

Ilaria Pugliese¹, <https://orcid.org/0009-0009-8187-4124>

Samica Sadik², <https://orcid.org/0000-0001-6711-2793>

Alessandra Zanelli¹, <https://orcid.org/0000-0002-7635-1531>

¹ Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

² Department of Craft Studies, Faculty of Educational Sciences, University of Helsinki, Finland

ilaria.pugliese@polimi.it

samica.sadik@helsinki.fi

alessandra.zanelli@polimi.it

Abstract. Le risorse locali offrono alla produzione industriale l'opportunità di ottimizzare i processi, promuovendo al contempo la biodiversità e un utilizzo diversificato delle materie prime. La ricerca prende in esame fibre naturali liberiane attualmente sottoutilizzate per applicazioni nell'architettura tessile – un settore fortemente dipendente da risorse non rinnovabili – confrontandone le proprietà tecniche e gli impatti ambientali per supportare una scelta consapevole dei materiali. Inoltre, ricostruisce scenari di produzione analizzando diverse tipologie di materiali fibrosi, la loro processabilità in tessuti per l'edilizia e l'infrastruttura al momento disponibile per la prima lavorazione delle fibre e la produzione tessile.

Parole chiave: Fibre naturali; Fibre liberiane; Architettura tessile; Produzione localizzata; Sviluppo di filiera.

Introduzione

Le fibre vegetali europee per uso tessile, come lino (*Linum usitatissimum*), canapa (*Cannabis sativa*) e ortica (*Urtica dioica*), sono materie prime annualmente rinnovabili, provenienti dagli attuali sistemi agroalimentari, e offrono risorse alimentari e non alimentari combinate, con origine controllata e prontezza logistica. La disponibilità limitata di tecnologie per la lavorazione del fusto e della fibra (Alex *et al.*, 2005), insieme alla delocalizzazione del settore tessile, hanno contribuito alla scomparsa dell'industria in Europa. In contemporanea l'avvento delle fibre sintetiche e di tecnologie di produzione avanzate ha ampliato le tipologie di materiali e tessuti per potenziali applicazioni in settori industriali.

Nell'architettura tessile, materiali ad alte prestazioni hanno permesso la creazione di sistemi leggeri che offrono resistenza ed efficienza utilizzando quantità minime di materiale. Questo approccio contrasta con gli impatti ambientali dei materiali

prevalentemente non rinnovabili utilizzati nella produzione, come PES, PVC e PE, e fibre sintetiche come vetro e carbonio. Gli sforzi per migliorare la sostenibilità delle membrane in architettura si sono concentrati principalmente sulle tecnologie di riciclo, in linea con i principi della ISO 20887:2020, mentre l'uso di materiali rinnovabili ha ricevuto un'attenzione più limitata (Zanelli *et al.*, 2020).

Il ciclo di vita dell'architettura tessile comprende soluzioni temporanee, come installazioni e allestimenti di edifici, così come applicazioni permanenti, in strutture chiuse o involucri edilizi. Temporaneità e durata prevista del sistema possono rendere idoneo l'uso di materie prime naturali alternative per una vasta gamma di applicazioni.

In un contesto di obiettivi di neutralità climatica, una prospettiva "oltre la decarbonizzazione" si estende al di là della sola neutralità carbonica in specifiche fasi della produzione. Comprendere le fonti disponibili di materie prime, i metodi di lavorazione e relative potenzialità applicative può contribuire ad un approccio olistico all'industria di nuova generazione.

Obiettivi della ricerca e metodologia

La ricerca affronta il tema della "Neutralità Climatica e Progetto Ambientale" delineando le fibre naturali come risorsa potenziale per l'architettura tessile e mappando scenari di produzione di prodotti tessili per l'edilizia, basati sull'infrastruttura di produzione esistente, al fine di supportare e innovare il processo di selezione delle materie prime.

Natural fibre sourcing for textile architecture

Abstract. Local resources can provide industrial production opportunities to improve processes while enhancing biodiversity and the use of raw materials. This research profiles currently underused bast plant fibres for environmentally sound textile applications in architecture – a sector heavily reliant on non-renewable resources – by comparing their technical properties and environmental impacts to support material selection. It also reconstructs production scenarios by evaluating fibre material typologies, their processability in textile-based building materials, and the existing fibre processing and textile manufacturing infrastructure.

Keywords: Natural fibres; Bast fibres; Textile architecture; Localised production; Supply chain development.

Introduction

European textile-grade plant fibres such as flax (*Linum usitatissimum*),

hemp (*Cannabis sativa*), and nettle (*Urtica dioica*) are annually renewing material feedstocks originating from current agri-food systems. They provide both food and non-food materials with controlled origin and logistical readiness. The limited availability of stem and fibre processing technologies (Alex *et al.*, 2005), and the relocation of the textile sector have contributed to the disappearance of the industry in Europe. Meanwhile, the emergence of synthetic fibres and advanced manufacturing technologies has expanded the variety of textiles in terms of types, materials, and potential applications across various industrial fields.

In textile architecture, high performance materials have enabled the creation of lightweight systems, which offer strength and efficiency while using minimal material quantities. This approach contrasts with the environ-

mental impacts of predominantly non-renewable materials used in production, such as PES, PVC, PE, and synthetic fibres like glass and carbon. Sustainability efforts in membrane architecture have primarily concentrated on recycling technologies aligned with the principles of ISO 20887:2020, while using renewable materials has received limited attention (Zanelli *et al.*, 2020).

The life cycle of textile architecture encompasses temporary solutions, such as installations and building fit-out, as well as permanent applications, including enclosed structures and integrated building envelopes. The temporary and expected lifespan of the system could make alternative natural materials sufficient for a wide range of applications.

In the context of climate neutrality targets, a "beyond decarbonisation"

Lo studio si allinea con gli obiettivi di simbiosi industriale del partenariato esteso MICS (*Made in Italy and Circular Sustainability*) finanziato dal MUR attraverso il programma *NextGenerationEU* (PNRR). Nello specifico si svolge nell'ambito del progetto "Circular Design for Natural Fibers", che prevede la seguente struttura di lavoro: (1) esplorazione di nuove soluzioni e scenari; (2) valutazione della fattibilità tecnica; (3) sperimentazione e test dei materiali; (4) valutazione ambientale, sociale ed economica.

Questo articolo presenta la metodologia e i risultati relativi alla fase 1, sviluppati nei seguenti passaggi: i) identificazione delle fibre naturali per l'architettura tessile e caratterizzazione delle loro proprietà tecniche, derivate dalla letteratura scientifica e prodotti di mercato; ii) analisi della disponibilità e degli impatti ambientali associati alla produzione agronomica di fibre naturali, utilizzando un modello adattato di contabilità gestionale (Sadik, 2019), che considera gli input delle attività produttive; iii) Mappatura delle tipologie di materiali rilevanti e delle tecnologie di lavorazione disponibili per applicazioni tessili in edilizia, valutando le diverse qualità di fibra e la loro processabilità.

