

Materiali tessili e strategie di riqualificazione. Nuove frontiere per l'efficienza energetica

Just Accepted: December 20, 2024 Published: July 25, 2025

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Giulia Procaccini, <https://orcid.org/0000-0001-5846-3022>

giulia.procaccini@polimi.it

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

Abstract. I materiali tessili, grazie alle loro proprietà intrinseche, svolgono da sempre un ruolo fondamentale nel settore edilizio. Data l'urgente necessità di rinnovare il patrimonio edilizio europeo, il loro uso innovativo in soluzioni di riqualificazione di facciata emerge come una strategia promettente. Il presente lavoro illustra i risultati della ricerca di dottorato sulle Strategie di Riqualificazione con Facciate Tessili (TFRS), alternative valide e sostenibili alle metodologie convenzionali, e ne confronta l'impatto ambientale ed energetico. Promuovendo soluzioni leggere, la ricerca si allinea agli obiettivi di decarbonizzazione, riducendo significativamente l'impatto ambientale ed energetico associato ai metodi di riqualificazione e migliorando la resilienza e l'adattabilità delle facciate.

Parole chiave: Riqualificazione di facciata; Materiali tessili; Efficienza energetica; Transizione ecologica; Resilienza edilizia.

La necessità di nuove soluzioni

Il settore edilizio è il principale responsabile dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra dell'UE, contribuendo rispettivamente per circa il 40% e il 36% del totale (Commissione europea). Circa il 35% degli edifici ha più di 50 anni e quasi il 70% di essi soffre di inefficienza energetica, nonostante solamente l'1% venga annualmente riqualificato. Data la previsione che l'85-90% degli edifici attuali rimarrà in uso oltre il 2050, ne consegue la necessità di misure decisive per raggiungere la neutralità climatica entro quella data. Infatti, benché la riqualificazione edilizia presenti numerosi vantaggi in termini di riduzione di tempi e sprechi e di estensione della durata di vita dei componenti, i costi elevati, la lunga durata e i conseguenti fastidi per gli abitanti spesso scoraggiano costruttori, inquilini e residenti dall'intraprendere tali processi.

Il concetto di riqualificazione si basa sulla necessità di ridurre l'impatto degli edifici sull'ambiente e di migliorarne la salubrità

Il settore edilizio è il principale responsabile dei consumi energetici e delle emissioni di gas

Textile materials and retrofit strategies. New frontiers for energy efficiency

Abstract. Membranes have always played an essential role within the construction sector as a result of their intrinsic properties. Nowadays, with the urgent need to renovate the European building stock, the innovative use of these materials in façade retrofit solutions emerges as a promising strategy to increase the renovation rate. This paper outlines the results of a PhD research that explores Textile Façade Retrofit Strategies (TFRS) as viable, sustainable alternatives to traditional façade retrofits, comparing their environmental and energy impacts. By promoting lightweight solutions, the research aligns with the goals of decarbonisation by significantly reducing the environmental and energy impacts associated with retrofit methods, and enhancing the resilience and adaptability of urban façades.

Keywords: Façade retrofit; Textile membranes; Energy efficiency; Ecological transition; Construction resilience.

per gli occupanti (Martinez *et al.*, 2015). Le facciate, responsabili del 20-30% del consumo energetico totale di un edificio (Dall'O, 2012), rappresentano un elemento critico di intervento. I processi di riqualificazione possono essere classificati in tre tipologie: (i) miglioramento dell'isolamento termico, (ii) riduzione del surriscaldamento delle facciate in vetro dovuto all'elevata trasparenza e (iii) aggiornamento dei sistemi di facciata obsoleti che non soddisfano più gli standard moderni.

Sulla spinta di nuovi incentivi per pratiche sostenibili volte a riciclare il patrimonio edilizio e a ridurre i rifiuti da demolizione, l'impiego di questi processi è aumentato negli ultimi anni. In risposta a questi sviluppi, l'attuale ricerca, condotta nell'ambito di un progetto collaborativo tra Politecnico di Milano, KU Leuven e l'associazione TensiNet, esplora soluzioni innovative di riqualificazione di facciata attraverso l'uso sostenibile di materiali tessili. Questi materiali, ampiamente utilizzati in architettura, meritano ulteriori approfondimenti grazie alle loro caratteristiche di leggerezza, sottigliezza e flessibilità (Beccarelli *et al.*, 2013), che contribuiscono a ridurre l'impatto ambientale (Monticelli *et al.*, 2013). Inoltre, le loro qualità estetiche, la trasparenza e la capacità di controllare l'illuminazione e la luce solare li rendono particolarmente interessanti (Monticelli, 2015). Scelti per la loro adattabilità ad applicazioni sia temporanee che permanenti, offrono soluzioni promettenti in scenari di riqualificazione di facciata.

Lo studio mira, dunque, a sviluppare tecniche rapide, economiche e poco invasive che migliorino l'efficienza energetica e la sostenibilità degli edifici. Concentrandosi sull'uso di materiali leggeri e flessibili, questa ricerca intende fornire nuovi metodi che integrino gli attuali approcci di riqualificazione di facciata.

The need for new solutions

Currently, buildings account for around 40% of EU energy consumption and 36% of greenhouse gas emissions, making them the major energy consumers in Europe (European Commission). Approximately 35% of these buildings are over 50 years old, with nearly 70% of them featuring energy inefficiency. Yet, only around 1% of these structures undergo renovation annually. Given the projected 85-90% of current buildings expected to remain in use by 2050, it is imperative to take decisive measures to achieve climate neutrality in Europe by that time. Despite the benefits of renovation in reducing time, waste, and extending component lifespan, the high costs, long durations, and disruptions often deter builders, tenants, and residents from undertaking such projects. The concept of building retrofit sets

its foundation on the imperative to reduce the detrimental impact of buildings on the environment and enhance their healthiness for occupants (Martinez *et al.*, 2015). The façade of a building, responsible for 20-30% of its total energy consumption (Dall'O, 2012), stands out as a critical element for intervention. Façade renovations can be broadly categorised into three types: (i) enhancements to thermal insulation in older buildings, (ii) solutions for overheating issues in glass façades due to high transparency, and (iii) updates to outdated façade systems that no longer meet modern standards.

In recent years, the adoption of renovation strategies has expanded, driven by new incentives for sustainable practices aimed at upcycling building stock and minimising demolition waste. In response to these developments, the

L'obiettivo finale è quello di contribuire a trasformare il patrimonio edilizio in un ambiente più sostenibile e resiliente, in linea con gli attuali obiettivi ambientali e di efficienza energetica dell'UE.

