



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIDA Dipartimento di Architettura

Scuola dottorale XXXVI ciclo
Architettura, progetto, conoscenza e salvaguardia del patrimonio culturale

Curriculum
Strutture e Restauro dell'Architettura e del Patrimonio Culturale

Progettazione di un Materiale Composito Ecosostenibile per la Riduzione della Vulnerabilità Sismica e la Riqualificazione Energetica del Patrimonio Edilizio Storico in Muratura

Dottoranda

Arch. Dora Pugliese

Tutor

Prof. Mario De Stefano

Co- Tutor

Prof. Valerio Alecci
Prof. Rosa Romano

Co-Tutor esterno

Prof. Antonio Nanni

Indice

<i>Abstract</i>	I
<i>Organizzazione della tesi</i>	II
<i>Introduzione</i>	IV
<i>Lo stato dell'arte in letteratura</i>	V
<i>Approccio integrato per la progettazione di sistemi di retrofit sismico ed energetico</i>	V
<i>Materiali innovativi per la riqualificazione integrata sismica ed energetica</i>	VIII
<i>Parte I: Ricerca e analisi dei materiali costituenti il composito</i>	1
1. Selezione delle matrici per il composito fibrorinforzato	1
1.1. Tipologia di materiale legante.....	4
1.2. Tipo di aggregati all'interno della miscela	4
1.3. Resistenza alla compressione	4
1.4. Conducibilità termica.....	6
1.5. Massa volumica apparente.....	7
1.6. Resistenza di adesione su laterizio	8
1.7. Coefficiente di assorbimento acqua per capillarità	9
1.8. Intervallo granulometrico	10
1.9. Resistenza alla diffusione del vapore	10
1.10. Classe di resistenza al fuoco	11
1.11. Contenuto di materiale riciclato o riciclabile	11
1.12. Spessore massimo e minimo di applicazione	11
2. Sperimentazioni: metodologia e analisi dei risultati.....	12
2.1. Valutazione delle proprietà termoigrometriche mediante simulazioni dinamiche per la riqualificazione di edifici esistenti in muratura	13
2.1.1. Fase di input: definizione dei materiali e delle stratigrafie	14
2.1.2. Fase di output e analisi dei risultati	28
2.1.3. Temperatura della superficie interna.....	34
2.1.4. Interpretazione dei risultati.....	38
2.2. Determinazione della resistenza a flessione e a compressione delle undici matrici	42
2.2.1. Prove di flessione per tre punti	43
2.2.2. Prove compressione.....	62

2.3. Prove di trazione diretta sulla fibra di rinforzo.....	81
<i>Parte II: Analisi delle proprietà meccaniche del materiale composito fibrorinforzato</i>	<i>86</i>
3. Prove di trazione diretta sui coupon	86
3.1. Analisi dei risultati delle prove di trazione diretta sui coupon.....	89
4. Prove di adesione su elementi in laterizio	116
4.1. Analisi dei risultati delle prove di adesione single shear test su elementi in laterizio.....	121
4.2. Analisi dei risultati delle prove di adesione single shear test su pilastrini costituiti da elementi in laterizio.....	137
5. Prove di compressione diagonale su pannelli in muratura	145
5.1. Analisi dei risultati delle prove di compressione diagonale su pannelli in muratura rinforzato dal composito FRLM.....	149
<i>Parte III: Progettazione di un intonaco termico costituito da calce idraulica naturale con l'aggiunta sughero in granuli.....</i>	<i>172</i>
6. Descrizione generale delle procedure di analisi.....	172
7. Sviluppo e formazione della nuova matrice	174
8. Analisi granulometrica delle miscele	178
8.1. Modelli matematici numerici relativi all'analisi granulometrica.....	178
9. Studio della segregazione mediante tomografia computerizzata	184
9.1. Analisi dei risultati ottenuti mediante tomografia computerizzata...	188
10. Determinazione della lavorabilità delle nuove matrici	195
11. Valutazione del coefficiente di assorbimento d'acqua capillare.....	198
12. Prove di resistenza a compressione delle matrici	204
12.1. Analisi dei risultati delle prove di compressione.....	205
13. Prove di adesione mediante prove di adesione pull-off	216
13.1. Analisi dei risultati delle prove di adesione pull-off	220
14. Misurazione della rugosità superficiale dei mattoni in laterizio.....	241
15. Conclusioni.....	250
16. Bibliografia	260

Abstract

Il percorso accademico che ha portato alla realizzazione di questa tesi di dottorato, dal titolo "Progettazione di un Materiale Composito Ecosostenibile per la Riduzione della Vulnerabilità Sismica e la Riqualificazione Energetica del Patrimonio Edilizio Storico in Muratura", è stata un'esperienza intrisa di ispirazione. Questo lavoro è stato sviluppato in due luoghi profondamente distinti: le città di Firenze e Miami.

Il cuore della ricerca affronta le complesse sfide legate alla vulnerabilità sismica e all'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente in muratura.

La prima e la seconda parte hanno preso forma nel contesto fiorentino, in cui il patrimonio edilizio è un solido testamento del passato. Qui sono state esaminate le normative esistenti e sono state esplorate le proprietà di diversi materiali, delineando le prime applicazioni pratiche in un tale contesto.

La terza parte di questo percorso accademico si è sviluppata a Miami, una città vivace il cui panorama architettonico riflette la diversità e la modernità. La collaborazione con esperti a livello internazionale ha ulteriormente arricchito il percorso di ricerca, portando a una comprensione più approfondita delle applicazioni pratiche di materiali compositi.

La suddivisione in due luoghi di questa tesi non è soltanto geografica, ma simbolizza anche il passaggio tra due mondi, ciascuno con le sue peculiarità. Affrontare la vulnerabilità sismica, integrando la ricerca di soluzioni innovative per l'efficienza energetica è una "missione" che si intreccia con la storia e il futuro, la tradizione e l'innovazione.

Attraverso un approccio multidisciplinare, sono state esaminate non solo le proprietà meccaniche e termiche dei materiali analizzati, ma anche gli standard normativi, cercando di gettare le basi per una nuova metodologia di riqualificazione integrata nell'approccio sismico ed energetico.

Si auspica che questa ricerca contribuisca soprattutto ad ispirare ulteriori sforzi per preservare il passato, attraverso soluzioni sempre sostenibili e all'avanguardia.

Organizzazione della tesi

La ricerca si colloca nell'area scientifico disciplinare dell'ingegneria civile e dell'architettura. In particolare, i settori coinvolti sono ICAR 09- Tecnica delle costruzioni e ICAR 12- Tecnologia dell'architettura. Il fulcro di questo studio, infatti, è l'interazione tra settori disciplinari differenti, volto a favorire la formulazione di una proposta innovativa in termini di riqualificazione integrata sismica ed energetica del patrimonio edilizio in muratura esistente. A questo proposito, indirizzi scientifici multidisciplinari sono indispensabili per lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche, coinvolgendo l'ingegneria dei materiali e la tecnologia dell'architettura, nel rispetto dei principi di sostenibilità ambientale ed economica, mediante soluzioni che integrino il retrofit energetico e strutturale e che permettano di riqualificare l'ambiente costruito in modo sistematico ed efficace.

L'obiettivo della ricerca è progettare una soluzione innovativa integrata per riqualificazioni ad alta efficienza energetica, riducendo la domanda di energia primaria, e resistenza meccanica, che preveda l'utilizzo di materiali green, combinando soluzioni di alto profilo tecnologico a basso impatto ambientale.

Lo scopo principale è quello di ricercare e analizzare un composito innovativo, da accoppiare con materiali provenienti da risorse rinnovabili e smaltibili a fine vita, che nel suo insieme riesca a soddisfare le prestazioni termiche e a migliorare la risposta sismica del patrimonio edilizio storico.

L'attività nasce dalla collaborazione con due importanti progetti, il progetto MIRACLE "Sistemi di rinforzo a matrice cementizia a basso impatto ambientale per la riduzione della vulnerabilità sismica e l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici storici", che riguarderà la prima parte della ricerca, e il progetto PRIN2022 "Unified approach for improving structural and thermal response of masonry buildings with optimized sustainable composite materials—ASThRO-Co", relativo alle analisi effettuate nella seconda fase del lavoro. Entrambi i progetti si pongono come obiettivo principale la progettazione e analisi di innovativi sistemi di rinforzo a matrice inorganica e materiali naturali, da utilizzare in interventi di restauro dell'edilizia residenziale storica caratterizzata dalla presenza di muratura portante e finitura ad intonaco.

La tesi è strutturata in tre parti, ognuna focalizzata su una fase specifica della ricerca. La prima e la seconda parte si concentrano sulle sperimentazioni condotte a Firenze, mentre la terza parte affronta le fasi successive dello studio svolto a Miami. Questa divisione geografica riflette le differenti sfaccettature dell'indagine, permettendo di esplorare le peculiarità di ciascun contesto e di integrare prospettive diverse all'interno di un'analisi completa.

Nel dettaglio, la prima e la seconda parte presentano il contesto accademico delle sperimentazioni a Firenze, in cui si espone la metodologia di ricerca, i risultati ottenuti e le analisi condotte. Durante il mio periodo a Firenze, ho avuto l'opportunità di applicare le normative UNI EN ISO (adottate a livello europeo) e CNR (Consiglio

Nazionale delle Ricerche), che rappresentano standard essenziali nel contesto italiano. Questa esperienza ha costituito una solida base per la mia formazione, mentre mi avvicinavo per la prima volta alle normative ASTM (American Society for Testing and Materials), consolidate successivamente nella fase di ricerca a Miami. In particolare, la prima fase si concentrerà sulla ricerca e sulle analisi delle proprietà termiche e meccaniche dei materiali costituenti il materiale composito da progettare, vale a dire gli intonaci termici da utilizzare come matrici, rinforzati con rete in fibra di basalto. Nella seconda fase, invece, si analizzano le proprietà meccaniche del materiale composito, dal punto di vista della resistenza a trazione, adesione e compressione diagonale.

La collaborazione con i miei colleghi e i professori nel laboratorio di Firenze ha giocato un ruolo cruciale nel successo della campagna sperimentale, favorendo un'applicazione efficace delle normative specifiche e garantendo l'esito finale di ogni prova. Questi risultati hanno contribuito a delineare il quadro iniziale della mia ricerca, preparandomi per la successiva fase e consolidando la coerenza tra le diverse parti del mio percorso di dottorato.

Successivamente, la terza parte delinea la metodologia applicata a Miami, lavoro svolto in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'University of Miami, in cui si fornisce un'analisi dettagliata dei risultati ottenuti di una matrice a base di calce idraulica naturale additivata da sughero in granuli.

A Miami, la ricerca ha assunto una dimensione internazionale grazie alla collaborazione intensiva con colleghi, accademici e professionisti provenienti da diverse parti del mondo. Questo periodo è stato caratterizzato da un profondo scambio di idee e opinioni, creando un ambiente stimolante in cui le diverse prospettive hanno contribuito in modo sostanziale alla ricchezza della ricerca. Un altro aspetto cruciale della ricerca a Miami è stato lo studio approfondito delle normative americane, ASTM e ACI (American Concrete Institute), rilevanti per le sperimentazioni di laboratorio e la certificazione di materiali nel settore dell'ingegneria civile e architettura. L'adattamento delle metodologie sperimentali per conformarsi a questi rigidi standard ha rappresentato una componente essenziale per garantire l'affidabilità e la comparabilità dei risultati ottenuti.

Tale approccio strutturale è stato delineato per fornire una chiara sequenza di sviluppo della ricerca, consentendo al lettore di seguire cronologicamente le varie fasi del mio percorso di dottorato.

Nei capitoli successivi, saranno esaminate approfonditamente le sperimentazioni condotte sia a Firenze che a Miami. Si presenteranno in dettaglio le metodologie utilizzate, i riferimenti bibliografici e normativi analizzati, i processi sperimentali e i risultati ottenuti durante entrambe le fasi di ricerca.

Attraverso un'analisi accurata, si fornirà una visione completa delle dinamiche sperimentali. Particolare attenzione sarà dedicata a una discussione esaustiva dei risultati, con l'obiettivo di fornire una comprensione approfondita delle prove di laboratorio svolte. Questa sezione costituirà il nucleo centrale della tesi, contribuendo

a costruire una base solida per il quadro complessivo della ricerca svolta nel corso del dottorato.

Introduzione

Gran parte del patrimonio edilizio in Italia e in numerose città europee è costituito da edifici in muratura portante con finitura ad intonaco, vulnerabili sismicamente e fortemente energivori perché realizzati in assenza di norme antisismiche e prescrizioni energetiche. Pensare alla riqualificazione energetica di tale patrimonio costruito senza tener conto del suo grado di sicurezza strutturale, risulta un controsenso. Bisogna, invece, integrare gli aspetti termici con quelli meccanici, operando in modo coordinato e congiunto per la realizzazione di interventi sull'esistente mediante strategie progettuali volte ad ottenere un miglioramento della sicurezza strutturale e del comfort ambientale interno, operando attraverso interventi non invasivi, nel rispetto del bene architettonico da preservare. A tal proposito, partendo dal presupposto che la riqualificazione di edifici esistenti non può prescindere da una progettazione integrata sismica ed energetica, questo lavoro di ricerca si pone l'obiettivo di trovare una soluzione innovativa integrata sismica ed energetica, combinando soluzioni di alto profilo tecnologico e basso impatto ambientale, con lo scopo di ridurre la domanda di energia primaria.