Fibre naturali per l'architettura tessile

tuttavia, le loro proprietà intrinseche, come isolamento termico, traspirabilità, assorbimento acustico e controllo dell'umidità, suggeriscono applicazioni promettenti nel settore.

I tessuti tecnici si differenziano da quelli tradizionali per le loro avanzate caratteristiche funzionali, come prestazioni fisiche, chimiche e meccaniche, che prevalgono su quelle estetiche (De

Le fibre naturali nell'architettura tessile sono una risorsa relativamente poco esplorata; tut-

approach extends over sole carbon neutrality at specific stages of production. Understanding the sources of available raw materials, processing methods, and their potential features for final applications can contribute to a more thorough approach to the next-generation industry.

Research objectives and methodology

The research addresses the theme of 'Climate Neutrality and Environmental Design' by profiling potential natural fibre feedstocks and mapping production scenarios for textile-based building products, considering existing manufacturing infrastructure, to support and innovate the material selection process.

The study aligns with the industrial symbiosis goals of the extended partnership MICS (*Made in Italy and Cir-*

cular Sustainability), funded by MUR through the European Union's Next-GenerationEU (PNRR) programme. It is conducted within the framework of the "Circular Design for Natural Fibers" project, which has the following work structure: (1) exploration of new solutions and scenarios; (2) evaluation of technical feasibility; (3) material experimentation and testing; (4) environmental, social, and economic assessment.

This paper presents the methodology and results related to work package 1, focusing on the following specific steps: i) identifying natural fibres suitable for textile architecture and characterising their technical properties based on scientific literature and market products; ii) profiling the availability of natural fibre feedstocks and their environmental impacts using an adapted agronomic management ac-

Giuli and Ferrari, 2013). Tuttavia, l'architettura tessile è determinata in egual modo dalle prestazioni tecniche dei suoi materiali e dalle loro qualità estetiche, quali leggerezza, flessibilità e permeabilità alla luce. Comprende materiali come tessuti, film e non tessuti, utilizzabili in sistemi flessibili o semi-flessibili, come membrane multistrato, o in sistemi rigidi, come scocche in resina.

L'uso delle fibre vegetali si sta diffondendo in vari settori industriali per funzioni strutturali come rinforzo nei materiali compositi, offrendo riduzione del peso e miglioramento delle proprietà meccaniche. Nel settore delle costruzioni, ricerche pionieristiche hanno esplorato l'uso del lino per sistemi di facciata biocompositi (ad es., BioBuild; CORDIS, 2011) e in strutture sperimentali realizzate con la tecnologia *filament winding* (ad es., The LivMatS Pavilion; Pérez *et al.*, 2022). A livello commerciale, le fibre naturali vengono principalmente impiegate per l'isolamento termico e acustico grazie alla loro alta porosità e bassa conducibilità termica. Inoltre, sul mercato sono disponibili alcuni prodotti per la finitura degli interni, come strati tessili, finanche strati di controllo del vapore.

La tabella 1 riassume le caratteristiche più rilevanti per applicazioni tessili tecniche in edilizia delle principali fibre liberiane europee, includendo la specie asiatica ramiè (*Boehmeria nivea*). Da un'analisi della letteratura scientifica emerge che le fibre selezionate sono comparabili in termini di elasticità e resistenza allo sforzo, con la canapa che presenta caratteristiche leggermente inferiori. Queste fibre mostrano proprietà meccaniche favorevoli, che si avvicinano a quelle della fibra di vetro, il rinforzo sintetico più utilizzato, con una resistenza alla trazione di 1700-3500 MPa (Chawla, 2001). La leggerezza della fibra di

counting model (Sadik, 2019), which assesses the impacts of input use; iii) mapping key materials and available processing technologies for textile-based building applications, evaluating different fibre grades and their processability.

Natural fibres for textile architecture

Natural fibres in textile architecture are a relatively underexplored resource. However, their intrinsic properties, such as thermal insulation, breathability, sound absorption, and moisture control, suggest valuable applications in the field. Technical textiles distinctly differ from traditional ones, as their advanced functional properties, including physical, chemical, and mechanical performance, take precedence over aesthetics (De Giuli and Ferrari, 2013). Nonetheless, textile architecture is equally defined by the technical be-

haviour of its materials and their aesthetic qualities, including lightweight, flexibility, and light permeability. It comprises materials such as fabrics, films, and non-wovens, which can be employed in flexible or semi-flexible systems, like multi-layer membranes, or rigid systems, such as resin shells.

Plant fibres are increasingly used in various industries for structural functions as reinforcement in biocomposite materials, providing weight reduction and mechanical properties. In construction, pioneering research has explored the use of flax in composite façade systems (e.g., BioBuild; CORDIS, 2011) and experimental filament-wound composite structures (e.g., The LivMatS Pavilion; Pérez *et al.*, 2022). Commercially, natural fibres are primarily used for thermal and acoustic insulation due to their high porosity and low thermal conductivity.

Tab. 01 | Proprietà delle fibre liberiane rilevanti per applicazioni in tessuti tecnici in edilizia, derivate da letteratura scientifica e prodotti di mercato
Relevant technical properties of plant fibres for technical textile building applications, derived from scientific literature and market products

Natural Fibres	Morphological properties			Mechanical properties			Thermal	References
	Lenght (avg) (mm)	Diameter (avg) (µm)	Density (g/cm³)	Tensile strenght (cN tex-1)	Ultimate stress (MPa)	Strain to failure (%)	Young's modulus (GPa)	Thermal conductivity [W/mK]
Flax (<i>Linum usitatissimum</i>)								[1] (Mather and Wardman, 2015)
	27 ± 3	17,8 (± 5,8)	1,53	N/A	1339 (± 486)	3,27 (± 0,4)	58 (± 15)	0,038
	[1]	[2]	[2]		[2]	[2]	[2]	[a]
Hemp (<i>Cannabis sativa</i>)								[4] (Bacci et al., 2011)
	20 (±5)	31,2 (± 4,9)	1,48	N/A	270 (± 40)	0,8 (± 0,1)	19,1 (± 4,3)	0,039
	[1]	[2]	[2]		[2]	[2]	[2]	[b]
Nettle (<i>Urtica dioica</i>)								
	50 (±12)	23 – 46	0,72	7 – 182	1594 (± 640)	1 – 7	87 (± 28)	N/A
	[3]	[4]	[3]	[4]	[2]	[4]	[2]	
Ramie (<i>Boehmeria nivea</i>)								
	135 ± 15	34	1,51	N/A	900	2,5	65 (± 18)	N/A
	[2]	[2]	[2]		[2]	[2]	[2]	