Quadro teorico e metodologia

Al fine di delineare in maniera efficace nuove strategie per la riqualificazione di facciata, il

lavoro di ricerca collaborativa, combinando competenze accademiche e professionali, si è strutturato in tre fasi (Fig. 1), approfondendo progressivamente le potenzialità, gli impatti e l'applicazione delle TFRS. Attraverso questa struttura, le TFRS sono state valutate complessivamente, dall'esplorazione teorica alla validazione empirica, fino all'applicazione pratica.

La prima fase della ricerca è stata dedicata alla definizione di un quadro teorico completo, ottenuto attraverso un'ampia analisi dello stato dell'arte che ha incluso un'approfondita revisione della letteratura e l'esame di casi studio rilevanti. Questa fase è stata fondamentale per articolare l'ambito della ricerca e facilitare un'analisi comparativa dettagliata tra le strategie convenzionali di riqualificazione di facciata e l'applicazione innovativa di materiali tessili. Gli approfondimenti raccolti durante questa fase hanno costituito la base teorica necessaria per lo sviluppo e la comprensione delle TFRS.

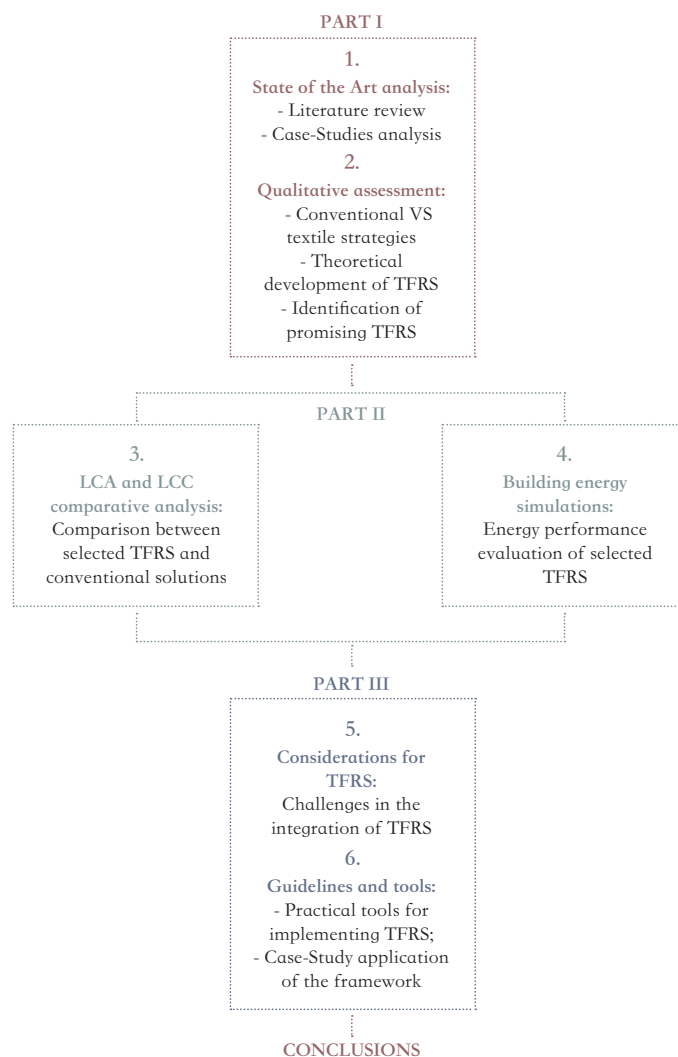
Successivamente, nella fase di valutazione empirica, le TFRS promettenti sono state sottoposte ad analisi comparative attraverso valutazione del ciclo di vita (LCA) e del costo del ciclo di vita (LCC). Inoltre, sono state condotte simulazioni energetiche per misurare l'efficacia di queste strategie in termini di conservazione e modulazione dell'energia. Questa indagine empirica è

current research was carried out as part of a collaborative project between Politecnico di Milano, KU Leuven and TensiNet Association, with the aim of exploring innovative façade redevelopment solutions through the use of textile materials and their environmental impact. Membranes, already variously employed in architecture, are worthy of investigation, among others, thanks to their lightness, thinness and flexibility (Beccarelli *et al.*, 2013), which reduce the environmental impact (Monticelli *et al.*, 2013). Additionally, their aesthetic qualities, translucency, and ability to control sunlight and light make them particularly appealing (Monticelli, 2015). Their use, chosen also for their adaptability to both temporary and permanent applications, offers promising solutions to the prevalent challenges faced in façade retrofitting. The study aims to develop fast,

cost-effective, and minimally invasive techniques that enhance building energy efficiency and sustainability. By focusing on lightweight and flexible membranes, this research intends to provide new methods that complement the current approaches to façade renovation. The ultimate goal is to help transform the European building stock into a more sustainable and climate-resilient environment, in line with EU environmental and energy efficiency objectives.

Theoretical framework and methodology

To effectively investigate innovative façade retrofit strategies, the collaborative research combined academic and professional expertise, structuring the research work into three phases (Fig. 1), each of which progressively delves into the potential, impacts and appli-



stata indispensabile per quantificare l'impatto delle TFRS, valutando così, attraverso dati numerici, i loro benefici ambientali. La fase finale si è infine concentrata sullo sviluppo di un quadro

cation of Textile Façade Retrofit Strategies (TFRS). Through this structured and phased methodology, the research ensured that TFRS were evaluated comprehensively, from theoretical exploration through empirical validation to practical application.

The initial phase of the research was dedicated to establishing a comprehensive theoretical framework. This was achieved through an extensive State-of-the-Art analysis, which included a thorough Literature Review and the examination of relevant Case Studies. This stage was crucial for articulating the research scope and facilitating a detailed comparative analysis between conventional façade retrofit strategies and the innovative application of textiles. The insights gathered during this phase set the foundational theoretical groundwork necessary for the development and understanding of TFRS.

Following the theoretical exploration, the research transitioned into an empirical evaluation phase. In this stage, promising TFRS were subjected to comparative analyses using Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC). Additionally, building energy simulations were employed to measure the effectiveness of these strategies in terms of energy conservation and modulation. This empirical inquiry was imperative for quantifying the performance impacts of TFRS, thus providing robust data to support the validation of their environmental benefits.

