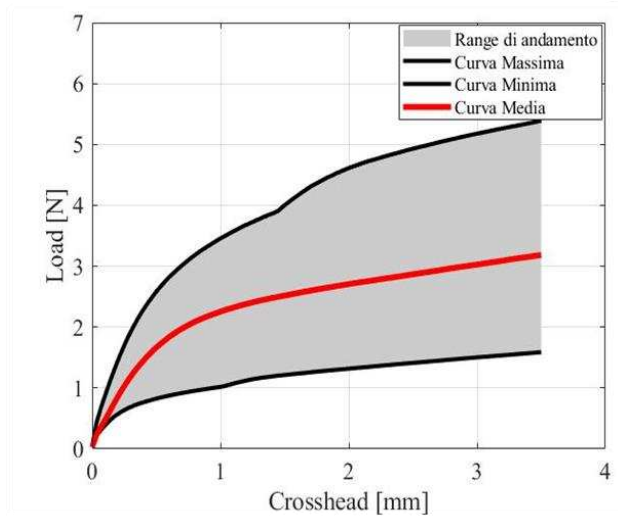
FS T0



FF T1



FM T1



FS T1

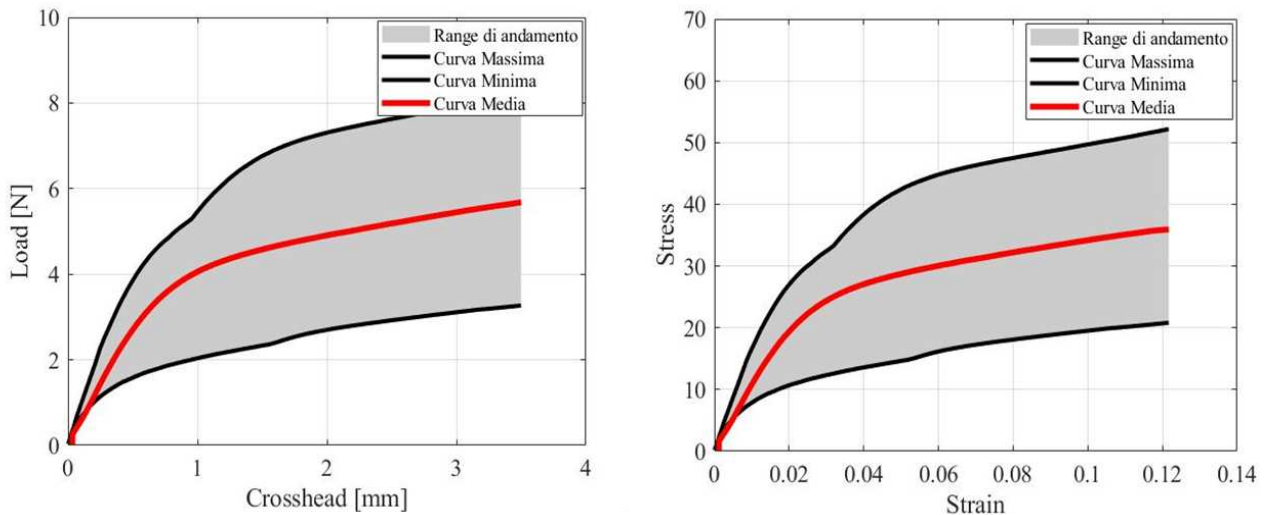


Figura 5.14. Risultati delle prove di trazione in T_0 e T_1 , per le 3 categorie dimensionali: curve Load - Crosshead e Stress - Strain. Media (in rosso), curve minima e massima (in nero); range di andamento (area in grigio). I provini con andamento anomalo sono stati esclusi da questa rappresentazione grafica.

Osservando i grafici, la categoria dimensionale delle fibre sembra influenzarne il comportamento meccanico: a parità di deformazione del provino, i valori di *Stress* risultano maggiori nelle fibre *fini* rispetto alle fibre *medie*, che a loro volta mostrano valori superiori a quelli delle fibre *spesse* (**Fig. 5.15**), suggerendo una maggiore elasticità di queste ultime.

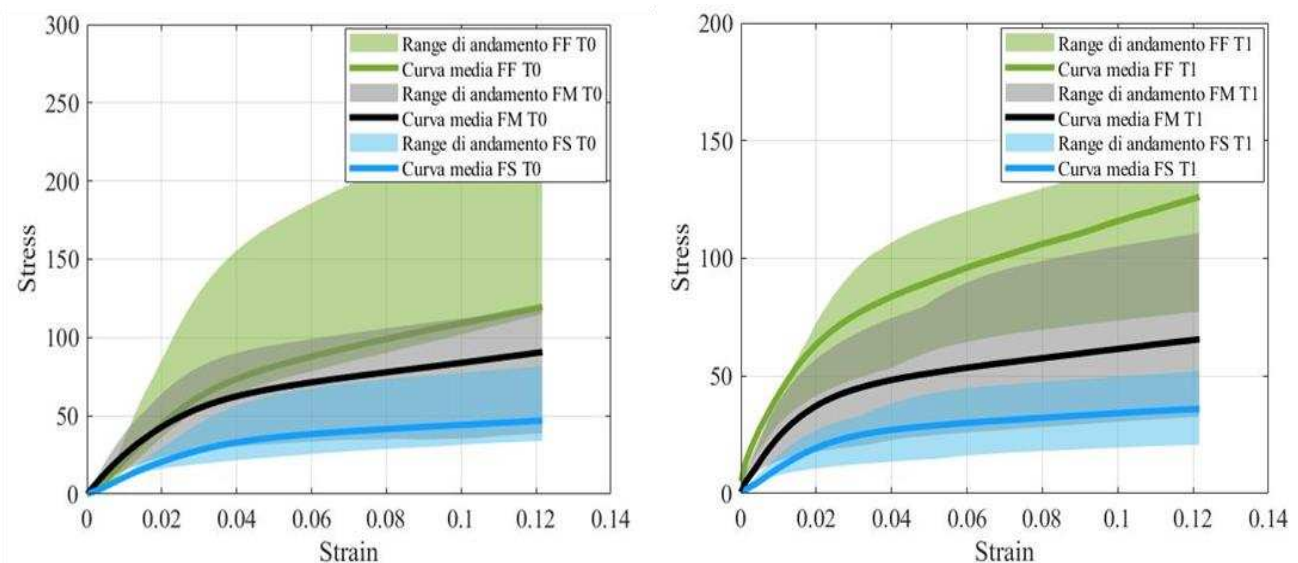


Figura 5.15. Risultati delle prove di trazione: confronto tra le curve medie ed i range di andamento Stress - Strain delle 3 categorie dimensionali di fibre T_0 e T_1 : fini (verde), medie (grigio), spesse (azzurro).

Anche la condizione sembra presentare un effetto sul comportamento meccanico delle fibre: le curve ricavate dalle fibre sottoposte al trattamento in mare (T_1) mostrano valori di *Stress* inferiori rispetto alle fibre non trattate (T_0) (**Fig. 5.16**). Le fibre trattate sembrano quindi presentare una maggiore elasticità rispetto a quelle non trattate.

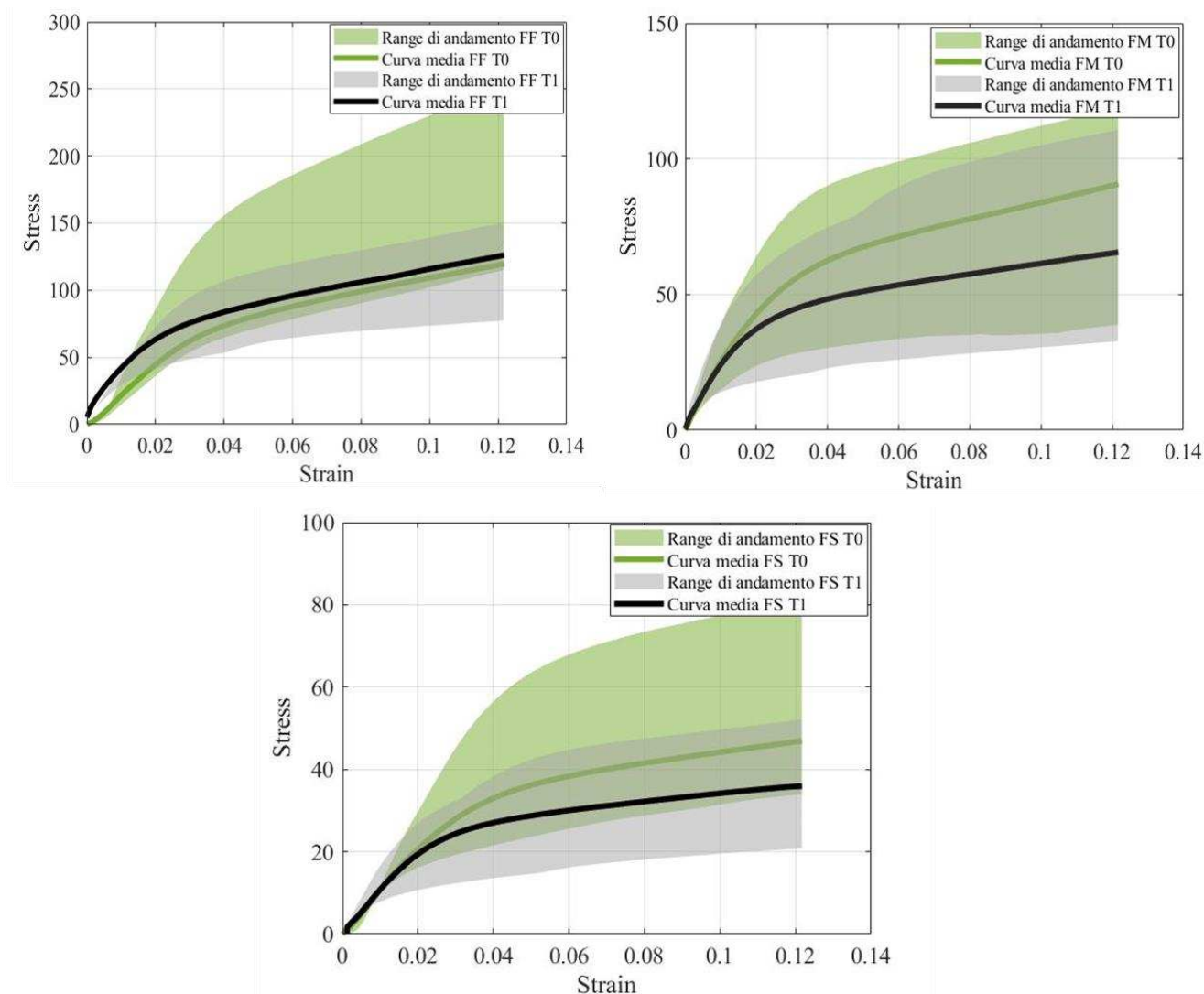


Figura 5.16. Risultati delle prove di trazione: confronto tra le curve medie ed i range di andamento Stress - Strain delle due condizioni di fibre fini, medie e spesse: T_0 (verde) e T_1 (grigio).

