

TERMINTONACI NATURALI PER MATICI FIBROCOMPOSTE

Analisi strutturale-energetico-ambientale

NATURAL THERMAL PLASTERS FOR FIBRE-COMPOSITE MATRICES

Structural-energy-environmental analysis

Rosa Romano, Valerio Alecci, Antonino Maria Marra,
Elisabetta Palumbo

ABSTRACT

L'articolo presenta i primi risultati della ricerca MIRACLE, finalizzata a progettare, testare e realizzare innovativi sistemi di rinforzo a matrice bio-composita, additivati con termintonaci a base naturale, utilizzabili in interventi di risanamento di edifici residenziali realizzati prima del 1945. Partendo da una sintetica descrizione delle proprietà delle matrici cementizie fibrorinforzate di tipo organico, supportata da una ricognizione delle ricerche internazionali finalizzate a sviluppare metodologie, sistemi e componenti innovativi, utilizzabili per migliorare le prestazioni energetiche e meccaniche di edifici storici vincolati, saranno analizzati i termintonaci più idonei (tra quelli esistenti sul mercato italiano), individuandone le caratteristiche prestazionali sia sotto l'aspetto meccanico sia sotto l'aspetto termico e di sostenibilità ambientale.

The article presents the first results of MIRACLE research, aimed at designing, testing, and implementing innovative reinforcement systems with bio-composite matrix, with additives containing natural thermal-plasters, usable in the restoration of residential buildings created before 1945. Starting from a brief description of the properties of fibre-reinforced cement organic matrices, supported by a survey of international research aimed at developing innovative methodologies, systems, and components used to improve the energy and mechanical performances of listed historic buildings, the most suitable thermal-plasters will be analysed (among those existing on the Italian market), identifying the performance characteristics both in terms of mechanic and thermal and environmental sustainability.

KEYWORDS

termintonaci, matrici fibrocomposte, rischio sismico, efficienza energetica, Life Cycle Thinking

thermal-plasters, fibre-composite matrices, seismic risk, energy efficiency, Life Cycle Thinking

Rosa Romano, PhD Architect, is a Researcher at the Department of Architecture in Florence (Italy). She carries out research mainly in the fields of Environmental Sustainability and Energy Efficiency in Building, focusing on the topic of design of innovative façade components for the Mediterranean climate. E-mail: rosa.romano@unifi.it

Valerio Alecci, Architect and PhD, is a Researcher at the Architecture Department of the University of Florence (Italy). He carries out research activities mainly in the field of mechanical behaviour of traditional and innovative materials, and seismic vulnerability of historical masonry. E-mail: valerio.alecci@unifi.it

Antonino Maria Marra, Civil Engineer and PhD, is a Researcher at the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Florence (Italy). He is involved in numerous researches concerning the seismic risk of historical structures, structural health, monitoring and wind engineering. E-mail: antoninomaria.marra@unifi.it

Elisabetta Palumbo, Architect and PhD, is a Senior Researcher at the Inab Department of RWTH Aachen University (Germany). Her research interests are mainly focused on traditional and innovative materials and construction systems for the sustainability of the built environment. E-mail: elisabetta.palumbo@inab.rwth-aachen.de

Il recupero e il consolidamento del patrimonio edilizio esistente è un tema complesso che apre numerose questioni e che coinvolge ambiti e competenze professionali differenti. Intervenire sull'edilizia storica, intesa come Bene culturale, significa garantire livelli prestazionali minimi che riguardano la messa in sicurezza della struttura e la risoluzione di criticità relative ai consumi energetici e del suo impatto ambientale. Tali obiettivi si traducono in strategie progettuali per la gestione del Bene architettonico vincolato, volte a ottenere un innalzamento della sicurezza strutturale e del comfort indoor, agendo tramite interventi non invasivi in un'ottica di salvaguardia. A ciò si aggiunge il problema della frammentarietà degli interventi, in un panorama nel quale il tema del risanamento energetico è spesso disgiunto da quello del miglioramento sismico, portando a sottovalutare in termini teorici e metodologici la necessità di sviluppare azioni di risanamento/restauro congiunte che permettano di intervenire in modo sistematico ed efficace sull'ambiente costruito, senza alterarne le caratteristiche semiotiche.

Negli ultimi anni, la difficoltà nel riuscire a introdurre soluzioni tecnologiche e strategiche che siano compatibili con l'organismo edilizio da preservare ha determinato lo sviluppo di nuovi materiali 'specializzati' (Battisti et alii, 2018) in grado di incrementare la resistenza meccanica, migliorandone l'inerzia e la trasmittanza termica, senza andare a gravare sulla struttura portante (sia essa puntiforme o continua) con ulteriori carichi. La sperimentazione in atto, inoltre, ha prodotto risultati soddisfacenti nell'ambito dei metodi di produzione avanzata propri della Material Ecology, un campo emergente nel design bio-orientato, in cui è significativa la persistenza di sinergie intrinseche tra vincoli ambientali, metodi di produzione ed espressione percettivo-funzionale del materiale realizzato (Oxman, 2012).

In quest'ottica si inserisce lo studio dei materiali compositi che permette di trasferire al settore della produzione edilizia conoscenze maturate in altri settori industriali. Si tratta di materiali eterogenei, cioè costituiti da due o più sostanze semplici con proprietà fisiche differenti, tali da permettere il raggiungimento di ottime prestazioni termiche, meccaniche e ambientali. Nel dettaglio, un composito fibrorinforzato è ottenuto dall'unione di fibre (organiche o inorganiche) annegate in una matrice realizzabile con materiali sintetici o naturali, come i termointonaci (Fig. 1). Il rinforzo, definito da una base fibrosa, garantisce un miglioramento delle caratteristiche meccaniche mentre la matrice permette l'applicazione del rinforzo al supporto strutturale, migliorandone talora anche le prestazioni termo-igrometriche. L'elevata tensione di rottura, la resistenza a corrosione, la leggerezza, la non invasività, la reversibilità dell'intervento sono le caratteristiche principali di questo tipo di materiale che risulta essere particolarmente idoneo a essere utilizzato per il recupero di strutture in muratura portante, tipiche dell'edilizia storica (Fig. 2).

Partendo da queste premesse, il progetto MIRACLE (Sistemi di rinforzo a matrice cementizia a basso impatto ambientale per la riduzione della vulnerabilità sismica e l'incremento del-

l'efficienza energetica degli edifici storici), attraverso un approccio multi-scala 'dall'idea alla realizzazione', mira all'individuazione di uno o più mescole per la realizzazione di componenti biocompositi, da utilizzare in interventi di consolidamento di edifici residenziali realizzati in Europa prima del 1945. L'analisi di diverse tipologie di termointonaci utilizzabili per la realizzazione della matrice, l'individuazione di sistemi di produzione efficaci, il forte legame con il territorio e l'industria sono i punti cardine della ricerca, insieme con un forte carattere pluridisciplinare che, partendo dalla tecnologia dell'architettura, coinvolge l'ingegneria dei materiali e la tecnica delle costruzioni. L'approccio metodologico proposto, dopo un approfondimento relativo allo studio dello stato dell'arte e dei prodotti esistenti sul mercato, è caratterizzato da una fase sperimentale di prove e simulazioni in laboratorio, a cui seguirà la realizzazione di un prototipo da testare in ambiente reale (Fig. 3).

I termointonaci, scelti dopo una fase di comparazione analitica, saranno in prima istanza testati dal punto di vista strutturale ed energetico, in abbinamento al rinforzo fibroso, attraverso simulazioni e prove di laboratorio, finalizzate a comprenderne il contributo alla scala dell'edificio. A conclusione di questa fase, individuata la matrice con le prestazioni migliori dal punto di vista del comportamento meccanico e del comportamento termodinamico, sarà realizzato un prototipo di muratura a scala 1:1 che, montato sulla testcell UNIFI – Abitare Mediterraneo, potrà essere analizzato per circa sei mesi con l'obiettivo di determinare il suo comportamento termodinamico in ambiente reale. Parallelamente saranno valutati i profili ambientali e gli eventuali benefici, in termini di ridotti impatti ambientali e uso di risorse, derivanti dall'applicazione della matrice individuata dalla ricerca rispetto a matrici di tipo tradizionale.

In questo articolo vengono presentati i risultati relativi alla prima fase della ricerca, finalizzata a definire i requisiti (ecologici, fisico-tecnici, meccanici ed energetici) dei termointonaci utilizzabili per la realizzazione della matrice MIRACLE che sarà testata successivamente in laboratorio. Al fine di raggiungere gli esiti proposti per questo obiettivo operativo sono stati, infatti, analizzati 59 termointonaci tra quelli già presenti sul mercato italiano, aventi caratteristiche prestazionali analoghe a quelle che si desidera ottenere con il sistema MIRACLE, per valutare il grado d'innovazione a cui puntare, circoscrivendo il campo d'indagine a quelle tipologie di materiali che meglio di altri possono essere integrati nel sistema proposto e che siano in grado di esprimere le potenzialità rispetto alle quali dovrà essere progettato il componente MIRACLE per essere competitivo, grazie all'innovazione contenuta, nel mercato del mondo delle costruzioni.