The final phase of the methodology focused on developing a structured Framework to implement TFRS into building façade retrofit practices. This phase aimed to tackle the main challenges associated with their integration into renovation processes, creating

strutturato per implementare le TFRS nelle pratiche di riquilificazione di facciata. Mirando ad affrontare le principali sfide associate alla loro integrazione nei processi di ristrutturazione, sono state delineate linee guida e strumenti pratici per un'implementazione efficace. Il quadro risultante non solo combina le intuizioni degli studi teorici ed empirici, ma fornisce anche strategie attuabili per migliorare la resilienza e l'adattabilità delle facciate, facendo progredire in modo significativo lo sviluppo urbano sostenibile.

Identificazione delle strategie

Una valutazione completa è stata essenziale per poter definire e classificare le applicazioni tessili in facciata e sviluppare le TFRS. Ciò ha comportato un esame approfondito delle proprietà dei tessuti, delle loro applicazioni specifiche in facciata e una revisione delle strategie di riquilificazione esistenti, al fine di comprendere il panorama della riquilificazione di facciata e identificare le opportunità di innovazione.

Come dettagliato nel resoconto completo di Procaccini G. *et al.* (2021), che fornisce una documentazione approfondita dello stato dell'arte e una dettagliata analisi qualitativa, un'approfondita revisione della letteratura unita all'analisi di 59 casi studio – ognuno dei quali prevedeva l'uso del tessile in facciata con varie applicazioni – ha portato all'identificazione di nove differenti TFRS (Tab. 1), classificate in base ai loro principali metodi di applicazione: *Replace*, *Addition*, *Wrap it*. Questa classificazione, basata sulla categorizzazione delle metodologie di riquilificazione di facciata sviluppata da Konstantinou (2014) nella sua tesi di dottorato, ha fornito un approccio strutturato per comprendere come integrare le TFRS in diversi progetti di riquilificazione di facciata a seconda delle esigenze e dei vincoli specifici dell'edificio.

Dall'analisi qualitativa iniziale, quattro strategie (*Covering*, *Wrapping*, *Double Skin ed Enclosing*) sono emerse come particolarmente promettenti per i loro potenziali benefici, riducendo efficacemente il carico strutturale aggiuntivo, minimizzando il disagio degli occupanti durante l'installazione e migliorando l'efficienza energetica della facciata attraverso la riduzione dei

	RETROFIT STRATEGY: REPLACE		RETROFIT STRATEGY: ADDITION			RETROFIT STRATEGY: WRAP IT			
	TENSIONED MEMBRANE	CUSHIONS	FINISHING	ADDING	COVERING	WRAPPING	DOUBLE SKIN	ENCLOSING	NESTING
Application plane									
Strategy	Replacement of the entire façade	Replacement of the entire façade	Replacement of the finishing	Addition from the interior	Addition from the exterior	Wrapping of the entire building	Wrapping of the façade	Wrapping of the components	Addition from the interior
Application	In line	In line	In line	In line	Additional layer	Additional layer	Additional layer	Additional layer	Additional layer
Retrofitting measure	Replacement of the entire façade with sandwich panels.	Replacement of the entire façade with pneumatic cushions.	Addition of exterior insulation and finishing system.	Addition of an internal textile layer	(Partial) covering of the façade with textile membrane	Total covering of the building with textile membrane or pneumatic cushions.	Façade covering with textile membrane	Façade elements covering with textile membrane.	Addition of an internal textile structure
Material	Walls: Membrane: textile ± insulation ± OBS	Walls and Windows: Pneumatic cushions Replacing / Enclosing windows	Walls and Balconies: Exterior Insulation and Finishing System	Walls: Textile Layer: air gap + textile finishing	Walls, Balconies and Windows: Screen OR Sun-shading	Walls and Balconies: Second Skin / Buffer zone Windows: (En)closing windows OR Sun-shading	Walls and Balconies: Second Skin / Buffer zone Windows: Double casing OR Sun-shading	Balconies: Integrated Balcony Additional Space Windows: Sun-shading	Walls: Structure into structure (nest) Second interior skin
Operation	Textile Membrane ± Insulation ± OBS	Pneumatic cushions - Multiple layers	Textile Membrane + Insulation	Air gap + Textile Finishing	Textile Membrane	Textile Membrane + Insulation OR Pneumatic cushions	Textile Membrane + Insulation OR Pneumatic cushions	Textile Membrane ± Insulation	Textile Membrane ± Insulation
Limitations	Heat protection: increased thermal resistance and air-tightness	Heat protection; Passive solar heating	Heat protection: increased thermal resistance and air-tightness	Increased thermal resistance; New interior finishing; Detached from the existing	Improved acoustic performances; Sun-shading; Backlit or advertising surface	Heat protection; Thermal buffer unheated zone or ventilated façade; Create extra usable space; Sun-shading	Heat protection; Thermal buffer unheated zone or ventilated façade; Sun-shading	Thermal buffer unheated zone; Create extra usable space; Sun-shading;	Increased thermal resistance; Interior bubble space; Detached from the existing
Verticalities	Façade replacement; Disturbance for occupants; Prefabrication requires detailed survey; Cost	Façade replacement; Disturbance for occupants; Extra structure (and space) required; Cost	Finishing replacement; Thermal bridging of the fixing; Water leakage risks	Lack of interior spaces; No thermal insulation	No thermal insulation; Opening for the shading; Overheating risk	Lack of exterior spaces; Overheating risk; Adequate ventilation needed; Extra structure (and space) required; Cost	Lack of exterior spaces; Extra structure (and space) required; Cost	Overheating risk; Opening for the shading;	Lack of exterior spaces; Adequate ventilation needed; Cost
Verticalities	Different layers and finishing; Different insulation types and thicknesses	Different layers and transparency; Different insulation types and thicknesses	Different insulation types and finishing	Different finishings	Different layers and transparency; Different types and design of covering / shading elements	Different types and design of transparent and opaque elements	Different types and design of transparent and opaque elements	Different layers and transparency; Different types and design of covering elements	Different types and design of elements; Different insulation types and thicknesses

guadagni di luce naturale o la definizione di una zona termica tra l'ambiente interno e quello esterno.

In particolare:

- La strategia *Covering* riduce il guadagno di calore attraverso le finestre e le pareti attraverso la presenza di uno schermo esterno aggiuntivo, diminuendo di fatto la necessità di climatizzazione e riducendo così i costi energetici;
- *Wrapping* e *Double Skin* prevedono l'aggiunta di uno strato esterno alla facciata esistente, formando una zona termica che aiuta a mantenere un clima interno più stabile, riducendo l'energia necessaria per il riscaldamento e il raffreddamento;
- *Enclosing* incapsula alcuni elementi di facciata esistente migliorandone l'isolamento termico.