I valori medi dei Moduli di Young (E) relativi ai sei gruppi di fibre (**Tab. 5.5**), calcolati ricavando il coefficiente angolare dei tratti lineari delle curve, in accordo con i grafici (**Figg. 5.15 - 5.16**), mostrano una riduzione del modulo elastico all'aumentare del diametro e nelle fibre trattate in mare. Considerando nello specifico la condizione T_0 , nelle fibre *fini* sono stati registrati i valori maggiori, compresi tra 1,08 e 3,95 GPa nel primo tratto e tra 0,25 e 1,84 GPa nel secondo tratto. Seguono le fibre *medie*, con valori compresi tra 0,61 e 2,59 GPa nel primo tratto e tra 0,08 e 0,51 GPa nel secondo. Le fibre *spesse* presentano valori compresi tra 0,39 e 2,80 GPa nel primo tratto e tra 0,12 e 0,92 GPa nel secondo. Per quanto concerne la condizione T_1 , per le fibre *fini* sono stati registrati valori compresi tra 0,58 e 3,11 GPa nel primo tratto e tra 0,18 e 0,79 GPa nel secondo. Le fibre *medie* presentano valori compresi tra 0,33 e 3,71 GPa nel primo tratto e tra 0,11 e 0,49 GPa. Infine, le fibre *spesse* presentano valori compresi tra 0,11 e 1,12 GPa nel primo tratto e tra 0,06 e 0,28 GPa nel secondo.

Tabella 5.5. Valori medi di modulo elastico o Modulo di Young del primo (E1) e del secondo (E2) tratto ($\pm$ deviazione standard) ricavati dalle curve delle fibre fini non trattate (FF T₀), medie non trattate (FM T₀), spesse non trattate (FS T₀), fini trattate in mare (FF T₁), medie trattate in mare (FM T₁), spesse trattate in mare (FS T₁). Questi valori sono stati ottenuti mediante il calcolo dei coefficienti angolari delle rette rappresentative dell'andamento bilineare delle curve ricavate dalle prove di trazione.

	FF	FM	FS
E1 (GPa) T₀	2,39 $\pm$ 0,81	1,62 $\pm$ 0,56	1,13 $\pm$ 0,60
E1 (GPa) T₁	1,98 $\pm$ 0,73	1,17 $\pm$ 0,85	0,58 $\pm$ 0,27
E2 (GPa) T₀	0,70 $\pm$ 0,50	0,32 $\pm$ 0,12	0,24 $\pm$ 0,12
E2 (GPa) T₁	0,48 $\pm$ 0,18	0,22 $\pm$ 0,12	0,11 $\pm$ 0,05

La variazione del Modulo di Young (*E*) osservata è stata valutata elaborando un modello di regressione lineare con interazione, testando mediante un'ANOVA a due fattori di classificazione gli effetti della categoria dimensionale e della condizione sul modulo elastico. Data l'assenza di differenze evidenti tra le curve ricavate a diverse velocità di spostamento della traversa, il fattore "velocità" non è stato considerato nel modello. Inoltre, dal test di correlazione di Pearson tra i valori del modulo elastico del primo e del secondo tratto è emersa una forte correlazione positiva ($r = 0,76$), risultata statisticamente significativa ($t_{87} = 10,847$; $p < < 0,001$); il modello è stato dunque elaborato tenendo conto esclusivamente del modulo ricavato dal primo tratto. Le assunzioni del modello di regressione lineare e dell'ANOVA, quali normalità dei dati, omoschedasticità, normalità dei residui e media di questi significativamente diversa da zero, sono state soddisfatte. Le variabili indipendenti incluse nel modello spiegano il 46% della variazione del modulo elastico (*Multiple R - squared* = 0,46). I risultati dell'ANOVA evidenziano un effetto significativo della condizione ($F_{1,84} = 11,073$; $p = 0,001$) ed altamente significativo della categoria dimensionale ($F_{2,84} = 30,328$; $p < < 0,001$) sul modulo elastico. L'interazione tra le due variabili non è risultata statisticamente significativa ($F_{2,84} = 0,085$; $p = 0,919$). La **Tab. 5.6** riporta nel dettaglio i risultati del modello elaborato.

Tabella 5.6. Risultati del modello di regressione lineare che valuta l'effetto della condizione e della categoria sul modulo elastico del primo tratto delle curve ricavate dalle fibre. Nell'intercetta del modello si trovano le fibre fini non trattate (FF T₀); i coefficienti stimati nella prima colonna corrispondono alle fibre trattate in mare (T₁), medie (FM), spesse (FS), medie trattate in mare (FM T₁) e spesse trattate in mare (FS T₁); "SE" indica l'errore standard; "t" indica il rapporto tra la stima e l'errore standard; "p" indica il livello di significatività osservato.

	Stima (MPa)	SE	t	p
FF T0 (intercetta)	2390,93	172,00	13901	< 2,00e-16
T1	-413,03	243,25	-1,70	0,09
FM	-776,10	243,25	-3,19	< 0,01
FS	-1264,70	243,25	-5,20	1,39e-06
FM : T1	-28,61	344,00	-0,08	0,93
FS : T1	-134,29	344,00	-0,39	0,70

Dal grafico rappresentativo dei risultati del modello (**Fig. 5.17**), che confronta i moduli elastici delle fibre T_0 e T_1 delle 3 categorie dimensionali, in accordo con i risultati ottenuti, si osserva come tutte le categorie dimensionali mostrino una diminuzione del modulo elastico nella condizione T_1 . Le fibre trattate in mare presentano, quindi, una rigidità inferiore rispetto a quelle non trattate. Le fibre spesse, inoltre, si confermano le più elastiche, mentre le fini presentano la rigidità maggiore.

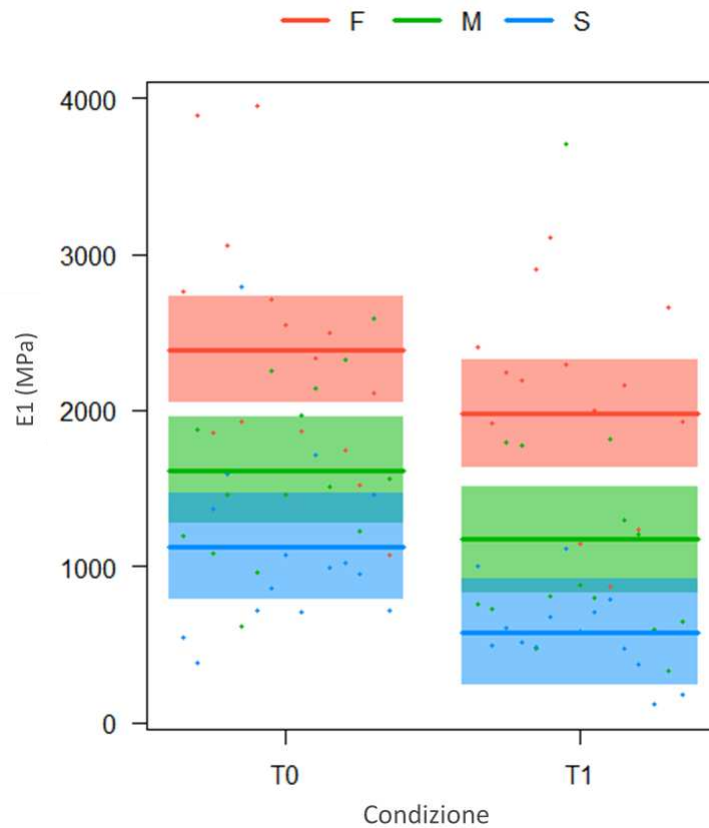


Figura 5.17. Risultati del modello di regressione lineare che valuta l'effetto della condizione e della categoria sul modulo elastico del primo tratto delle curve ricavate dalle fibre. Confronto tra gli intervalli interquartili (IQR) relativi al modello elaborato: valori del modulo elastico delle fibre fini (F), medie (M), e spesse (S) alle condizioni T_0 e T_1 . La linea centrale rappresenta la mediana (Q_2).

5.2.3. Prove di Trazione: Pannelli in fibra di cocco

I campioni presentavano uno spessore iniziale tra 4 e 6 mm, con una sezione iniziale compresa tra 80 e 120 mm². Tutte le 15 prove svolte sono risultate valide, in quanto hanno prodotto una corretta rottura al centro del provino (**Fig. 5.18**).



Figura 5.18. Esempio di corretta rottura di un provino al termine del test di trazione.

Le curve originali ricavate dalle prove presentavano un evidente disturbo o “rumore”. Le irregolarità presenti sono state corrette mediante la tecnica del calcolo della media mobile. Le curve *Load [N]* - *Crosshead [mm]* corrette (**Fig. 5.19**), che mostrano la relazione tra lo Spostamento (x) e la Forza (y), sono state inizialmente differenziate in base alla velocità di esecuzione delle prove (2 - 4 - 6 mm min⁻¹). Per rendere più chiara la rappresentazione delle curve, esse sono state troncate ad un valore fisso di x . Come nel caso delle fibre, non si evidenziano differenze tra le 3 velocità, di conseguenza essa non è stata presa in considerazione per l’elaborazione dei successivi grafici.