Matrici fibro-rinforzate biocomposite per il recupero degli edifici storici

In Italia, la riqualificazione del Patrimonio edilizio vincolato è stata, negli ultimi anni, oggetto di interesse sotto due principali aspetti: quello energetico, inteso come riduzione dei consumi per la climatizzazione invernale ed estiva, e quello strutturale, inteso come miglioramento del comportamento sismi-

co. Questo duplice approccio, sebbene rivolto a un unico edificio, raramente viene percepito e affrontato in maniera unitaria e congruente. Inoltre, le scelte dei produttori nel settore dell'edilizia devono confrontarsi con l'innalzamento dei livelli di prestazione meccanica ed energetica richiesti dal mercato e dalle istanze di un panorama normativo sempre più attento ai principi di sostenibilità e impatto ambientale LCA-based che caratterizzano l'intero processo edilizio. A ciò va aggiunta la necessaria riflessione sulle problematiche di tipo sismico che da sempre affliggono il territorio italiano.

Soprattutto in contesti ad alto valore storico, le tecnologie che si svilupperanno nei prossimi anni dovranno essere in linea con i principi fondamentali del risparmio energetico così come indicato dalle Direttive Europee, in particolare la Energy Performance Directive del 2018 (European Commission, 2018), e il New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and more Competitive Europe (European Commission, 2020) che invitano a riflettere sulle soluzioni utilizzabili in interventi di riqualificazione edilizia in un'ottica di Life Cycle Thinking. In tale ambito, la potenzialità delle soluzioni di rinforzo strutturale realizzate con materiali compositi, tra cui i termointonaci (Fig. 4), è insita proprio nella capacità di offrire incrementi di resistenza, trasmittanza e inerzia termica senza gravare la struttura con ulteriori carichi, aumentandone la capacità in termini deformativi. Nonostante ciò, i materiali avanzati in generale, e i compositi in particolare, sono ancora poco utilizzati nel settore delle costruzioni e vengono spesso relegati a fenomeni sperimentali sporadici (Savoja, 2018).

Le applicazioni di maggior interesse si hanno in componenti secondari (come appretti e reti per intonaci) o, nel caso di rinforzi strutturali di edifici esistenti, realizzati con le cosiddette fasce di rinforzo con fibre di carbonio, aramidiche e, più raramente, di vetro. Nell'ultimo ventennio, i materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP), sono stati ampiamente studiati e utilizzati con successo per applicazioni su murature esistenti in zona sismica. In particolare, i nuovi compositi a matrice cementizia FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) stanno diventando una valida alternativa agli FRP perché il loro utilizzo permette di superare gli inconvenienti associati alle matrici polimeriche, come la bassa resistenza alle alte temperature, la bassa permeabilità al vapore, la difficile applicazione su supporto irregolare o bagnato e, molto importante, la scarsa compatibilità con il supporto in muratura ancor di più se di tipo storico e monumentale.

Tuttavia, sono disponibili ancora solo pochi studi sulle proprietà meccaniche di tali compositi FRCM. In letteratura (Alecci et alii, 2019; Barducci et alii, 2020), infatti, sono al momento reperibili studi sul rinforzo di pannelli murari con strisce di composito poste in opera secondo differenti configurazioni geometriche al fine, in primis, di valutare l'incremento apportato al pannello murario in termini di resistenza a taglio. Inoltre, se l'investigazione sul comportamento di rinforzi con fibre di carbonio associate a resine epossidiche applicate a sistemi in cemento armato è ormai pluridecennale e ha fornito ottimi risultati, la sperimentazione su supporti murari,

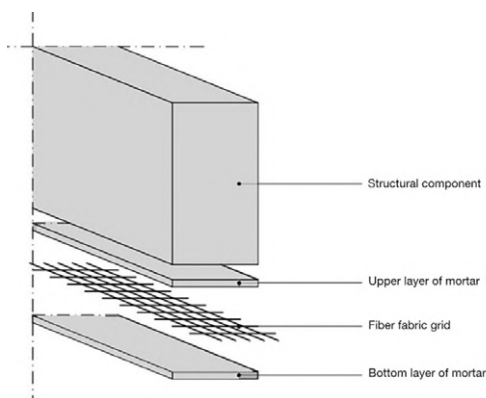


Fig. 1 | Stratigraphy diagram of a fibre-reinforced composite material.

Fig. 2 | Realisation of load-bearing masonry samples on which a fibre-based reinforcement and a cement matrix are applied.

al contrario, ha messo in luce notevoli punti critici. Questi consistono nelle modalità di rottura per delaminazione, cioè distacco dalla muratura con asportazione di un sottile strato del paramento murario (e quindi procurando danni irreversibili alle superfici murarie stesse).

I rapidi sviluppi delle tecniche e delle tipologie di produzione dei materiali (come i laminati ceramici) e l'introduzione in edilizia di materiali specializzati (Li et alii, 2015), quali i nanomateriali, hanno rappresentato negli ultimi decenni degli stimoli costanti per l'innovazione dei componenti da utilizzare nella rigenerazione architettonica, ottimizzati in termini prestazionali. Nonostante ciò, i materiali compositi rappresentano un caso emblematico all'interno della macro area di sperimentazione legata al settore della progettazione dei materiali e dell'architettura bioecologica, giungendo finanche a essere considerati come 'la prima forma di materia progettata' (Antonini, 2008). Inoltre, numerose sono le ricerche sviluppate in ambito nazionale e internazionale sul tema della riqualificazione degli edifici storici che hanno indagato con particolare attenzione il tema dell'innovazione di materiali e componenti per il loro consolidamento ed efficientamento energetico-ambientale, anche attraverso l'uso di matrici polimeriche bioderivate e/o biodegradabili e da fibre di origine naturale (Sallit et alii, 2015; Savoja, 2018; Bottino-Leone et alii, 2019). Le matrici a base tessile impregnate di leganti inorganici (TRM; Fig. 5) possono essere considerate, in tal senso, l'ultima frontiera della ricerca scientifica relativa al consolidamento degli edifici storici: si tratta di materiali che hanno un costo sostenibile, non difficili da posare, resistenti al fuoco e compatibili sia con il calcestruzzo sia con sistemi di muratura a sacco o realizzati in elementi di laterizio (Bournas, 2018).

Infine, seppur l'edificio vincolato non è soggetto a nessun obbligo normativo dal punto di vista delle prestazioni energetiche, vista la difficoltà di intervenire sul suo apparato murario senza comprometterne le caratteristiche estetiche vincolanti, numerose sono le ricerche (Ciulla et alii, 2016; Cirami et alii, 2017) che negli ultimi anni hanno cercato di migliorarne le prestazioni termo-igrometriche in modo non invasivo e coerente con i principi di salvaguardia ambientale. In quest'ottica rientrano, gli studi inerenti l'utilizzo dei Phase Change Materials (PCM) e di aerogel per la realizzazione di intonaci termici adatti all'utilizzo di interventi di riqualificazione nell'edilizia storica (Ganobjak et alii, 2020).

Analisi delle prestazioni energetico-strutturali-ambientali dei termointonaci

Come anticipato, l'obiettivo della ricerca MIRACLE è quello di sviluppare una matrice fibrorinforzata, realizzabile con termointonaci a basso impatto ambientale, che abbia particolari caratteristiche prestazionali sia sotto l'aspetto meccanico che sotto l'aspetto termico, tale da poter affrontare le criticità che si presentano negli edifici interessati da azioni di risanamento conservativo.

I termointonaci sono malte per muratura che presentano ottime caratteristiche isolanti, identificati dalla norma UNI EN 998-1 – Malte per Intonaci Interni ed Esterni come 'malte a prestazione garantita con proprietà isolanti specifiche'. È importante ricordare come la differenza tra un intonaco tradizionale e un intonaco termico dipenda dal suo valore di conduttività termica (λ). Secondo la UNI EN 998-1, infatti, le malte termiche, identificate dalla lettera T, rispetto alle altre tipologie devono garantire un valore di $\lambda < 0,1$ W/mK per rientrare nella categoria T1 oppure inferiore a 0,2 per la categoria T2: al diminuire del valore della conduttività termica diminuisce anche il flusso di calore che attraversa l'elemento (Bianco et alii, 2015). Per assicurare buone prestazioni isolanti i termointonaci sono prodotti sostituendo, parzialmente o totalmente, alla classica miscela di legante (costituita da acqua e inerte) una composizione a base di aggregati leggeri che possono essere di tipo sintetico (perle di polistirene espanso, fibre di vetro, vetro espanso, ecc.) o di tipo naturale (sughero, paglia, cellulosa, pomice, vermiculite, perlite espansa, ecc.). Per quanto riguarda invece il legante principale viene solitamente utilizzata la calce idraulica, poiché: 1) grazie alle sue caratteristiche igroscopiche garantisce una buona permeabilità al vapore, tale da far traspirare la struttura evitando così la formazione di fenomeni di condensa interstiziale e superficiale; 2) la buona lavorabilità e le caratteristiche chimiche della sua miscela si adattano perfettamente alle strutture in muratura, garantendo il rispetto del criterio di reversibilità dell'intervento.