Una soluzione efficiente per la riqualificazione del patrimonio costruito in muratura è quella di adottare strategie progettuali volte ad ottenere un incremento della sicurezza strutturale e un miglioramento delle prestazioni energetiche, operando mediante interventi non invasivi sull'involucro, nel rispetto del bene architettonico da preservare e valutando la compatibilità con l'ambiente e il benessere degli utenti. Le tecnologie adottate devono essere in linea con i principi fondamentali del risparmio energetico e della sostenibilità ambientale, economica e sociale, soprattutto in contesti di alto valore storico e culturale, al fine di rispondere ai necessari requisiti richiesti dalle normative vigenti, senza alterare le caratteristiche semiotiche architettoniche del costruito.

Questo progetto di ricerca intende incrementare la conoscenza e l'utilizzo di sistemi tecnologici innovativi capaci di ridurre i consumi energetici degli edifici esistenti, in particolare di quelli storici, garantendo al contempo un'adeguata sicurezza alle azioni dinamiche, favorendo la diffusione di buone pratiche per la riqualificazione energetica e strutturale, capaci di incidere positivamente sulla riduzione delle emissioni in atmosfera, con conseguente beneficio ambientale.

Considerato il vasto patrimonio storico italiano ed internazionale, l'individuazione di un materiale innovativo e sostenibile capace di ridurre la vulnerabilità sismica e di migliorare le prestazioni energetiche, è di fondamentale importanza.

Nello specifico, l'idea di progetto si concentra sullo studio, l'attività di testing, la progettazione e il mix-design di innovative matrici inorganiche a base di calce idraulica naturale rinforzate con fibre di basalto, da utilizzare in interventi di restauro

dell'edilizia residenziale storica in muratura, con l'intento di migliorare le prestazioni meccaniche (in termini di resistenza e duttilità), ed energetiche (in termini di riduzione della conducibilità termica ed incremento della capacità termica areica), nel rispetto delle istanze della conservazione sostenibile e della riduzione delle emissioni. L'obiettivo principale è quello di realizzare un materiale composito innovativo, da accoppiare con materiali provenienti da risorse naturali, rinnovabili e riciclabili, che nel suo insieme riesca a soddisfare le prestazioni termiche e a migliorare la risposta sismica del patrimonio edilizio storico in muratura.

Lo stato dell'arte in letteratura

In questo paragrafo si riporta una revisione della letteratura scientifica in merito al contributo che la ricerca sta dando alla definizione di strumenti operativi, capaci di valutare lo stato di criticità e i possibili miglioramenti di alcune tipologie di intervento integrato, attraverso un approccio interdisciplinare, garantendo la sostenibilità economica ed ecologica del patrimonio edilizio esistente.

L'analisi dello stato dell'arte della letteratura è suddivisa in due sezioni principali, ciascuna focalizzata su aspetti chiave correlati alla progettazione integrata di sistemi di retrofit sismico ed energetico.

In primo luogo, l'oggetto di indagine è l'approccio integrato per la progettazione di sistemi di retrofit sismico ed energetico. Questa sezione si prefigge di esaminare criticamente le metodologie esistenti che convergono sulla sicurezza sismica e sull'efficienza energetica nell'ambito del retrofit strutturale. L'obiettivo è mettere in luce i lavori proposti e le opportunità di innovazione emergenti in questo contesto.

Successivamente, l'analisi dello stato dell'arte si concentra sui materiali innovativi destinati alla riqualificazione integrata sismica ed energetica. Questa parte dell'analisi si riferisce alle più recenti tendenze legate all'utilizzo di materiali avanzati per migliorare la resistenza meccanica e l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente. Lo scopo è fornire una visione dettagliata delle principali caratteristiche di tali materiali e delle loro applicazioni pratiche in contesti reali.

Attraverso tale disamina articolata, l'intenzione è quella di offrire al lettore una comprensione approfondita delle conoscenze esistenti nel campo della riqualificazione integrata e di fornire il necessario contesto per esplorare le sfide e le opportunità di questa tesi di dottorato.

Approccio integrato per la progettazione di sistemi di retrofit sismico ed energetico

In letteratura è fornita un'ampia gamma di tipologie di intervento per la riduzione della vulnerabilità sismica [1], [2], [3] e per l'incremento delle prestazioni termiche [4], ma la tendenza è ancora quella di operare in modo disgiunto.

In tale scenario, si è dato impulso a tecniche di intervento integrato, ponendo attenzione sia al grado di sicurezza nei confronti degli eventi sismici, sia all'efficienza energetica, nel rispetto dei principi di sostenibilità ambientale e sostenibilità economica [5].

La riqualificazione integrata sismica ed energetica è un tema nuovo, poco investigato in passato non solo in Italia, ma anche in altre parti del mondo.

Combinando gli effetti di riduzione della vulnerabilità strutturale a quelli del miglioramento energetico, si risolve il problema della funzionalità dell'edificio, consentendo di ridisegnarne l'aspetto, sfruttando la sinergia del cantiere unico e riducendo il costo complessivo dell'intervento.

Allo scopo di ottenere effetti vantaggiosi, sono necessari nuovi metodi di progettazione e di pianificazione dell'intervento sul costruito esistente, operando mediante tecniche di riqualificazione olistica sull'edificio nel suo complesso.

Una materia così vasta deve includere un approccio multidisciplinare, che sia capace di rispondere a specifiche problematiche tecniche, mantenendo una visione globale dell'intervento da predisporre e coniugando le esigenze strutturali con quelle energetiche.

Attualmente, la ricerca si sta ponendo come obiettivo la definizione di metodi per l'individuazione di soluzioni di intervento ottimali e sostenibili da realizzare sull'edilizia esistente, migliorando la risposta della struttura e ottimizzando i costi economici ed ecosostenibili, tenendo in conto il luogo in cui è situato l'edificio.

Nella letteratura di settore, si sta proponendo un approccio integrato per valutare nuovi metodi di riqualificazione sismica ed energetica degli edifici esistenti in muratura, allo scopo di trovare una strategia green, ecosostenibile ed ecocompatibile. Al fine di valutare l'efficacia e la fattibilità dei metodi proposti, tenendo conto delle prestazioni termiche e della capacità sismica dell'intervento, in [6] sono confrontati i costi economici unitari ($\text{€}/\text{m}^2$) ed ecologici ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$) di alcune tecniche di riqualificazione. Nello specifico, vengono analizzati sei tipici scenari di retrofit (denominati scenario a., b), c), d), e), f)), su pareti in muratura di dimensione $1\text{m} \times 1\text{m}$. Gli interventi a) e b) consistono nell'applicazione di un pannello isolante in polistirene ($\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$), con e senza connettori laterali; nel caso senza connettori, si ottiene ovviamente un miglioramento soltanto dal punto di vista energetico, mentre nel caso dell'inserimento dei connettori trasversali, aumenta anche la resistenza strutturale. Nei casi c) e d) vengono applicati, mediante connettori e su entrambi i lati della parete, uno strato di CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), caratterizzato da una conducibilità termica $\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$, una resistenza a trazione f_{FRP} pari a 2800 MPa e un modulo elastico $E = 350000 \text{ MPa}$, e uno strato di GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), con una $f_{FRP} = 1000 \text{ MPa}$ ed $E = 45000 \text{ MPa}$.

Negli interventi (e) e (f) sono applicate, su entrambi i lati della parete, rispettivamente, una rete di CFRP e una rete di GFRP; in questo caso, data la

mancanza di uno strato isolante, si ottiene un miglioramento della sola resistenza strutturale.

Per ogni strategia di intervento analizzata, si definiscono i parametri prestazionali energetici e strutturali, valutando l'incremento di resistenza meccanica in termini di momento flettente ΔM o di sforzo di taglio ΔV , e la resistenza termica ΔR ottenuta dopo l'intervento, al fine di stimare i costi economici (considerati variabili tra i 100 €/m² e i 350 €/m²) ed ecologici (considerati variabili tra i 10 kg CO₂/m² e i 100 kg CO₂/m²).

Dalle analisi ottenute, le soluzioni di retrofit vengono valutate in quattro differenti località italiane: Torino (basso carico sismico, elevate esigenze termiche), L'Aquila (elevato carico sismico, elevate esigenze termiche), Catania (elevato carico sismico, basse esigenze termiche) e Cagliari (basso carico sismico, basse esigenze termiche). Il confronto tra costo ecologico ed economico ha permesso di evidenziare le peculiarità dei diversi interventi. Le prestazioni termiche si sono rivelate più importanti in condizioni climatiche fredde (Torino) mentre l'adeguamento strutturale è preferibile in condizioni di alto rischio sismico (Catania).

Grazie a questa metodologia di indagine, dato un costo fisso (economico o ecologico), è possibile valutare la soluzione migliore che tenga conto delle caratteristiche della località in cui è situato l'edificio oggetto di intervento, in modo da avere un'efficace e sintetica visione del complesso problema della riqualificazione integrata e delle sue possibili soluzioni.

Altri autori propongono un approccio integrato per valutare le prestazioni sismiche ed energetiche degli edifici esistenti in cemento armato [7]. La metodologia utilizzata è quella basata sul concetto del Pay Back Time, che rappresenta il momento in cui il valore dell'investimento iniziale sarà interamente ammortizzato dai benefici ottenuti dopo l'intervento di riqualificazione congiunta. Il Pay Back Time di un approccio integrato (PBT_{S+E}) viene valutato in base alla corrispondenza tra il beneficio totale e il costo della soluzione integrata. Gli autori rappresentano questo tipo di approccio su un grafico, sulle cui ordinate sono rappresentati i valori ΔEAL (Expected Annual Losses), che indicano le perdite economiche annuali previste in funzione del tempo, e sulle ascisse viene rappresentato il tempo.

Con lo scopo di progettare un sistema a basso costo e di facile applicazione, adattabile a diversi contesti geografici, in diverse condizioni di esposizione e applicabile a edifici di diversa forma e dimensione, altri autori [8] propongono una soluzione tecnica innovativa, che consiste nell'utilizzo di un sistema di telai in acciaio dotati di dissipatori antisismici BRAD (Buckling-Restrained Axial Dampers), su cui installare dei pannelli solari termici e fotovoltaici (PV), da collegare sulla facciata dell'edificio da riqualificare al fine di ridurre la vulnerabilità sismica e di migliorarne l'efficienza energetica.

Con l'obiettivo di fornire al mercato un sistema multifunzionale e prefabbricato per interventi di riqualificazione integrata, questa ricerca ha raggiunto risultati incoraggianti sia dal punto di vista della riduzione dei consumi energetici, sia dal punto di vista della protezione sismica.

Oltre allo studio di metodologie che permettono la combinazione di interventi per la riqualificazione sismica ed energetica degli edifici esistenti, la ricerca si sta muovendo per sviluppare nuove tecniche innovative utilizzando materiali rinnovabili e riciclabili, capaci di aumentare la resistenza meccanica, ridurre la trasmittanza e migliorare l'inerzia termica dell'edificio da riqualificare, contribuendo in modo significativo all'economia e fornendo un fattore ambientale favorevole riguardo l'inquinamento derivante dalla fabbricazione dei materiali tradizionalmente utilizzati.

Materiali innovativi per la riqualificazione integrata sismica ed energetica

Nell'ambito dei materiali innovativi per la progettazione integrata di sistemi di retrofit sismico ed energetico, si inserisce lo studio dei nuovi materiali compositi [9] FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), caratterizzati da una matrice inorganica compatibile con i supporti da rinforzare, che assicura un'efficace adesione alle fibre strutturali [10], ha un buon comportamento alle alte temperature [11], [12], [13], un costo minore di messa in opera ed è completamente removibile senza creare danni al supporto [14].

In letteratura, i compositi FRCM si sono affermati come valida soluzione per il rinforzo di edifici esistenti in interventi di restauro [15] grazie alla natura inorganica della matrice, che rende il sistema di rinforzo FRCM preferibile agli FRP (Fiber Reinforced Polymer) soprattutto per le applicazioni sui supporti in muratura da rinforzare, con cui ha una buona compatibilità chimica, fisica, estetica e materica [16], con l'intento di migliorare le prestazioni meccaniche ed energetiche del costruito.

In campo internazionale, al momento sono disponibili alcune linee guida per la progettazione di interventi di rinforzo strutturale realizzati mediante FRCM. Nel contesto internazionale, si ricordano i criteri di accettazione statunitensi ACI 549.6R -20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures [17].

A livello nazionale, sono disponibili le istruzioni CNR DT 215/ 2018: Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica [18]. Questo documento risponde all'esigenza di conoscenza e di standardizzazione nel settore delle applicazioni innovative dei materiali compositi fibrorinforzati, attraverso strumenti tecnico-scientifici condivisi; inoltre, pone in nostro Paese in posizione preminente nel quadro normativo internazionale, in particolare europeo, costituendo una base sicura che accompagnerà l'evoluzione tecnica e tecnologica.

Il rinforzo di strutture in muratura è tra le applicazioni più importanti per i sistemi FRCM [19], che possono essere distribuiti sull'intera superficie del supporto da rinforzare, oppure essere applicati come strisce di ampiezza tale da contenere le sollecitazioni tangenziali all'interfaccia tra supporto e rinforzo. I compositi FRCM permettono di raggiungere miglioramenti significativi delle prestazioni meccaniche sia a trazione e

sia a taglio, senza aumentare la massa o incrementare in modo significativo la rigidità [20].