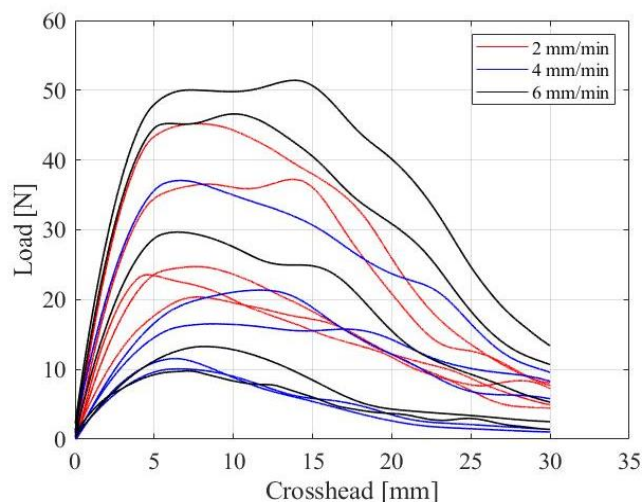


Figura 5.19. Risultati delle prove di trazione: curve *Load* - *Crosshead* ricavate dai 15 provini differenziate per velocità di esecuzione della prova: 2 mm min⁻¹ (rosso), 4 mm min⁻¹ (blu), 6 mm min⁻¹ (nero). Sull’asse delle ascisse viene espresso lo spostamento (*Crosshead*) in millimetri, sull’asse delle ordinate la forza applicata (*Load*) in Newton.

L'andamento generale delle curve (**Fig. 5.20**) è caratterizzato da un tratto di rigidità iniziale lineare, una regione di snervamento centrale “a campana” e un tratto finale di cedimento graduale del provino, privo di un effettivo punto di rottura.

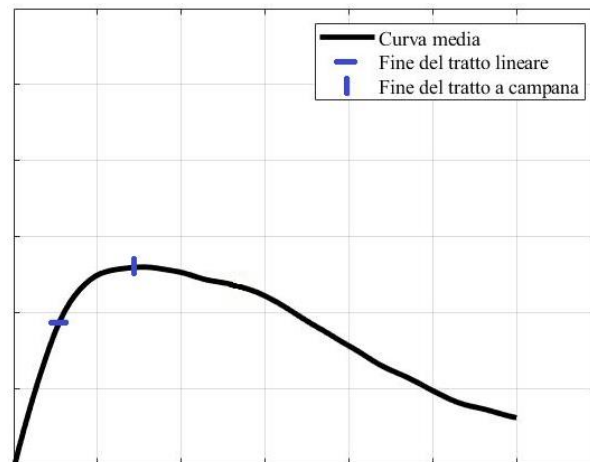


Figura 5.20. Risultati delle prove di trazione: curva Load - Crosshead media suddivisa in tre tratti che mostrano il comportamento del geotessile durante le prove: il primo tratto lineare corrisponde alla rigidità iniziale del materiale, il secondo tratto “a campana” indica la fase di snervamento e l’ultimo tratto equivale al cedimento graduale del provino.

Nella **Fig. 5.21** vengono rappresentate le curve Load - Crosshead e Stress - Strain minima, massima e media; l’area evidenziata mostra l’andamento complessivo delle 15 prove svolte. I 15 provini mostrano valori massimi di Load e Stress piuttosto variabili: la forza massima applicata ai provini varia approssimativamente da 10 a 52 N, mentre lo sforzo massimo raggiunto varia da 0,10 a 0,52.

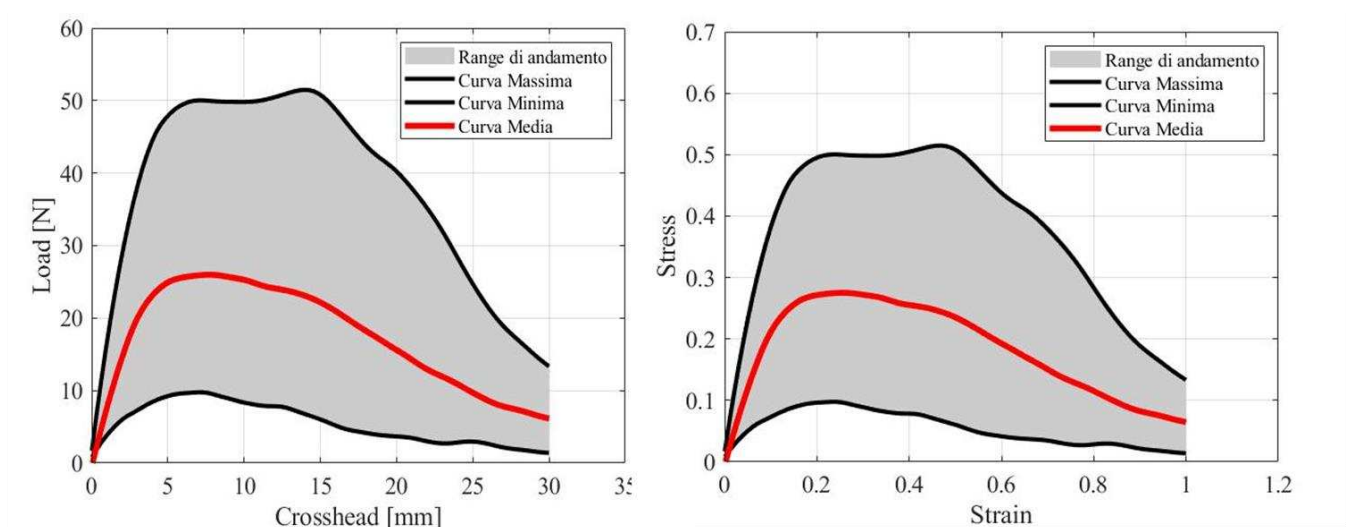


Figura 5.21. Risultati delle prove di trazione: curve Load - Crosshead e Stress - Strain media (in rosso), minima e massima (in nero). L’area in grigio mostra il range di andamento.

I moduli elastici (E) ricavati dai 15 provini riflettono la variabilità osservata nei grafici: i valori ottenuti sono compresi tra un minimo di 0,60 MPa e un massimo di 2,91 MPa. Il valore medio risulta pari a $1,65 \pm 0,84$ MPa.

5.3. Valutazione della fibra di cocco come Acidificante Ambientale

La valutazione del potenziale acidificante della fibra di cocco in mare è stata effettuata valutando le variazioni di pH in ambiente controllato a temperatura costante, in relazione a diverse concentrazioni di fibra. Durante i 3 mesi di esperimento sono stati effettuati 5 rilevamenti di pH e temperatura nelle beute contenenti pannelli di cocco immersi in acqua di mare: le prime misurazioni sono state effettuate un'ora dopo l'allestimento dell'unità sperimentale (T_0) mentre le successive sono state eseguite al 15°, 30°, 60° e 90° giorno (rispettivamente: T_{15} , T_{30} , T_{60} , T_{90}). La temperatura registrata è compresa tra i 19 e i 23°C. Le 3 condizioni testate sono state le seguenti: assenza di fibra di cocco (*control* - CTRL), bassa concentrazione di fibra (*low fiber* - LF; 4 pannelli = 392 cm² / 2 L) e alta concentrazione di fibra (*high fiber* - HF; 2 pannelli = 784 cm² / 2 L).

Nel tempo, il range di pH registrato ha seguito un trend decrescente in tutti i trattamenti, controllo compreso, sebbene con andamento irregolare (**Tab. 5.7**). I valori osservati in presenza di fibra sono generalmente inferiori rispetto a quelli osservati nel controllo con sola acqua. I valori più bassi vengono raggiunti nella condizione HF, suggerendo un'influenza della concentrazione sulla variazione osservata.

Tabella 5.7. Range di pH misurati nelle tre condizioni sperimentali testate: assenza di fibra (*control* - CTRL), bassa concentrazione di fibra (*low fiber* - LF) e alta concentrazione di fibra (*high fiber* - HF). In tutto sono stati eseguiti 5 rilevamenti nell'arco di 3 mesi, dei quali il primo ad un'ora dall'inizio dell'esperimento (T_0) e i successivi al 15°, 30°, 60° e 90° giorno (T_{15} , T_{30} , T_{60} , T_{90}). Nella tabella vengono riportati i valori basati sulle singole misurazione effettuate (3 repliche per ogni beuta); al fine delle analisi, successivamente sono state condensate calcolando la media per ogni beuta.

	T_0	T_{15}	T_{30}	T_{60}	T_{90}
CTRL	8,072 - 8,101	7,817 - 7,897	7,907 - 7,953	7,538 - 7,596	7,737 - 7,800
LF	7,323 - 7,417	7,237 - 7,367	7,316 - 7,446	7,190 - 7,237	7,094 - 7,249
HF	7,094 - 7,424	7,096 - 7,953	7,046 - 7,153	6,935 - 7,068	6,830 - 7,206

Per valutare la variazione del pH osservata è stato elaborato un modello di regressione lineare misto con interazione, effettuando un'ANOVA mista di tipo III. Il modello include due fattori fissi (tempo, condizione) ed un fattore random (beuta). Le assunzioni del modello di regressione lineare e dell'ANOVA, quali normalità dei dati, omoschedasticità, normalità dei residui e media di questi significativamente diversa da zero, sono state soddisfatte. I risultati dell'ANOVA hanno mostrato un effetto altamente significativo del tempo ($F_{4,31} = 30,335$; $p < 0,001$), a conferma del trend decrescente osservato in tutte le condizioni, e del trattamento sperimentale ($F_{2,31} = 315,222$; $p < 0,001$) sul pH: il decremento osservato nel tempo si è mostrato più marcato in presenza della fibra. Inoltre, l'interazione tra i due fattori è risultata statisticamente significativa ($F_{8,31} = 3,373$; $p = 0,010$): la riduzione dei valori di pH è risultata significativamente maggiore nelle beute ad elevate concentrazioni di fibra (**Tab. 5.8**).

Tabella 5.8. Risultati del modello di regressione lineare che valuta l'effetto della concentrazione di fibra e del tempo sul pH dell'acqua. Nell'intercetta del modello si trova la condizione control ad un'ora dall'inizio dell'esperimento (CTRL T₀); i coefficienti stimati nella prima colonna corrispondono ai giorni trascorsi (T₁₅, T₃₀, T₆₀, T₉₀), alle due condizioni valutate (low fiber - LF, high fiber - HF) e all'interazione tra i fattori tempo e condizione (LF:T₁₅, LF:T₃₀, LF:T₆₀, LF:T₉₀, HF:T₁₅, HF:T₃₀, HF:T₆₀, HF:T₉₀); "SE" indica l'errore standard; "t" indica il rapporto tra la stima e l'errore standard; "p" indica il livello di significatività osservato.