| Tab. 01

ortica (0,72 g/cm³), rispetto al peso specifico della canapa e del lino (1,5-1,54 g/cm³; Bacci *et al.*, 2011), rappresenta una caratteristica aggiuntiva per potenziali applicazioni. Inoltre, i valori di conducibilità termica dei prodotti di isolamento a base di lino o canapa, quelli con contenuto di fibra più elevato disponibili sul mercato, mostrano prestazioni competitive (0,038-0,039 W/mK), comparabili ai materiali di isolamento convenzionali come la lana minerale (0,035 W/mK). Attualmente, non vi sono evidenze di prodotti di isolamento a base di ortica europea, evidenziando una lacuna sia nel mercato che nella ricerca. Nonostante proprietà favorevoli, le fibre naturali possono presentare limitazioni nel raggiungere le stesse *performance* dei materiali sintetici da costruzione, in particolare in termini di resistenza meccanica e durabilità. Tuttavia, la durata tipica di componenti tessili in edilizia varia dai 15 ai 30 anni per le mem-

brane strutturali, fino a 1-5 anni per applicazioni interne come contro soffitti, schermi di partizione, sistemi di rivestimento e installazioni temporanee (Mazzola, 2020). Data la vita utile più breve dei tessuti in architettura, l'uso delle fibre naturali può risultare adeguato e migliorare il comfort ambientale nelle relative applicazioni.

Scenari di produzione

Implementare un'infrastruttura di prima trasformazione idonea a tutte le fibre liberiane può favorirne l'uso industriale e la fattibilità economica (Reyneri *et al.*, 2001). Lino, canapa e ortica sono stati studiati per il loro potenziale applicativo industriale (Bacci *et al.*, 2009; Dreyer *et al.*, 2002; Jeannin *et al.*, 2020; Ouagne *et al.*, 2020; Pasila, 2000) e possono essere lavorati in modo simile utilizzando gli stessi macchinari quando la contaminazione tra spe-

Additionally, some interior finishing products, such as textile sheets, and vapour control layers, are available on the market. Table 1 summarises the most relevant features for technical textile building applications of main European plant fibres, including Asiatic ramie (*Boehmeria nivea*). An analysis of the scientific literature shows that the selected bast fibres are comparable in terms of elasticity and stress resistance, with hemp exhibiting slightly inferior characteristics. These fibres demonstrate favourable mechanical properties, approaching those of e-glass, the most widely used synthetic reinforcement, with a tensile strength of 1700-3500 MPa (Chawla, 2001). Nettle fibre's light weight (0,72 g/cm³), compared to hemp and flax (1,5-1,54 g/cm³; Bacci *et al.*, 2011), is an additional feature for potential applications. Fur-

thermore, the thermal conductivity values of flax or hemp-based building insulation products, those with higher fibre content available on the market, demonstrate competitive performance (0,038-0,039 W/mK), comparable to conventional insulation materials such as mineral wool (0,035 W/mK). Currently, there is no evidence of the development of European nettle-based insulation products, highlighting a gap in both the market and the literature. Despite favourable properties, natural fibres may have limitations in achieving the performance levels of synthetic materials, particularly regarding mechanical resistance and durability. However, in construction, the typical service life of textile components ranges from 15-30 years for structural membranes to 1-5 years for indoor applications such as ceilings, screens, walling systems and temporary instal-

lations (Mazzola, 2020). Due to the shorter lifespan of textiles in architecture, natural fibres could offer significant potential to enhance environmental comfort in related applications. **Production scenarios** Establishing a first-processing infrastructure suitable for all bast fibres is key to increasing their industrial use and economic feasibility (Reyneri *et al.*, 2001). Flax, hemp and nettle have all been studied for their fibre output in industrial applications (Bacci *et al.*, 2009; Dreyer *et al.*, 2002; Jeannin *et al.*, 2020; Ouagne *et al.*, 2020), and can be processed similarly using the same machinery when contamination between fibres is not a concern. This production scenario aims to improve the profitability of fibre production (Alex *et al.*, 2015) by leveraging the use of second-grade fibres.

Natural fibre feedstock profiling The presented bast fibres, nettle excluded, are annual crops with established agronomic practices produced within the food system. Linseed flax is regionally produced in Italy, while fibre varieties are sensitive to climate and soil conditions, and are predominantly cultivated in and Belgium (FAOSTAT, 2022). Hemp cultivation is present in Italy (ISTAT, 2023), although harvesting and post-harvest processing, along with public acceptance and cultivar regulation, can be challenging. Nettle production is not commercially significant; however, the basic agronomic steps of nettle cultivation have been researched over the years in Italy focusing mainly on Tuscany and Emilia Romagna (e.g., ORTIKA; CORDIS, 2018) (Fig. 1). Flax, hemp and nettle are regarded as both food and fibre crops within the

cie di fibre non rappresenta un problema. Lo scenario di produzione mira a migliorare la redditività della produzione di fibre (Alex *et al.*, 2015) esplorando l'uso di fibre di seconda qualità.

Analisi della produzione agronomica di fibre naturali

Le fibre liberiane presentate, ad esclusione dell'ortica, sono colture annuali con pratiche agronomiche consolidate, prodotte all'interno del sistema alimentare.

Il lino da olio è prodotto a livello regionale in Italia, mentre le varietà da fibra, sensibili al clima e alle condizioni del suolo, sono prevalentemente coltivate in Francia e Belgio (FAOSTAT, 2022). La coltivazione della canapa è presente in Italia (ISTAT, 2023); ciononostante, le fasi di raccolta e lavorazione presentano alcune sfide, così come l'accettazione pubblica e la regolamentazione delle varietà. La produzione di ortica non è significativa a livello commerciale; tuttavia, i passaggi agronomici fondamentali per la sua coltivazione sono stati oggetto di ricerca negli anni, con un focus geografico su Toscana ed Emilia-Romagna (ad es., ORTIKA; CORDIS, 2018) (Fig. 1).

Lino, canapa e ortica sono considerate sia colture alimentari che da fibra nell'ambito della *European Union Common Agricultural Policy*, generando una combinazione di materie prime alimentari e non alimentari in un contesto agricolo. Inoltre, la produzione di fibra di ortica si è dimostrata fattibile anche su terreni contaminati, senza trasferimento di contaminanti nel prodotto finale (Jeannin *et al.*, 2020), ampliando le possibilità produttive.

