

# Progettazione di un materiale composito ecosostenibile per la riduzione della vulnerabilità sismica e la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio storico in muratura



**L'IDEA DI PROGETTO**  
Gran parte del patrimonio edilizio esistente è costituito da edifici in muratura, realizzati in assenza di norme antisismiche e prescrizioni per l'isolamento termico e non presenta attenzione né alla prestazione energetica, né alla sicurezza strutturale. La scelta di misure ottimali per la riqualificazione di edifici esistenti non può prescindere da una progettazione integrata sismica ed energetica. Coniugando il miglioramento strutturale agli interventi volti all'abbattimento delle dispersioni termiche presenti sulle pareti perimetrali, è possibile conseguire affidabili vantaggi economici e di sostenibilità in termini di protezione dell'ambiente, mediante l'utilizzo di prodotti che siano un connubio tra ecosostenibilità e risparmio energetico.

L'idea di progetto mira a sviluppare un materiale composito innovativo da applicare nel settore delle costruzioni, ottenuto dall'accoppiamento di fibre di rinforzo con una matrice a base di calce idraulica naturale, compatibile con il supporto murario e perfettamente in linea con i principi di efficientamento energetico indicati dalle direttive europee in tema di riqualificazione energetica degli edifici storici.

## LA MATRICE COSTITUENTE IL COMPOSITO

La prima fase del lavoro di ricerca ha riguardato l'individuazione, tra i prodotti presenti in letteratura e sul mercato internazionale, di una matrice con caratteristiche meccaniche e termiche tali da consentire il miglioramento delle prestazioni sismiche ed energetiche delle pareti perimetrali degli edifici in muratura esistenti.

Una volta selezionati i termointonaci che soddisfano i requisiti imposti sulle proprietà energetiche e di resistenza meccanica, un ulteriore vaglio è stato imposto con riferimento al problema della sostenibilità; in particolare, la scelta si è ristretta alle matrici costituite da materiali naturali,

ecosostenibili ed ecocompatibili e a quelle ottenute da materiali riciclati e riciclabili. In tabella 1 sono elencati gli intonaci termici selezionati pervenuti presso il nostro laboratorio.

Per ogni prodotto, vengono indicati i valori da scheda tecnica di resistenza a compressione  $\sigma$  e di conducibilità termica  $\lambda$ . Con i simboli accanto al codice, si indica la tipologia della miscela, in particolare:

- indica che il termointonaco è prodotto da materiali di origine naturale
- indica che il termointonaco è prodotto da materiali riciclati o riciclabili
- indica che il termointonaco è caratterizzato da una  $\sigma \geq 1,50 \text{ N/mm}^2$  da una  $\lambda \leq 0,07 \text{ W/mK}$ .

## PROGRAMMA SPERIMENTALE

Successivamente all'analisi dei termointonaci scelti nella prima fase della ricerca, è stata effettuata un'estesa campagna sperimentale, che ha riguardato:

- prove a flessione per tre punti e successive prove di compressione delle matrici pervenute in laboratorio
- valutazione delle proprietà termoigrometriche mediante simulazioni dinamiche con l'utilizzo del software WUFI®Pro
- prova di trazione su rete di fibra di basalto
- prova di trazione diretta sul coupon costituito dalla matrice risultata migliore dal punto di vista strutturale e termodinamico e rinforzata con la rete di fibra di basalto
- analisi numeriche lineari e non lineari eseguite mediante il software FEM (Finite Element Method) Abaqus CAE.

In tabella 2 si riportano i risultati ottenuti dalle prove di flessione per tre punti e dalle successive prove di compressione dei termointonaci testati in laboratorio, in termini di resistenza a compressione  $\sigma_{te}$ , modulo elastico E e resistenza a trazione  $\sigma_t$ .

Una volta effettuata la caratterizzazione meccanica delle matrici, sono state ese-

N.	Matrix	Compressive strength $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Thermal conductivity $\lambda$ [W/mK]
1	INT.01	> 1,50	0,056
2	INT.02	2,50	0,075
3	INT.03	5,00	0,050
4	INT.04	$\geq 2,00$	0,086
5	INT.05	2,00	0,064
6	INT.06	2,00	0,050
7	INT.07	1,50	0,100
8	INT.08	1,50	0,076
9	INT.09	1,50	0,080
10	INT.10	2,50	0,137
11	INT.11	2,50	0,057

Tab.1: Proprietà degli intonaci termici selezionati

guita le simulazioni energetiche dinamiche mediante il software WUFI®Pro, al fine di determinarne le proprietà termoigrometriche generali.