	Stima	SE	t	p
CTRL T₀ (intercetta)	8,083	0,041	196,088	< 2,000e-16
T₁₅	-0,222	0,056	-3,995	0,001
T₃₀	-0,152	0,056	-2,740	0,011
T₆₀	-0,515	0,056	-9,270	2,120e-9
T₉₀	-0,312	0,056	-5,627	8,590e-6
LF	-0,707	0,058	-12,136	6,920e-13
HF	-0,804	0,058	-13,804	2,820e-14
LF : T₁₅	0,145	0,079	1,846	0,077
LF : T₃₀	0,159	0,079	2,025	0,054
LF : T₆₀	0,350	0,079	4,463	1,000e-4
LF : T₉₀	0,125	0,079	1,591	0,125
HF : T₁₅	0,067	0,079	0,856	0,400
HF : T₃₀	-0,015	0,079	-0,191	0,850
HF : T₆₀	0,251	0,079	3,195	0,004
HF : T₉₀	0,034	0,079	0,427	0,673

In aggiunta alle osservazioni precedenti, dalla Fig. 5.22, contenente i risultati ottenuti dal modello, si può notare come vi sia un evidente scostamento tra i valori di pH registrati nel controllo (C) e quelli osservati in presenza di fibra (LF, HF) al tempo T₀, ovvero ad un'ora dall'avvio dell'esperimento. Esso rimane tuttavia relativamente costante nelle successive misurazioni, suggerendo un effetto acidificante limitato nel lungo periodo. Inoltre, considerando l'andamento di ambedue le condizioni LF e HF rispetto al controllo, la fibra sembra avere un effetto stabilizzante sul pH nel lungo periodo. Infine, l'andamento del controllo risulta diverso dall'atteso, in quanto non lineare e con un trend decrescente, nonostante l'accurata sterilizzazione effettuata, la temperatura relativamente costante e la presenza di aeratori. Ciò suggerisce la presenza di ulteriori fattori esterni al modello in grado di influenzare il pH.

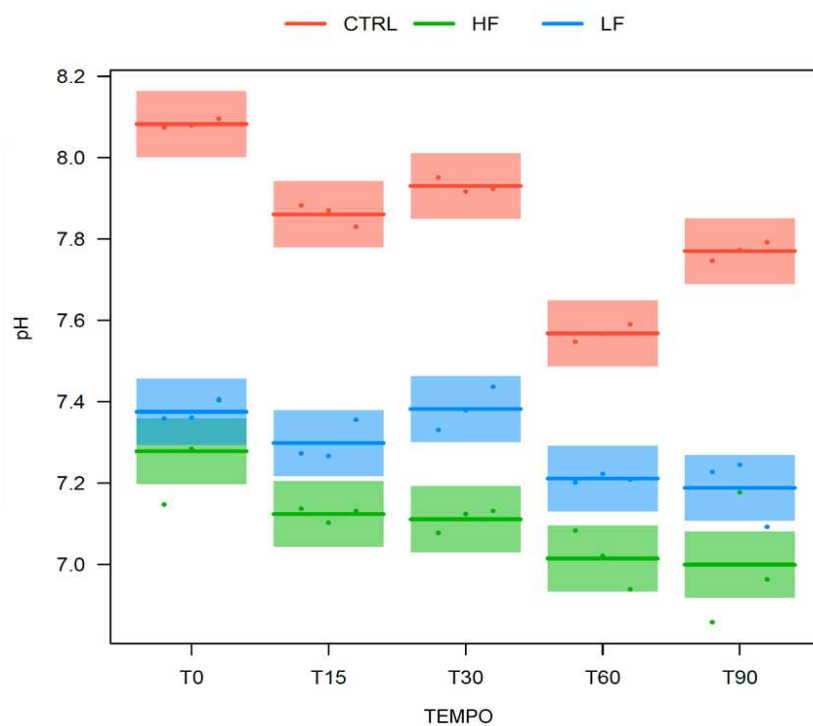


Figura 5.22. Risultati del modello di regressione lineare che valuta l'effetto della concentrazione di fibra e del tempo sul pH dell'acqua. Andamento del pH dell'acqua nel tempo, nelle 3 condizioni: control - CTRL (rosso), low fiber - LF (azzurro) e high fiber - HF (verde). Il tempo viene indicato sottoforma di giorni trascorsi dalla partenza dell'esperimento, con i seguenti codici: T₀ (1 h), T₁₅ (15 gg.), T₃₀ (30 gg.), T₆₀ (60 gg.), T₉₀ (90 gg.). Tutti i valori derivano dalla media delle 3 repliche sperimentali di ogni beuta, per un totale di 3 misurazioni per ogni condizione e campionamento.

6. DISCUSSIONI

Questo studio ha permesso per la prima volta di osservare le performance ecologiche e tecniche della fibra di cocco in ambiente marino. Negli ultimi anni, diversi studi hanno evidenziato gli effetti negativi sull'ambiente da parte di componenti chimiche e plastiche presenti all'interno dei materiali sintetici (Wiewel & Lamoree, 2016; Prambauer *et al.*, 2019). Questo vale anche per le fibre sintetiche utilizzate per la produzione di geotessili, ormai di largo impiego in diversi settori, tra cui quello costiero (Breccianoli & Onori, 2008). Nell'ottica di una maggiore sostenibilità ambientale, le fibre naturali, tra cui la fibra di cocco, offrono una valida alternativa (Hasan, 2020). L'impiego della fibra di cocco in ambiente marino è però ancora limitato, nonostante la noce di cocco, frutto da cui viene estratta, sia adattata a resistervi a lungo. Di conseguenza, anche le informazioni sull'argomento sono scarse in letteratura scientifica. La conoscenza delle prestazioni eco-biologiche, fisico-meccaniche e chimiche della fibra in ambiente marino è fondamentale per permetterne uno sfruttamento ottimale. In questo studio, dunque, sono state valutate: la capacità di reclutamento *biofouling* del substrato in fibra di cocco, la resistenza della fibra a lunghi periodi di immersione in mare ed il potenziale di acidificazione in ambienti marini chiusi. Data l'assenza di un protocollo scientifico consolidato per la valutazione del danno subito in ambiente marino, sono state effettuate delle analisi al microscopio elettronico a scansione (SEM) per valutare eventuali modalità di deterioramento superficiale delle fibre e/o variazioni di dimensione, in associazione a prove di trazione uniassiale sul geotessile e sulle singole fibre, per studiare le proprietà meccaniche del materiale.

Gli ambienti costieri sono ormai ricchi di infrastrutture costruite per diversi scopi, come la protezione dei litorali, l'acquacoltura e le attività ricreative (Dugan *et al.*, 2011; Morris *et al.*, 2018). In accordo con il principio di base dell'eco-ingegneria, secondo cui i substrati naturali e tridimensionali complessi favoriscono la biodiversità locale rispetto a quelli bidimensionali semplici, l'utilizzo di substrati in fibra di cocco potrebbe rappresentare un'alternativa valida per incrementare il reclutamento di specie (Johnson *et al.*, 2003; Chapman, 2003; Kostylev *et al.*, 2005; Morris *et al.*, 2018). Le aree antropizzate sono però spesso vulnerabili all'introduzione di specie non indigene (NIS), che vengono trasportate da un porto all'altro mediante le acque di zavorra e le incrostazioni degli scafi (Costello *et al.*, 2022). Per questo motivo, nella scelta dei materiali da utilizzare è importante tenere conto della selettività di questi ultimi, preferendo substrati che non favoriscono la colonizzazione da parte di NIS. Ad oggi, tuttavia, sono ancora poche le informazioni disponibili sull'argomento e non è ancora chiaro quali materiali siano in grado di favorirne o contrastarne l'insediamento (Glasby *et al.*, 2007; Dafforn *et al.*, 2009; Morris *et al.*, 2018).

I pannelli in fibra di cocco analizzati in questo studio sembrano mostrare una buona capacità di reclutamento *biofouling*: la struttura del geotessile ha permesso una colonizzazione stratificata da

parte di diverse specie sessili durante i 3 mesi di immersione al porto di Fezzano (SP), in accordo con precedenti studi che dimostrano come substrati naturali e tridimensionali favoriscano la biodiversità (Johnson *et al.*, 2003; Chapman, 2003; Kostylev *et al.*, 2005; Morris *et al.*, 2018). Per confermare queste ipotesi nell'area di studio e valutare la capacità del substrato di incrementare la biodiversità locale, in futuro, sarebbe necessario un confronto standardizzato con la comunità sviluppatasi su altri materiali. Ad esempio, seguendo il protocollo SERC, si potrebbero utilizzare come controllo statistico dei pannelli in PVC, per i quali sono già disponibili dati sul reclutamento di specie in diversi anni.

Le comunità insediate sui pannelli è piuttosto omogenea, mostrano un elevato grado di similarità tra loro, sia dal punto di vista della ricchezza in specie (similarità dei 10 pannelli invernali: 60,58%), sia dell'abbondanza (similarità dei 10 pannelli invernali: 75,37%). Quest'ultima risulta leggermente superiore rispetto a quella riscontrata da Tamburini *et al.* (2022), analizzando la comunità sessile sviluppatasi sui pannelli in PVC (71,57%). Tuttavia, il diverso posizionamento dei pannelli ed il periodo di campionamento potrebbero essere stati determinanti per alterare la composizione della comunità sessile.

Come già precedentemente osservato per i pannelli in PVC (Tamburini *et al.*, 2021; Tamburini *et al.*, 2022; Santos-Simón *et al.*, 2024), sui pannelli in fibra di cocco predominano gli organismi con componenti calcaree, quali Annelida e Bryozoa, seguiti dal phylum Tunicata. I phyla Cnidaria, per l'86,67% rappresentato da specie coloniali della classe Hydrozoa, Crustacea e Mollusca sono meno abbondanti (abbondanze relative < 4%) e non presenti in tutti i pannelli.

Le specie riscontrate sui pannelli in fibra di cocco sono per la maggior parte native. Le 8 NIS identificate sono *Paraleucilla magna*, *Hydroides elegans*, *Hydroides dirampha*, *Branchiomma luctuosum*, *Ciona robusta*, *Styela plicata*, *Celleporaria brunnea* e *Tricellaria inopinata*. Ognuna di queste, è stata precedentemente rilevata nel porto di Fezzano, su pannelli in PVC anche trattati con sostanze *anti-fouling*, sui quali, in aggiunta, è stata riscontrata la presenza di *A. verticillata*, non osservata sui pannelli in fibra di cocco (Tamburini *et al.*, 2021; Tamburini *et al.*, 2022; Santos-Simón *et al.*, 2024).