Per valutare i vantaggi agronomici nella produzione di queste fibre, la ricerca ha applicato un modello di contabilità gestionale (Sadik, 2019), adattando l'analisi degli impatti ambientali utilizzata per la produzione di biocarburanti (Stolarski *et al.*, 2018) alla valutazione delle fibre sulla base delle attività produttive condotte in contesti italiani (LaMMA-Test, 2007a, b; Masella *et al.*, 2024). Dai risultati emerge che l'ortica, essendo una coltura perenne, consente di ridurre l'uso di input e, di conseguenza, gli impatti ambientali durante gli anni di resa, a differenza di lino e canapa, che richiedono un apporto più ampio di input nel tempo (Fig. 2).

Tipologie di materiali e tecnologie di produzione disponibili

L'architettura tessile e il settore edilizio, che permettono l'uso completo di fibre di qualità inferiore, possono ampliare la gamma di applicazioni dei materiali fibrosi oltre l'impiego in tessuti per l'abbigliamento, creando una massa critica di materiale da processare.

Le coltivazioni annuali da fibra producono foglie e semi per uso alimentare, mentre gli steli forniscono diversi tipi di fibre, che variano da quelle tessili di alta qualità a fibre più grosse e corte, fino a materiali cellulosici residui (Fig. 3). Nello specifico: i) le fibre lunghe, di qualità tessile, vengono estratte per ottenere filati con proprietà meccaniche superiori; ii) le fibre corte grezze, residue dalla prima lavorazione, contenenti impurità e canapuli, vengono attualmente lavorate per usi tessili, producendo filati più grossi adatti a tessuti tecnici, o impiegate per applicazioni fibrose; iii) la

01 | Plant resources for food and non-food use in Tuscany Region

Characterization and LCA of some products derived from nettle [2010-2011]

PRIN 2009

Medicinal and dyeing-plants natural extracts: characterization, and innovative poly-use of nettle, daphne, lavender and chestnut tannins [2010-2012]

ICCOG

Identification and characterization of some clones of nettle and Spanish broom for textile and phytotherapeutic use [2008-2009]

NATURAL.TEX

Natural fibres in textile processing chain of Tuscany [2006]

LaMMA-TEST

The textile processing chain in Tuscany [2005-2007]



FILODOR

La filiera dell'ortica: riscoperta e valorizzazione per le produzioni agro-alimentari dell'areale emiliano-romagnolo
EU funded project [2020-2022]

ORTIKA

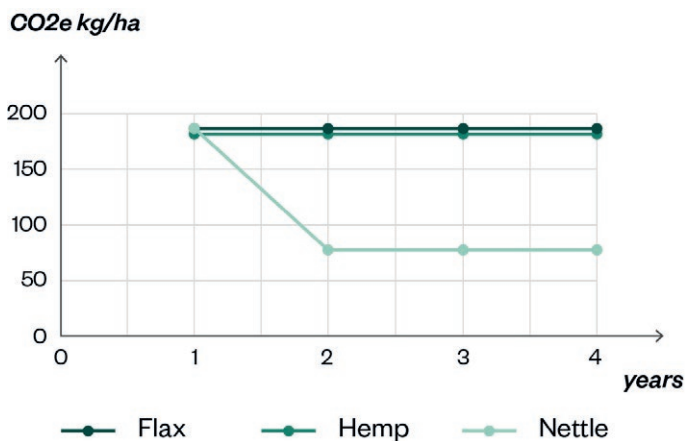
Toward sustainable fashion: nettle and blueberry garments to promote sustainable development of mountain areas and to boost young talents
H2020 project [2018-2019]

paglia legnosa, che rappresenta circa il 50% della resa dello stelo, è composta prevalentemente da materiale cellulosico adatto alla produzione di prodotti simili alla carta e imballaggi.

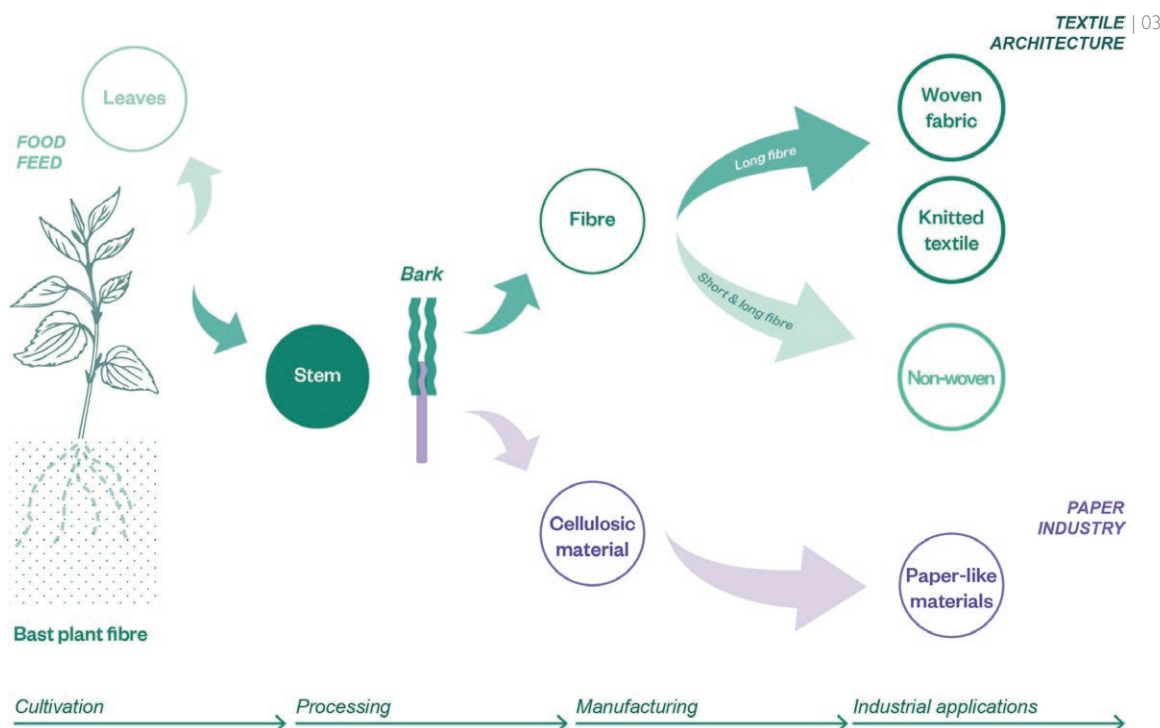
Questa varietà di materiali risulta idonea per la produzione di semilavorati edilizi a base tessile mediante diverse tecnologie disponibili (Fig. 4):