Validazione delle strategie Per validare i benefici e gli impatti ambientali delle TFRS identificate, sono state condotte analisi LCA e LCC, volte a confrontare l'efficacia e l'efficienza dei costi delle TFRS rispetto a metodi di riqualificazione tradizionali. Per quantificare ulteriormente i vantaggi offerti da queste strategie, sono state eseguite simulazioni energetiche di facciata. Questo processo di validazione è stato essenziale per garantire che le TFRS potessero essere efficacemente implementate in contesti reali, fornendo miglioramenti tangibili nell'efficienza energetica e nel comfort degli occupanti, e allineandosi ai principi di sostenibilità richiesti.

Validazione delle strategie – Analisi LCA e LCC

Le analisi LCA e LCC sono state condotte avvalendosi del software OneClickLCA. Quattro edifici esistenti realizzati con fac-

practical guidelines and tools for effective implementation. The resulting framework not only combines insights from theoretical and empirical studies but also provides actionable strategies to improve the resilience and adaptability of building façades, significantly advancing sustainable urban development.

Identification of the strategies

A comprehensive evaluation was essential to define and categorise textile applications on façades and to develop TFRS. This included a thorough examination of textile properties, their specific façade applications, and a review of existing retrofit strategies. This phase was vital for understanding the façade retrofit landscape and identifying opportunities for innovation. As per the comprehensive report by Procaccini *G. et al.* (2021), which pro-

vides an in-depth documentation of the State of the Art and a detailed Qualitative Analysis, a thorough literature review combined with the examination of 59 case studies – each involving the use of textiles in façades for various applications – resulted in the identification of nine distinct TFRS (Tab. 1).

In accordance with the façade retrofit categorisation developed by Konstantinou T. (2014) in her PhD thesis, these strategies were methodically classified based on their primary methods of application, precisely replacement, addition, and wrapping. This classification provided a structured approach to understanding how textiles can be integrated into different types of façade retrofit projects, depending on the specific needs and constraints of the building. From the initial qualitative analysis, four strategies (*Covering*, *Wrapping*, *Double Skin*, and *Enclosing*) emerged

as particularly innovative due to their potential benefits. Each strategy effectively reduces additional structural load, minimises occupant disruption during installation, and enhances façade energy efficiency by either reducing daylight gains or creating a thermal buffer zone between the interior and exterior environments.

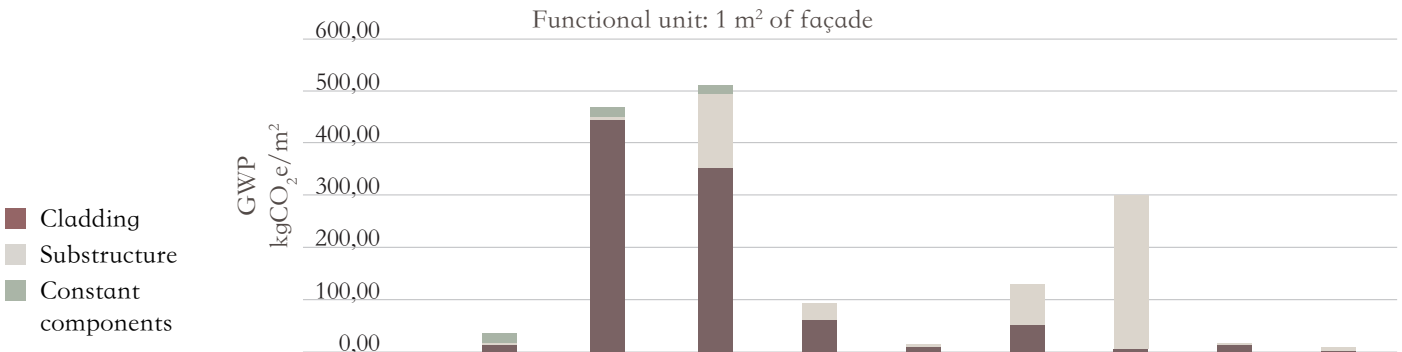
Specifically:

- *Covering* focuses on adding an external layer that reduces heat gain through windows and walls, effectively decreasing the need for air conditioning and, thereby, reducing energy costs;
 - *Wrapping* and *Double Skin* involve creating an additional layer outside the existing façade, forming a thermal buffer zone that helps to maintain a stable interior climate, reducing the energy required for heating and cooling;
 - *Enclosing* encapsulates some existing façade components, thus improving their thermal insulation.
- Validation of the strategies**
- To validate the benefits and environmental impacts of the identified TFRS, comprehensive LCA and LCC analyses were conducted, aimed at comparing the effectiveness and cost-efficiency of TFRS against traditional retrofit methods. Additionally, detailed building energy simulations were also performed to further quantify the energy advantages offered by these strategies. This thorough validation process was essential to ensure that TFRS could be effectively implemented in real world settings, providing tangible improvements in energy efficiency and occupant comfort, while aligning with the required sustainable principles.

02 | Risultati delle analisi LCA and LCC: Confronto tra le categorie di impatto del rivestimento (finitura + sistema di fissaggio)
 LCA and LCC analyses results: Impact category comparison of the cladding (finishing + fixing system)

Code	Name of the project	Textile Façade Retrofit Strategy	Textile material	Alternative design	Reason
1a	Iperal shopping mall - Adamello	Covering	Pretended PES-PVC membrane	1b: polycarbonate panels 1c: aluminum perforated panels	Translucent effect
2a	King Fahad National Library	Sun-shading	PTFE Panels	2a: terracotta panels	Local sourced material
3a	ETFE Unilever headquarter façade	Double Skin	ETFE Panels	3a: spiderglass façade	Transparency
4a	iGuzzini Iberica headquarter	Wrapping	PES-PVC tensioned membrane	4a: metal mesh cladding	Wrapping capacity

| Tab. 02



| 02

IMPACT CATEGORY	UNIT	1a	1b	1c	2a	2b	3a	3b	4a	4b
Global Warming Potential	kg/CO ₂ e	35,9	464,3	508,5	93,00	15,01	127,46	300,28	17,21	8,39
Ozone depletion	g/CFC11e	15,45	15,45	15,44	0,00	0,00	1,61	0,30	0,00	0,00
Acidification	kg/SO ₂ e	0,13	0,42	2,85	0,36	0,05	0,46	1,29	0,08	0,04
Eutrophication	kg/PO ₄ e	0,04	0,10	0,70	0,02	0,01	0,16	0,60	0,05	0,01
Weight	kg/m ²	6,00	48,52	11,72	11,84	22,65	55,11	218,16	1,32	4,25
Cost	€/m ²	247,39	287,08	567,08	128,10	4,29	271,95	221,72	73,63	72,39