Gli FRCC possono essere utilizzati al fine di migliorare la capacità portante di pareti sollecitate nel proprio piano, prevedendo l'applicazione del composito in modo simmetrico su entrambe le superfici del supporto da rinforzare ed esteso a tutta la superficie del supporto [21].

Nel caso di azioni sismiche, i compositi FRCC vengono spesso utilizzati per migliorare la resistenza dei pannelli murari alle azioni fuori dal piano. In letteratura sono disponibili alcuni modelli analitici per il calcolo della resistenza fuori dal piano degli elementi strutturali rinforzati con FRCC [22], che dimostrano l'efficacia dei compositi FRCC per migliorare la capacità di flessione fuori dal piano di pareti in muratura [23].

I materiali componenti che costituiscono i sistemi di rinforzo FRCC sono la matrice inorganica, che rappresenta la fase continua, a base di cemento o di calce a reazione idraulica, con eventuale aggiunta di additivi, e la fibra di rinforzo.

Il rinforzo può essere unidirezionale o bidirezionale ed è costituito da un tessuto a maglia aperta quadrata o rettangolare, che conferisce al sistema FRCC un comportamento anisotropo e può essere impiegato, quando necessario, in più strati sovrapposti; secondo le CNR -DT 215/218 [18], un singolo strato di matrice di FRCC ha uno spessore pari a circa 5mm ÷ 15mm.

Le fibre utilizzate per il rinforzo FRCC possono essere a base vegetale, come le fibre di canapa, le fibre di iuta e le fibre di lino [24] il cui uso, però, è ancora in fase di sviluppo, oppure possono essere fibre tradizionali, come le fibre di carbonio, di vetro, di acciaio, di PBO e le fibre di basalto. Queste ultime, in particolare, sono caratterizzate da un'ottima resistenza a trazione e basso peso specifico e, se sottoposte a variazioni termiche, presentano una buona stabilità dimensionale. Inoltre, le reti in fibra di basalto offrono elevate prestazioni a costi ridotti, sia economici che ambientali, perché sono tipicamente di origine minerale e inorganica [25].

In [26] viene indagata l'efficacia di un sistema FRLM (Fiber Reinforced Lime Mortar) composto da una matrice a base di calce in cui sono annegate le fibre di basalto per il rinforzo di archi in muratura. Rispetto ai risultati ottenuti sugli archi in muratura rinforzati con matrice polimerica o cementizia, il sistema di rinforzo è risultato più efficace in termini di miglioramento di capacità di carico, di capacità spostamento e di aumento della duttilità cinematica.

La matrice ha il compito di garantire la distribuzione dello sforzo tra le fibre di rinforzo e proteggerle dagli agenti atmosferici esterni, assicurando al contempo l'adesione del composito al supporto in muratura da rinforzare, presentando con esso una buona compatibilità chimico-fisica, estetica e materica. Altri vantaggi sono la traspirabilità e la permeabilità al vapore, la resistenza alle alte temperature [27], i tempi e i costi di installazione, la richiesta di manodopera non specializzata e soprattutto, la reversibilità dell'intervento, principio chiave di qualsiasi attività di restauro, rispettando i principi di qualità auspicati da ICOMOS (Council on Monumental and Site) [28].

Negli ultimi anni l'attenzione della ricerca si è indirizzata verso l'utilizzo di matrici rinnovabili, sostenibili e riciclabili, in sostituzione di quelle che non rispettano i moderni requisiti ambientali e di sostenibilità. Tali matrici sono capaci di produrre miglioramenti anche dal punto di vista termico, allo scopo di migliorare la prestazione energetica generale dell'edificio da riqualificare.

Vengono analizzati gli effetti di miscele a base di calce idraulica naturale con cenere volante idraulica (nota anche come cenere silicea o calcica) e con le scorie d'altoforno [29] le quali, additivate alle malte, sono capaci di ridurre la conducibilità termica e aumentarne i valori di resistenza a compressione.

In materia di interventi di risanamento integrato del costruito storico in muratura, anche la cenere volante da biomassa viene studiata come potenziale additivo per la progettazione di malte a base di calce idrata [30]; in questo caso si nota un incremento della resistenza meccanica, con proprietà di resistenza a compressione conformi ai valori limite stabiliti dalla norma UNI EN 998-1 2016: Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni [31], con una diminuzione dei valori di conducibilità termica e del calore specifico [32]. L'aumento del contenuto di cenere nella malta mostra inoltre una riduzione sia nella produzione di anidride carbonica, sia nel consumo di energia, contribuendo in modo significativo all'economia e fornendo un fattore ambientale favorevole riguardo l'inquinamento derivante dalla fabbricazione dei materiali cementizi tradizionalmente utilizzati.

In sostituzione al classico intonaco a base di calce, un'ottima soluzione per la riqualificazione degli edifici storici sembra essere la progettazione di malte additivate con la pozzolana, che rende l'aggregato più compatibile con il supporto in muratura da rinforzare [33]. Sperimentazioni di questo tipo hanno dimostrato un significativo miglioramento delle proprietà meccaniche e un leggero incremento anche delle proprietà termiche e igriche [34]. Inoltre, i materiali di scarto come polvere di ceramica, perlite espansa e sabbia di silice, mostrano una buona reattività pozzolanica, portando benefici in termini economici, ecologici, con significativo miglioramento delle prestazioni meccaniche [35].

Da queste osservazioni, emerge quanto sia cresciuta la consapevolezza del ciclo di vita degli edifici, cosicché il riutilizzo di materie prime di riciclo [36] e di materiali provenienti da scarti di lavorazione [37], sta diventando una soluzione comune per ridurre l'impatto sull'ambiente del settore delle costruzioni.

Il concetto di impatto ambientale è da intendersi osservando l'approccio "From Cradle to Grave", seguendo il metodo del Life Cycle Assessment (LCA), allo scopo di valutare l'influenza che il processo di produzione ha sui fattori relativi al cambiamento climatico [38]. L'obiettivo del LCA è quello di valutare le emissioni di gas serra e l'effetto sull'inquinamento atmosferico dei materiali, dall'ottenimento della materia prima al fine vita, attraverso i processi di modifica e le applicazioni in cui vengono impiegati.

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 [39].

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 [40] e il New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and more Competitive Europe [41], che invitano a riflettere sulle soluzioni utilizzabili in interventi di riqualificazione edilizia in un'ottica di Life Cycle Thinking.

Grazie al nuovo interesse che viene posto nei confronti dell'impatto sull'ambiente dei prodotti e del loro ciclo di vita, si è dato spazio alla progettazione di materiali compositi innovativi, ottenuti dall'abbinamento di malte idrauliche leggeri naturali LWA (Lightweight aggregates) [42] non modificate chimicamente, prodotte con l'aggiunta di aggregati naturali e rinforzate con fibre naturali o minerali. [43].

A seguire, verrà illustrata l'idea di progetto, che mira ad ottenere un materiale composito sostenibile da applicare nel settore delle costruzioni, elaborando soluzioni di intervento integrate in grado di coniugare il risparmio energetico e il miglioramento delle prestazioni sismiche, combinando soluzioni di alto profilo tecnologico e basso impatto ambientale.

Parte I: Ricerca e analisi dei materiali costituenti il composito

1. Selezione delle matrici per il composito fibrorinforzato

Mediante l'analisi dello stato dell'arte, è stato riscontrato che non esistono materiali compositi fibrorinforzati FRCM a basso impatto ambientale da utilizzare per interventi di riqualificazione integrata sismica ed energetica su edifici esistenti in muratura.

A tale proposito, è di fondamentale importanza individuare matrici che presentino caratteristiche meccaniche e termo-igrometriche tali da consentire il miglioramento delle pareti perimetrali degli edifici esistenti in muratura.

In questa ottica, si è pensato di sostituire alla classica matrice cementizia utilizzata per i compositi FRCM, un intonaco termico a base di calce idraulica naturale NHL (Natural Hydraulic Lime). Tale matrice è caratterizzata da buone proprietà meccaniche, termiche ed igrometriche, e rispetta i criteri di sostenibilità ambientale in quanto additivata da materiali naturali, riciclati o riciclabili, portando benefici in termini economici ed ecologici e garantendo l'esecuzione di un intervento reversibile non invasivo [44]. È importante ricordare che la norma europea UNI EN 998 – Parte1 [31], descrive le proprietà caratteristiche delle malte per intonaci interni ed esterni a base di leganti inorganici

Di seguito vengono riportati i vari step di un'analisi dello stato degli intonaci termici presenti attualmente in commercio, utilizzabili per la realizzazione delle matrici dei compositi fibrorinforzati FRLM (Fiber Reinforced Lime Matrix) da progettare [45].

Tutti i dati analizzati sono quelli riportati dalle schede tecniche dei produttori. A questo proposito, al fine di garantire un approccio oggettivo, si è scelto consapevolmente di non citare aziende specifiche. Questa scelta riflette l'adesione alle pratiche accademiche che promuovono la trasparenza e l'integrità nella presentazione dei risultati di ricerca. L'obiettivo è garantire che l'analisi e le conclusioni siano guidate esclusivamente dalla ricerca scientifica e dalla valutazione oggettiva delle prestazioni dei materiali, preservando così l'autenticità della presente indagine.

Nella ricerca mirata all'identificazione e alla selezione di intonaci termici commerciali per la creazione della matrice del composito FRLM, il percorso è stato suddiviso in quattro step distinti.

L'approccio metodologico permette una chiara comprensione del processo decisionale che ha guidato la selezione finale. Ogni fase ha contribuito a raffinare la selezione, concentrando l'attenzione su specifici parametri prestazionali, rappresentando una tappa cruciale nel percorso di ricerca, mirato all'identificazione delle matrici idonee alla progettazione del composito FRLM.

Si inizia con un'ampia selezione di più di cento tipologie di prodotti. Il primo passo ha riguardato un'accurata ricerca degli intonaci termici aventi come legante una calce idraulica naturale NHL, additivata da aggregati leggeri di origine naturale e da materiali riciclati o riciclabili, in accordo alle etichette e dichiarazioni ambientali dichiarate dalle UNI EN ISO 14021:202 [46].

Nella seconda fase, la selezione si è focalizzata sulle matrici aventi proprietà di resistenza a compressione, conducibilità termica e capillarità analoghe a quelle definite dalla normativa europea UNI EN 998-1 [31], catalogando in questo modo più di 50 prodotti.

La terza fase ha coinvolto la cernita di circa 30 matrici, costituite da un intervallo granulometrico nei limiti descritti dall'ASTM C144 – 18 [47].

Infine, nell'ultimo step, l'attenzione è stata rivolta alla Classe di resistenza al fuoco di classe A1 [48], allo spessore massimo e minimo di applicazione e all'utilizzo interno ed esterno quando applicati sul supporto in muratura.

Su più di un centinaio di prodotti, soltanto undici hanno soddisfatto tutte le proprietà della fase decisionale.

In Tab. 1-1 sono riportate le prestazioni analizzate degli undici termointonaci, indicati con i codici da INT. 01 a INT.11.

Di seguito, si elencano e si descrivono tutte le proprietà analizzate per la scelta degli intonaci termici selezionati, in modo da avere un concetto chiaro sul significato di ogni singola prestazione dei materiali.

<i>Matrice</i>	<i>Legante</i>	<i>Aggregati</i>	<i>Resistenza alla compressione [N/mm²]</i>	<i>Conducibilità termica λ [W/mK]</i>	<i>Massa volumica apparente [kg/m³]</i>	<i>Resistenza di adesione su laterizio [N/mm²]</i>	<i>Coefficiente di assorbimento acqua [Kg/m² min^{1/2}]</i>	<i>Intervallo granulometrico [mm]</i>	<i>Resistenza alla diffusione del vapore [-]</i>	<i>Spessore di applicazione [mm]</i>
<i>INT.01</i>	Calce idraulica naturale NHL 3,5	Farine di marmo, caolino, perlite, farina di sughero, fibre naturali e agenti antisalini	1.5	0.077	400	0.18	0.35	0 ÷ 2.5	9.0	20÷ 30 per strato
<i>INT.02</i>	Calce e idraulica naturale NHL 3,5	Vetro espanso riciclato, inerti naturali	2.5	0.075	380	0.40	0.30	0 ÷ 0.1	6.0	Max. 60 totale
<i>INT.03</i>	Calce Idraulica Naturale NHL5	Sughero in granuli	5.0	0.046	395	0.10	0.40	0 ÷ 3	5.0	15÷ 20 per strato
<i>INT.04</i>	Calce idraulica naturale	Gesso, inerti calcarei selezionati ed additivi naturali	2.0	0.086	358	0.20	0.30	0 ÷ 1.0	14.0	20 ÷60
<i>INT.05</i>	Calce idraulica naturale NHL 3.5	Sughero in granuli, inerti minerali leggeri, additivi naturali	2.0	0.064	365	0.10	0.25	0 ÷ 3.0	5.0	Max. 30 per strato
<i>INT.06</i>	Calce idraulica naturale NHL 3.5	Inerti naturali alleggeriti	2.0	0.050	380	0.15	0.35	0 ÷ 2.5	5.5	Max. 40 per strato
<i>INT.07</i>	Calce idraulica naturale	Sughero naturale	1.5	0.100	400	0.10	0.40	0 ÷ 2.5	7.5	20 ÷ 60
<i>INT.08</i>	Calce idraulica naturale NHL 3.5	Inerti leggeri naturali e minerali	1.5	0.076	390	0.20	0.30	0 ÷ 3.0	5.0	20 ÷ 60
<i>INT.09</i>	Calce idraulica naturale	Materia prima naturale	2.0	0.080	400	0.10	0.35	0 ÷ 4.0	8.5	Min. 30 per strato
<i>INT.10</i>	Calce idraulica naturale	Pomici, additivi naturali	1.5	0.100	390	0.20	0.40	0 ÷ 3.0	5.0	Max. 20 per strato
<i>INT.11</i>	Calce idraulica naturale NHL 5	Sabbie minerali espanse	2.5	0.057	348	0.35	0.35	0 ÷ 4.0	6.0	Max. 40 per strato

Tab. 1-1 Proprietà prestazionali degli undici intonaci termici selezionati come matrice del composito FRLM

1.1. Tipologia di materiale legante

La calce idraulica naturale NHL è una calce con proprietà idrauliche, prodotta dalla cottura di calcari argillosi o silicei, con successiva riduzione in polvere. Ha la proprietà di far presa e indurire quando miscelata con acqua e reagendo con l'anidride carbonica presente nell'aria (fenomeno di carbonatazione)[49]. La resistenza meccanica di compressione della NHL comprende le tre classi NHL 2, NHL 3.5 e NHL 5; il numero che segue la sigla NHL corrisponde al valore di resistenza a compressione della calce, che si misura in MPa oppure in N/mm² [49].