In generale, nel presente studio è stata osservata una minore colonizzazione da parte di NIS (abbondanza relativa complessiva: 23,36%) rispetto ai pannelli in PVC (Tamburini *et al.*, 2021), per i quali sono state riportate abbondanze relative pari a circa il 50%. Sembra quindi che il substrato in fibra di cocco non favorisca la colonizzazione da parte di NIS, come precedentemente osservato nello studio di Morris *et al.* (2018) svolto in Australia, nel quale viene inoltre sottolineato l'incremento di specie native nel tempo ed una diminuzione di NIS. Lo studio di Morris *et al.* (2018), inoltre, confrontando le comunità sessili sviluppatasi in assenza ed in presenza di pannelli in fibra di cocco, ha dimostrato l'effetto significativo di questi sulla riduzione di policheti calcarei, tra cui *H. elegans*. Sulle coste italiane, quest'ultima specie rappresenta una delle NIS più frequenti (Langeneck *et al.*,

2020) e viene classificata come specie invasiva a causa dei danni provocati alla biodiversità ed all'economia (Zenetos *et al.* 2010; Mangano *et al.*, 2012). Per questo motivo potrebbe essere interessante replicare lo studio di Morris *et al.* nel porto di Fezzano, al fine di confermare la tendenza del substrato a limitarne la colonizzazione. Inoltre, per comprendere più approfonditamente la selettività della fibra di cocco, sarebbe necessario condurre uno studio con un'ampia scala temporale, per verificare che le abbondanze non siano influenzate dalla stagionalità (Mangano *et al.*, 2012; Morris *et al.*, 2018). Purtroppo, nel presente studio non è stato possibile confrontare la variabilità stagionale tra la comunità estiva e quella invernale, in seguito alla perdita quasi completa dei pannelli estivi, probabilmente dovuta a fattori legati sia alla struttura dei pannelli sia a fattori biologico-ambientali. Plausibilmente, la struttura del geotessile e la mancanza di agugliatura lo hanno reso non idoneo a sostenere il peso della comunità insediata su di esso. L'insediamento di massicce biomasse di *biofouling* ed in particolare della voluminosa ascidia non-indigena *Styela plicata* sembra infatti essere favorito in primavera-estate, quando la temperatura dell'acqua è ottimale per la riproduzione e la crescita (Mangano *et al.*, 2012); ciò potrebbe quindi essere stato un fattore determinante per la perdita dei pannelli verificatasi esclusivamente in questa stagione. Al contempo, l'azione di predazione da parte di pesci sugli organismi insediati o direttamente sulla fibra (es. *Diplodus sargus*, *Sarpa salpa*, già osservati nell'area: Tamburini *et al.*, 2022) potrebbe aver favorito lo “sfibramento” dei pannelli, contribuendo al cedimento degli stessi. Altri fattori che potrebbero aver influenzato la durata dei pannelli sono le condizioni meteo-marine. Come possibile soluzione, si potrebbe ricorrere all'utilizzo un geotessile in fibra di cocco lavorato mediante il processo di agugliatura, utile per conferire una maggiore compattezza al materiale; tuttavia, questa ipotesi dovrebbe essere confermata da uno studio dedicato.

Grazie alle analisi eseguite al SEM si è potuto osservare un apparente aumento del diametro delle fibre di cocco *fini* prima (T_0) e dopo un'immersione di 7 mesi in acqua di mare (T_1). Dai risultati dell'ANOVA, tale variazione, non riscontrata in altre categorie dimensionali delle fibre, non è risultata statisticamente significativa ($F_{1,54} = 2,996$; $p = 0,089$). Tuttavia, dato il valore di p vicino alla significatività, è possibile supporre che il risultato sia dovuto ad un problema di potenza del modello riconducibile alla *sample size* limitata. A conferma di questa ipotesi, i risultati ottenuti sono contrastanti con la letteratura scientifica, che riporta un aumento del diametro delle fibre fino al 34% in seguito all'assorbimento di acqua (van Dam *et al.*, 2006; Mishra & Basu, 2020). Si può supporre che, nonostante la capacità della fibra di assorbire acqua sia elevata (Tran *et al.*, 2015), in ambiente marino questa non influisca in modo significativo sulle sue dimensioni per quanto riguarda le fibre *medie* e *spesse*, ma sono necessari ulteriori accertamenti per verificare l'eventuale variazione di diametro nelle fibre *fini*.

Osservando le immagini ricavate al SEM, non sembrano esserci discrepanze evidenti tra la qualità di superficie delle fibre T₀ e T₁. Si può ipotizzare che i difetti osservabili siano esclusivamente dovuti alla variabilità e irregolarità che caratterizzano la fibra di cocco e, in generale, le fibre naturali (Mohanty *et al.*, 2000).

Le curve originali elaborate dai dati delle prove di trazione uniassiale presentano un leggero rumore di fondo, riconducibile alla rottura delle fibre elementari che compongono una fibra tecnica od all'eccessiva frequenza di rilevamento del macchinario. Le curve delle fibre T₀, così come quelle delle fibre T₁, presentano un andamento approssimativamente bilineare. Il primo tratto rappresenta la fase di resistenza del provino (*zona elastica*), in cui la deformazione subita è reversibile. Successivamente, il provino inizia a deformarsi irreversibilmente (*zona plastica*), resistendo fino al punto di rottura. Nelle curve sono stati osservati diversi “*cedimenti*”, riconducibili plausibilmente alla rottura di fasci di fibre elementari; l'ipotesi di un eventuale scivolamento del provino viene esclusa, in quanto il corretto posizionamento della fibra e la corretta rottura sono stati verificati al termine di ogni prova. Studiando le curve ricavate dalle prove di trazione delle fibre T₀ e T₁ sono stati individuati alcuni provini distinguibili dalla media; questi, si possono suddividere in tre categorie: provini a tratto lineare unico, provini con rottura anticipata e provini con valori superiori alla media. I tre provini che presentano un unico tratto lineare fino al punto di rottura, sono stati osservati esclusivamente nelle fibre *fini* T₀ e corrispondono alle uniche fibre *bianche* sottoposte alle prove. La differenza di andamento può essere quindi plausibilmente spiegata dalla maturità delle fibre: le fibre *bianche* sono per definizione le più acerbe, caratterizzate generalmente da una minore resistenza alla trazione e una maggiore flessibilità rispetto alle fibre *marroni*, più mature e rigide (Razak *et al.*, 2023). I provini con rottura anticipata e con valori superiori alla media rispettano il comportamento bilineare osservato nelle altre curve; dunque, le differenze sono probabilmente dovute all'alta variabilità tra i singoli campioni (Satyanarayana *et al.*, 1982; Mohanty *et al.*, 2000; Ghosh *et al.*, 2009).

I risultati dell'ANOVA svolta per valutare la variazione del Modulo di Young nelle fibre hanno mostrato un effetto altamente significativo della categoria dimensionale su di esso ($F_{2,84} = 30,328$; $p < 0,001$): viene sottolineata una riduzione della rigidità delle fibre all'aumentare del diametro. Questa differenza potrebbe essere spiegata dalla maggiore quantità di fibre elementari che compongono le fibre *spesse*: la maggiore capacità di deformazione di queste ultime potrebbe riflettere la rottura sequenziale delle singole fibre elementari, che conferisce al materiale un comportamento più elastico. Le fibre *fini*, al contrario, essendo composte da un minor numero di fibre elementari, risulterebbero più rigide e raggiungerebbero più velocemente la rottura. Un'altra ipotesi è che l'invecchiamento delle fibre influisca sulla loro resistenza. I risultati dell'ANOVA hanno evidenziato, inoltre, un effetto significativo del trattamento (l'immersione per 7 mesi in acqua di mare) sul modulo

elastico ($F_{1,84} = 11,073$; $p = 0,001$); in particolare, viene evidenziata una riduzione del modulo elastico. Non essendo emerso alcun effetto significativo dell'interazione tra i fattori "categoria" e "condizione" ($F_{2,84} = 0,085$; $p = 0,919$), si evince che fibre immerse in mare per un certo tempo tendano a ridurre la propria rigidità indipendentemente dalla loro classe dimensionale. Tuttavia, la dimensione ed il trattamento in mare spiegano il 46% della variazione del modulo elastico (*Multiple R - squared* = 0,461): vi sono quindi altri fattori non analizzati che influenzano la rigidità del materiale.

In questo studio, i moduli elastici ottenuti nella condizione T_0 variano da 1,126 GPa nelle fibre *spesse* a 2,391 GPa nelle fibre *fini*. La letteratura scientifica invece riporta che il Modulo di Young della fibra di cocco sia compreso tra 4 e 6 GPa (Gupta, 1991; Mitra, 2002; Methacanon *et al.*, 2010; Wiewel, & Lamoree, 2016; Prambauer *et al.*, 2019). Questa incongruenza potrebbe essere dovuta a diversi fattori in grado di influenzare le proprietà meccaniche delle fibre, quali: la varietà di Palma da cocco ed il metodo di estrazione, la composizione chimica, l'età (Mohanty *et al.*, 2000) e, come dimostrato in questo studio, lo spessore. Rispetto a juta, sisal e alle fibre sintetiche di polipropilene (PP), tra le più utilizzate per la produzione di geotessili, la fibra di cocco si conferma la più elastica (Gupta, 1991; Mitra, 2002; Methacanon *et al.*, 2010; Wiewel, & Lamoree, 2016; Prambauer *et al.*, 2019). La minore rigidità della fibra di cocco la rende idonea a diverse applicazioni, come la produzione di cordami e geotessili, che grazie alla loro versatilità possono trovare facilmente impiego in ambito marino.