Validation of the strategies – LCA and LCC analyses

To assess the environmental and cost implications of the promising TFRS, comprehensive LCA and LCC analyses were conducted using the software OneClickLCA. Four existing buildings outfitted with textile façades served as case studies. These were analysed in comparison to alternative

designs that were specifically tailored based on project characteristics. Table 2 details the selected projects, the alternative designs, the rationale behind choosing these alternatives, and the specific TFRS considered. Each analysis spanned a life cycle of 50 years to evaluate the long-term impacts of durable solutions against those of textile materials, which might require peri-

odic replacement of the cladding. The findings of these analyses, summarised in (Fig. 2), highlighted several noteworthy insights:

- strategies that involved a heavier substructure (1c, 3a, 3b) displayed poorer performance metrics;
- designs that used a higher percentage of plastic materials (1b) ranked among the least effective due to the

significant environmental toll of both material production and waste treatment;

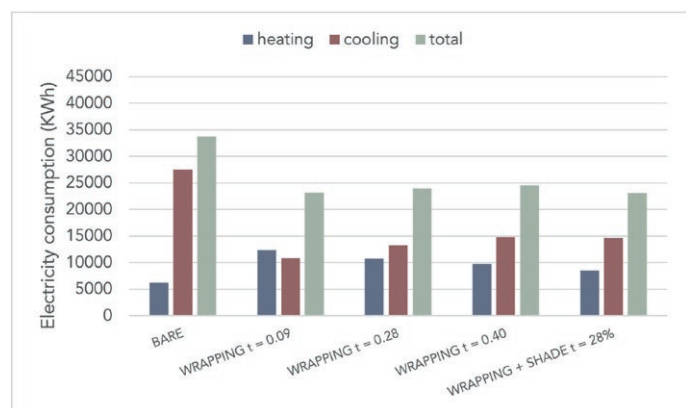
- while the need for periodic replacement of textile materials was common across most TFRS (except for strategy 3a), these impacts were generally minimal and did not significantly affect the overall sustainability of the solutions;

li come i pannelli di terracotta o a materiali riciclati come l'alluminio;

- infine, contrariamente alla percezione comune, dal punto di vista economico queste TFRS rappresentano alternative valide ai metodi di riqualificazione convenzionali, offrendo un'opzione finanziariamente sostenibile per la riqualificazione di facciata.

Questi risultati forniscono una comprensione dell'efficacia e della fattibilità delle TFRS, evidenziandone i potenziali vantaggi e limiti nel contesto delle pratiche edilizie sostenibili.

Validazione delle strategie – Simulazioni energetiche dell'edificio
L'applicazione delle TFRS sulle facciate esistenti è stata analizzata in termini di prestazioni energetiche attraverso simulazioni con il software EnergyPlus. Per valutare l'efficacia di varie configurazioni, come caso studio è stato scelto un edificio esistente che presenta un rivestimento tessile. L'analisi ha messo a confronto tre scenari edilizi: l'edificio 'nudo' senza alcuna schermatura, l'edificio avvolto interamente da un rivestimento tessile e un'ultima configurazione in cui l'edificio risulta avvolto dal rivestimento tessile ad eccezione delle finestre, dove puntuali schermature sono state applicate come tenda tessile esterna. Inoltre, le simulazioni hanno confrontato diverse proprietà di trasmittanza della pelle tessile ($t = 0,09$, $t = 0,28$ e $t = 0,40$). La figura 3 illustra i risultati comparativi in termini di kWh/m². L'analisi ha rivelato che l'installazione di uno schermo tessile davanti alla facciata tende ad aumentare le richieste di riscaldamento invernale a causa della riduzione dei guadagni di luce diurna, ma riduce significativamente le richieste di raffrescamento estivo limitando il guadagno di calore solare. In una valu-



tazione annuale completa effettuata a Milano (Italia), l'impatto netto è risultato positivo, in particolare per la prevalenza del fabbisogno di raffreddamento rispetto a quello di riscaldamento. Inoltre, all'aumentare della trasmittanza della pelle esterna, è visibile un miglioramento della domanda di riscaldamento e una diminuzione della domanda di raffreddamento. La soluzione "involucro + schermatura" (*wrapping + shade*), caratterizzata da uno schermo mobile, si adatta in modo ottimale ai cambiamenti stagionali aumentando l'ingresso della luce diurna in inverno e riducendolo in estate, migliorando così l'efficienza energetica complessiva.

Tuttavia, i risultati di queste simulazioni possono variare in base a diversi fattori, tra cui la posizione specifica, la configurazione e l'orientamento dell'edificio, il rapporto finestre/pareti e la stratigrafia delle pareti. Questa variabilità sottolinea l'importanza di adattare le applicazioni TFRS alle caratteristiche di ogni edificio per massimizzare il risparmio energetico e le prestazioni complessive.

Un quadro di riferimento per l'attuazione delle TFRS

La ricerca si è concentrata non solo sulla definizione di TFRS innovative, ma anche sulla definizione di un quadro completo per la loro attuazione pratica.

- despite confirming insights from Monticelli *et al.* (2017) and aligning with principle 2, there was not a consistent relationship between reduced weight and lower Global Warming Potential (GWP). This variability largely depends on the specific materials used in production. Indeed, while textiles generally performed well, they did not always offer a competitive edge over traditional materials like terracotta panels or recycled materials such as aluminium components;
- lastly, contrary to common perceptions, from an economic standpoint, these TFRS represent viable alternatives to conventional retrofit methods, and their cost impacts are competitive, offering a financially sustainable option for façade renovation. These results provide a nuanced understanding of the efficacy and viability of

TFRS, highlighting both their potential advantages and limitations in the context of sustainable building practices.

Validation of the strategies – Building energy simulations

The energy performance of the application of TFRS over existing façades was thoroughly examined through simulations using the software EnergyPlus. An existing building showcasing a textile cladding was selected as a case study to evaluate the efficacy of various configurations. The analysis compared three building scenarios, precisely, a "bare" building without any shading, a "wrapped" building entirely enveloped by a textile cladding, and a "wrapping + shade" configuration that uses the textile both as a tensioned static element at certain opaque points on the façade and as an external textile curtain for the building's windows.