- Non tessuti per l'edilizia: questi materiali trovano impiego come tappetini isolanti, filtratura, finiture interne e barriere al vapore. Tecnologie di produzione consolidate, come processi *dry-laid* (ad es. *airlay*) per non tessuti più spessi e processi *wet-laid* (simili alla produzione della carta), possono accettare diversi tipi di fibre. Il legame può essere meccanico (ad es., agugliatura, cucitura), chimico o termico. La principale sfida consiste nello sviluppo di non tessuti interamente *bio-based*, migliorando la saldatura meccanica o integrando leganti naturali.
- Tessuti per l'edilizia: i filati naturali possono essere trasformati in strutture tessili, come tessuti a maglia, che si prestano ad applicazioni su misura e reversibili senza sprechi di produzione rispetto ai tradizionali tessuti piani. Gli strati tessili possono essere impiegati in membrane tensili (monostrato o multistrato) o in applicazioni per interni, quali allestimenti edilizi, finiture, controsoffitti o partizioni.

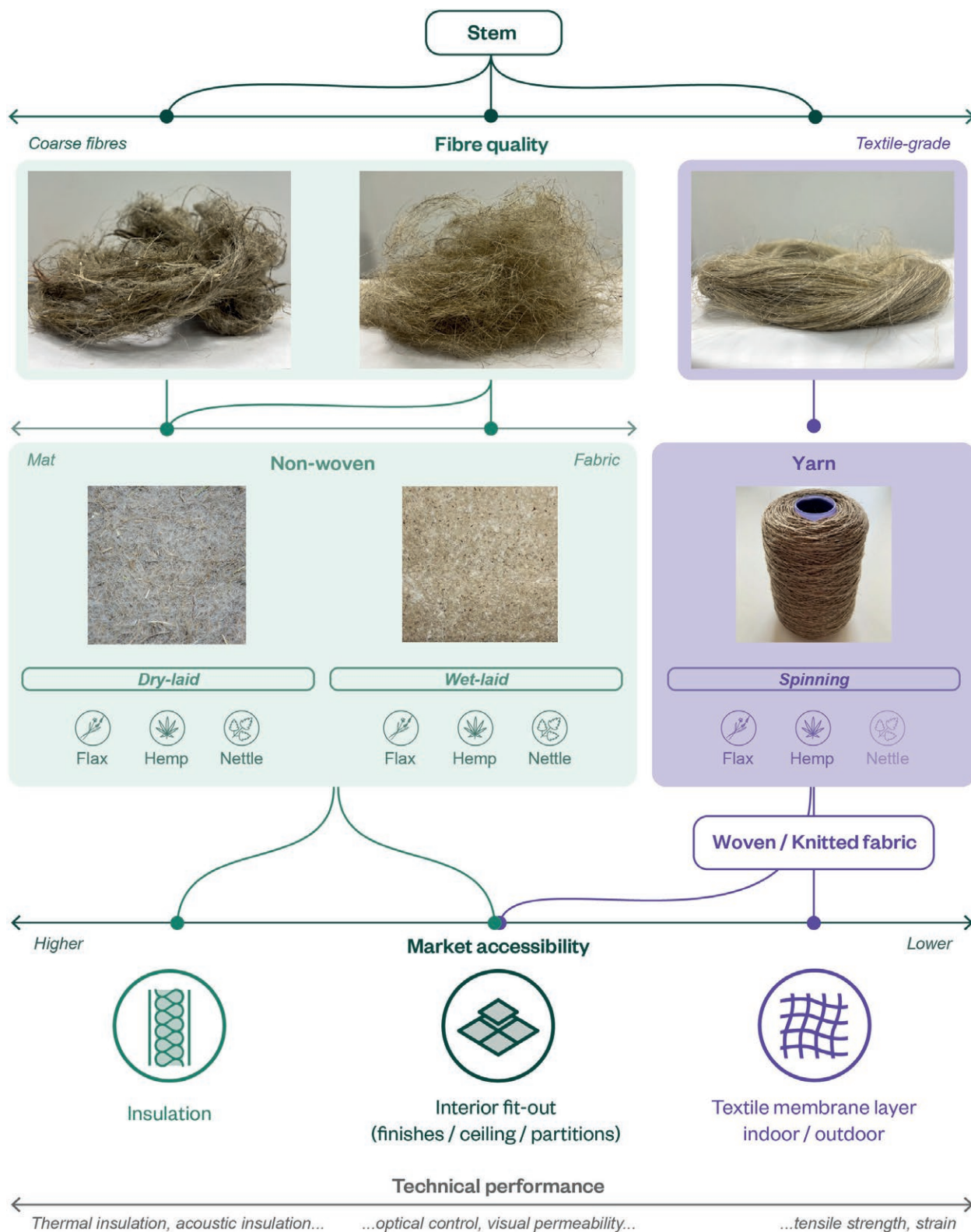
L'analisi identifica diversi livelli di accessibilità al mercato per prodotti edilizi a base di fibre naturali in uno scenario di pro-



duzione localizzata. L'Italia è il quarto esportatore globale di tessuti industriali e il secondo in Europa (International Trade Centre, 2023). Nella più ampia categoria del tessile tecnico, i tessuti non tessuti raggiungono il 49% del valore totale della produzione (ISTAT, 2022). Nello specifico, (1) la produzione di non tessuti a partire da fibre corte potrebbe beneficiare delle infrastrutture esistenti, con cluster di piccole e medie imprese (PMI) concentrati in regioni specifiche (Fig. 5). Questa categoria di prodotti potrebbe costituire la domanda iniziale per lo sviluppo della filiera. (2) Al contrario, la produzione di tessuti da fibre lunghe presenta maggiori difficoltà a causa delle infrastrutture limitate per la prima lavorazione – le aziende italiane importano la fibra lavorata (FAOSTAT, 2022) – e per la filatura a umido. Per le fibre di qualità inferiore, la filatura a secco, più diffusa, è in grado di lavorare sia fibre lunghe che corte, risultando quindi maggiormente adatta al settore tecnico.



04 |



In uno scenario a lungo termine, impianti di lavorazione in grado di accettare una gamma più ampia di fibre potrebbero beneficiare di protocolli di lavorazione unificati per diverse varietà di fibre. In Italia, la creazione della filiera e i costi logistici potrebbero essere parzialmente suddivisi tra le industrie mediante l'implementazione di impianti strategicamente posizionati a una distanza accessibile sia dalle aziende manifatturiere che dalle aree di coltivazione.