Partendo da questa premessa teorica, e al fine di avere una visione chiara delle peculiarità termiche e meccaniche dei termointonaci presenti sul mercato italiano e utilizzabili per la realizzazione della matrice MIRACLE, la prima parte della ricerca è stata finalizzata ad analizzare, attraverso un originale approccio bottom-up, le caratteristiche di tali materiali con l'obiettivo di

scegliere quelli più idonei a essere combinati con la matrice di base realizzata con un rinforzo in tessuto bidirezionale (bilanciato nelle due direzioni) di rete in fibre di basalto (con interasse tra i filamenti di mm 17 e spessore equivalente di mm 0,032) prodotto da Kerakoll S.p.A.

Nel dettaglio, questa fase ha riguardato la catalogazione di 59 tipologie di termointonaci, individuati rispetto ai seguenti parametri: 1) Composizione, con particolare attenzione alla presenza di materiali riciclabili o riciclati; 2) Classe tipologica, in relazione alla norme UNI di riferimento; 3) Granulometria (mm); 4) Temperatura di applicazione ($^{\circ}$ C); 5) Spessore minimo di applicazione (mm); 6) Spessore massimo di applicazione (mm); 7) Tipologia di utilizzo (esterno e/o interno); 8) Resistenza alla compressione σ (N/mm²); 9) Resistenza di permeabilità al vapore acqueo; 10) Densità (kg/m³); 11) Conduttività termica λ (W/mK); 12) Classe di resistenza al fuoco; 13) Contenuto di riciclato (%); 14) Assenza di sostanze pericolose.

Inoltre, al fine di supportare le scelte tecniche di progetto orientate agli aspetti di sostenibilità ambientale, i prodotti sono stati valutati rispetto alle specifiche tecniche previste dai CAM Edilizia (D.M. 11 ottobre 2017), e in particolare in relazione ai Criteri 2.4.1.2 – Materia Recuperata o Riciclata e 2.4.1.3 – Sostanze Pericolose. Nello specifico, il criterio 2.4.1.2 stabilisce che il contenuto di materia recuperata o riciclata nei materiali utilizzati per la costruzione o riqualificazione di un edificio, anche considerando diverse percentuali per ogni materiale, deve essere pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale di tutti i materiali utilizzati (di tale percentuale, almeno il 5% deve essere costituita da materiali non strutturali). Questa prestazione è stata, pertanto, analizzata facendo riferimento a quei prodotti dotati di asserzione ambientale autodichiarata (etichetta ambientale di Tipo II conforme alla norma UNI EN ISO 1402:2016) verificata e convalidata da un Ente terzo. Mentre, la conformità al criterio 2.4.1.3 dei prodotti è stata verificata attraverso i certificati di prova di laboratorio in possesso dei produttori e rilasciati da Organismi di valutazione.

Successivamente all'individuazione dei criteri necessari a parametrizzare le prestazioni termoigrometriche, meccaniche e ambientali degli intonaci termici commercializzati sul territorio nazionale, si è operata una prima suddivisione degli stessi, catalogandoli in quattro macro-gruppi:

1) Termointonaci a base di calce idraulica e additivati con inerti e/o aggregati vari (ad es. silicati, argilla, calcari, vetro, cemento, polistirene espanso e polipropilene); si tratta di 26 prodotti caratterizzati da buoni valori di permeabilità a vapore, un'ottima resistenza agli sbalzi termici e semplicità di posa; tra questi, i materiali contenenti materie plastiche presentano ottimi valori di conduttività termica grazie alla presenza di microsfele di polipropilene e polistirolo, a fronte di scarsi valori di resistenza a compressione (Fig. 6); un comportamento opposto si verifica nei termointonaci contenenti una percentuale di cemento che chiaramente aumenta i valori di resistenza meccanica ma non offre vantaggi dal punto di vista termico. Anche l'aggiunta di fibre di vetro garantisce buone prestazioni termiche con valori di conduttività che si attestano su 0,086 W/mK;

2) Termointonaci realizzati con materiali naturali; fanno parte di questo gruppo 26 prodotti che contengono sughero, fibre di canapa e calce idraulica naturale NHL (ovvero calce prodotta senza utilizzare materiali pozzolanici o idraulici); l'analisi ha rilevato come questa categoria di materiali presenti caratteristiche meccaniche e termiche differenti in relazione agli inerti presenti (Fig. 7); in particolare, l'aggiunta di aggregati minerali, sughero o canapa garantisce il raggiungimento di ottimi valori di conduttività termica mentre la presenza di calce NHL e inerti leggeri, quali sabbia, consente di raggiungere valori sufficienti di resistenza a compressione;

3) Termointonaci realizzati con materiali riciclati o riciclabili (4 prodotti; Fig. 8), costituiti principalmente da aggregati minerali riciclati o provenienti da scarti del vetro; essi presentano ottime prestazioni termiche, con buoni valori di resistenza a compressione che oscillano tra 1,4 N/mm² fino ad un massimo di 5 N/mm²;

4) Termointonaci contenenti PCM; lo studio ha interessato 3 prodotti realizzati con: microcapsule MICRONAL di acrilato contenenti cere di paraffina con un punto di fusione tra i 23 e i 26 °C, prodotte dalla BASF; microcapsule contenenti cere di origine vegetale INERTEK PCM 118, prodotte dalla WINCO Technologies; i valori di conducibilità termica di questi materiali sono compresi tra 0,075 e 0,29 W/mK, mentre quelli di resistenza compressione si attestano intorno a 2 N/mm².

Risultati | La comparazione analitica tra i prodotti scelti ci ha permesso di scegliere 10 tipologie di materiale con buone caratteristiche di conduttività termica (λ inferiore a 0,1) e resistenza a compressione (σ compresa tra 2 e 6). Come si può vedere dalla Figura 9 i prodotti con queste caratteristiche sono in prevalenza quelli riconducibili ai macro-gruppi 2 e 3, e quindi compatibili con l'obiettivo di realizzare una matrice fibrocomposta a basso impatto ambientale. Analizzando nel dettaglio le caratteristiche dei prodotti scelti (Tab. 1) possiamo vedere che si tratta di termointonaci realizzati prevalentemente con materiali naturali, ad eccezione di Diathonite Thermactive 037, Diathonite Evolution, FC 19 Bicalce Intonaco e Into-Sughero che contengono anche materiale riciclato (come vetro espanso e/o inerti minerali). Dai dati raccolti si evince che i prodotti più