Additionally, the simulations tested the wrapping configuration with varying transmittance properties of the textile skin, set at $t = 0.09$, $t = 0.28$, and $t = 0.40$. Figure 3 illustrates the comparative results in terms of kWh/m². The data revealed that installing a textile screen in front of the façade tends to increase winter heating demands due to reduced daylight gains, yet it significantly lowers summer cooling requirements by limiting solar heat gain. In a comprehensive annual evaluation set in Milan, Italy, the net impact was found to be beneficial, particularly due to the dominant cooling needs over the heating requirements.

Furthermore, as the transmittance of the skin increases, the simulations show an improvement in heating demands and a decrease in cooling demands. The "wrapping + shade" solution, featuring a movable screen,

optimally adjusts to seasonal changes by allowing daylight gains during the winter and blocking them in the summer, thereby enhancing overall energy efficiency.

However, it is crucial to note that the outcomes of such simulations can vary depending on several factors including the specific location, wall configuration, building orientation, window-to-wall ratio, and wall stratigraphy. This variability underscores the importance of tailoring TFRS applications to the unique characteristics of each building to maximise energy savings and overall performance.

A framework for the implementation of TFRS

This research not only focused on defining innovative TFRS but also on establishing a comprehensive framework for their practical implementation.

L'analisi iniziale dello stato dell'arte ha rivelato un approccio frammentario all'utilizzo dei tessuti in applicazioni di facciata, caratterizzato dall'assenza di un obiettivo chiaro e di una profonda comprensione delle complessità coinvolte e dei potenziali benefici, sottolineando la necessità di un quadro di attuazione strutturato che potesse guidare verso un uso delle TFRS in modo più coerente e orientato agli obiettivi.

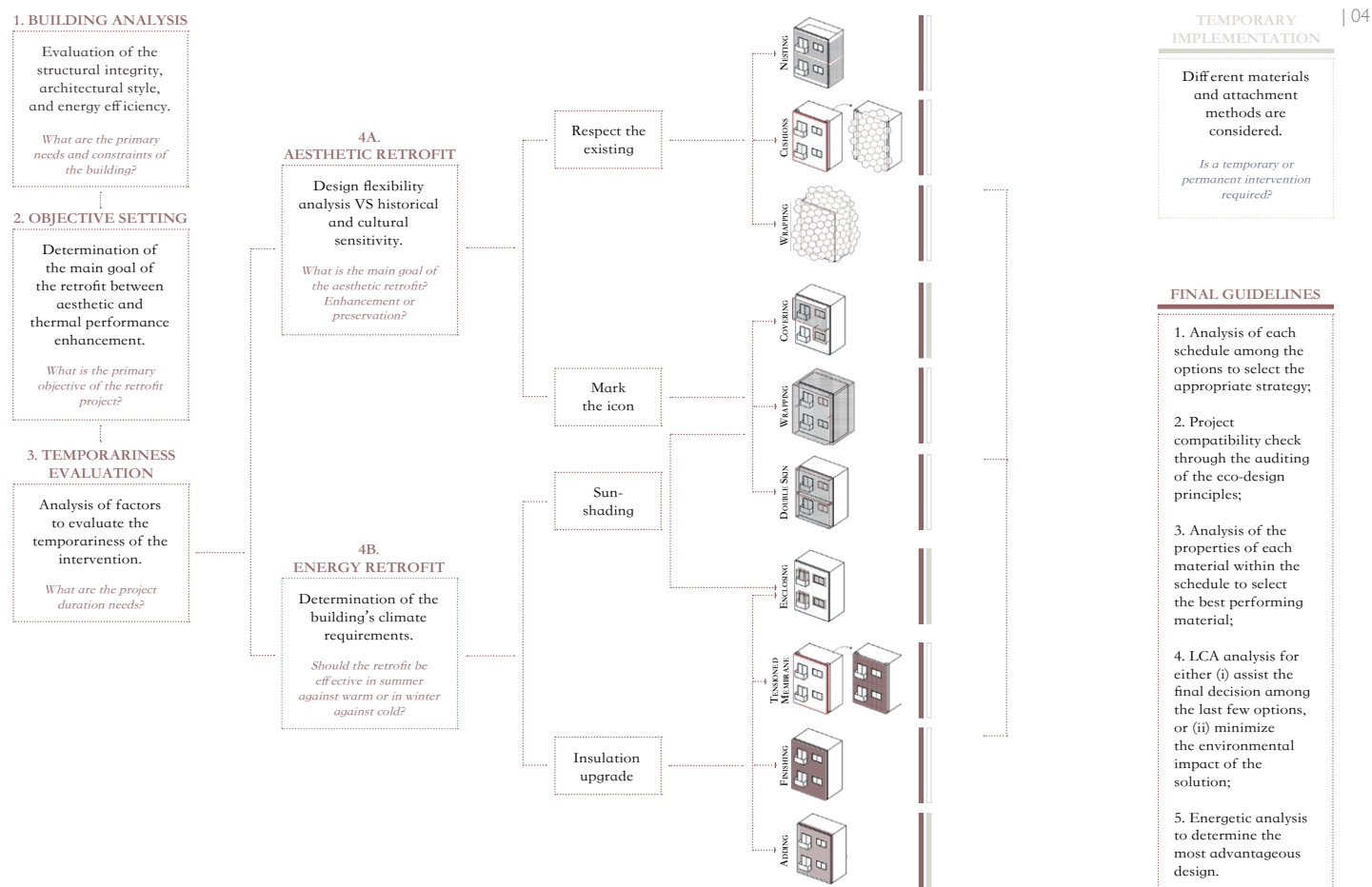
A tal fine sono state sviluppate delle linee guida generali (Procaccini and Monticelli, 2024), che dimostrano il potenziale di queste strategie nel contribuire in modo significativo alla decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Queste linee guida sottolineano anche l'importanza che i produttori forniscano chiare dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) per sostenere l'adozione di pratiche sostenibili.

Per aiutare ulteriormente i professionisti e gli attori coinvolti nell'uso di queste strategie e garantire un approccio sistematico, è stato progettato un diagramma di flusso (Fig. 4) che possa guidare attraverso i passi necessari alla pianificazione di un'ade-

guata riqualificazione di facciata, aiutando a scegliere il gruppo di TFRS appropriato per ogni progetto specifico. Inoltre, sono state sviluppate delle specifiche schede per assistere il processo di selezione, fornendo un ulteriore supporto per navigare nella complessità dell'integrazione delle TFRS nei progetti edilizi. Questo approccio strutturato mira a unificare l'applicazione delle soluzioni tessili negli interventi di riqualificazione di facciata, garantendo che la loro implementazione sia strategica e informata da una comprensione completa sia dei loro impatti che vantaggi.