Discussione e futuri sviluppi

L'articolo esplora le fibre liberiane come materia prima per l'architettura tessile, evidenziando il potenziale dell'utilizzo di fibre di qualità inferiore per ampliare le possibilità produttive e favorire la ricostruzione della filiera. Dopo aver esaminato le proprietà tecniche delle fibre vegetali per diverse applicazioni edilizie, la ricerca profila le materie prime naturali, le tipologie di fibre e i processi disponibili. L'analisi rivela che la coltivazione dell'ortica presenta vantaggi agronomici rispetto al lino e alla canapa, come minori esigenze di lavoro sul campo e un ridotto uso di input nel tempo. Inoltre, la sua capacità di crescere su terreni marginali offre opportunità economiche in aree non adatte alla produzione alimentare, rendendo l'ortica una scelta promettente per la produzione di fibre.

Riguardo alla processabilità dei materiali, i non tessuti per isolamento o applicazioni d'interni rappresentano un mercato iniziale più accessibile, capace di accogliere una varietà più ampia di tipologie di fibre tramite diverse tecnologie di produzione. Un limite significativo è la scarsità di tecnologie e impianti adatti per l'estrazione e la filatura delle fibre in Europa, che

pone sfide tecniche per lo sviluppo di nuovi prodotti, come filati da fibre sottoutilizzate quali l'ortica. Oltre alle barriere tecnologiche, la disponibilità delle materie prime, influenzata dalla stagionalità delle coltivazioni, potrebbe limitare la scalabilità della produzione.

I successivi passi della ricerca all'interno del progetto MICS includeranno i) caratterizzazione dei materiali: analisi delle proprietà meccaniche, termiche e ottiche di campioni a scala di laboratorio di fibre vegetali selezionate; ii) sviluppo del prodotto: collaborazione con PMI locali e centri di ricerca per esplorare l'utilizzo delle fibre liberiane in sistemi di produzione industriale; iii) *Life Cycle Assessment* (LCA): valutazione di scenari di produzione territoriali e analisi dell'impatto ambientale di diversi prodotti tessili edili.

L'innovazione principale della ricerca risiede in un approccio multidisciplinare, che integra agronomia e tecnologia dell'architettura per migliorare la sostenibilità del settore. I beneficiari sono le PMI italiane insieme alle comunità locali, che possono utilizzare il *know-how* e le risorse territoriali per sviluppare prodotti innovativi a partire da fibre provenienti da fonti locali.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Studio condotto nell'ambito del Partenariato Esteso MICS (Made in Italy Circolare e Sostenibile), finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.3 – D.D. 1551.11-10-2022, PE000000004). I punti di vista e le opinioni espresse sono tuttavia solo quelli degli autori e non riflettono necessariamente quelli dell'Unione Europea o della Commissione Europea. Né l'Unione Europea né la Commissione Europea possono essere ritenute responsabili per essi.

European Union's Common Agricultural Policy, creating a simultaneous food and non-food material output within the agricultural production environment. Additionally, nettle cultivation for fibre has been found feasible on contaminated lands without transfer into fibre output (Jeannin *et al.*, 2020) widening production possibilities. To evaluate the agronomic advantages of these plant fibres, the research applied a management accounting model (Sadik, 2019), which adapts environmental impact assessments used for biofuel feedstocks (Stolarski *et al.*, 2018) to assess fibre feedstocks based on Italian production activities (LaMMA-Test, 2007a, b; Masella *et al.*, 2024). The results show that nettle, as a perennial crop, reduces input use and environmental impacts during its yield years, compared to flax and hemp, which require a wider range of inputs over time (Fig. 2).

Available materials and processing technologies

Technical textile and building-related applications, allowing the complete utilisation of lower-grade fibre output, could expand the range of fibre material applications beyond high quality textiles, ensuring a critical mass of material for processing.

Fibre crops' annual outputs consist of leaves and seeds for food use, while the stems yield different fibre types, ranging from high-grade textile fibres to coarser, shorter fibres and residual cellulosic materials (Fig. 3). Specifically: i) Long, garment-grade fibres are extracted for yarns with higher mechanical properties; ii) Raw short fibres, residual from initial processing, which contain impurities and shives, are currently processed for textile uses, yielding coarser yarns suitable for technical textiles and fibrous applications; iii)

Woody straw, roughly 50% of the stem yield, consists of primarily cellulosic material suitable for producing paper-like products and packaging.

This range of materials has been identified as suitable for textile-based semi-finished building products through different available manufacturing technologies (Fig. 4):

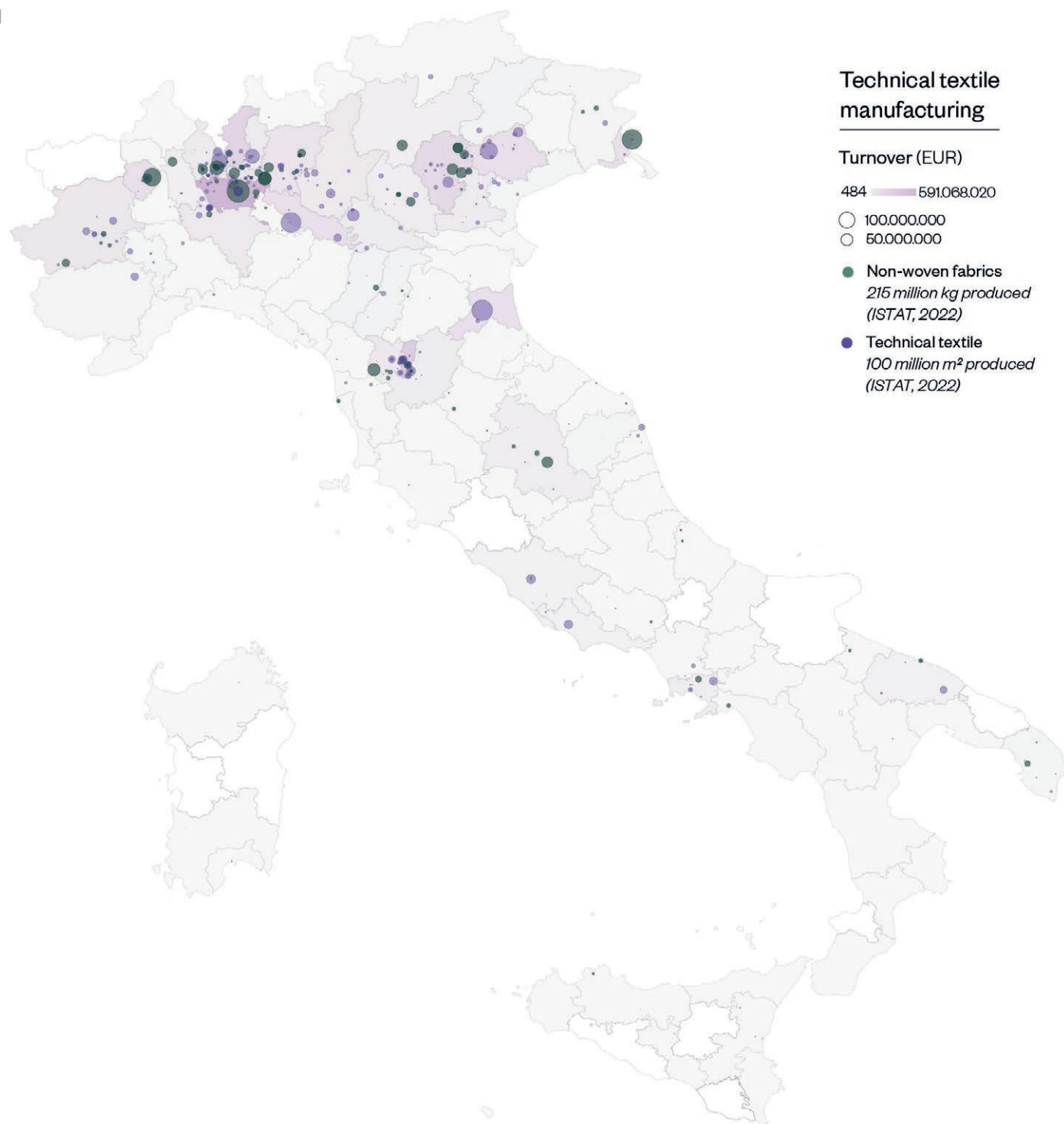
- Non-woven building applications: These materials are used as insulation mats, felting, interior finishes, and vapour barrier layers. Established manufacturing technologies, such as dry-laid (e.g., airlay) for thicker non-wovens and wet-laid methods (similar to paper production), can accommodate various fibre types. Bonding can be mechanical (e.g., needle-punched, stitch-bonded), chemical, or thermal. The main challenge is developing fully bio-based non-wovens by enhancing