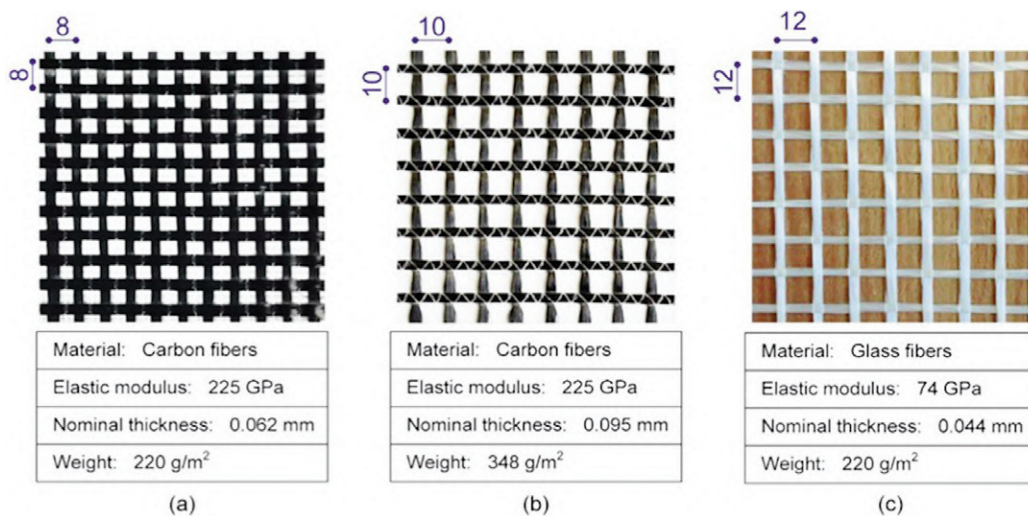
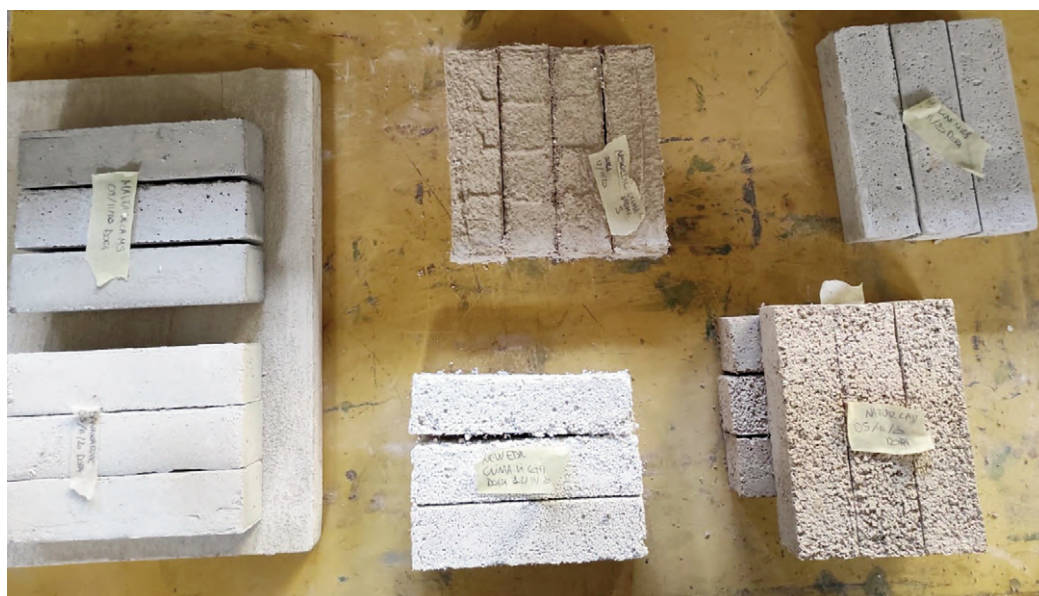
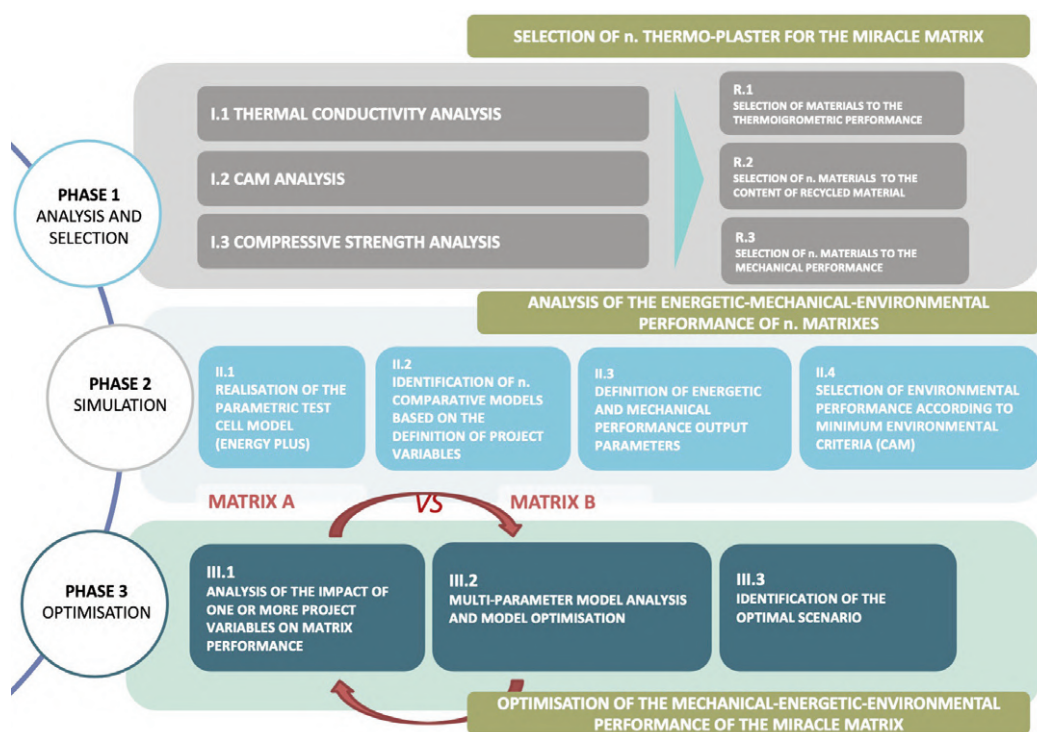


Fig. 3 | Outline of the methodological approach adopted in the MIRACLE research.

Fig. 4 | Samples of fibre-reinforced matrices made with thermal-plasters.

Fig. 5 | Textile fabrics: (a) light carbon-fibre textile; (b) heavy carbon-fibre textile; (c) glass fibre textile (source: D'Ambrisi and Focacci, 2011).

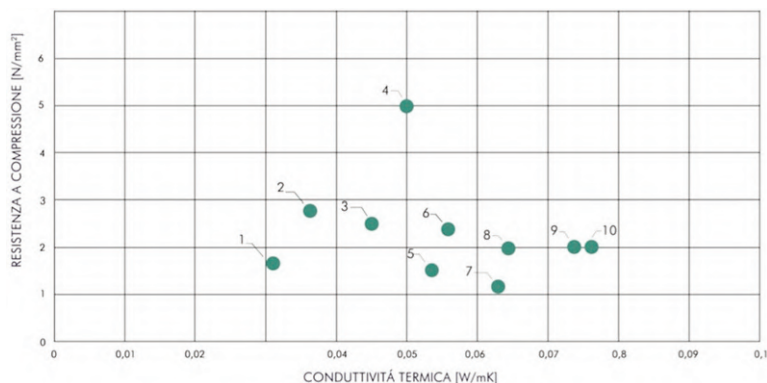
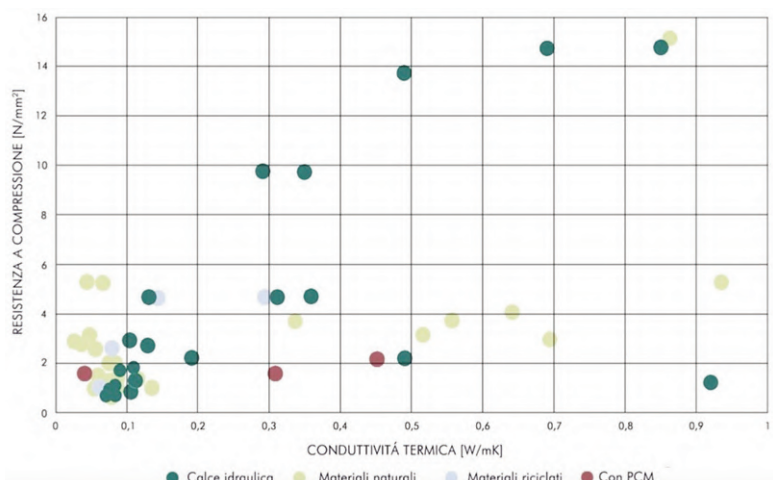
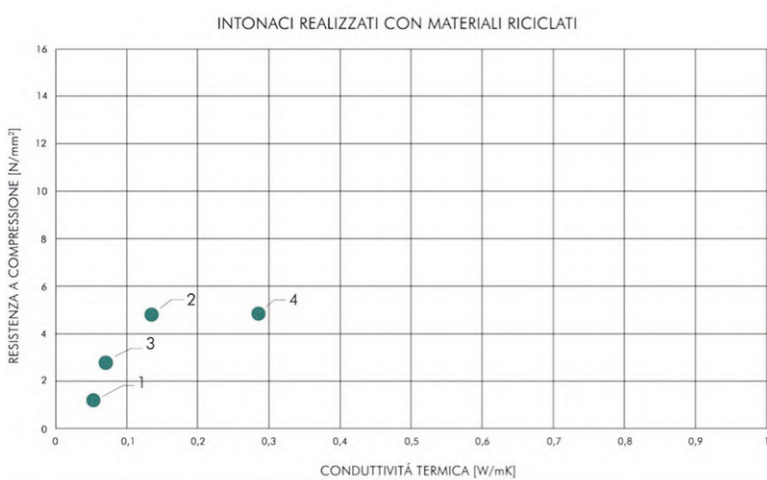
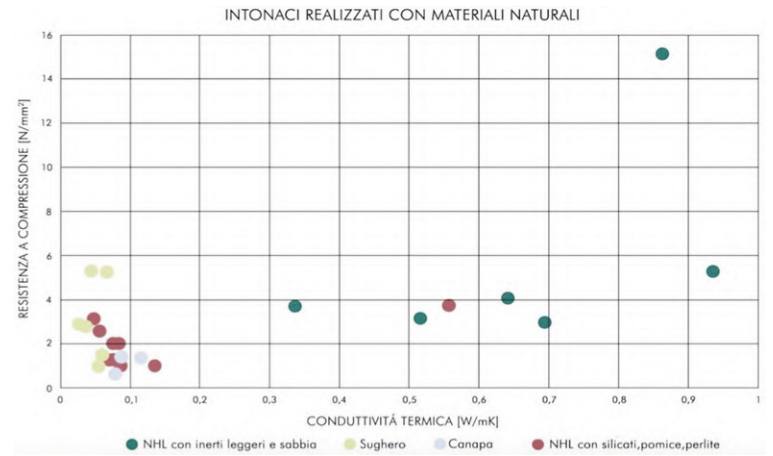
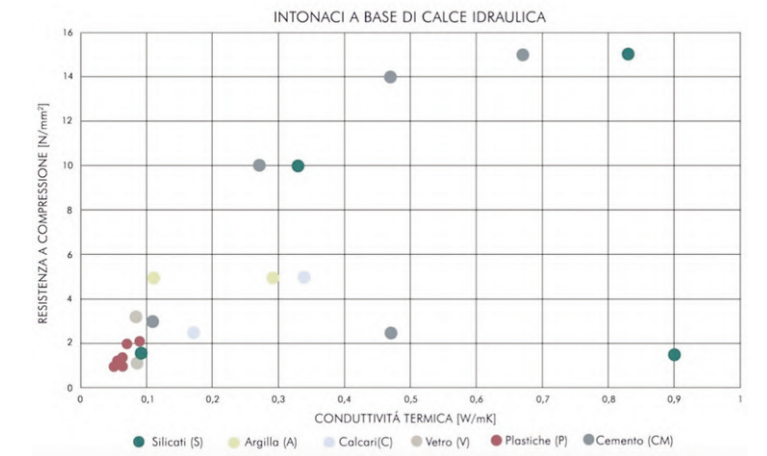