A differenza delle singole fibre, i pannelli in fibra di cocco presentano una superficie disomogenea, essendo composti da fibre di dimensioni variabili ed intrecciate tra loro in modo casuale. La prova di trazione uniassiale, è un metodo solitamente utilizzato per materiali omogenei; le curve ottenute sono infatti caratterizzate da un andamento non lineare, con un evidente rumore di fondo, dovuto plausibilmente alla continua rottura delle fibre che compongono i pannelli ed allo "snervamento" di questi. L'andamento delle curve ricavate dai 15 provini è simile, come atteso, data la provenienza di questi ultimi dallo stesso geotessile. Esso è caratterizzato da un primo tratto lineare di resistenza del provino, un tratto centrale "a campana" di snervamento ed un ultimo tratto rappresentativo della fase di cedimento del provino, che sostituisce il classico punto di rottura osservabile nei materiali omogenei. Nonostante l'andamento simile, i 15 provini mostrano valori di *Load*, nonché di *Stress*, molto diversi tra loro; di conseguenza, i moduli elastici ricavati risultano differenti a seconda del campione. Quanto osservato è attribuibile alla disposizione casuale delle fibre che compongono un pannello, ed alla grande variabilità di spessore di queste che, come verificato in questo studio, ne influenza le proprietà meccaniche. In accordo con la letteratura scientifica, il Modulo di Young ottenuto per il geotessile in fibra di cocco ($1,65 \pm 0,84$ MPa) si è dimostrato inferiore rispetto, ad esempio, a materiali sintetici a base di polipropilene (PP), essendo essi composti da fibre

caratterizzate da una maggiore rigidità (Rawal *et al.*, 2010; Prambauer *et al.*, 2019). Gli spazi vuoti tra le fibre dei pannelli contribuiscono a ridurre la rigidità del materiale; il processo di agugliatura, utilizzato per conferire una maggiore compattezza ai geotessili, potrebbe risultare conveniente in caso di applicazioni che richiedano robustezza.

Nell'ottica di un futuro utilizzo in aree portuali, considerati il peso degli organismi che hanno colonizzato i pannelli analizzati in questo studio, l'eventuale pressione di pascolo e le condizioni meteo-marine non sempre ottimali, potrebbe essere più indicato un geotessile avente una trama più fitta. In caso di utilizzo in aree marine aperte vi è da considerare un ulteriore fattore, ovvero la forza di corrente, che potrebbe concorrere a ridurre la durata del materiale. Mentre, in caso di utilizzo in aree non antropizzate, il peso degli organismi potrebbe essere ridotto, garantendo al geotessile una maggiore durabilità a parità degli altri fattori.

La fibra di cocco presenta per natura un pH tendenzialmente acido (Evans *et al.*, 1996; Abad *et al.*, 2002), caratteristica che potrebbe influenzare la sua selettività in termini di reclutamento larvale in ambiente marino. Questa caratteristica potrebbe concorrere a creare un microhabitat in grado di favorire la colonizzazione da parte di organismi più tolleranti, potenzialmente rappresentati da NIS. Inoltre, ipotizzando un utilizzo su larga scala della fibra in mare, studiare il suo potenziale di acidificazione risulta importante per non rischiare di influenzare i processi di acidificazione delle acque, ad oggi già in accelerazione (Doney *et al.*, 2009). Queste condizioni potrebbero risultare amplificate negli ambienti a bassa circolazione, come le aree portuali. Dall'ANOVA svolta per valutare le variazioni di pH dell'acqua in presenza di differenti concentrazioni di fibra, sono emersi effetti altamente significativi della concentrazione di fibra ($F_{2,31} = 315,222$; $p < 0,001$), ma anche un aspetto interessante: il pH si riduce significativamente nel tempo ($F_{4,31} = 30,335$; $p < 0,001$), ma con trend non lineare, in particolare con un drastico calo iniziale già nelle primissime ore di immersione della fibra, seguito da un declino più graduale. L'andamento della condizione *control - CTRL* è differente dall'atteso, in quanto, data la temperatura relativamente costante e gli accorgimenti per ridurre al minimo la carica batterica che avrebbe potuto influenzare il pH, quali l'utilizzo di acqua marina autoclavata, l'attenta sterilizzazione della strumentazione e la continua insufflazione di aria, ci si aspetterebbe di osservare un andamento più lineare. Un'ipotesi che potrebbe spiegare la variazione del pH dell'acqua nel controllo è l'assorbimento di anidride carbonica (CO_2), che porta alla formazione di acido carbonico (H_2CO_3) e alla sua dissociazione in ioni bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}), processo che avviene normalmente anche nell'oceano (Doney *et al.*, 2009). La riduzione del pH nel tempo, inoltre, sembra seguire un andamento simile nelle tre condizioni, suggerendo che la fibra non sia l'unico fattore scatenante. Si può supporre, dai coefficienti stimati dal modello, che la presenza della fibra nel lungo periodo tenda a stabilizzare leggermente il pH rispetto alla sola acqua. Questo potrebbe essere dovuto a sostanze tampone contenute nella fibra o alla crescita

di microrganismi in grado di contrastare l'acidificazione dell'acqua, favorita dalla struttura tridimensionale dei pannelli. Per verificare l'eventuale proliferazione di microrganismi, lo studio potrebbe essere ripetuto misurando la carica batterica prima della partenza e al termine dell'esperimento.

Nell'ottica di un futuro utilizzo della fibra in mare, si può supporre che l'effetto acidificante osservato non rappresenti un rischio per utilizzi su piccola scala, considerando il naturale potere tampone dell'oceano (Doney *et al.*, 2009) ed il ricambio d'acqua, assente in questo esperimento. A favore di questa ipotesi, in letteratura scientifica è stata dimostrata la capacità dei pannelli in fibra di cocco di incrementare la proliferazione algale (Morris *et al.*, 2018) e, in questo studio, il *biofilm* algale è stato osservato in tutti i pannelli immersi nella stagione invernale, con una copertura quasi totale; inoltre, dalle analisi al SEM è stata riscontrata la presenza di *microfouling* sulla superficie delle fibre precedentemente immerse. La crescita di microrganismi sulla fibra potrebbe essere la chiave per contrastare il leggero effetto acidificante osservato. In ogni caso, dato il diverso effetto sul pH rilevato nelle condizioni LF e HF, per ridurre il rischio di alterare il pH locale potrebbe essere necessario dosare la fibra in base ai fattori fisici locali, come ad esempio la presenza di correnti od il grado di rimescolamento della colonna d'acqua: in un'area a basso ricambio di acqua, come ad esempio un porto od un golfo particolarmente riparato, potrebbe essere preferibile immergere una minore concentrazione di fibra. Sono, tuttavia, necessari ulteriori studi per valutare l'interazione della fibra con l'ambiente, prima di confermare la possibilità di utilizzo di questa su larga scala.

7. CONCLUSIONI

In conclusione, la fibra di cocco si è confermata essere una promettente alternativa alle fibre sintetiche per la produzione di geotessili. Tra i vantaggi, oltre alla grande disponibilità, economicità e versatilità, vi è la sostenibilità ambientale. La fibra di cocco è infatti un sottoprodotto della lavorazione dell'olio di cocco (Faruk *et al.*, 2012) e, come le altre fibre naturali, è completamente biodegradabile; inoltre, la coltivazione della Palma da cocco presenta un impatto ambientale relativamente basso (Henrietta *et al.*, 2022). Essendo un sottoprodotto, fino a pochi anni fa, non veniva posta attenzione alla selezione delle fibre in base alla destinazione d'uso, nonostante l'enorme variabilità di caratteristiche correlate alla varietà di Palma da cocco da cui derivano, al metodo di estrazione o alle singole fibre (Jayasekara & Amarasinghe, 2010; Mishra & Basu, 2020). Tuttavia, nella produzione di materiali destinati all'utilizzo in ambiente marino, la scelta delle fibre in base alla funzione che essi sono chiamati a svolgere permetterebbe l'ottenimento di migliori prestazioni. Nell'ottica di un ipotetico utilizzo prolungato in ambiente marino, sarebbe preferibile optare per geotessili prodotti con fibre *marroni*, più mature e rigide rispetto alle fibre *bianche* (Razak *et al.*, 2023), selezionando quelle con un diametro indicativamente inferiore a 200 μm , perché più rigide. Una bassa rigidità delle fibre potrebbe, infatti, provocare un precoce sfibramento del materiale. Per quanto concerne il geotessile analizzato in questo studio, ai fini dell'utilizzo in mare potrebbe essere più indicato migliorarne la struttura, ad esempio incrementandone la compattezza tramite il processo di agugliatura.

La comprensione delle performance della fibra di cocco in ambiente marino offre nuovi scenari di sfruttamento in ambiti portuali, navali ed alieutici. Ciò conferma quanto essa sia ampiamente versatile non solo in campo terrestre, dove il suo sfruttamento è affermato già da molti anni, ma anche in ambito marino, come prospettiva futura. Inoltre, la struttura tridimensionale del pannello in fibra di cocco suggerisce che possa essere idoneo a favorire il reclutamento di comunità macrozoobentoniche nelle aree soggette a forte impatto antropico e dove la biodiversità locale è a rischio. Tuttavia, saranno necessari studi futuri per comprendere se le caratteristiche chimico-fisiche della fibra possano favorire o meno l'insediamento di *biofouling* rispetto ad altri substrati bidimensionali e/o artificiali. In aggiunta, in vista dell'utilizzo della fibra in aree marine antropizzate, quali le aree portuali, sarebbe opportuno valutare la propensione del substrato a reclutare specie NIS in contrapposizione ad altri materiali. Questo studio si è rivelato utile alla comprensione di alcuni aspetti legati all'utilizzo della fibra di cocco in ambiente marino, contribuendo a raggiungere una maggiore consapevolezza al fine di permettere uno sfruttamento ottimale di questo materiale in questo ambiente.

8. BIBLIOGRAFIA

- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., & Noguera, V. (2002). Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource technology*, 82(3), 241-245.
- Álvarez-Mozos, J., Abad, E., Giménez, R., Campo, M. A., Goñi, M., Arive, M., Casalí, J., Díez, J., & Diego, I. (2014). Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss. *Catena*, 118, 168-178.
- Alvarez, V. A., & Vázquez, A. (2004). Thermal degradation of cellulose derivatives/starch blends and sisal fibre biocomposites. *Polymer degradation and stability*, 84(1), 13-21.
- Annunciado, T. R., Sydenstricker, T. H. D., & Amico, S. C. (2005). Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. *Marine pollution bulletin*, 50(11), 1340-1346.
- Arora, M., Dutta, R. K., & Jain, A. (2022). Characterization, durability, and application of treated coir geotextiles in low volume roads. *Journal of Natural Fibers*, 19(12), 4509-4529.
- Ayrilmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P., & White, R. H. (2011). Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications. *Fibers and polymers*, 12, 919-926.
- Beena, K. S. (2013). Case studies on application of coir geotextiles for soil stabilization. *Missouri University of Science and Technology. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 7.
- Beveridge, F. C., Kalaipandian, S., Yang, C., & Adkins, S. W. (2022). Fruit biology of coconut (*Cocos nucifera* L.). *Plants*, 11(23), 3293.
- Bledzki, A. K., Reihmane, S., & Gassan, J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of applied polymer science*, 59(8), 1329-1336.
- Brecciaroli, B., & Onori, L. (2008). Ripristino degli ecosistemi marino-costieri con tecniche di ingegneria naturalistica.
- Brígida, A. I. S., Calado, V. M. A., Gonçalves, L. R. B., & Coelho, M. A. Z. (2010). Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber. *Carbohydrate Polymers*, 79(4), 832-838.