Per le simulazioni è stata presa in esame la zona climatica della città di Firenze, considerando un "simulation time" pari a dieci anni. I tipi di chiusura verticale simulati e i relativi spessori sono stati scelti tenendo conto della frequenza con cui le tipologie costruttive si inseriscono nel panorama edilizio esistente. Le soluzioni tecniche individuate sono tre:

- muratura in mattoni pieni a tre teste, con uno spessore pari a 38 cm
- muratura in pietra, con uno spessore pari a 50 cm
- muratura a sacco con riempimento debolmente legato, con uno spessore pari a 48 cm.

Su ogni chiusura verticale sono state applicate le 11 matrici sia all'esterno (con uno spessore di 6 cm), sia all'interno (con uno spessore di 4 cm), che ne miglioreranno l'inerzia e la trasmittanza termica, senza andare a gravare sulla struttura portante. Per quanto riguarda il contenuto di acqua totale all'interno del muro [kg/m<sup>3</sup>] e il contenuto d'acqua all'interno dello strato di intonaco interno [kg/m<sup>3</sup>], i prodotti con il valore medio annuale più basso risultano essere INT.01 e INT.06. Inoltre, i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con l'INT.06 hanno mostrato che non si presenta accumulo di acqua all'interno di alcuna delle tre tipologie costruttive analizzate.

Da queste ultime osservazioni si evince che la matrice risultata migliore dal punto di vista termico e meccanico è l'INT.06, caratterizzata da una resistenza a compressione pari a 2,86 MPa.

La terza fase della campagna sperimentale ha riguardato la stima delle proprietà meccaniche della rete di fibra di basalto, ottenute mediante prove di trazione diretta. I valori medi, in termini di resistenza a trazione  $f_{tr}$ , modulo elastico  $E_{tr}$  e deformazione massima  $E_{tr}$ , sono riportati in tabella 3.

Una volta testata la rete di fibra di basalto, sono state condotte le prove di trazione diretta sul composito costituito dalla matrice INT.06 e rinforzato con la rete di fibra di basalto, al fine di determinarne il comportamento meccanico. Sono stati preparati tre campioni nominati T-01, T-02 e T-03 di dimensione 500'65'10 mm<sup>3</sup>. I risultati, in termini di carico massimo  $F_{max}$ , resistenza a trazione  $f_r$ , modulo elastico  $E$  e deformazione massima  $\epsilon_r$ , sono riportati in tabella 4.

Infine, con lo scopo di valutare numericamente il comportamento di un pannello in muratura non rinforzato (denominato N-R-P) e di un pannello in muratura rinforzato (denominato R-P) sottoposti a prove di compressione diagonale, sono

N.	Matrix	Compressive strength $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Compressive Young modulus E [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexural tensile strength $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	INT.01	2,41	336,67	0,65
2	INT.02	0,40	153,59	0,08
3	INT.03	0,29	21,23	0,12
4	INT.04	0,73	143,68	0,02
5	INT.05	2,39	280,21	0,11
6	INT.06	2,86	319,86	0,29
7	INT.07	0,11	4,00	0,10
8	INT.08	1,23	187,77	0,02
9	INT.09	1,15	237,61	0,03
10	INT.10	1,87	470,81	0,07
11	INT.11	0,76	76,00	0,12

Tab.2: Proprietà meccaniche delle matrici

	$f_{tr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{tr}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{tr}$
GS	865	60487	0,017

Tab. 3: Proprietà meccaniche del tessuto di basalto

	$F_{max}$ [N]	$f_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_r$
T-01	721,01	346,64	15071,09	0,017
T-02	844,93	406,22	16248,64	0,025
T-03	772,23	371,31	19542,53	0,019
T-media	779,39	374,72	16954,08	0,020

Tab.4: Proprietà meccaniche del composito

state eseguite le simulazioni numeriche ad elementi finiti mediante il software FEM Abaqus CAE. Per la definizione del pannello murario si è proceduto in due modi differenti. Per prima cosa è stata effettuata un'analisi lineare del modello di calcolo (L-N-R-P), considerando la muratura un materiale caratterizzato da un comportamento elastico lineare. Una volta effettuata l'analisi elastico lineare sul pannello in muratura, esso verrà studiato come materiale con comportamento non lineare (N-L-N-R-P), utilizzando il modello "concrete damage plasticity" (CDP) presente nel database di Abaqus CAE. Dal momento che il modello di calcolo è ancora in fase di studio e di sviluppo, non è ancora possibile condividere i risultati ottenuti dalla simulazione numerica.