Fig. 6 | Relationship between thermal conductivity λ (W/mK) and compression strength σ (N/mm²) for hydraulic lime-based plasters.

Fig. 7 | Relationship between thermal conductivity λ (W/mK) and compression strength σ (N/mm²) for thermal plasters made of natural materials.

Fig. 8 | Relationship between thermal conductivity λ (W/mK) and compression strength σ (N/mm²) for thermal-plasters made of recycled materials: 1) FC 19 bio-lime; 2) Biolime Thermal-plaster; 3) Benesserebio; 4) Muro Sano plaster.

Fig. 9 | Relationship between thermal conductivity λ (W/mK) and compression strength σ (N/mm²) of all materials analysed.

Fig. 10 | Relationship between the thermal conductivity λ (W/mK) and compression strength σ (N/mm²) of the thermal plasters chosen for laboratory tests: 1) Thermo-K; 2) Diathonite Thermactive 037; 3) Diathonite Evolution; 4) Naturacap; 5) INT.0169 Sanawarme; 6) Climatherm; 7) Corkshield; 8) IntoSughero; 9) FC 19 Biocalce Intonaco; 10) Rofix Calce Clima Thermo.

efficienti dal punto di vista termo-igrometrico (Fig. 10) sono quelli contenenti sughero, seguiti poi dagli intonaci realizzati con calce idraulica naturale NHL e inerti minerali. In particolare, si può osservare che i valori di conduttività termica oscillano tra lo 0,037 W/mK del prodotto Thermo-K, e lo 0,080 W/mK di RÖFIX CalceClima® Thermo Intonaco. Per quanto concerne le prestazioni meccaniche, così come precedentemente illustrato, la resistenza a compressione e la conducibilità termica risultano inversamente proporzionali. Di conseguenza, gli intonaci scelti mostrano valori di compressione relativamente bassi, riconducibili a una classe di resistenza CS I, a eccezione del prodotto NaturCap che, con una resistenza meccanica dichiarata di 5 N/mm² (classe di resistenza CS II) e una conduttività

termica di 0,05 W/mK, potrebbe essere scelto (dopo le successive simulazioni termiche e meccaniche previste dalla ricerca) come uno dei materiali costituenti la matrice MIRACLE.

Infine, la verifica dei requisiti ambientali, sulla base dei Criteri Ambientali Minimi ministeriali, ha messo in luce che, del gruppo 'termointonaci prodotti con materia riciclata', il prodotto con maggiore contenuto di riciclato dichiarato è Climatherm (40%), seguito da Diathonite Evolution (c.a. 38,25%) e NaturCap (25%). Tuttavia, dal confronto delle prestazioni termiche, meccaniche e ambientali ancora una volta NaturCap risulta essere l'intonaco termico maggiormente performante rispetto agli obiettivi della ricerca con buoni valori dichiarati di conducibilità termica, resistenza

meccanica e contenuto di materia riciclata.

Conclusioni | L'individuazione di termointonaci compatibili con il supporto murario storico e dalle promettenti caratteristiche termiche e strutturali è un passo cruciale per la progettazione di materiali compositi di quarta generazione da impiegare per la riduzione della vulnerabilità sismica e l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici storici, tramite un intervento a basso impatto ambientale che recepisca le istanze di compatibilità, sostenibilità e reversibilità. La ricerca MIRACLE dimostra, quindi, come attraverso un'indagine metodologica, che parte dai 'materiali complessi' (Antonini, 2008) e si estende a tutto il sistema edilizio, sia possibile dare risposte improntate al-

	Thermo-K	Diathonite Thermactive 037	Diathonite Evolution	NaturaCap	INT.0169 Sanawarme	ClimaTherm	CorkShield	IntoSughero	FC 19 Biocalce	RÖFIX CalceClima® Thermo Intonaco
Groups	2 ♻️ 🌿	2 🌿	2 ♻️ 🌿	2 ♻️ 🌿	2 ♻️ 🌿	2 ♻️ 🌿	2 🌿	2 🌿	2 🌿	2 🌿
Binders	Natural Hydraulic Lime 3,5	Natural Hydraulic Lime 5,0	Natural Hydraulic Lime 3,5	Natural Hydraulic Lime	Natural Hydraulic Lime 3,5	Natural Hydraulic Lime 5,0	Natural Hydraulic Lime 5,0	Natural Hydraulic Lime 3,5	Natural Hydraulic Lime 3,5	Natural Hydraulic Lime
Aggregates	MINERALS Pozzolanic, perlite and expanded silica	MIXED Cork, expanded amorphous silica, perlite and pumice combined	MIXED Cork, clay, diatomaceous earth powders	VEGETABLES Cork granules	MIXED Botticino, kaolin, casein calcium, Vichy salt, calcium carbonate, tartaric acid, ammonium salts, expanded perlite, cork flour, natural fibres, anti-saline agents	MINERALS Pure expanded mineral sands with low specific weight	VEGETABLES Cork granules	VEGETABLES Cork granules	MINERALS Pure white pumice in microgranules and dolomitic limestone, recycled	MINERALS Fine ground limestone sand
Classes and typologies	T	T1	T-1	T	M10	T	T-1	T-1	T1	M25
Granulometry (mm)	1-0,3	0-3	0-3	0-3	2.5	0 ÷ 4	0 ÷ 3	< 3	0 ÷ 100	< 2
Temperature range (°C)	5 ÷ 35	5 ÷ 30	5 ÷ 35	5 ÷ 35	8 ÷ 30	5 ÷ 35	5 ÷ 32	5 ÷ 35	5 ÷ 35	5 ÷ 35
Minimum thickness (mm)	20	–	15	30	30	2	40	–	–	2
Maximum thickness (mm)	–	–	25	35	100	150	60	30	40	25
Usage typology (external and/or internal)	External and/or internal	External and/or internal	External	External and/or internal	External	External and/or internal	External and/or internal	External and/or internal	External and/or internal	External and/or internal
Compressive strength (σ) [N/mm²]	0,4-2,5	2.8	2.7	5	>1,5	2.5	1.07	2	1.07	2
Water vapour permeability coefficient (μ)	5	3	4	<5	9	<6	<6	<5	6	–
Density Kg/m³	390	250	370	395	700	400	330-340	365	330	1300
Thermal conductivity (λ) [W/mK]	0.0757	0.037	0.045	0.05	0.056	0.057	0,063 ± 0,005	0.064	0.075	0.08
Fire resistance	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Recyclable or recovered materials (%)	23.66	n.p.d.	34-42,5	25	4.9	40	0	0	n.p.d.	0
Absence of dangerous substances	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓

♻️ natural material | recyclable material 🌿

Tab. 1 | Comparison of the characteristics of the chosen thermal plasters for laboratory tests.

la sostenibilità e ai recenti target definiti dal Green Deal Europeo (European Commission, 2019), stimolando ripensamenti ecologici di processo e di prodotto, oltre che nuove progettualità olistiche relative a interventi di valorizzazione e salvaguardia del patrimonio edilizio esistente, capaci di incidere positivamente sull'ambiente costruito.