- Cabral, M. M. S., Abud, A. K. D. S., Silva, C. E. D. F., & Almeida, R. M. R. G. (2016). Bioethanol production from coconut husk fiber. *Ciência Rural*, 46, 1872-1877.
- Carlton, J. T., Keith, I., & Ruiz, G. M. (2019). Assessing marine bioinvasions in the Galápagos Islands: implications for conservation biology and marine protected areas. *Aquatic Invasions*, 14(1).
- CEN (2015). Geosynthetics - Part 1: Terms and definitions. EN ISO 10318-1:2015. Brussels, Belgium.
- Chan, E., & Elevitch, C. R. (2006). *Cocos nucifera* (coconut). *Species profiles for Pacific Island agroforestry*, 2(1), 1-27.
- Chang, A. L., Brown, C. W., Crooks, J. A., & Ruiz, G. M. (2018). Dry and wet periods drive rapid shifts in community assembly in an estuarine ecosystem. *Global Change Biology*, 24(2), e627-e642.
- Chapman, M. G. (2003). Paucity of mobile species on constructed seawalls: effects of urbanization on biodiversity. *Marine Ecology Progress Series*, 264, 21-29.
- Chattopadhyay, B. C., & Chakravarty, S. (2009). Application of jute geotextiles as facilitator in drainage. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(2), 156-161.
- Conrad, K. (2008). Correlation between the distribution of lignin and pectin and distribution of sorbed metal ions (lead and zinc) on coir (*Cocos nucifera* L.). *Bioresource technology*, 99(17), 8476-8484.
- Costello, K. E., Lynch, S. A., McAllen, R., O'Riordan, R. M., & Culloty, S. C. (2022). Assessing the potential for invasive species introductions and secondary spread using vessel movements in maritime ports. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113496.
- Dafforn, K. A., Johnston, E. L., & Glasby, T. M. (2009). Shallow moving structures promote marine invader dominance. *Biofouling*, 25(3), 277-287.
- Davies, K., Fullen, M. A., & Booth, C. A. (2006). A pilot project on the potential contribution of palm-mat geotextiles to soil conservation. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 31(5), 561-569.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual review of marine science*, 1(1), 169-192.
- Dugan, J. E., Airolidi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J., Schlacher, T., Wolanski, E., & McLusky, D. (2011). 8.02-Estuarine and coastal structures: environmental effects, a focus on shore and nearshore structures. *Treatise on estuarine and coastal science*, 8, 17-41.

- Ekanayake, G. K., Perera, S. A. C. N., Dassanayake, P. N., & Everard, J. M. D. T. (2010). Varietal classification of new coconut (*Cocos nucifera* L.) forms identified from southern Sri Lanka. *Cocos*, 19, 41-50.
- Evans, M. R., Konduru, S., & Stamps, R. H. (1996). Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience*, 31(6), 965-967.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, 37(11), 1552-1596.
- Gartner, H. N., Murray, C. C., Frey, M. A., Nelson, J. C., Larson, K. J., Ruiz, G. M., & Therriault, T. W. (2016). Non-indigenous invertebrate species in the marine fouling communities of British Columbia, Canada. *BioInvasions Record*, 5(4).
- Gasparini, G. P., Abbate, M., Bordone, A., Cerrati, G., Galli, C., Lazzoni, E., & Negri, A. (2009). Circulation and biomass distribution during warm season in the Gulf of La Spezia (north-western Mediterranean). *Journal of Marine Systems*, 78, S48-S62.
- Ghosh, M., Choudhury, P. K., & Sanyal, T. (2009). Suitability of natural fibres in geotextile applications. *IGC Geotide*, 497-501.
- Glasby, T. M., Connell, S. D., Holloway, M. G., & Hewitt, C. L. (2007). Nonindigenous biota on artificial structures: could habitat creation facilitate biological invasions?. *Marine biology*, 151(3), 887-895.
- Gokarneshan, N. (2023). A Review of Sustainable Approaches in Geo Textiles for Environment Conservation. *Journal of Earth and Environmental Science Research*, 188, 2-12.
- Gupta, A. K. S. (1991). Geotextiles: opportunities for natural-fibre products, vol 27. *International Trade Forum*, 27, 10.
- Hasan, K. M. F., Horváth, P. G., Bak, M., & Alpár, T. (2021). A state-of-the-art review on coir fiber-reinforced biocomposites. *Rsc Advances*, 11(18), 10548-10571.
- Hasan, R. (2020). An overview of geotextiles: industrial application in technical textiles. *J Text Sci Fash Technol*, 4(4).
- Henrietta, H. M., Kalaiyarasi, K., & Raj, A. S. (2022). Coconut tree (*Cocos nucifera*) products: A review of global cultivation and its benefits. *Journal of Sustainability and Environmental Management*, 1(2), 257-264.

- Ignacio, I. F., & Miguel, T. S. (2021). Research opportunities on the coconut (*Cocos nucifera* L.) using new technologies. *South African Journal of Botany*, 141, 414-420.
- Ishikawa, T., Ishii, Y., Nakasone, K., Ohkoshi, Y., & Kyoung Hou, K. (2019). Structure analysis of needle-punched nonwoven fabrics by X-ray computed tomography. *Textile research journal*, 89(1), 20-31.
- Jayasekara, C., & Amarasinghe, N. (2010). Coir - Coconut cultivation, extraction and processing of coir. *Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications*, 197-217.
- Johnson, M. P., Frost, N. J., Mosley, M. W., Roberts, M. F., & Hawkins, S. J. (2003). The area-independent effects of habitat complexity on biodiversity vary between regions. *Ecology letters*, 6(2), 126-132.
- Jurgens, L. J., Bonfim, M., Lopez, D. P., Repetto, M. F., Freitag, G., McCann, L., Larson, K., Ruiz G. M., & Freestone, A. L. (2018). Poleward range expansion of a non-indigenous bryozoan and new occurrences of exotic ascidians in southeast Alaska. *BioInvasions Record*, 7(4).
- Kostylev, V. E., Erlandsson, J., Ming, M. Y., & Williams, G. A. (2005). The relative importance of habitat complexity and surface area in assessing biodiversity: fractal application on rocky shores. *Ecological complexity*, 2(3), 272-286.
- Kulkarni, A. G., Satyanarayana, K. G., Sukumaran, K., & Rohatgi, P. K. (1981). Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. *Journal of materials science*, 16, 905-914.
- Langeneck, J., Lezzi, M., Del Pasqua, M., Musco, L., Gambi, M. C., Castelli, A., & Giangrande, A. (2020). Non-indigenous polychaetes along the coasts of Italy: a critical review. *Mediterranean Marine Science*, 21(2), 238-275.
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. William Andrew.
- Mangano, M. C., Ape, F., & Mirto, S. (2019). The role of two non-indigenous serpulid tube worms in shaping artificial hard substrata communities: case study of a fish farm in the central Mediterranean Sea. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 41-51.
- Manik, P., Tuswan, T., Overstiano Rahardjo, F. A., & Misbahudin, S. (2023). Mechanical Properties Evaluation of Laminated Composites of Petung Bamboo (*Dendrocalamus asper*) and Coconut Coir Fiber as Ship Construction Components. *Pomorstvo*, 37(1), 75-85.

- Markiewicz, A., Koda, E., & Kawalec, J. (2022). Geosynthetics for Filtration and Stabilisation: A Review. *Polymers*, 14(24), 5492.
- Marques, A. R., de Oliveira Patrício, P. S., dos Santos, F. S., Monteiro, M. L., de Carvalho Urashima, D., & de Souza Rodrigues, C. (2014). Effects of the climatic conditions of the southeastern Brazil on degradation the fibers of coir-geotextile: Evaluation of mechanical and structural properties. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(1), 76-82.
- Marraffini, M. L., Ashton, G. V., Brown, C. W., Chang, A. L., & Ruiz, G. M. (2017). Settlement plates as monitoring devices for non-indigenous species in marine fouling communities. *Management of Biological Invasions*, 8(4), 559-566.
- Methacanon, P., Weerawatsophon, U., Sumransin, N., Prahsarn, C., & Bergado, D. T. (2010). Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*, 82(4), 1090-1096.
- Mishra, L., & Basu, G. (2020). Coconut fibre: its structure, properties and applications. *Handbook of natural fibres*, 231-255. Woodhead Publishing.
- Mitra, B. C. (2002). Synthetic vs. natural geotextiles. *Textile trends*, 45(8), 39-41.
- Mohanty, A. K., Misra, M. A., & Drzal, L. T. (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC press.
- Mohanty, A. K., Misra, M. A., & Hinrichsen, G. I. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular materials and Engineering*, 276(1), 1-24.
- Morris, R. L., Golding, S., Dafforn, K. A., & Coleman, R. A. (2018). Can coir increase native biodiversity and reduce colonisation of non-indigenous species in eco-engineered rock pools?. *Ecological Engineering*, 120, 622-630.
- Newcomer, K., Marraffini, M. L., & Chang, A. L. (2018). Distribution patterns of the introduced encrusting bryozoan *Conopeum chesapeakeensis* (Osburn 1944; Banta et al. 1995) in an estuarine environment in upper San Francisco Bay. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 504, 20-31.
- Newcomer, K., Tracy, B. M., Chang, A. L., & Ruiz, G. M. (2019). Evaluating performance of photographs for marine citizen science applications. *Frontiers in Marine Science*, 6, 457516.