La permeabilità della NHL, inoltre, risulta particolarmente significativa, consentendo alle murature di prevenire danni correlati all'accumulo di umidità, come la formazione di muffe[50].

L'utilizzo della calce idraulica naturale NHL (Natural Hydraulic Lime) per il rinforzo delle murature esistenti, anziché una matrice a base di cemento, si basa sulla necessità di preservare e rispettare le caratteristiche intrinseche delle murature storiche, garantendo una maggiore compatibilità strutturale nel tempo[51].

1.2. Tipo di aggregati all'interno della miscela

L'aggiunta di aggregati naturali può apportare diversi benefici alla calce idraulica naturale NHL. Da un'accurata analisi dello stato dell'arte, si è visto come l'aggiunta di sughero in granuli, di canapa[52] e di fibre di palma [53], abbia benefici sulle malte a base di calce idraulica naturale in termini di miglioramento delle proprietà termiche e di traspirazione della miscela.

Ad oggi, il sughero in granuli è l'aggregato naturale maggiormente studiato e analizzato, mostrando capacità fungicide e battericide contro la formazione di umidità [54], un notevole abbattimento della conducibilità termica [55], [56] e un miglioramento delle proprietà igrometriche [57], [58]. L'aggiunta del sughero influisce anche sulle proprietà meccaniche, riducendo la densità del materiale, e di conseguenza la sua resistenza a compressione [59] e di adesione [60].

1.3. Resistenza alla compressione

In accordo con la norma europea UNI EN 998-1 [31], la resistenza a compressione, determinata mediante la EN 1015-11- Part 11 [61] e la ASTM C109/C109M-21 [62], deve essere classificata secondo il prospetto 1 (Tab. 1-2).

A questo proposito, il valore di resistenza a compressione limite posto per la selezione delle matrici da analizzare è pari a 1,50 N/mm², vale a dire il valore medio della categoria CSI e il valore minimo della categoria CII.

Tutti gli intonaci termici, caratterizzati da una resistenza a compressione inferiore a tale valore, sono stati scartati. I valori delle resistenze a compressione degli undici intonaci termici selezionati (valori indicati nelle schede tecniche dei prodotti) sono riportati nel diagramma a barre verticali di Fig. 1.1.

Proprietà	Categorie	Valori
Intervallo di resistenza a compressione a 28 d	CS I	Da 0,4 N/mm ² a 2,5 N/mm ²
	CS II	Da 1,5 N/mm ² a 5,0 N/mm ²
	CS III	Da 3,5 N/mm ² a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥6 N/mm ²

Tab. 1-2 Classificazione della resistenza a compressione delle malte indurite secondo il prospetto 1 delle UNI EN 998-1 [31]

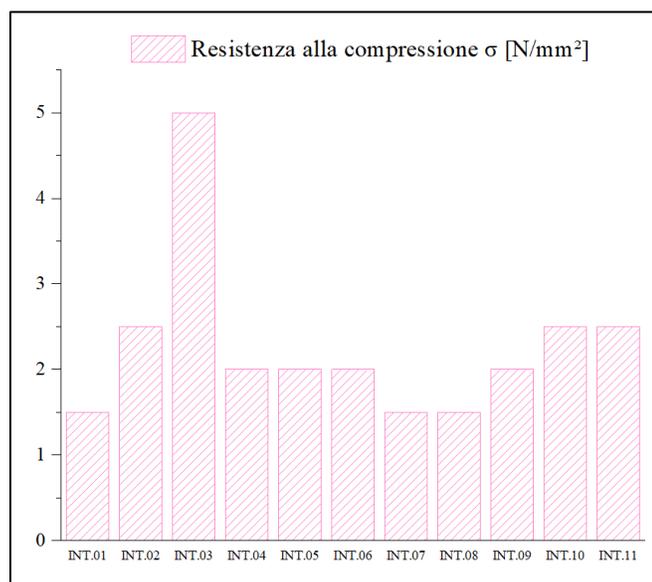


Fig. 1.1 Valori di resistenza alla compressione degli intonaci termici selezionati.

Nella tabella sottostante sono riportate le statistiche descrittive relative ai dati rappresentati nell'istogramma di Fig. 1.1. Queste includono la media, la deviazione standard e il coefficiente di variazione, che forniscono una panoramica più completa della distribuzione dei dati e delle loro caratteristiche di variabilità.

Resistenza alla compressione σ [N/mm ²]	Totale	Media	Deviazione standard	Coefficiente di variazione
		11	2.27	0.98

Tab. 1-3 Media, deviazione standard e coefficiente di variazione dei valori di resistenza a compressione degli undici termointonaci.

1.4. Conducibilità termica

In accordo con la norma europea UNI EN 998-1 [31] la conducibilità termica deve essere classificata mediante il prospetto 1 (Tab. 1-4). Le categorie di intonaco con proprietà termo isolanti garantite sono due, indicate dalla normativa con la lettera "T". Le categorie T1 e T2 si riferiscono, rispettivamente, a termointonaci con conducibilità termica non superiore a 0.10 W/mK e a 0.20 W/mK.

Le proprietà termiche di un intonaco termoisolante dipendono non solo dal tipo di aggregato utilizzato, ma anche dal legante. Gli intonaci a base di cemento, ad esempio, non sono traspiranti, sono poco porosi e sono dotati di un'elevata conducibilità termica (circa 1.60 W/mK), che si trasferisce alle proprietà della miscela. Gli intonaci a base di calce idraulica naturale NHL, invece, hanno una porosità maggiore rispetto all'intonaco cementizio [63], proprietà che rende la miscela più traspirante, interagendo con l'ambiente esterno ed evitando eventuali fenomeni di condensa.

Proprietà	Categorie	Valori
Conducibilità termica	T 1	$\leq 0,1 \text{ W / m} \times \text{K}$
	T 2	$\leq 0,2 \text{ W / m} \times \text{K}$

Tab. 1-4 Classificazione della conducibilità termica delle malte indurite secondo il prospetto 1 delle UNI EN 998-1 [64].

In Fig. 1.2 è illustrato un diagramma a barre verticali che rappresenta i dati relativi ai valori di conducibilità termica (riportati nella scheda tecnica del prodotto) degli undici intonaci selezionati.

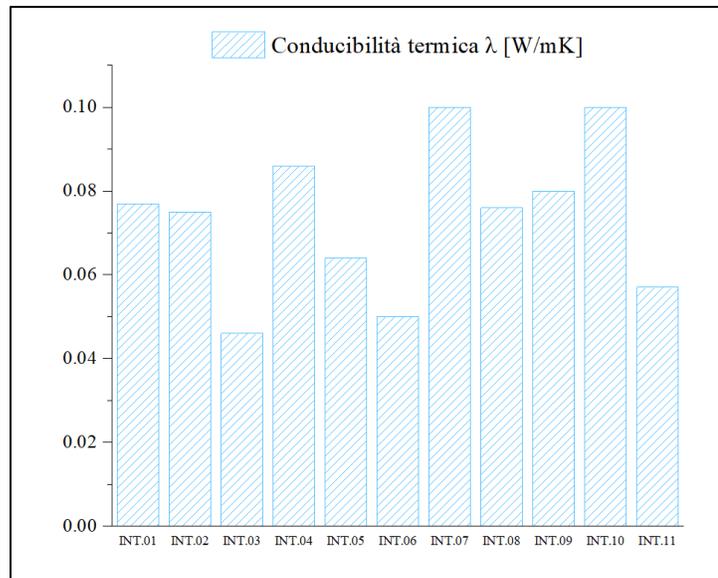


Fig. 1.2 Valori di conducibilità termica degli intonaci termici selezionati.

Nella tabella seguente (Tab. 1-5) sono presenti le statistiche descrittive relative ai dati mostrati nell'istogramma della conducibilità termica.

Conducibilità termica λ [W/mK]	Totale	Media	Deviazione standard	Coefficiente di variazione
		11	0.07	0.02

Tab. 1-5 Media, deviazione standard e coefficiente di variazione dei valori di conducibilità termica degli undici termointonaci.

1.5. Massa volumica apparente

La massa volumica apparente (o densità) di un dato campione della malta indurita è determinata come rapporto tra la sua massa dopo l'asciugatura e il volume occupato [65]. L'aggiunta degli aggregati naturali alla calce idraulica naturale NHL influisce sulla densità complessiva, riducendola. Questo effetto è particolarmente evidente quando si utilizzano aggregati leggeri, come il sughero in granuli [66]. L'aggiunta del sughero in granuli crea una struttura più leggera e porosa, e riduce la quantità complessiva del materiale più pesante, portando una diminuzione della densità. Tutti gli intonaci termici selezionati hanno una massa volumica apparente non maggiore di 400 kg/m³, limite tipico di malte a base di calce NHL con aggiunta di aggregati leggeri naturali.

1.6. Resistenza di adesione su laterizio

In accordo con la norma europea UNI EN 1015-12 [62], la forza di adesione è definita come il massimo sforzo di trazione applicato mediante un carico diretto di trazione ortogonale alla superficie della malta da intonaco interno ed esterno su un supporto. La proprietà di adesione è di fondamentale importanza tra malta e muratura, influenzando direttamente della qualità, sulla durabilità e sulla resistenza strutturale degli edifici [18] Si tenga presente che le schede tecniche dei prodotti indicano la resistenza di adesione dell'intonaco termico quando applicato su un supporto in laterizio. Fig. 1.3 mostra un grafico a barre verticali che rappresenta i dati relativi ai valori delle resistenze di adesione (secondo schede tecniche) degli intonaci termici selezionati.

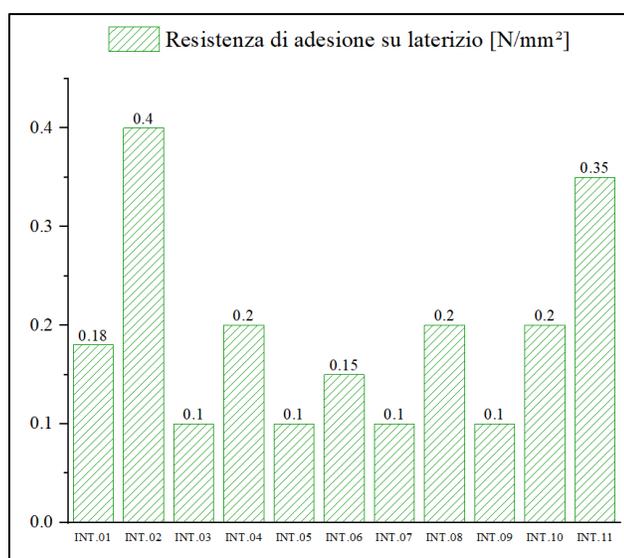


Fig. 1.3 Valori di resistenza di adesione degli intonaci termici selezionati.

In Tab. 1-6 sono illustrate le statistiche descrittive relative ai dati rappresentati nell'istogramma della resistenza di adesione su murature in laterizio. Queste includono la media, la deviazione standard e il coefficiente di variazione, fornendo una visione completa delle caratteristiche distributive e della variabilità dei dati.

Resistenza di adesione su laterizio [N/mm²]	Totale	Media	Deviazione standard	Coefficiente di variazione
	11	0.19	0.10	0.54

Tab. 1-6 Media, deviazione standard e coefficiente di variazione dei valori di resistenza di adesione su laterizio degli undici termointonaci.

1.7. Coefficiente di assorbimento acqua per capillarità

Riguardo la valutazione delle proprietà igrometriche, le matrici sono state selezionate in base al loro coefficiente assorbimento per capillarità, definibile mediante i due standard ASTM C1403-22a [67] e dalla UNI en 1015-18 [68].