La progettazione della matrice MIRACLE,

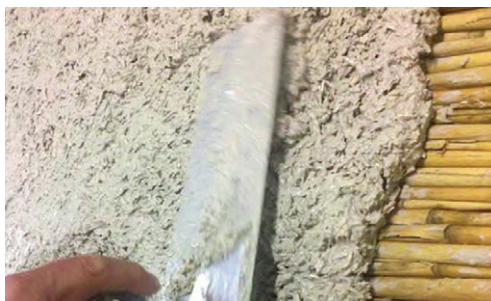
successivamente all'analisi dei termointonaci scelti nella prima fase della ricerca, sarà validata attraverso un'estesa campagna sperimentale su pannelli in muratura assemblati secondo tessiture tipiche delle murature storiche. Lo schema di posizionamento, lo spessore, la stratigrafia e l'ancoraggio del materiale composito al supporto murario sarà inoltre indagato attraverso simulazioni numeriche degli elementi finiti, a partire

dalle leggi di comportamento dei materiali impiegati e dalla loro caratterizzazione in laboratorio.

The restoration and consolidation of the existing building heritage is a complex issue that leads to many questions and involves different professional fields and skills. Operating on historical

buildings intended as cultural Assets means to guarantee minimum performance levels that concern the safety of the structure and the resolution of critical issues related to energy consumption and its environmental impact. These objectives are translated into design strategies for the management of the listed architectural Asset, aimed at achieving an increase in structural safety and indoor comfort, acting through non-invasive interventions in a safeguard perspective. Moreover, there is the problem of fragmentation of interventions, in a context that often considers the topic of energy recovery disjointed from the seismic improvement one, leading to underestimate in theoretical and methodological terms the need to develop joint restoration and recovery actions that allow systematically and effectively operating on the built environment, without altering its semiotic characteristics.

In recent years, the difficulty in introducing technological and strategic solutions, compatible with the building organism to preserve, has led to the development of new 'specialised' materials (Battisti et alii, 2018), able to increase the mechanical resistance, improving its inertia and thermal transmittance, without burdening the structural system (either framed or continuous) with additional loads. The ongoing experimentation has also produced satisfactory results in the context of the advanced production methods of Material Ecology, an emerging field in bio-oriented design, in which is significant the persistence of intrinsic synergies between environmental constraints, production methods and perceptive / functional expression of the material produced (Oxman, 2012).



Furthermore, the study of composite materials makes it possible to transfer to the building production sector the knowledge acquired in other industrial sectors. These are heterogeneous materials, consisting of two or more simple substances with different physical properties that can achieve excellent thermal, mechanical, and environmental performances. In detail, a fibre-reinforced composite is obtained by joining fibres (organic or inorganic) embedded in a matrix made of synthetic or natural materials, such as thermal-plasters (Fig. 1). The reinforcement, defined by a fibrous base, guarantees an improvement of the mechanical characteristics, while the matrix allows the application of the reinforcement to the structural system, sometimes also improving the thermo-hygrometric performance. High tensile strength, corrosion resistance, lightness, non-invasiveness, reversibility of the intervention are the main characteristics of this type of material which is particularly suitable for recovering of load-bearing masonry structures, typical of historical buildings (Fig. 2).

Starting from these premises, the project MIRACLE (reinforcement systems with cement matrix and low environmental impact for the reduction of seismic vulnerability and the increase of energy efficiency of historic buildings), through a multi-scale approach 'from the idea to the realisation', aims to identify one or more compounds for the realisation of bio-composite components that can be used in consolidation projects of residential structures built in Europe before 1945. The analysis of different types of thermal plaster utilised for the realisation of the matrix, the identification of effective production systems, the strong link with the territory and the industry are the key points of the research, together with a strong multidisciplinary characteristic that, starting from the technology of architecture, involves the engineering of materials and construction techniques. The methodological approach proposed, after a detailed study of the state of the art and of the products existing on the market, is characterised by an experimental phase of laboratory tests and simulations, followed by the realisation of a prototype to be analysed in an actual environment (Fig. 3).

The thermal plasters, chosen after an analytical comparison phase, first will be tested from the structural and energy point of view, in combination with the fibrous reinforcement, through simulations and laboratory tests, aimed at understanding their contribution to the scale of the building. At the end of this phase, identified the matrix with the best mechanical and thermodynamic performances, a prototype of masonry in scale 1:1 will be built and, mounted on the test cell UNIFI – Abitare Mediterraneo, it will be tested for about six months to define its thermodynamic behaviour in real environment. At the same time, environmental profiles and possible bene-

fits will be assessed, in terms of reduced environmental impacts and resource use, deriving from the application of the matrix identified by the research compared to traditional matrices.

This article presents the outcomes of the first phase of the research, aimed at defining the requirements (ecological, physical-technical, mechanical, and energetic) of the thermal-plasters usable for the realisation of the MIRACLE matrix that will be tested in laboratory at a later time. In order to reach the results proposed for this operating objective, 59 thermal-plasters have been analysed among those already present on the Italian market – having performance characteristics in line to the ones we want to achieve with the MIRACLE system – to assess the goal innovation level, limiting the field of investigation to those types of materials that better than others can be integrated into the proposed system. They also need to be able to express the potential that the MIRACLE component design should respect to be competitive, thanks to contained innovation, in the construction market.

Fibre-reinforced bio-composite matrices for the recovery of historic buildings

In Italy, the redevelopment of the listed building Heritage has been, in recent years, the subject of interest in two main aspects: the energetic one, intended as a reduction in consumption for winter and summer air conditioning, and the structural one, intended as an improvement of seismic behaviour. Although addressed to a single building, this dual approach is rarely perceived and dealt with in a unique and congruent way. Moreover, the choices of manufacturers in the construction sector must face the rise of the mechanical and energy performance levels required by the market and the demands of a regulatory landscape increasingly focused on the principles of sustainability and LCA-based environmental impact that characterise the entire building process. It must be added the necessary reflection on seismic-related problems that have always afflicted the Italian territory.

Especially in contexts of high historical value, the technologies that will be developed in the next years will have to be in line with the core principles of energy-saving, as indicated by the European Guidelines, in particular the 2018 Energy Performance Directive (European Commission, 2018), and the New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and more Competitive Europe (European Commission, 2020), that invite to reflect on solutions that can be used in interventions of redevelopment in the perspective of Life Cycle Thinking. In this context, the potential of structural reinforcement solutions made with composite materials, including thermal plasters (Fig. 4), is inherent in the ability to offer increases in strength, transmittance and thermal inertia without burdening the structure with additional loads, increasing its capacity in terms of deformation. Nevertheless, advanced materials in general, and composites in particular, are still not widely used in the construction sector and are often relegated to sporadic experimental events (Savoja, 2018).

The most interesting applications occur in secondary components (such as coatings and plaster nets) or, in the case of structural reinforce-

Fig. 11 | Breathable thermal plaster based on lime hemp (source: beleafmagazine.it).

Fig. 12 | Thermal plaster: example of installation (source: pianetadesign.it).

Fig. 13 | Fibre-reinforced matrix: example of installation (source: arketipomagazine.it).

ments of existing buildings, made with the so-called reinforcement bands with carbon, aramid and, more rarely, fibreglass. In the last two decades, polymer matrix composites and FRP carbon fibre reinforcement (Fibre Reinforced Polymers) have been extensively studied and used for applications on existing masonry in seismic areas. In particular, the new cement matrix composites FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Matrix) are becoming a valid alternative to FRP because their use allows to overcome the inconveniences associated with polymer matrices, such as the low resistance to high temperatures, the low permeability to steam, the difficult application on irregular or wet support and, above all, the low compatibility with the masonry support, especially with a historical and monumental one.

However, only few studies on the mechanical properties of such FRCM composites are yet available. In the literature (Alecci et alii, 2019; Barducci et alii, 2020), in fact, we can now find studies on the reinforcement of wall panels with strips of composite put in place according to different geometric configurations in order, in the first place, to assess the increase on the wall panel in terms of shear strength. Moreover, while the investigation of the behaviour of carbon fibre reinforcements, associated with epoxy resins applied to reinforced concrete systems, is now decades-long and has provided excellent results, the experimentation on wall supports, on the contrary, has highlighted critical points. These consist in the modality of fracture by delamination, that is, the detachment from the masonry with removal of a thin layer of the wall coating (and therefore causing irreversible damage to the masonry surfaces).

The quick developments of techniques and types of production of materials (such as ceramic laminates) and the introduction in construction of specialised materials (Li et alii, 2015), such as nanomaterials, in recent decades, have represented continuous incentives for the innovation of components to be used in architectural regeneration, optimised in terms of performance. Nevertheless, composite materials represent an emblematic case within the macro area of experimentation linked to materials design and bio-ecological architecture, and they are now considered 'the first form of designed matter' (Antonini, 2008). Moreover, numerous research have been carried out at the national and international level on the topic of the redevelopment of historic buildings that have investigated with particular attention to the topic of innovation of materials and components for their consolidation and energetic-environmental efficiency, even through the use of bio-derivative and/or biodegradable polymer matrices and natural fibres (Salit et alii, 2015; Savoja, 2018; Bottino-Leone et alii, 2019). Textile-based matrices impregnated with inorganic binders (TRM; Fig. 5) can be considered, in this sense, the last frontier of scientific research related to the consolidation of historical buildings. They are materials with sustainable cost, easy to be placed, fire-resistant and compatible with both concrete and rubble masonry systems or made of brick elements (Bourmas, 2018).