- Nwankwojike, B. N., Onuba, O., & Ogbonna, U. (2012). Development of a coconut dehusking machine for rural small scale farm holders. *International journal of innovative technology & creative engineering*, 2(3), 1-6.
- Okpala, C. C., Onukwuli, K. S., & Ezeanyim, O. (2021). Coir Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 8, 2458-9403.
- Pham, L. J. (2016). Coconut (*Cocos nucifera*). *Industrial oil crops*, 231-242. AOCS Press.
- Piazzzi, L., Acunto, S., Frau, F., Atzori, F., Cinti, M. F., Leone, L., & Ceccherelli, G. (2021). Environmental engineering techniques to restore degraded *Posidonia oceanica* meadows. *Water*, 13(5), 661.
- Prambauer, M., Wendeler, C., Weitzenböck, J., & Burgstaller, C. (2019). Biodegradable geotextiles - An overview of existing and potential materials. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(1), 48-59.
- Prasad, S. V., Pavithran, C., & Rohatgi, P. K. (1983). Alkali treatment of coir fibres for coir-polyester composites. *Journal of materials science*, 18, 1443-1454.
- Pritchard, M., Sarsby, R. W., & Anand, S. C. (2000). Textiles in civil engineering. Part 2 - natural fibre geotextiles. *Handbook of technical textiles*, 372-406.
- Ramli, M., Kwan, W. H., & Abas, N. F. (2013). Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 38, 554-566.
- Rawal, A., Shah, T., & Anand, S. (2010). Geotextiles: Production, properties and performance. *Textile Progress*, 42(3), 181-226.
- Razak, N. A. A., Ismail, A., Husin, A., & Pahraraji, M. E. H. M. (2023). Coir Fibre in Concrete: A Review. *International Journal of Business and Technology Management*, 5(3), 68-77.
- Rencoret, J., Ralph, J., Marques, G., Gutiérrez, A., Martínez, A. T., & del Río, J. C. (2013). Structural characterization of lignin isolated from coconut (*Cocos nucifera*) coir fibers. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(10), 2434-2445.
- Ribeiro, F. E., Baudouin, L., Lebrun, P., Chaves, L. J., Brondani, C., Zucchi, M. I., & Vencovsky, R. (2010). Population structures of Brazilian tall coconut (*Cocos nucifera* L.) by microsatellite markers. *Genetics and Molecular Biology*, 33, 696-702.

- Robello, C., Acunto, S., Leone, L. M., Mancini, I., Oprandi, A., & Montefalcone, M. (2024). Large-Scale Re-Implantation Efforts for *Posidonia oceanica* Restoration in the Ligurian Sea: Progress and Challenges. *Diversity*, *16*(4), 226.
- Rosa, M. F., Chiou, B. S., Medeiros, E. S., Wood, D. F., Williams, T. G., Mattoso, L. H. C., Orts W. J., & Imam, S. H. (2009). Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites. *Bioresource technology*, *100*(21), 5196-5202.
- Rowell, R. M. (1985). The Chemistry of Solid Wood. *Advance in Chemistry Series*, 207.
- Santos-Simón, M., Ferrario, J., Benaduce-Ortiz, B., Ortiz-Zarragoitia, M., & Marchini, A. (2024). Assessment of the effectiveness of antifouling solutions for recreational boats in the context of marine bioinvasions. *Marine Pollution Bulletin*, *200*, 116108.
- Satyanarayana, K. G., Pillai, C. K. S., Sukumaran, K., Pillai, S. G. K., Rohatgi, P. K., & Vijayan, K. (1982). Structure property studies of fibres from various parts of the coconut tree. *Journal of materials science*, *17*, 2453-2462.
- Simkanin, C., Fofonoff, P. W., Larson, K., Lambert, G., Dijkstra, J. A., & Ruiz, G. M. (2016). Spatial and temporal dynamics of ascidian invasions in the continental United States and Alaska. *Marine Biology*, *163*, 1-16.
- Stelte, W., Barsberg, S. T., Clemons, C., Morais, J. P. S., de Freitas Rosa, M., & Sanadi, A. R. (2019). Coir fibers as valuable raw material for biofuel pellet production. *Waste and Biomass Valorization*, *10*, 3535-3543.
- Subaida, E. A., Chandrakaran, S., & Sankar, N. (2009). Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles. *Geotextiles and geomembranes*, *27*(3), 204-210.
- Sumi, S., Unnikrishnan, N., & Mathew, L. (2018). Durability studies of surface-modified coir geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, *46*(6), 699-706.
- Tamburini, M., Ferrario, J., Piazzese, L., & Occhipinti-Ambrogi, A. (2022). Effect of predation on fouling communities in an Italian hotspot of non-indigenous species. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(10), 1496.
- Tamburini, M., Keppel, E., Marchini, A., Repetto, M. F., Ruiz, G. M., Ferrario, J., & Occhipinti-Ambrogi, A. (2021). Monitoring non-indigenous species in port habitats: first application of a

standardized North American protocol in the Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8, 700730.

Tan, W. T., Ooi, S. T., & Lee, C. K. (1993). Removal of chromium (VI) from solution by coconut husk and palm pressed fibres. *Environmental technology*, 14(3), 277-282.

Tanasă, F., Nechifor, M., Ignat, M. E., & Teacă, C. A. (2022). Geotextiles - a versatile tool for environmental sensitive applications in geotechnical engineering. *Textiles*, 2(2), 189-208.

Tomczak, F., Sydenstricker, T. H. D., & Satyanarayana, K. G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1710-1721.

Torchin, M. E., Freestone, A. L., McCann, L., Larson, K., Schlöder, C., Steves, B. P., Fofonoff, P., Repetto, M. F., & Ruiz, G. M. (2021). Asymmetry of marine invasions across tropical oceans. *Ecology*, 102(8), e03434.

Tracy, B. M., Larson, K. J., Ashton, G. V., Lambert, G., Chang, A. L., & Ruiz, G. M. (2017). Northward range expansion of three non-native ascidians on the west coast of North America. *BioInvasions Record*, 6(3).

Tran, L. Q. N., Minh, T. N., Fuentes, C. A., Chi, T. T., Van Vuure, A. W., & Verpoest, I. (2015). Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials. *Industrial Crops and Products*, 65, 437-445.

Van Dam, J. E., van den Oever, M. J., Keijsers, E. R., van der Putten, J. C., Anayron, C., Josol, F., & Peralta, A. (2006). Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk: Part 2: Coconut husk morphology, composition and properties. *Industrial Crops and Products*, 24(2), 96-104.

Varma, D. S., Varma, M., & Varma, I. K. (1984). Coir fibers - Part I: Effect of physical and chemical treatments on properties. *Textile Research Journal*, 54(12), 827-832.

Varma, D. S., Varma, M., & Varma, I. K. (1986). Thermal behaviour of coir fibres. *Thermochimica Acta*, 108, 199-210.

Vishnudas, S., Savenije, H. H. G., Van der Zaag, P., & Anil, K. R. (2012). Coir geotextile for slope stabilization and cultivation - A case study in a highland region of Kerala, South India. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 47, 135-138.

- Vishnudas, S., Savenije, H. H. G., Van der Zaag, P., Anil, K. R., & Balan, K. (2006). The protective and attractive covering of a vegetated embankment using coir geotextiles. *Hydrology and earth system sciences*, 10(4), 565-574.
- Wang, Y. (2001). A method for tensile test of geotextiles with confining pressure. *Journal of industrial textiles*, 30(4), 289-302.
- Wiewel, B. V., & Lamoree, M. (2016). Geotextile composition, application and ecotoxicology - A review. *Journal of Hazardous Materials*, 317, 640-655.
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., & Liu, T. (2020). Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering. *Materials*, 13(7), 1774.
- Yadav, S. K., & Singh, A. (2019). An experimental study on coconut fiber reinforced concrete. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 6, 2250-2254.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.
- Yao, W., & Zhong, W. (2007). Effect of polypropylene fibers on the long-term tensile strength of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 22(1), 52-55.
- Zenetos, A., Gofas, S., Verlaque, M., Çinar, M. E., García Raso, J. E., Bianchi, C. N., Morri, C., Azzurro, E., Bilecenoglu, M., Froglija, C., Siokou-Frangou, I., Violanti, D., Sfriso, A., San Martín, G., Giangrande, A., Katagan, T., Ballesteros, E., Ramos-Esplá, A. A., Mastrototaro, F., Ocaña, Ó., Zingone, A., Gambi, M. C., & Streftaris, N. (2010). Alien species in the Mediterranean Sea by 2010. A contribution to the application of European Union's Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Part I. Spatial distribution.

9. SITOGRAFIA

Cressington Scientific Instruments. (n.d.). *Cressington 208 Carbon High Vacuum Coater*. Retrieved October 14, 2024, from <https://www.cressington.com/>

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia. (n.d.). MTS Insight System 10 kN. Retrieved October 14, 2024, from <https://compmech.unipv.it/laboratories/mate-lab/mts-insight-system-10-kn/>

Pokugiardini. (n.d.). *Pokugiardini: La natura è casa nostra*. Retrieved October 14, 2024, from <https://www.pokugiardini.it>

TESCAN. (n.d.). *MIRA3-XMU Field Emission Gun Scanning Electron Microscope*. Retrieved October 14, 2024, from <https://www.tescan.com/products/scanning-electron-microscopes/mira3-xmu>

10. RINGRAZIAMENTI

Ringrazio i collaboratori del laboratorio di Ecologia dell'Università di Pavia, che sono stati fondamentali per lo svolgimento di questo lavoro, in particolare il Dr. Salvatore Coco, la Prof.ssa Jasmine Ferrario, il Dr. Davide Michel Lelong e la Prof.ssa Agnese Marchini.

Ringrazio la Dott.ssa Manuela Bordiga, ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale presso la sede di Trieste, per la messa a disposizione dell'area di lavoro e della strumentazione necessaria, per il sostegno nell'elaborazione del disegno sperimentale e nella raccolta dei dati, nonché per la possibilità di presentare questo lavoro presso l'OGS.

Ringrazio il Prof. Alessandro Girella, tecnico presso il Laboratorio Arvedi del Centro Interdipartimentale di Studi e Ricerche per la Conservazione del patrimonio culturale (CISRIC) dell'Università di Pavia, per la collaborazione e la messa a disposizione della strumentazione necessaria alle analisi.

Ringrazio i Professori Simone Morganti e Ferdinando Auricchio, responsabili del Mate-Lab (*MATerial Mechanics LABoratory*) per la collaborazione e la messa a disposizione della strumentazione necessaria alle analisi fisico-meccaniche, nonché la Dott.ssa Giulia Formenton, la Dott.ssa Martina Schembri, per il supporto nella preparazione del macchinario ed il sostegno durante l'elaborazione dei dati.

Ringrazio il Dr. Marco Mangiacotti, ricercatore presso il Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Pavia, per l'assistenza nell'elaborazione dei dati.

Infine, ringrazio Sebastiana Di Dio e Lorenzo Lecca, per il supporto durante la preparazione delle strutture sperimentali e Giulia Della Porta, per il sostegno nell'elaborazione dei dati.