Assorbimento d'acqua per capillarità	$W_c 0$	Non specificato
	$W_c 1$	$C \leq 0,40 \text{ kg} / (\text{m}^2 \times \text{min}^{0,5})$
	$W_c 2$	$C \leq 0,20 \text{ kg} / (\text{m}^2 \times \text{min}^{0,5})$

Tab. 1-7 Classificazione delle proprietà delle malte indurite: assorbimento d'acqua per capillarità secondo il prospetto 1 delle UNI EN 998-1 [31]

Le undici matrici selezionate presentano valori di assorbimento per capillarità non superiori a $W_c 1$, vale a dire $C \leq 0.40 \text{ kg/m}^2\text{m}^{0.5}$, rientrando quindi nei limiti stabiliti dal prospetto 1 delle UNI EN 998-1 [31], come riportato in Tab. 1-7.

In Fig. 1.4 è riportato un istogramma a barre verticali che definisce i valori del coefficiente di assorbimento acqua per capillarità (indicati nella scheda tecnica del prodotto) per gli undici intonaci termici selezionati.

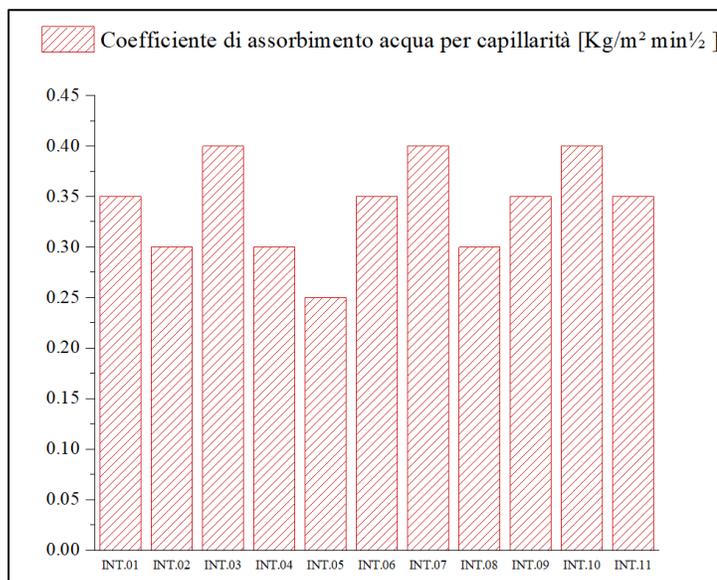


Fig. 1.4 Valori del coefficiente di capillarità di assorbimento di acqua capillare degli intonaci termici selezionati

Le statistiche descrittive associate all'istogramma del coefficiente di assorbimento acqua per capillarità in Tab. 1-8 offrono una comprensione dettagliata della distribuzione e della variabilità dei dati.

Coefficiente di assorbimento acqua per capillarità [Kg/m ² min ^{1/2}]	Totale	Media	Deviazione standard	Coefficiente di variazione
	11	0.34	0.05	0.14

Tab. 1-8 Media, deviazione standard e coefficiente di variazione dei valori di assorbimento acqua per capillarità degli undici termointonaci.

1.8. Intervallo granulometrico

Si riferisce alla distribuzione delle dimensioni delle particelle nella miscela. Questo parametro può influire sulla lavorabilità e sulle proprietà meccaniche del materiale [69], [70].

La distribuzione granulometrica degli intonaci termici selezionati non supera mai i 4.75 mm rientrando nei limiti prestabiliti dalla ASTM C144 – 18 (Fig. 1.5), relativa al dimensionamento di aggregati di malte per muratura [47].

Sieve Designation

4.75-mm	(No. 4)
2.36-mm	(No. 8)
1.18-mm	(No. 16)
600-µm	(No. 30)
300-µm	(No. 50)
150-µm	(No. 100)
75-µm	(No. 200)

Fig. 1.5 Distribuzione granulometrica adottata dall' ASTM C144- 18 [47].

1.9. Resistenza alla diffusione del vapore

Il fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo definisce la capacità del materiale di permettere o respingere il passaggio del vapore acqueo. Il coefficiente è un numero puro e si indica con la lettera greca μ . Rilevante per le prestazioni termiche e l'umidità, il coefficiente di resistenza alla diffusione di vapore delle malte da intonaco indurite per opere murarie, viene determinato mediante il metodo illustrato nella UNI EN 1015-19 [71].

I valori dei coefficienti di resistenza alla diffusione del vapore μ degli undici termointonaci selezionati variano tra 5.0 e 14.0 [-] (valori indicati dalle rispettive schede tecniche).

1.10. Classe di resistenza al fuoco

Gli intonaci termici a base di leganti inorganici sono classificati come appartenenti alla classe di prestazione A1, in conformità alla norma europea UNI EN 13501-1 [48], senza necessità di prove.

Nello specifico, i materiali classificati come A1 non contribuiscono all'espansione di un incendio, neanche in presenza di un incendio completamente sviluppato, e non costituiscono alcun pericolo in termini di emissione e rilascio di fumi [48]

Le matrici ricercate, però, sono tutte additivate da materiale organico. Per questo motivo, si è fatto riferimento alle schede tecniche fornite dai produttori, selezionando soltanto quelle di classe A1.

1.11. Contenuto di materiale riciclato o riciclabile

Secondo la norma europea UNI EN ISO 14021:202 [46], per contenuto riciclato si intende una porzione, in massa, di materiale riciclato in un prodotto. Per materiale riciclato, si intende un materiale che è stato rilavorato da materiale recuperato mediante un processo di lavorazione e trasformato in un prodotto finale o in un componente.

In questo caso, la scelta dei termo-intonaci da utilizzare come matrice del nuovo composito è avvenuta selezionando quelli che, secondo scheda tecnica, presentano contenuto di materiale riciclato all'interno della miscela.

1.12. Spessore massimo e minimo di applicazione

Lo spessore minimo totale di applicazione e l'utilizzo interno ed esterno del materiale, sono parametri tenuti in considerazione ai fini di un corretto svolgimento delle simulazioni termoigrometriche dinamiche. Le tipologie di elementi da simulare, infatti, sono pareti perimetrali di edifici in muratura, rinforzate da uno strato di matrice esterno, con uno spessore di 60 mm, e da uno strato interno di matrice pari a 40mm. Per una completa comprensione, si rimanda al capitolo delle simulazioni termodinamiche (2.1.1).

2. Sperimentazioni: metodologia e analisi dei risultati

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

- Valutazione delle proprietà termoigrometriche mediante simulazioni dinamiche per la riqualificazione di edifici esistenti in muratura, in accordo alle UNI EN 15026:2023[72] e UNI CEN ISO/TR 52016-2:2018 [73].
- Determinazione della resistenza a flessione e a compressione delle undici matrici, secondo quanto specificato dalla normativa europea UNI EN 1015- 11 [61].
- Prove di trazione diretta unidirezionale su rete in fibra di basalto, con riferimento alla normativa ASTM D3039/D3039M – 17 [74].
- Prove di trazione diretta unidirezionale sui compositi FRLM costituiti dalle tre migliori matrici dal punto di vista meccanico ed energetico e rinforzate con la rete in fibra di basalto, con riferimento alla normativa ASTM D3039/D3039M – 17 [74] (analizzate nella seconda parte).
- Prove per la valutazione del legame di adesione del materiale composito FRLM su superficie in laterizio (analizzate nella seconda parte).
- Prove di compressione diagonale su pannelli in muratura rinforzati dal composito FRLM costituito dalla matrice INT.06 rinforzata dalla rete in fibra di basalto, in accordo alle ASTM E519/E519M – 22 [75] (analizzate nella seconda parte).

2.1. Valutazione delle proprietà termoigrometriche mediante simulazioni dinamiche per la riqualificazione di edifici esistenti in muratura

In questa fase, vengono illustrati i risultati sperimentali ottenuti attraverso strumenti di simulazione energetica a regime dinamico. L'attività di ricerca ha riguardato la valutazione igrotermica di soluzioni tecniche per l'isolamento dell'involucro edilizio, mediante l'applicazione degli undici intonaci termici individuati a conclusione della fase di analisi dei migliori prodotti presenti in commercio.

Le simulazioni termodinamiche sono state condotte confrontando tre differenti soluzioni tecniche di chiusura verticale in muratura, sulle quali si è ipotizzata l'applicazione degli undici termointonaci, simulandone il comportamento igrometrico. Per le simulazioni sono state selezionate tre diverse località: Milano, Firenze e Palermo, scelta motivata dalla volontà di fornire un'analisi completa e rappresentativa delle prestazioni del sistema edilizio in diverse condizioni climatiche, migliorando così l'applicabilità pratica dei risultati ottenuti.

Lo strumento utilizzato per la valutazione igrotermica dell'involucro e il software WUFI® Pro, sviluppato dal Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) e validato per le normative UNI EN 15026:2023[72] e UNI CEN ISO/TR 52016-2:2018 [73].

Il software WUFI® Pro è dedicato al calcolo dinamico termogrometrico delle condense interstiziali e consente di simulare in maniera dinamica il comportamento igrotermico ed energetico di elementi costruttivi in condizioni climatiche reali. Questo tipo di analisi igrotermica dinamica completa è necessaria per una progettazione accurata ed è richiesta nella norma DIN EN 15026:2007-0 [76]. Quando l'applicabilità del metodo di Glaser è discutibile per situazioni speciali (es. tetti verdi, isolamento interno), DIN 4108-3:2018-10 [77] consiglia la valutazione con simulazioni igrotermiche e WUFI® Pro 6.0 è esplicitamente menzionato dallo standard come metodo di scelta; inoltre, dal 2007, la norma europea DIN EN 15026:2007-07 [76] regola le procedure per eseguire simulazioni igrotermiche in tutta Europa.

La banca dati dei materiali multilingue contiene circa 600 materiali da costruzione predefiniti e può anche accettare materiali definiti dall'utente e dispone di dati climatici per circa 149 località internazionali (Europa, Nord America, Sud America, Giappone e Oceania).

Nello specifico, WUFI® Pro esegue calcoli igrotermici unidimensionali sulle sezioni trasversali dei componenti dell'edificio, tenendo conto (ove appropriato) di umidità incorporata, pioggia battente, radiazione solare, e condensa estiva. Si noti che i metodi tradizionali, come il metodo di Glaser, non tengono conto di questi effetti, limitandosi alla sola valutazione degli effetti della condensa invernale.

Il calcolo viene effettuato mediante i seguenti step: 1. simulazione dati climatici; 2. produzione del modello 3D (direttamente in WUFI® Pro 6.0 o mediante importazione); 3. definizione stratigrafie; 4. definizione comfort invernale ed estivo; 5. lancio del calcolo; 6. analisi dei risultati.

Per la visualizzazione dei risultati delle simulazioni effettuate, WUFI ® Pro 6.0 offre tre modi diversi per visualizzare i risultati: 1. Riassunto veloce; 2. Report; 3. Diagrammi. Possono anche essere riguardati le animazioni delle ombre, del comportamento dinamico degli elementi costruttivi, le radiazioni, i flussi di calore, aria e umidità. In alternativa, si possono anche esportare i dati per fogli di calcolo o database (Excel, Origin Pro, ecc.).

2.1.1. Fase di input: definizione dei materiali e delle stratigrafie

Per la scelta delle chiusure verticali in muratura da simulare, si sono presi in esame vari modelli di sistemi costruttivi tipici del patrimonio edilizio italiano esistente fino al 1946. Questo limite dipende dalle valutazioni fatte analizzando i dati del quindicesimo censimento Istat della popolazione e delle abitazioni del 2011, secondo cui rileva che un quarto dell'intero patrimonio edilizio italiano è costituito da edifici costruiti prima del 1946 (Fig. 2.1). Il grafico di Fig. 2.2 mostra la straordinaria rilevanza delle strutture in muratura (circa 5,3 milioni di edifici) rispetto al totale del patrimonio edilizio esistente.

A partire dall'abaco fornito dalla UNI/TR 11552 e UNI/TS 11300, sono state individuati i tipi di chiusura verticale in muratura e i relativi spessori, tenendo conto dei dati dell'ultimo censimento e la frequenza con cui le tipologie costruttive si inseriscono nel panorama edilizio esistente.

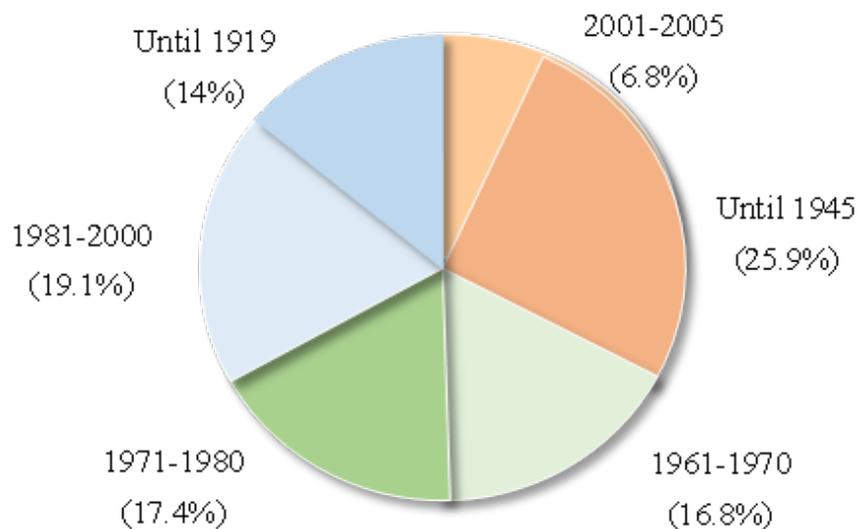


Fig. 2.1 Patrimonio edilizio italiano: epoca di costruzione. Elaborazione Ance sui dati del Censimento Istat del 2011.