Conclusioni e prospettive future

Questa ricerca ha ampiamente esplorato l'applicazione e il potenziale delle TFRS nel moderno contesto urbano. Attraverso un'analisi approfondita di revisione dello stato dell'arte e analisi del ciclo di vita, dei costi e simulazioni energetiche, lo studio ha identificato e convalidato diverse strategie di riqualificazione innovative che sfruttano



l'uso di materiali tessili per migliorare le prestazioni di facciata. Queste strategie non solo rispondono alla pressante esigenza di efficienza energetica e di riduzione delle emissioni di gas serra, ma offrono anche soluzioni pratiche che possono essere adattate a diversi contesti edilizi.

Lo sviluppo di un quadro strutturato e di linee guida dettagliate, integrate da un pratico diagramma di flusso, fornisce agli attori coinvolti gli strumenti necessari per implementare efficacemente queste strategie. Le linee guida e gli strumenti sviluppati mirano a standardizzare l'applicazione delle TFRS, assicurando che i loro benefici siano massimizzati e che la loro implementazione sia semplificata in diversi progetti.

La ricerca evidenzia il potenziale di trasformazione dei tessili nelle pratiche di riqualificazione di facciata, sottolineando la loro adattabilità e multifunzionalità. Il presente studio ha il potenziale per aumentare il tasso di *retrofit* delle facciate introducendo soluzioni progettuali innovative, adattabili e sostenibili, applicabili principalmente a edifici appartenenti ai settori commerciale e terziario, spesso trascurati. Questa ricerca colma un divario critico tra l'uso contemporaneo e diffuso dei materiali tessili e le loro proprietà uniche, consentendo ad architetti e ingegneri di migliorare l'estetica degli edifici unitamente alla loro efficienza energetica e al loro impatto ambientale. A lungo termine, la ricerca potrebbe catalizzare una più ampia adozione di materiali avanzati (Denz *et al.*, 2021), stabilire nuovi standard per le pratiche di riqualificazione e contribuire alla transizione dell'industria verso un ambiente costruito più sostenibile e intelligente.

Nonostante i risultati promettenti, è fondamentale riconoscere i limiti intrinseci di questa ricerca. Lo studio si concentra

The initial state of the art analysis revealed a fragmented approach to using textiles in façade applications, with these varying widely and often lacking a clear objective or a deep understanding of the complexities involved and the potential benefits. This situation underscored the need for a structured implementation framework that could guide the use of TFRS in a more coherent and goal-oriented manner.

To address this, general guidelines were developed, as detailed in Procaccini, G. and Monticelli C. (2024), which demonstrate the potential of these strategies to contribute significantly to the decarbonisation of the built environment. These guidelines also stress the importance of manufacturers providing clear Environmental Product Declarations (EPDs) to support the adoption of sustainable practices.

A detailed flowchart was created (Fig. 4) to further aid professionals and stakeholders in approaching retrofit applications and ensure a systematic approach. This flowchart is designed to guide professionals through the necessary steps when planning a façade retrofit, helping them choose the appropriate group of TFRS tailored to each specific project. Alongside the flowchart, specific schedules have been developed to assist with the selection process, providing additional support in navigating the complexities of integrating TFRS into building projects. This structured approach aims to unify the application of textile solutions in façade retrofits, ensuring that their implementation is both strategic and informed by a comprehensive understanding of their impacts and advantages.

prevalentemente sugli aspetti tecnici e materiali delle strategie, senza affrontare il comfort degli occupanti, le aspettative degli utenti e la percezione urbana, aspetti fondamentali per il successo dei progetti di riqualificazione, influenzato dall'accettazione e l'esperienza vissuta degli spazi riadattati. Gli sviluppi futuri includeranno analisi sul campo per convalidare i risultati ottenuti e un più ampio coinvolgimento delle parti interessate per esaminare gli impatti socio-economici e ambientali. L'implementazione di campagne sperimentali avrà inoltre lo scopo di raccogliere *feedback* diretti e incorporare valutazioni post-occupazione per fornire una comprensione più sfumata di come questi interventi di riqualificazione influenzino le esperienze quotidiane degli occupanti e la loro soddisfazione complessiva. Con la continua crescita dei centri urbani e l'aumento della domanda di soluzioni edilizie sostenibili, il ruolo di materiali e tecnologie innovative come quelle esplorate in questo studio diventerà sempre più cruciale. I risultati di questa ricerca contribuiscono in modo significativo allo sviluppo edilizio in un'ottica di sostenibilità ambientale, offrendo percorsi verso la decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Colmando il divario tra ricerca teorica e applicazione pratica, questo studio apre la strada a future innovazioni nelle strategie di riqualificazione degli edifici, segnando un significativo passo avanti verso un approccio guidato dallo sviluppo urbano sostenibile.

ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Questo lavoro, esito di una ricerca di dottorato condotta al Politecnico di Milano, è stato reso possibile grazie al supporto di KU Leuven e TensiNet Association, il cui contributo è stato essenziale per lo sviluppo e la validazione delle strategie innovative esplorate nella ricerca.

Conclusions and future outlooks

This research has extensively explored the application and potential of Textile Façade Retrofit Strategies (TFRS) within the context of modern urban sustainability. By conducting a thorough analysis that includes a State-of-the-Art review, Life Cycle Assessments, cost analysis, and energy simulations, the study has identified and validated several innovative retrofit strategies that leverage textile technologies to enhance building façades. These strategies not only address the pressing need for energy efficiency and reduced greenhouse gas emissions but also offer practical solutions that can be adapted to diverse building contexts.

The development of a structured framework and detailed guidelines, supplemented by a practical flowchart, provides professionals and stakehold-

ers with the necessary tools to implement these strategies effectively. The guidelines and tools developed through this research aim to standardise the application of TFRS, ensuring that their benefits are maximised and their implementation is streamlined across varied projects.

The research highlights the transformative potential of technical textiles in façade retrofitting, emphasising their adaptability and multifunctionality. It has the potential to increase the façade retrofit rate by introducing innovative, adaptable, and sustainable design solutions, mainly applicable to buildings belonging to the commercial and tertiary sectors, which are often disregarded. It bridges a critical gap between the contemporary scattered use of textile materials and their unique properties, enabling architects and engineers to concomitantly enhance building aes-

L'autore dichiara che non esistono conflitti di interesse relativi a questa ricerca.