mechanical bonding or incorporating natural binders.

- Textile building applications: Natural yarns can be processed into textile structures, such as knitted fabrics, offering customisable, reversible systems with zero waste compared to traditional plain-woven fabrics. Textile layers can be used in tensile membranes (single or multi-layered systems) or interior applications, such as building fit-out, finishing, ceilings, or partition systems.

This analysis identifies varying levels of market accessibility for natural fibre-based building products in localised production. Italy is the fourth largest global exporter of industrial textiles and the second in Europe (International Trade Centre, 2023). In the broader category of technical textiles, non-woven fabrics constituted 49% of the total production value (ISTAT,

05 |



REFERENCES

- Alex, R., Kessler, R., Kohler, R., Mayer, G. and Tubach, M. (2005), "Sustainability and Profitability Through Intelligent Value Chain Management in Bast Fibre Processing", *J. Nat. Fibers*, Vol. 1, pp. 67-75. Available at: https://doi.org/10.1300/J395v01n03_04.
- Bacci, L., Baronti, S., Predieri, S. and Di Virgilio, N. (2009), "Fiber yield and quality of fiber nettle (*Urtica dioica* L.) cultivated in Italy", *Ind. Crops Prod.*, Vol. 1, pp. 480-84. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.09.005>.
- Bacci, L., Di Leonardo, S., Albanese, L., Mastromei, G. and Perito, B. (2011), "Effect of different extraction methods on fiber quality of nettle (*Urtica dioica* L.)", *Text. Res. J.*, Vol. 81, pp. 827-37. Available at: <https://doi.org/10.1177/0040517510391698>.
- Black Mountain Insulation Limited (2014), "NatuHemp". Available at: https://www.blackmountaininsulation.com/NatuHemp_Technical_Sheet.pdf (Accessed on 28/11/2024).
- Bodros, E. and Baley, C. (2008), "Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*)", *Mater. Lett.*, Vol. 62, pp. 2143-45. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.034>.
- Chawla, K.K. (2001), "Glass fibers", in Buschow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilshner, B., Kramer, E.J. and Mahajan, S. (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, Oxford, UK, pp. 3541-3545. Available at: <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/00630-6>.
- CORDIS European Commission (2011), "BioBuild. High Performance, Economical and Sustainable Biocomposite Building Materials". Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/285689/it> (Accessed on 28/11/2024).
- CORDIS European Commission (2018), "ORTIKA. Toward sustainable fashion: nettle and blueberry garments to promote sustainable development of mountain areas and to boost young talents". Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/836019/it> (Accessed on 28/11/2024).
- De Giuli, I. and Ferrari, R. (2013), "Flexible Composite Materials: Production and Modern Uses of a Polymorphic Material", in Motro, R. (Ed.), *Flexible Composite Materials*, Birkhäuser, pp. 8-25. Available at: <https://doi.org/10.1515/9783034613507.8>.
- Dreyer, J., Müssig, J., Koschke, N., Ibenthal, W.D. and Harig, H. (2002), "Comparison of Enzymatically Separated Hemp and Nettle Fibre to Chemically Separated and Steam Exploded Hemp Fibre", *J. Ind. Hemp*, Vol. 7, pp. 43-59. Available at: https://doi.org/10.1300/J237v07n01_05.
- FAOSTAT (2022), "Crops and livestock products: Production & Trade". Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data> (Accessed on 06/09/2024).
- International Trade Centre (2023), "List of products at 4 digits level exported by Italy in 2023". Available at: <https://www.trademap.org/index.aspx> (Accessed on 06/09/2024).
- ISO 20887:2020, "Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works. Design for Disassembly and Adaptability. Principles, requirements and guidance".
- ISOLINA (2020), "Flax insulation products". Available at: <https://www.isolina.com/gb/IsolinaBrochureENG.pdf> (Accessed on 28/11/2024).
- ISTAT (2022), "Produzione industriale in quantità e valore". Available at: http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSP_PRODCOM (Accessed on 06/09/2024).
- ISTAT (2023), "Coltivazioni industriali". Available at: <http://dati.istat.it/Index.aspx?QueryId=3370> (Accessed on 28/11/2024).
- Jeannin, T., Yung, L., Evon, P., Labonne, L., Ouagne, P., Lecourt, M., Cazaux, D., Chalot, M. and Placet, V. (2020), "Are nettle fibers produced on metal-contaminated lands suitable for composite applications?", *Mater. Today Proc.*, Vol. 31, pp. S291-95. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.365>.
- LaMMA-Test (2007a), "Manuale di coltivazione e prima lavorazione della canapa da fibra". Available at: https://agronotizie.imaginenetwork.com/materiali/Varie/File/Mario_Rosato/Manuale-coltivazione-prima-lavorazione-canapa-.pdf (Accessed on 06/09/2024).
- 2022). Specifically, (1) the production of non-woven fabrics from short fibres could benefit from existing infrastructure, with clusters of small and medium-sized enterprises (SMEs) concentrated in specific regions (Fig. 5). This product category could drive the initial demand for supply chain development. (2) Conversely, producing textiles from long fibres presents more challenges due to limited infrastructure for fibre isolation – Italian companies import processed fibres (FAOSTAT, 2022) – as well as for wet spinning. For coarser grades, dry spinning is more widespread and can process both long and short fibres, making it more suitable for the technical sector. In a long-term scenario, processing facilities able to accept a wider range of fibre grades could benefit from unified processing protocols of different plant fibre varieties. In Italy, the cost of establishing the supply chain could be partially shared across industries by implementing strategically located plants, within accessible distances from both manufacturing companies and cultivation areas.
- Discussion and future steps**
- This paper explores plant fibres as feedstocks for textile architecture, emphasising their potential to utilise lower-grade fibres, expand manufacturing possibilities, and support supply chain reconstruction. After reviewing the technical properties of plant fibres for various building applications, the research profiles the natural feedstocks, material typologies, and available processes. The analysis revealed that nettle cultivation demonstrates agronomic advantages over flax and hemp, such as lower labour requirements and reduced input use over time. Additionally, its ability to grow on marginal lands provides economic opportunities in areas unsuitable for food production, positioning nettle as a promising candidate for fibre production scenarios. Regarding material processability, non-wovens for insulation or interior building products are an initial and more accessible market, capable of accommodating a broader variety of fibre types through various manufacturing technologies. A key limitation is the scarcity of suitable technologies and facilities for fibre extraction and spinning in Europe, posing technical challenges for product development, such as yarn production from underutilised fibres like nettle. Beyond technological constraints, factors such as feedstock availability, impacted by cultivation seasonality, may also limit final production scalability.
- The following steps within the MICS project will include: i) material characterisation: analysing the mechanical, thermal, and optical properties of lab-scale samples from selected plant fibres; ii) product development: collaborating with local SMEs and research centres to explore the usability of selected plant fibres in man-made manufacturing systems; iii) Life Cycle Assessment (LCA): evaluating territorial production scenarios and assessing the environmental impact of different textile-based building products. The research's main innovation is its multidisciplinary approach, integrating agronomy and architectural technology to improve the sector's sustainability. Beneficiaries include Italian SMEs and local communities, who can leverage territorial expertise and resources to develop innovative products from locally sourced fibres.