I tipi di muratura scelti sono quelli che ricorrono con maggiore frequenza nel panorama edilizio italiano, in relazione anche alle località da analizzare. In particolare, la muratura in mattoni pieni a tre teste (

Fig. 2.3), la muratura in pietra (Fig. 2.4) e la muratura a sacco con riempimento debolmente legato (Fig. 2.5). Di seguito, si riporta una descrizione dei parametri caratteristici UNI/TR 11552:2014 [78] delle soluzioni scelte.

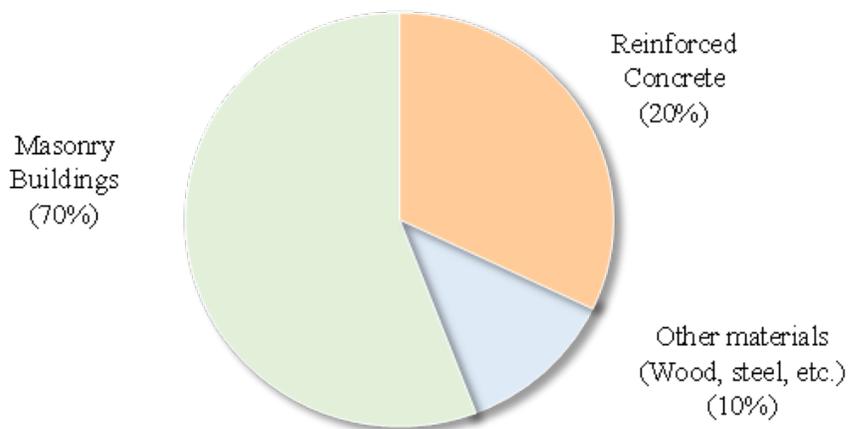


Fig. 2.2 Patrimonio edilizio italiano: tipologia costruttiva. Elaborazione Ance sui dati del Censimento Istat del 2011.

La muratura a sacco con riempimento debolmente legato e costituita da tre strati: mattoni pieni, riempimento debolmente legato e mattoni forati. Per quanto riguarda le proprietà del mattone pieno, si utilizzano (come nel caso di M1) i valori presenti nel database di WUFI® Pro. Le proprietà degli altri due componenti di M3 non compaiono nel database di WUFI® Pro e per questo motivo si sono inseriti manualmente.

M1: Muratura in mattoni pieni a tre teste; spessore= 380 mm

Proprietà

- Densità apparente: 1800 [kg/m³]
- Porosità: 0.41 [m³/m³]
- Capacità termica specifica: 1000 [J/kgK]
- Conduttività termica: 0.720 [W/mK]
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: 5/10 [-]

Le proprietà della muratura di mattoni pieni a tre teste e presente nel database di WUFI® Pro. Per tale motivo, in questo caso i valori non si sono inseriti manualmente, ma si sono utilizzati quelli del database.

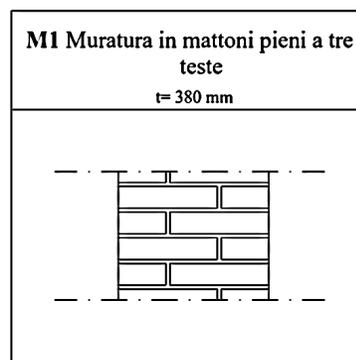


Fig. 2.3 Schema di muratura in mattoni pieni a tre teste; spessore= 380 mm.

M2: Muratura in pietra; spessore= 500 mm

Proprietà

- Densità apparente: 2500 [kg/m³]
- Porosità: 0.13 [m³/m³]
- Capacità termica specifica: 1000 [J/kgK]
- Conduttività termica: 2.40 [W/mK]
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: 140 [-]

Le proprietà della muratura in pietra non compaiono nel database di WUFI® Pro. Per tale motivo, in questo caso i valori si sono inseriti manualmente.

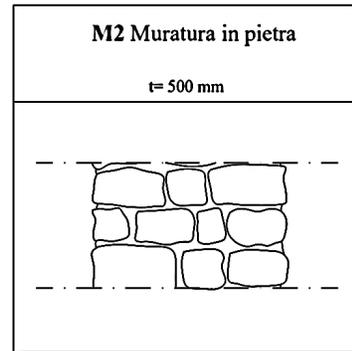


Fig. 2.4 Schema di muratura in pietra; spessore= 500 mm.

M3: Muratura a sacco con riempimento debolmente legato; spessore= 480 mm

Proprietà

(dall'esterno verso l'interno)

Mattoni pieni cotti estrusi; spessore= 250 mm

- Densità apparente: 2500 [kg/m³]
- Porosità: 0.13 [m³/m³]
- Capacità termica specifica: 1000 [J/kgK]
- Conduttività termica: 2.40 [W/mK]
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: 140 [-]

Riempimento debolmente legato; spessore 150 mm

- Densità apparente: 2500 [kg/m³]
- Porosità: 0.13 [m³/m³]
- Capacità termica specifica: 1000 [J/kgK]
- Conduttività termica: 2.40 [W/mK]
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: 140 [-]

Mattone forato; spessore= 80 mm

- Densità apparente: 2500 [kg/m³]
- Porosità: 0.13 [m³/m³]
- Capacità termica specifica: 1000 [J/kgK]
- Conduttività termica: 2.40 [W/mK]
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore: 140 [-]

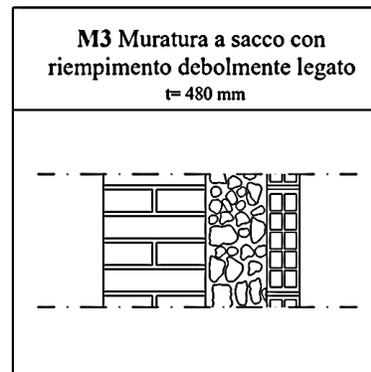


Fig. 2.5 Schema di muratura a sacco con riempimento debolmente legato; spessore= 480 mm.

Su ogni chiusura verticale saranno applicate gli undici intonaci termici sia all'esterno (con uno spessore di 60 mm) sia all'interno (con uno spessore di 40 mm) che ne miglioreranno l'inerzia e la trasmittanza termica, senza andare a gravare sulla struttura portante.

Per la scelta di tali matrici, è stata svolta un'accurata ricerca degli intonaci termici presenti sul mercato nazionale e internazionale.

Ogni matrice è composta da calce idraulica NHL e da materiali naturali ed è caratterizzata da un valore di conduttività termica $\lambda \leq 0,077$ [W/mK].

Di seguito si riporta l'elenco delle undici matrici mostratesi migliori dal punto di vista meccanico ed energetico, con una breve descrizione del prodotto la lista delle proprietà termo-fisiche richieste da WUFI® Pro, in modo da aggiungere i nuovi materiali nel database presente nel software.

- **INT. 01:** Intonaco termico, macro poroso ad elevato isolamento termico ed acustico, a base di calce idraulica naturale NHL 3,5 e aggregati naturali a basso impatto ambientale. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente [kg/m³] = 400
- Porosità [m³/m³] = 0.50
- Capacità termica specifica [J/kgK] = 1000
- Conduttività termica [W/mK] = 0.077
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore [-] = 9.0

- **INT. 02:** Termintonaco traspirante naturale eco-compatibile, a base di pura calce idraulica NHL 3,5, vetro espanso riciclato e inerti naturali per isolamenti termici di murature (laterizio superficie scabra, blocchi in calcestruzzo,). Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente [kg/m³] = 380
- Porosità [m³/m³] = 0.50
- Capacità termica specifica [J/kgK] = 1000
- Conduttività termica [W/mK] = 0.075
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore [-] = 6.0

- **INT. 03:** Intonaco premiscelato esclusivamente naturale costituito da calce idraulica naturale NHL 5 e sughero in granuli e che rende il prodotto

termoisolante, fonoassorbente, traspirante, deumidificante e antigelivo. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 395$
 - Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
 - Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
 - Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.046$
 - Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 5.0$
- **INT. 04:** Intonaco premiscelato termoacustico ed ignifugo a base di calce naturale, gesso ed inerti naturali leggeri che conferiscono al prodotto elevatissime caratteristiche di adesione e lavorabilità. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 358$
 - Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
 - Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
 - Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.086$
 - Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 14.0$
- **INT. 05:** Bio-intonaco eco-compatibile, idrofugo, a base di sughero e calce idraulica naturale NHL 3.5, riciclabile come inerte a fine vita. Ad elevata durabilità e traspirabilità. Non forma barriere al vapore e non contiene solventi. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 365$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.064$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 5.0$

- **INT. 06:** Intonaco ad elevato potere termoisolante e alta traspirabilità, composto da pura calce idraulica naturale NHL 3,5, inerti calcarei e inerti naturali leggeri. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 380$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.45$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 940$
- Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.050$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 5.5$

- **INT. 07:** Intonaco termoisolante a base calce idraulica naturale, minerali leggeri e sughero naturale. È caratterizzato da ottime proprietà di traspirabilità ed evaporazione verso l'esterno. Da applicare su chiusure verticali interne o esterne.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 400$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.100$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 7.5$

- **INT. 08:** Intonaco minerale naturale fibrorinforzato, a base di calce idraulica naturale 3.5, e inerti leggeri minerali e naturali. È caratterizzato da una bassa conducibilità termica, adatto per il risanamento e l'isolamento termico di murature perimetrali. Ad uso interno ed esterno.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 390$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conduttività termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.076$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 5.0$

- **INT. 09:** Intonaco termoisolante a base di calce idraulica naturale, sabbia calcarea e inerti leggeri a base naturale. È caratterizzato da una bassa conducibilità termica e da un'ottima lavorabilità. Ad uso interno ed esterno.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 400$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conducibilità termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.080$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 8.5$

- **INT. 10:** Intonaco termico, a base di calce idraulica naturale e pomice, costituito da materie prime di origine naturale. Risulta consigliato nel recupero di murature storiche. Indicato per uso interno ed esterno.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 390$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conducibilità termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.100$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 5.0$

- **INT. 11:** Intonaco ecologico, biocompatibile, deumidificante e coibente, è totalmente privo di cemento. A base di calce idraulica naturale pura NHL 5 e sabbie pure minerali. Per esterni ed interni.

Proprietà:

- Densità apparente $[\text{kg}/\text{m}^3] = 348$
- Porosità $[\text{m}^3/\text{m}^3] = 0.50$
- Capacità termica specifica $[\text{J}/\text{kgK}] = 1000$
- Conducibilità termica $[\text{W}/\text{mK}] = 0.057$
- Fattore di resistenza alla diffusione di vapore $[-] = 6.0$

Una volta definite le soluzioni tecniche, i materiali e le stratigrafie da analizzare, è necessario inserire le informazioni in WUFI ® Pro in modo da avviare la simulazione.

Per impostare la stratigrafia, si inizia dall'esterno (sinistra) verso l'interno (destra) e si attribuisce a ogni strato lo spessore (espresso in metri) del materiale corrispondente.

In Fig. 2.6 è riportata, a titolo di esempio, la stratigrafia della parete in muratura in mattoni pieni a tre teste (spessore= 380 mm) con l'applicazione dell'intonaco termico INT.06 sia all'esterno (spessore= 60 mm) sia all'interno (40 mm).

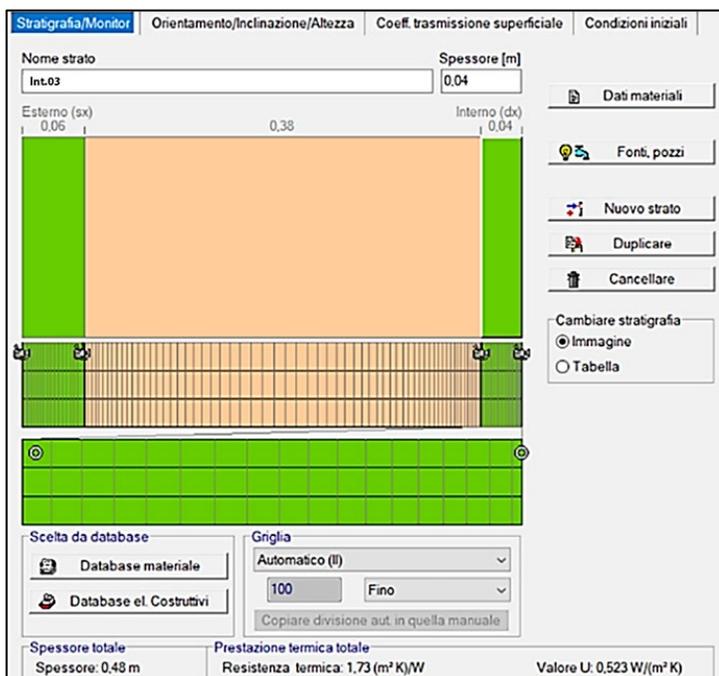


Fig. 2.6 Sezione Stratigrafia/Monitor in WUFI ® Pro 6.0: parete in muratura in mattoni pieni a tre teste con applicazione di INT.06.