REFERENCES

Beccarelli, P. and Chilton, J. (2013), "Advantages of lightweight tensioned coated fabrics and foils façades for the building sector", *Structural Membranes, Proceedings of VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Munich, Germany, 9–11 October, 2013*, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona, Spain, pp. 200-211. Available at: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185431/MEMBRES_2013-18_Advantages%20of%20lightweight%20tensioned.pdf (Accessed on 21/11/2024)

BPIE (2011), *Europe's Buildings under the Microscope*. Available at: <https://www.bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope> (Accessed on 02/06/2024).

BPIE (2020), *Renovate Europe. Building Renovation, a Kick Starter for the EU Recovery*. Available at: <https://www.renovate-europe.eu/2020/06/10/building-renovation-a-kick-starter-for-the-eu-economy> (Accessed on 02/06/2024).

Corrêa, D., Flores-Colen, I., Silvestre, J. D., Pedroso, M. and Santos, R. A. (2020), "Old Buildings' Façades: Fieldwork and Discussion of Thermal Retrofitting Strategies in a Mediterranean Climate". *Designs*, Vol. 4 (45), Available at: <https://doi.org/10.3390/designs4040045> (Accessed on 22/10/2022)

Dall'O, G., Galante, A. and Pasetti, G. (2012), "A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks", *Sustainable Cities and Societies*, Vol. 4, pp. 12–21. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.01.004>

Denz, P., Sauer, C., Waldhor, E.F., Schneider, M., and Vongsingha, P. (2021), "Smart Textile Sun Shading. Development of Functional ADAPTEX Prototypes". *J. Façade Des. Eng.* 2021, Vol. 9 (1), pp. 101 – 116, Available at: <https://doi:10.7480/jfde.2021.1.5539> (Accessed on 26/05/2021)

thetics, energy efficiency, and environmental performance. In the long term, the research could catalyse broader adoption of advanced materials (Denz *et al.*, 2021), set new standards for retrofitting practices, and contribute to the industry's transition toward greener, smarter built environments. Despite the promising findings, it is crucial to acknowledge the inherent limitations of this research. The study predominantly focuses on technical and material aspects of TFRS, while it does not address broader human dimensions such as occupant comfort, user expectations, and urban perception. These aspects are vital as the success of retrofit projects significantly hinges on user satisfaction and comfort, influencing acceptance and the living experience of retrofitted spaces. Future developments will include field analyses to validate the results

obtained, and broader involvement of stakeholders to examine socioeconomic and environmental impacts. The implementation of experimental campaigns to gather direct feedback and incorporate Post-Occupancy Evaluations is also planned to provide a more nuanced understanding of how these retrofits affect occupants' daily experiences and overall satisfaction. As urban centres continue to grow and the demand for sustainable building solutions increases, the role of innovative materials and technologies like those explored in this study will become increasingly crucial. The findings of this research contribute significantly to the field of sustainable architecture, offering pathways toward the decarbonisation of the built environment and the advancement of climate-neutral urban living. By bridging the gap between theoretical research

European Commission (2020), *Energy Efficiency in Buildings*, 17 February. Available at: https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17_en (Accessed on 02/06/2024).

Konstantinou, T. (2014), "Façade Refurbishment Toolbox. Supporting the Design of Residential Energy Upgrades", PhD Thesis, Faculty of Architecture and the Built Environment, TU Delft, Delft, Netherlands.

Martinez, A., Patterson, M., Carlson, A. and Noble, D. (2015), "Fundamentals in Façade Retrofit Practice", *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction*, Procedia Engineering, Vol. 118, pp. 934–941. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.534> (Accessed on 13/02/2022).

Mendonça, P. (2010), "Low-span lightweight membranes in housing—environmental and structural potentialities", in *Structures and Architecture*, pp. 1–10. Available at: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/12084/1/PM_paperCD.pdf (Accessed on 16/01/2021).

Monticelli, C. (2015), "Membrane claddings in architecture", in de Llorens, J.I. (Ed.), *Fabric structures in Architecture*, Elsevier Ltd., Cambridge, pp. 449-479. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-233-4.00014-0> (Accessed on 07/03/2021).

Monticelli, C. and Zanelli, A. (2016), "Life Cycle Design and efficiency principles for membrane architecture: towards a new set of eco-design strategies", *Procedia Engineering*, Vol. 155, pp. 416–425. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.045> (Accessed on 17/10/2022).

Monticelli, C., Zanelli, A. and Campioli, A. (2013), "Life cycle assessment of textile façades, beyond the current cladding system", *TensiNet Symposium Proceedings*, Istanbul, pp. 467-476. Available at: https://www.researchgate.net/publication/277236712_Life_cycle_assessment_of_textile_facades_beyond_the_current_cladding_systems (Accessed on 18/04/2022).

Monticelli, C., Zanelli, A. and Centrulli, M. (2017), "Application and validation of eco-efficiency principles to assess the design of lightweight structures: case studies of ETFE building skins", in *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 "Interfaces: architecture. engineering. science"*, September

and practical application, this study paves the way for future innovations in building retrofit strategies, marking a significant step forward in our approach to sustainable urban development.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

This study, which is the result of doctoral research conducted at the Politecnico di Milano, was carried out thanks to the support of KU Leuven and TensiNet Association, whose contribution was essential for the development and validation of the innovative strategies explored in the research.

The author declares that there are no conflicts of interest related to this research.

25-28, 2017, Hamburg, Germany, Annette Bögle, Manfred Grohmann (Eds.). Available at: https://re.public.polimi.it/retrieve/e0c31c0c-36d7-4599-e053-1705fe0aef77/IASS%202017_ml_10250_1500268214.pdf (Accessed on 16/12/2020).

Paech, C. (2016), "Structural membranes used in modern building façades", *Procedia Engineering*, Vol. 155, pp. 61–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.007> (Accessed on 12/12/2020).

Procaccini, G. and Monticelli, C. (2024), "The application and potentialities of textile façade retrofit strategies for energy-efficient and resilient buildings", *E3S Web of Conferences*, Vol. 546, 03005. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454603005> (Accessed on 20/09/2024).

Procaccini, G., Prieto, A., Knaack, U., Monticelli, C. and Konstantinou, T. (2024), "Textile Membrane for Façade Retrofitting: Exploring Fabric Potentialities for the Development of Innovative Strategies", *Buildings*, Vol. 14, p. 86. Available at: <https://doi.org/10.3390/buildings14010086> (Accessed on 10/01/2024).

Sandin, G. and Peters, G.M. (2018), "Environmental impact of textile reuse and recycling – A review", *Journal of Cleaner Production*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266> (Accessed on 13/02/2023).