Finally, although the listed building is not subject to any regulatory obligation from the point of

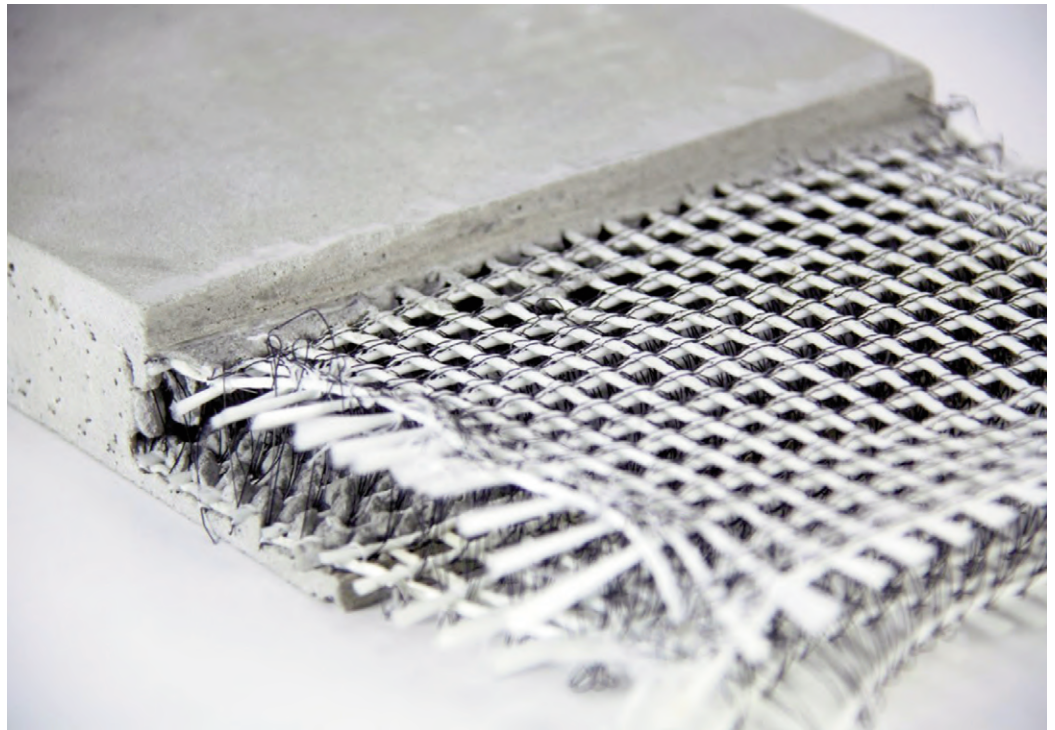


Fig. 14 | Samples of fibre-composite matrices after compression tests.

Fig. 15 | Detail of FRCM fibre-reinforced inorganic matrix composites (source: engineers.cc).

view of energy performance, given the difficulty to work on its wall structure without compromising its listed aesthetic characteristics, there are many research (Ciulla et alii, 2016; Cirmi et alii, 2017) that in recent years have tried to improve its thermo-hygrometric performance in a non-invasive way and consistent with the principles of environmental protection. In this perspective are included the studies concerning the use of Phase Change Materials (PCM) and aerogel for the realisation of thermal-plasters suitable for the use of redevelopment interventions in historic buildings (Ganobjak et alii, 2020).

Analysis of energy-structural-environmental performance of thermal-plasters | MIRACLE research aims to develop a fibre-reinforced matrix, achievable with low environmental impact thermal-plasters, which has particular performance characteristics in mechanical and thermal terms, able to face the critical issues in buildings affected by conservative restoration measures.

Thermo-plasters are mortars for masonry that show excellent insulating characteristics, identified by the standard UNI EN 998-1 – Mortar for Internal and External Plasters such as

'mortars with guaranteed performance and specific insulating properties'. It is important to remember that the difference between a traditional plaster and a thermal plaster depends on its thermal conductivity value (λ). According to the UNI EN 998-1, in fact, thermal mortars, identified by the letter T, compared to other types, must ensure a value of $\lambda < 0.1$ W/mK to be part of the category T1 or less than 0.2 for category T2: as the value of thermal conductivity decreases, the heat flow through the element decreases as well (Bianco et alii, 2015). To ensure good insulation performance, the thermal plasters are produced by replacing, partially or totally, the classic mixture of binder (consisting of water and aggregate) with a mixture based on light aggregates that can be synthetic (expanded polystyrene beads, fibreglass, expanded glass, etc.) or natural (cork, straw, cellulose, pumice, vermiculite, expanded perlite, etc.). As for the main binder, hydraulic lime is usually used for the following reasons: 1) it guarantees a good permeability to steam thanks to its hygroscopic characteristics, so that the structure can breathe, avoiding the formation of interstitial and superficial condensation; 2) the good workability

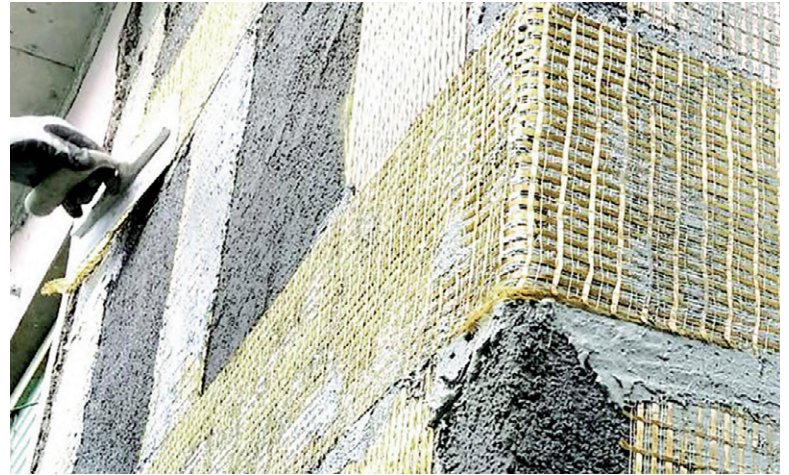


Fig. 16, 17 | Example of FRCM application (sources: infowebsrl.it; elearningonweb.com).

and chemical characteristics of its mixture are perfectly suited to masonry structures, ensuring compliance with the criterion of reversibility of the intervention.

Starting from this theoretical premise and in order to have a clear vision of the thermal and mechanical peculiarities of the thermal-plasters on the Italian market and usable for the realisation of the matrix MIRACLE, the first part of the research was aimed at analysing, through an original bottom-up approach, the characteristics of these materials to choose the most suitable ones to be combined with the basic matrix made with a bidirectional fabric reinforcement (balanced in both directions) of basalt fibre network (with a distance between filaments of 17 mm and an equivalent thickness of 0.032 mm) produced by Kerakoll S.p.A.

In detail, this phase involved the classification of 59 types of thermal-plaster, identified with respect to the following parameters: 1) Composition, with particular attention to the presence of recyclable or recycled materials; 2) Typological class, in relation to the UNI reference standards; 3) Grain size (mm); 4) Application temperature (°C); 5) Minimum application thickness (mm); 6) Maximum application thickness (mm); 7) Type of use (external and/or internal); 8) Compression strength σ (N/mm²); 9) Steam permeability resistance; 10) Density (kg/m³); 11) Thermal conductivity λ (W/mK); 12) Fire resistance class; 13) Recycled content (%); 14) Absence of hazardous substances.

Moreover, in order to support the technical choices of the project focused on environmental sustainability aspects, the products have been assessed with respect to the technical specifications provided by construction MEC (Italian Ministerial Decree of 11 October 2017) and in particular in relation to Standards 2.4.1.2 – Recovered or Recycled Matter and 2.4.1.3 – Hazardous Substances. Specifically, the 2.4.1.2 states that the percentage of matter recovered or recycled in the materials used for the con-

struction or redevelopment of a building, even considering different percentages for each material, shall be at least 15% of the weight estimated on the total amount of materials used (of this percentage, at least 5% shall consist of non-structural materials). This performance has therefore been analysed in reference to those products with a self-declared environmental statement (Type II environmental label conforming to UNI EN ISO 1402:2016), verified and validated by a third-party institution. At the same time, the compliance with the standard 2.4.1.3 of the products was verified through laboratory test certificates held by the manufacturers and issued by assessment Organisations.