È possibile impostare una griglia numerica (in questo caso si è mantenuta la griglia standard) e delle posizioni di controllo nei punti di maggiore interesse, che nel nostro caso sono la superficie esterna, il lato freddo dell'isolante, il lato calco dell'isolante e la superficie interna (Fig. 2.6).

WUFI ® Pro 6.0 contiene un database con i file climatici di svariate località. Per ogni simulazione sono state selezionate tre zone climatiche differenti. Le città prese in esame sono Palermo, Firenze e Milano.

Per la scelta dell'orientamento, si è preferito quello più sfavorevole in base alla direzione prevalente del vento (lato più esposto alla pioggia battente) che si determina con il grafico a rosa dei venti presente nella sezione "Clima | Esterno(sx) | Analisi climatica" di WUFI ® Pro 6.0.

Nel caso di Firenze, ad esempio, il lato più sfavorevole è quello a Ovest (Fig. 2.7), nel caso di Palermo e di Milano, invece, l'orientamento più sfavorevole è il lato nord.

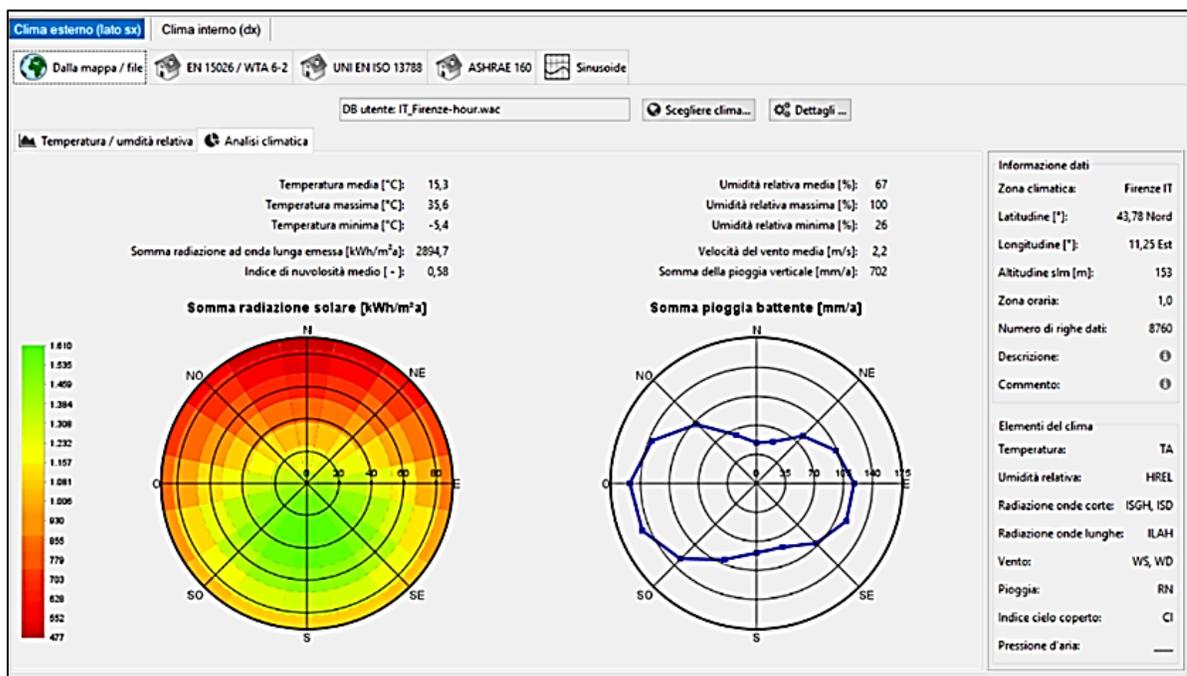


Fig. 2.7 Sezione "Clima | Esterno(sx) | Analisi climatica" in WUFI ® Pro 6.0 per la città di Firenze.

Nel caso di Firenze, ad esempio, il lato più sfavorevole è quello a Ovest (Fig. 2.7), nel caso di Palermo e di Milano, invece, l'orientamento più sfavorevole è il lato nord. Dopo aver impostato l'orientamento della parete, bisogna impostare l'inclinazione, che varia in funzione del tipo di chiusura analizzata (orizzontale, verticale o inclinata). Nel nostro caso si analizzano soltanto chiusure verticali e quindi l'inclinazione è pari a 90 ° (Fig. 2.8).

Poiché si considerano edifici isolati, l'altezza dell'edificio sarà pari a 10 m (altezza tipica dell'edilizia italiana). In base all'altezza scelta, il software applica automaticamente due coefficienti di pioggia diretta R1 e R2, che per h= 10 m] valgono rispettivamente 0 e 0.07 (Fig. 2.8).

I "coefficienti di trasmissione superficiale" (evidenziati in Fig. 2.9) definiscono il modo in cui la chiusura verticale interagisce con le condizioni al contorno e con la parete stessa.

Nel caso in esame, sono stati impostati i seguenti parametri:

1. La resistenza termica [m²K/W] della superficie esterna (sinistra) e della superficie interna (destra), pari rispettivamente a 0.04 m²K/W e 0.13 m²K/W, definiti secondo la norma UNI EN ISO 6946:2018 [79].

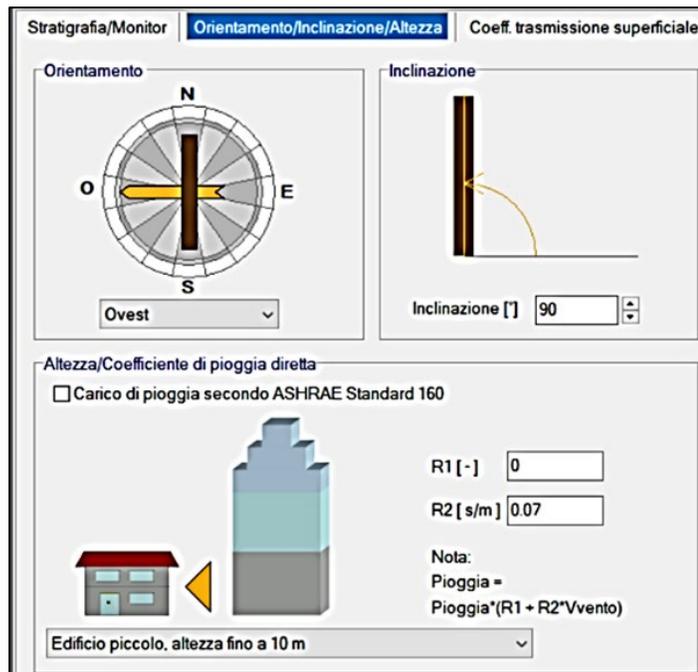


Fig. 2.8 Sezione "Orientamento/Inclinazione/Altezza" in WUFI® Pro 6.0.

2. Il coefficiente di assorbimento a onde corte, che determina la radiazione solare incidente assorbita dalla parete e il cui valore cambia a seconda del colore della superficie. Nel caso in esame si assume pari a 0.4, valore che indica "intonaco, chiaro normale".

3. La riflessione a onde corte del terreno, il cui valore cambia in funzione del materiale di cui è composto il suolo. Nelle simulazioni effettuate si utilizza 0.2, valore equivalente al materiale calcestruzzo.

4. Il coefficiente di assorbimento pioggia, che serve a ridurre la quantità di pioggia che colpisce la superficie esposta, perché parte dell'acqua rimbalza sulla chiusura e non è direttamente coinvolta nel fenomeno di capillarità. Nella sezione delle "condizioni iniziali" si definisce l'umidità e la temperatura iniziale della soluzione costruttiva da analizzare. Per la soluzione tecnica adottata si è considerata un'umidità pari all'80% UR e una temperatura costante per tutte le chiusure verticali pari a 20 °C (Fig. 2.10).

Stratigrafia/Monitor | Orientamento/Inclinazione/Altezza | **Coeff. trasmissione superficiale** | Condizioni iniziali

Superficie esterna (sx)

Resistenza termica [(m² K)/W] **0.04** Definito da utente

comprende la parte della radiazione ad onde lunghe [W/(m² K)] 6.5

Correlato al vento

Valore-Sd [m] ---- Senza pittura/vernice

Nota: Queste impostazioni non influenzano l'assorbimento della

Coefficiente di assorbimento onde corte [-] 0.4 Intonaco, chiaro normale

Coefficiente di emissione onde lunghe [-] ----

Fattori di riduzione per ombreggiamenti:

per l'assorbanza [-] ---- Nessun ombreggiamento

per l'emissività [-] ----

Bilancio radiativo esplicito Nota: questa opzione tiene conto del raffreddamento radiativo dell'emissione in onde lunghe. Casi particolari potrebbero richiedere dati della radiazione terrestre abbastanza accurati.

Riflessione a onde corte del terreno [-] **0.2** Valore standard

Coefficiente di assorbimento pioggia [-] **0.7** In funzione dell'inclinazione dell'elemento

Superficie interna (dx)

Resistenza termica [(m² K)/W] **0.13** (Definito da utente)

Valore-Sd [m] ---- Senza pittura/vernice

Fig. 2.9 Sezione "Coefficienti trasmissione superficiale" in WUFI ® Pro 6.0.

Stratigrafia/Monitor | Orientamento/Inclinazione/Altezza | Coeff. trasmissione superficiale | **Condizioni iniziali**

Umidità iniziale dell'elemento costruttivo

Costante su tutto l'elemento costruttivo

Nei singoli strati

Importare da file

Temp. iniziale nell'elemento costr.

Costante su tutto l'elemento costruttivo

Importare da file

Umidità relativa iniziale [-] **0.8**

Temp. iniziale nell'elemento costr. [°C] **20**

Umidità iniziale nei singoli strati

Nr.	Materiale/strato	Spessore [m]	Umidità-contenuto [kg/m³]
1	naturcap	0,06	37,0
2	Mattoni pieni cotti, estrusi	0,38	9,2
3	naturcap	0,04	37,0

Fig. 2.10 Sezione "Condizioni iniziali" in WUFI ® Pro 6.0.

Con lo scopo di analizzare la chiusura verticale fino alla fase del raggiungimento dell'equilibrio igrotermico con le condizioni al contorno, tutte le simulazioni hanno una

durata pari a 10 anni e iniziano il primo ottobre e non il primo gennaio, in modo da coprire tutta la stagione fredda (Fig. 2.11).

Durata di calcolo / profili | Numerico

Inizio_Fine / Profili

Calcolo	Profili	Data	Ora
Inizio	Profilo 1	01/10/2021	00:00:00
Fine	Profilo 2	01/10/2031	00:00:00
		31/03/2021	00:00:00

Passo temporale [h]

Nuovo
Eliminare
Copiare
Inserire

Fig. 2.11 Sezione "Tempo | Profilo" in WUFI ® Pro 6.0.

Durata di calcolo / profili	Numerico
Modalità di calcolo	
<input checked="" type="checkbox"/>	Calcolo del trasporto termico
<input checked="" type="checkbox"/>	Calcolo del trasporto d'umidità
Proprietà igrotermiche specifiche	
<input type="checkbox"/>	Senza trasporto capillare
<input type="checkbox"/>	Senza calore latente fase gas-liquido
<input type="checkbox"/>	Nel calore latente di evaporazione si esclude la dipendenza dalla temper
<input type="checkbox"/>	Senza calore latente fase liquido-solido
<input type="checkbox"/>	Senza dipendenza della conducibilità termica da temperatura e umidità
Parametro numerico	
<input checked="" type="checkbox"/>	Precisione aumentata
<input checked="" type="checkbox"/>	Miglioramento convergenza
Gestione passo temporale addattivo	
<input type="checkbox"/>	Attivare
Geometria	
<input checked="" type="radio"/>	Cartesiano
<input type="radio"/>	Simmetria radiale

Fig. 2.12 Sezione "Numerico" in WUFI ® Pro 6.0.

La sezione "Numerico" (Fig. 2.12). è indispensabile per il controllo del calcolo; nelle simulazioni effettuate si lasciano le impostazioni standard del software, senza modificare alcun parametro.

I dati climatici fanno riferimento a un anno tipo, presente sulle ascisse dei tre grafici di Fig. 2.13, che riportano sulle ordinate, rispettivamente, i valori di temperatura [°C] (primo grafico dall'alto), i valori di umidità relativa [%] (secondo grafico dall'alto) e i valori di irraggiamento globale, radiazione solare diffusa, ecc. (ultimo grafico dall'alto). La schermata di Fig. 2.13 ci fornisce, inoltre, informazioni relative alla posizione geografica della località scelta.

Per selezionare la località per le simulazioni, bisogna scegliere il clima esterno "Dalla mappa | file". Nel caso di Firenze (località non presente nel database di WUFI ® Pro 6.0), è stato scaricato il file climatico italiano direttamente dal sito wufi.it e copiato nella cartella "Climate" della directory di WUFI ® Pro 6.0, aggiungendo il file "IT_Firenze-hour.wac" nella sezione "Scegliere il file utente".

Le simulazioni dinamiche necessitano anche di dati specifici per l'ambiente interno, tra cui la temperatura dell'aria e l'umidità relativa. In assenza di tali valori, la norma UNI EN ISO 13788:2013 [80] permette di determinare le condizioni al contorno interne. Il grafico in Fig. 2.14 descrive l'andamento della temperatura [°C] (in rosso) e l'andamento dell'umidità relativa [%] (in verde) in funzione del tempo.