### FATTIBILITÀ E SCALABILITÀ DEL PROGETTO DI RICERCA

Dato l'ampio patrimonio edilizio storico italiano ed internazionale, l'individuazione di un materiale innovativo, capace di ridurre la vulnerabilità sismica e di migliorare le prestazioni energetiche, è di fondamentale importanza.

Lo scopo principale della ricerca è quello di rappresentare la progettazione integrata sismica ed energetica come nuova filosofia di riqualificazione, attraverso materiali da costruzione ecocompatibili e soluzioni innovative orientate alla sostenibilità dell'ambiente. L'impiego di questi nuovi materiali avrà un grande impatto legato all'incremento del livello di sicurezza sismica, al miglioramento energetico e alla conseguente riduzione dei livelli di inquinamento del patrimonio edilizio storico. Ci sarà anche un impatto di natura economica, in quanto verranno abbattuti sia i danni generati da eventuali futuri eventi sismici, sia quelli legati all'inquinamento globale, causati dall'eccessivo consumo energetico.

### RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le seguenti aziende, che hanno fornito il materiale da testare per il progetto: Azichem, Ferrimix, Index, Kerakoll SpA, Laterite, Lime & Cork, Malvin, Marraccini, Newedit, Rall K, Röfix, Tradimalt, TCS calce.

# A new compatible and sustainable composite material for the seismic and energetic upgrade of the existing masonry building heritage

## THE PROJECT IDEA

A large part of the existing building heritage consists of masonry buildings, built in the absence of anti-seismic standards and requirements for thermal insulation, and it does not pay attention to either energy performance or structural safety. The choice of optimal measures for the redevelopment of existing buildings cannot be separated from an integrated seismic and energy design. Combining structural improvement with interventions to reduce heat losses present on the perimeter walls makes it possible to achieve reliable economic and sustainability advantages in terms of environmental protection using products that combine eco-sustainability and energy saving. The project idea aims to develop an innovative composite material to be applied in the construction sector, obtained by coupling reinforcing fibres with a natural hydraulic lime-based matrix, compatible with the wall support and ideally in line with the energy efficiency principles indicated by the European directives on the energy requalification of historic buildings.

## THE MATRIX OF THE COMPOSITE MATERIAL

The first phase of the research work involved the identification, among the products present in the literature and the international market, of a matrix with mechanical and thermal characteristics such as to allow the improvement of the seismic and energy performance of the perimeter walls of existing masonry buildings.

Once the thermal plasters that meet the requirements imposed on energy properties and mechanical resistance have been selected, a further examination has been imposed regarding the problem of sustainability; in particular, the choice was restricted to the matrices made of natural, eco-sustainable and eco-compatible materials and those obtained from recycled and recyclable materials.

Table 1 lists the selected thermal plasters received in our laboratory.

The values of the compressive strength  $\sigma$  and thermal conductivity  $\lambda$  are indicated in the products datasheet.

The symbols next to the code indicate the type of compound, in particular:

-  indicates that the thermal plaster is made of natural materials
-  indicates that the thermal plaster is made of recycled or recyclable materials
-  indicates that the thermal plaster is characterized by  $\sigma \geq 1.50 \text{ N/mm}^2$  and  $\lambda \leq 0.07 \text{ W/mK}$ .

## EXPERIMENTAL PROGRAM

Following the analysis of the thermal plasters selected in the first phase of the research, an extensive experimental campaign was carried out, which involved:

bending tests for three points and uniaxial compression tests of the matrices received in the laboratory;

- evaluation of the thermohygro-metric properties through dynamic simulations using the WUFI®Pro software
- direct tensile test on basalt fabric
- direct tensile test on the composite composed of the structural reinforcing fabric embedded in the better matrix from the structural and thermodynamic point of view
- numerical simulations using the finite element software (FEM) Abaqus CAE.

Table 2 shows the results obtained from the bending tests for three points and uniaxial compression tests of the thermo-plasters tested in the laboratory regarding compressive strength  $\sigma_{rc}$ , compressive Young modulus  $E$ , and flexural tensile strength  $\sigma_{rc}$ .