- LaMMA-Test (2007b), “Manuale di coltivazione e prima lavorazione dell’ortica per uso tessile”. Available at: https://agronotizie.imagelinenetwork.com/materiali/Varie/File/Mario_Rosato/manuale-di-coltivazione-e-prima-lavorazione-dell-ortica-per-uso-tessile.pdf (Accessed on 06/09/2024).
- Masella, P., Angeloni, G. and Galasso, I. (2024), “Cropping Flax for Grain and Fiber: A Case-Study from Italy”, *Biomass*, Vol. 4, pp. 599–609. Available at: <https://doi.org/10.3390/biomass4020032>
- Mather, R.R. and Wardman, R.H. (2015), *The Chemistry of Textile Fibres*, Royal Society of Chemistry, Cambridge. Available at: <https://doi.org/10.1039/9781782626534>.
- Mazzola, C. (2020), “Ultra-lightweight temporary architecture. Defining new minimal mass and efficiency-oriented design strategies through an experimental approach”, PhD Thesis in Technology of Architecture, Politecnico di Milano. Available at: <https://hdl.handle.net/10589/166633>.
- Ouagne, P., Soulat, D., Evon, P., Renouard, S., Ferreira, M., Labonne, L., Labanieh, A.R., Laine, E. and De Luycker, E. (2020), “Use of bast fibres including flax fibres for high challenge technical textile applications. Extraction, preparation and requirements for the manufacturing of composite reinforcement fabrics and for geotextiles”, in Kozłowski, R.M. and Mackiewicz-Talarczyk, M. (Eds.), *Handbook of Natural Fibres. Volume 2: Processing and Applications*, Woodhead Publishing, pp. 169-204. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818782-1.00005-5>.
- Pérez, M., Guo, Y. and Knippers, J. (2022), “Integrative material and structural design methods for natural fibres filament-wound composite structures: The LivMatS pavilion”, *Mater. Des.*, Vol. 217, 110624. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110624>.
- Registro aziende (2024), “Elenco aziende con fatturato per il codice ATECO 13.95 & 13.96.2”. Available at: <https://registroaziende.it/ricerca-ateco> (Accessed on 06/09/2024).
- Reyneri, A., Abbate, V., Casa, R., Cavallero, A., Copani, V., Davì, A., De Mastro, G., Fila, G., Fontana, F., Furnari, G., Lombardo, V., Losavio, N., Marras, G., Marzi, V., Rondi, G., Rossini, F., Scarpa, G. and Ventrella, D. (2001) “Produzione, qualità e analisi della filiera produttiva del lino da fibra in Italia”, *Rivista di agronomia*, Vol. 35 (4), pp. 230-239. Available at: https://www.researchgate.net/publication/43784601_Produzione_qualita_e_analisi_della_filiera_produttiva_del_lino_da_fibra_in_Italia (Accessed on 28/11/2024).
- Sadik, S.A. (2019), “Production of Nettle (*Urtica dioica*), environmental and economic valuation in conventional farming”. Master Thesis in Agricultural Economics, University of Helsinki. Available at: <http://hdl.handle.net/10138/306173> (Accessed on 28/11/2024).
- Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Kwiatkowski, J., Tworowski, J. and Szczukowski, S. (2018), “Energy and economic efficiency of camelina and crambe biomass production on a large-scale farm in north-eastern Poland”, *Energy*, Vol. 150, pp. 770-780. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.021>.
- Zanelli, A., Monticelli, C. and Viscuso, S. (2020), “Closing the Loops in Textile Architecture: Innovative Strategies and Limits of Introducing Biopolymers in Membrane Structures”, in Della Torre, S., Cattaneo, S., Lenzi, C. and Zanelli, A. (Eds.), *Regeneration of the Built Environment from a Circular Economy Perspective*, Springer, pp. 263-76. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33256-3_25.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

This study was carried out within the MICS (Made in Italy – Circular and Sustainable) Extended Partnership and received funding from the European Union Next-GenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.3 – D.D. 1551.11-10-2022, PE00000004). This manuscript reflects only the authors’ views and opinions, neither the European Union nor the European Commission can be considered responsible for them.