Following the identification of the criteria necessary to parameterise the thermo-hygrometric, mechanical and environmental performances of thermal plasters marketed on the national territory, it was made a first subdivision, cataloguing them in four macro-groups:

1) Hydraulic lime-based thermal-plasters mixed with aggregate elements and/or various aggregates (e.g., silicates, clay, limestone, glass, cement, expanded polystyrene and polypropylene). These are the 26 products characterised by good permeability to steam values, excellent resistance to thermal changes and easy installation. Among these, the materials containing plastics have optimal values of thermal conductivity thanks to the presence of microspheres of polypropylene and polystyrene, but poor values of compression strength on the other hand (Fig. 6). An opposite behaviour occurs in thermal plasters containing a percentage of concrete that increases the mechanical resistance values but does not offer thermal advantages. The addition of fibreglass also guarantees good thermal performance with conductivity values of 0.086 W/mK; 2) Thermal plasters made of natural materials. 26 products are part of this group, and contain cork, hemp fibres and NHL natural hydraulic lime (that is, lime produced without using pozzolans or hydraulic materials); the analysis has shown

that this category of materials has different mechanical and thermal characteristics about the present aggregates (Fig. 7); in particular, the addition of mineral aggregates, cork or hemp, ensures the achievement of excellent thermal conductivity values, while the presence of NHL and lightweight aggregates, such as sand, allows achieving sufficient values of compression strength;

3) Thermal plasters made of recycled or recyclable materials (4 products; Fig. 8), consisting mainly of recycled mineral aggregates or glass waste. They have excellent thermal performances, with good compression strength values ranging from 1.4 N/mm² up to a maximum of 5 N/mm²; 4) Thermal plasters containing PCM; the study covered three materials produced with: acrylate MICRONAL microcapsules containing paraffin waxes with a melting point between 23 and 26 °C produced by BASF; microcapsules containing vegetal waxes INERTEK PCM 118, produced by WINCO Technologies. The thermal conductivity values of these materials are between 0.075 and 0.29 W/mK, while the compression strength ones are around 2 N/mm².

Outcomes | The analytical comparison of the chosen products allowed us to choose 10 types of material with good characteristics of thermal conductivity (λ less than 0.1) and compression strength (σ between 2 and 6). As you can see from Figure 9, the products with these characteristics are mainly attributable to macro-groups 2 and 3, and compatible with the objective of creating a fibre-composite matrix with low environmental impact. Analysing in detail the characteristics of the chosen products (Tab. 1), we can see that these thermal plasters are made mainly with natural materials, with the exception of Diathonite Thermactive 037, Diathonite Evolution, FC 19 Biocalce Intonaco and IntoSughero that also contain recycled material (such as expanded glass and/or mineral aggregates).

From the collected data the most efficient

products from the thermo-hygroscopic point of view (Fig. 10) contain cork, followed by plasters made with natural hydraulic lime (NHL) and mineral aggregates. In particular, it can be observed that the thermal conductivity values range between 0.037 W/mK of the Thermo-K product, and 0.080 W/mK of RÖFIX CalceClima® Thermo Plaster. As far as mechanical performance is concerned, compression strength and thermal conductivity are inversely proportional. Consequently, the chosen plasters show relatively low compression values, attributable to a CS I class, exception for the product Naturcap that, with a mechanical strength of 5 N/mm² (CS II class) and a thermal conductivity of 0.05 W/mK, could be chosen (after the subsequent thermal and mechanical simulations foreseen by the research) as one of the basic materials of the MIRACLE matrix.

Finally, the verification of environmental requirements, on the basis of the Ministerial Minimum Environmental Criteria, has highlighted that, in the 'thermal plasters produced with recycled materials' group, the product with higher content of recycled declared is Climatherm (40%), followed by Diatonite Evolution (approx. 38.25%) and Naturcap (25%). However, from the com-

parison of thermal, mechanical and environmental performances once again Naturcap turns out to be the most performing thermal plaster for the research objectives with good thermal conductivity values, mechanical strength and recycled material content.

Conclusions | The identification of thermal-plasters compatible with the historical wall support and with promising thermal and structural characteristics is a crucial step for the design of fourth-generation composite materials to be used for the reduction of seismic vulnerability and the increase of energy efficiency of historic buildings, through a low environmental impact intervention that incorporates the demands of compatibility, sustainability, and reversibility. Therefore, the MIRACLE research shows that through a methodological investigation – starting from the 'complex materials' (Antonini, 2008) and extending to the entire building system – it is possible to give answers based on sustainability and on recent targets defined by the European Green Deal (European Commission, 2019), stimulating ecological rethinking of processes and products, as well as new holistic projects related to the enhancement and preservation of the exist-

ing building heritage, able positively affecting the built environment.

The design of the MIRACLE matrix, following the analysis of the thermal plasters chosen in the first phase of the research, will be validated through an extensive experimental campaign on masonry panels assembled according to typical textures of historic masonry. The positioning scheme, the thickness, the stratigraphy, and the anchoring of the composite material to the wall support will also be investigated through numerical simulations of the finished elements, from the material behaviour laws used and their characterisation in the laboratory.

Acknowledgements

MIRACLE research (Low environmental impact cement matrix reinforcement Systems for the reduction of seismic vulnerability and the increase of energy efficiency of historic buildings) was financed by the University of Florence as part of the University Announcement entitled Competitive Projects for Temporary Researcher (RTD) – Years 2020-2021. The authors thank all the participants in the Working Group (Engineer A. Donato, Architect C. Pisciotta, Architect D. Pugliese, Architect A. De Angelis) who have contributed to the analysis of thermal insulating materials to create the fibre-reinforced matrix subject of the Research Programme.

References

Alecci, V., Barducci, S., D'Ambrisi, A., De Stefano, M., Focacci, F., Luciano, R. and Penna, R. (2019), "Shear capacity of masonry panels repaired with composite materials – Experimental and analytical investigations", in *Composites Part B – Engineering*, vol. 171, pp. 61-69. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.013 [Accessed 18 March 2021].

Antonini, E. (2008), "Materiali complessi", in *Materia*, n. 58, pp. 44-55.

Barducci, S., Alecci, V., De Stefano, M., Misseri, G., Rovero, L. and Stipo, G. (2020), "Experimental and Analytical Investigations on Bond Behavior of Basalt-FRCM Systems", in *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, issue 1, pp. 1-14. [Online] Available at: ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000985 [Accessed 28 March 2021].

Battisti, A. and Ministeri, E. (2018), "Integrazione di sistemi termo-attivi nella rigenerazione dell'involucro edilizio in area Mediterranea", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 16, pp. 152-163. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23154 [Accessed 28 March 2021].

Bianco, L., Serra, V., Fantucci, S., Dutto, M. and Masolino, M. (2015), "Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes – First experimental results", in *Energy and Buildings*, vol. 95,

pp. 86-91. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.016 [Accessed 05 May 2021].

Bottino-Leone, D., Larcher, M., Herrera-Avellanosa, D., Haas, F. and Troi, A. (2019), "Evaluation of natural-based internal insulation systems in historic buildings through a holistic approach", in *Energy*, vol. 181, pp. 521-531. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.139 [Accessed 28 March 2021].

Bournas, D. (2018), *Innovative Materials for Seismic and Energy Retrofitting of the Existing EU Buildings*, EUR 29184 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/091621 [Accessed 28 March 2021].

Cirami, S., Evola, G., Gagliano, A. and Margani, G. (2017), "Thermal and Economic Analysis of Renovation Strategies for a Historic Building in Mediterranean Area", in *Buildings*, vol. 7, issue 3, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings7030060 [Accessed 28 March 2021].

Ciulla, G., Galatioto, A. and Ricciu, R. (2016), "Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings", in *Energy & Buildings*, vol. 128, pp. 649-659. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.044 [Accessed 28 March 2021].

D'Ambrisi, A. and Focacci, F. (2011), "Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites", in *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, issue 5, pp. 707-720. [Online] Available at: doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218 [Accessed 28 March 2021].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan for a Cleaner and more Competitive Europe*, document 52020DC0098, 78 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0098 [Accessed 05 May 2021].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Council, the European Economic and*

Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640 [Accessed 05 May 2021].

European Commission (2018), *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance)*, Document 32018L0844. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3A0JL_2018.156.01.0075.01.ENG [Accessed 05 May 2021].

Ganobjak, M., Brunner, S. and Wernery, J. (2020), "Aerogel materials for heritage buildings – Materials, properties and case studies", in *Journal of Cultural Heritage*, vol. 42, pp. 81-98. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.007 [Accessed 28 March 2021].

Li, R., Yoshidomi, T., Ooka, R. and Olesen, B. W. (2015), "Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system", in *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 58-65. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.070 [Accessed 28 March 2021].

Oxman, N. (2012), "Programming Matter", in *Architectural Design*, vol. 82, issue 2, pp. 88-95. [Online] doi.org/10.1002/ad.1384 [Accessed 28 March 2021].

Salit, M. S., Jawaid, M., Yusoff, N. B. and Hoque, E. M. (2015), *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8 [Accessed 29 March 2021].

Savoja, G. (2018), "Experimentation of composites materials reinforced with vegetable fibres for the construction sector", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 16, pp. 317-324. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-22986 [Accessed 28 March 2021].