Once the mechanical characterization of the matrices was carried out, thermodynamic simulations were performed using the WUFI®Pro software. The climatic zone of Florence was considered, taking into account a simulation time of ten years. The types of wall simulated and the relative thicknesses were chosen considering the frequency with which the building types are present in the existing building contest. The identified technical solutions are three:

- one-and-a-half brick masonry, with

N.	Matrix	Compressive strength $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Thermal conductivity $\lambda$ [W/mK]
1	INT.01  	> 1,50	0,056
2	INT.02   	2,50	0,075
3	INT.03  	5,00	0,050
4	INT.04  	$\geq 2,00$	0,086
5	INT.05   	2,00	0,064
6	INT.06  	2,00	0,050
7	INT.07   	1,50	0,100
8	INT.08  	1,50	0,076
9	INT.09  	1,50	0,080
10	INT.10  	2,50	0,137
11	INT.11  	2,50	0,057

Tab.1: Properties of the selected thermal plasters

- a thickness of 38 cm
- stone masonry, with a thickness of 50 cm
- sack masonry, with a thickness of 48 cm.

The 11 matrices have been applied to each vertical closure both outside (6 cm thickness) and inside (4 cm thickness), which will improve the inertia and thermal transmittance of the wall without overloading the structure.

As regards the total water content inside the wall [kg/m<sup>3</sup>] and the water content inside the internal plaster layer [kg/m<sup>3</sup>], the products with the lowest annual average value are INT.01 and INT.06. Furthermore, the results obtained from the simulations carried out with INT.06 showed no water accumulation within any of the three construction types analyzed.

From these latest observations, it is clear that the best matrix from a thermal and mechanical point of view is INT.06, characterized by compressive strength equal to 2.86 N/mm<sup>2</sup>.

The third phase of the experimental campaign concerned estimating the mechanical properties of the basalt fabric, obtained through direct tensile tests. The average values of tensile strength  $f_{tf}$ , elastic modulus  $E_{tf}$  and maximum deformation  $\epsilon_{tf}$  are shown in table 3. Once the basalt fabric had been tested, direct tensile tests were carried out on the composite consisting of the INT.06 reinforced with the fabric. Three samples labelled T-01, T-02, and T-03 of size 500.65.10 mm<sup>3</sup> were prepared. In terms of maximum load  $F_{max}$ , tensile strength  $f_r$ , elastic modulus  $E_r$  and maximum deformation  $\epsilon_r$ , the results are reported in table 4.

Finally, to numerically evaluate the behaviour of a non-reinforced masonry panel (NRP) and a reinforced masonry panel (RP) subjected to diagonal compression tests, numerical simulations were carried out using the FEM Abaqus CAE software. A linear analysis (L-N-R-P) was carried out for the panel's definition, considering the masonry characterized by a linear elastic behaviour. Once the linear elastic analysis has been carried out, the panel will be studied with a non-linear behaviour (N-L-N-R-P), using the "concrete damage plasticity" (CDP) model present in the Abaqus CAE database.

Since the calculation model is still under study and development, it is not yet possible to share the results obtained from the numerical simulation.

N.	Matrix	Compressive strength $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Compressive Young modulus E [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexural tensile strength $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	INT.01	2,41	336,67	0,65
2	INT.02	0,40	153,59	0,08
3	INT.03	0,29	21,23	0,12
4	INT.04	0,73	143,68	0,02
5	INT.05	2,39	280,21	0,11
6	INT.06	2,86	319,86	0,29
7	INT.07	0,11	4,00	0,10
8	INT.08	1,23	187,77	0,02
9	INT.09	1,15	237,61	0,03
10	INT.10	1,87	470,81	0,07
11	INT.11	0,76	76,00	0,12

Tab.2: Mechanical properties of matrices

	$f_{tf}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{tf}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{tf}$
GS	865	60487	0,017

Tab.3: Mechanical properties of basalt fabric

	$F_{max}$ [N]	$f_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_r$
T-01	721,01	346,64	15071,09	0,017
T-02	844,93	406,22	16248,64	0,025
T-03	772,23	371,31	19542,53	0,019
T-media	779,39	374,72	16954,08	0,020

Tab.4: Mechanical properties of the composite

## FEASIBILITY AND SCALABILITY OF THE RESEARCH PROJECT

Given the significant historical Italian and international building heritage, it is crucial to identify an innovative material capable of reducing seismic vulnerability and improving energy performance.

The research aims to represent the integrated seismic and energy design as a new redevelopment philosophy through environmentally friendly building materials and innovative solutions oriented towards environmental sustainability.

The use of these new materials will have a significant impact linked to the increase in the level of seismic safety, the energy improvement and the con-

sequent reduction of the pollution levels of the historical building heritage. There will also be an economic impact, as both the damage generated by any future seismic events and those related to global pollution caused by excessive energy consumption will be reduced.

## ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to the following companies, who provided the material to be tested for the project: Azichem, Ferrimix, Index, Kerakoll SpA, Laterite, Lime & Cork, Malvin, Marraccini, Newedil, Rall K, Röfix, Tradimalt, TCS calce.