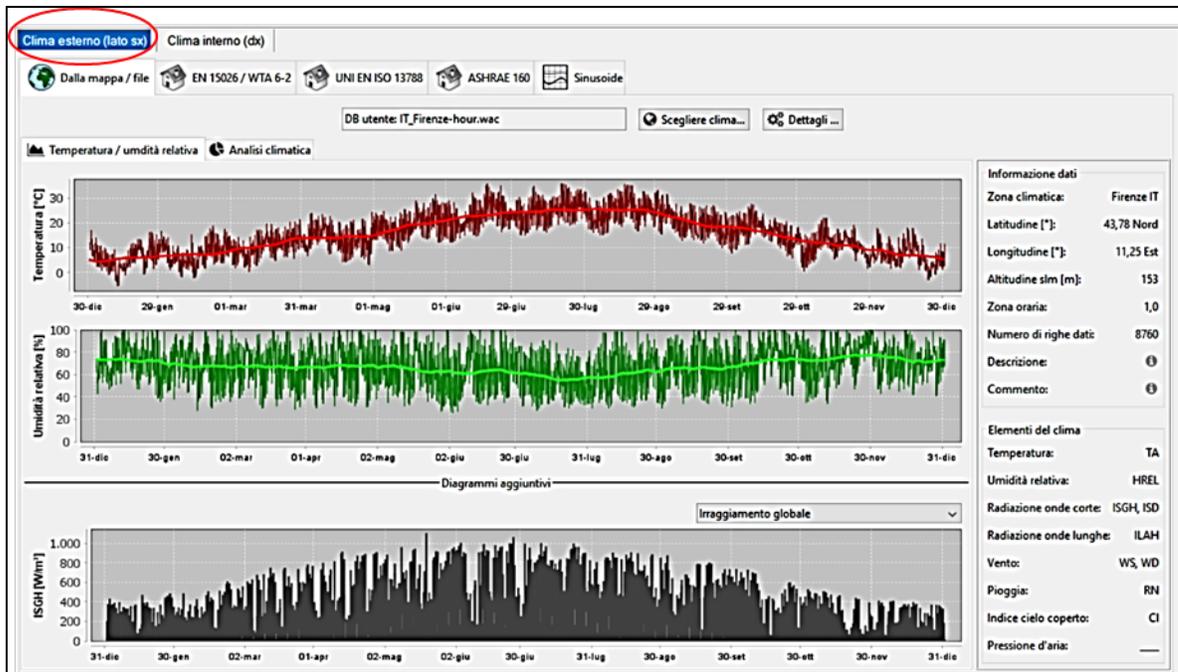


Fig. 2.13 Sezione Temperatura/ umidita relativa. Clima esterno (sinistra) in WUFI ® Pro6.0.

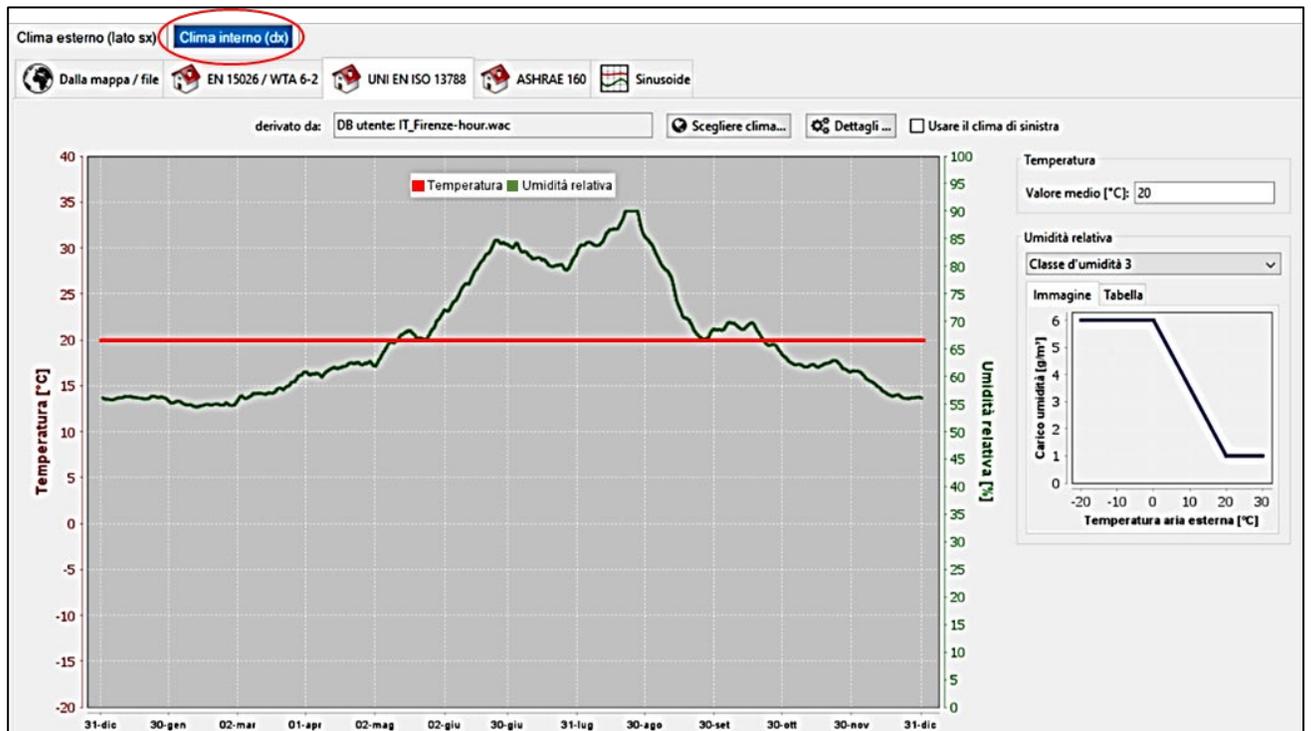


Fig. 2.14 Sezione Temperatura/ umidita relativa. Clima interno (destra) in WUFI ® Pro

2.1.2. Fase di output e analisi dei risultati

In questo paragrafo vengono presentati i risultati delle simulazioni igrotermiche dinamiche effettuate con WUFI ® Pro 6.0. Se i dati di input sono completi e corretti, il software risolve simultaneamente e in maniera iterativa le equazioni di trasporto e accumulo di umidità, come descritto nel diagramma di flusso di Fig. 2.15 [81].

A titolo di esempio, si riportano e si commentano i risultati ottenuti dalla simulazione igrotermica dinamica di una chiusura verticale costituita da una parete in muratura in mattoni pieni a tre teste rinforzata con INT.06 (come si riporta nello schema di Fig. 2.15) presso la città di Firenze.

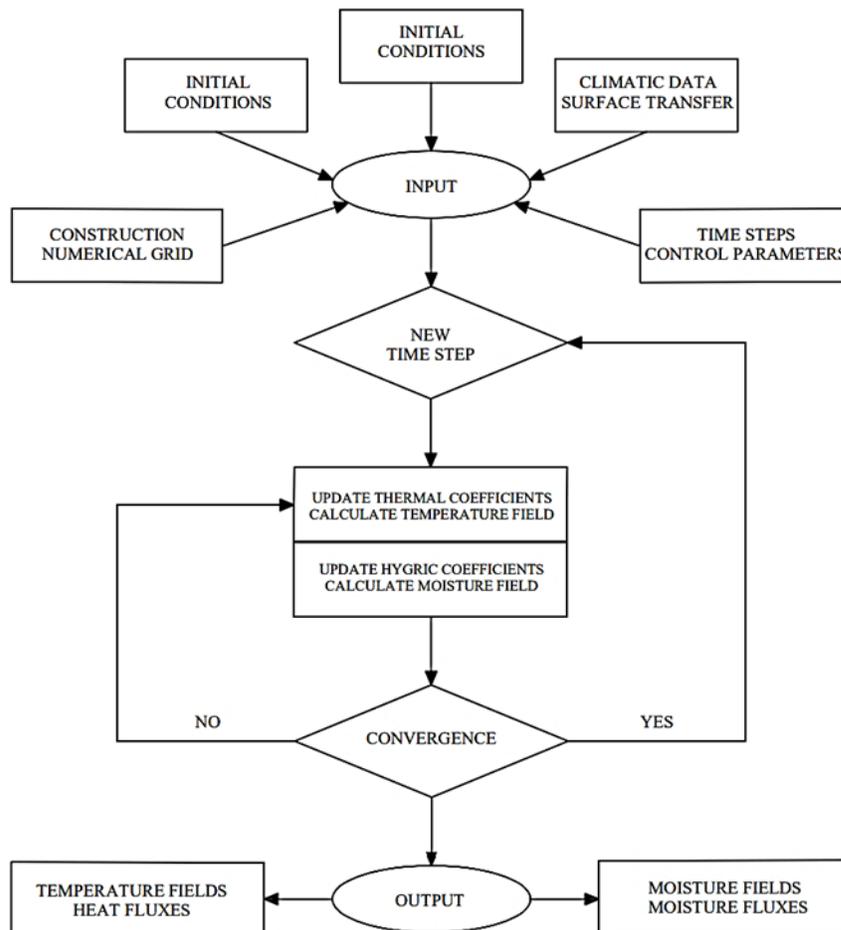


Fig. 2.15 Diagramma di flusso riferito al procedimento di calcolo con WUFI ® Pro 6.0.

Al termine di ogni simulazione, si apre automaticamente una finestra (Fig. 2.16) in cui sono compresi il numero degli errori di convergenza (differenza tra la soluzione numerica e la soluzione esatta) e la quantificazione dei due bilanci Bilancio 1 e Bilancio 2.

Più che controllare il numero di errori, è necessario il controllo dei bilanci; Bilancio 1 rappresenta la variazione del contenuto d'acqua durante il periodo di calcolo (negativo= asciugamento; positivo= accumulo di umidità) e Bilancio 2 rappresenta la somma dei flussi di umidità attraverso le superfici della chiusura (quantità d'acqua che entra o esce dal componente). Idealmente, questi due numeri devono essere identici, in quanto qualsiasi modifica del contenuto d'acqua deve derivare dall'umidità trasportata attraverso la chiusura dall'interno verso l'esterno. Se il controllo numerico ha dato esito positivo, si può procedere all'analisi delle proprietà igrotermiche del componente.

Per la soluzione tecnologica analizzata (muratura in mattoni pieni a tre teste rinforzata con Int.6 a Firenze), la schermata di Fig. 2.16 informa che la soluzione adottata non presenta né differenza di bilancio, né errori di convergenza.

Stato del calcolo				
Data/Ora del calcolo	31/03/2021 15:31:23			
Tempo esecuzione calcolo	9 min.32 sec			
Inizio / Fine del calcolo	01/10/2021 / 01/10/2031			
Quantità errori convergenza	0			
Controllo qualità numerica				
Integrale dei flussi, lato sx (kl,dl)	[kg/m ²]	133.4 -138.96		
Integrale dei flussi, lato dx (kr,dr)	[kg/m ²]	-0.51 -2.75		
Bilancio 1	[kg/m ²]	-2.31		
Bilancio 2	[kg/m ²]	-2.31		
Contenuto d'umidità [kg/m ²]				
	Inizio	Fine	Min.	Max.
Contenuto d'umidità totale	7.2	4.88	4.42	9.47

Fig. 2.16 Sezione "Stato del calcolo" in WUFI ® Pro 6.0.

Come anticipato in precedenza, questa sezione si dedica all'analisi specifica dei risultati della simulazione igrotermica dinamica con WUFI ® Pro 6.0 relativa a una chiusura verticale specifica: una parete in muratura in mattoni pieni a tre teste, rinforzata con INT.06. La parete in muratura è stata sottoposta a diverse condizioni ambientali, con attenzione agli effetti della variabilità climatica della città di Firenze.

La scelta di focalizzare l'analisi e la rappresentazione dei risultati sulla muratura a tre teste a Firenze è stata guidata dalla sua rilevanza e frequenza nella realtà edilizia locale. La muratura a tre teste è una tipologia ampiamente diffusa nell'architettura fiorentina, caratterizzata da una maggiore complessità strutturale che merita un'attenzione particolare nelle valutazioni igrotermiche.

La decisione di adottare l'intonaco termico INT.06 è stata orientata da diverse considerazioni. Inizialmente, la selezione di INT.06 è scaturita dagli ottimi risultati emersi dai test di flessione e compressione [61], attestando la sua affidabilità strutturale.

Va sottolineato che, per le simulazioni WUFI ® Pro 6.0, i dati di input richiesti riguardano la conducibilità termica del materiale. La scelta di INT.06, basata su dati di scheda tecnica affidabili, fornisce una base solida per le simulazioni, consentendo una valutazione accurata delle prestazioni termiche dell'intero sistema a muratura a tre teste.

In sintesi, la scelta di concentrarsi sulla muratura a tre teste a Firenze e sull'utilizzo di INT.06 è stata guidata dalla volontà di rendere tale analisi direttamente applicabile al contesto locale prevalente, affidandoci a un materiale con comprovate proprietà meccaniche e termiche, come indicato dai test di laboratorio e dalle specifiche del produttore.

Oltre ai grafici standard di contenuto d'acqua, temperatura, umidità relativa, temperatura di rugiada e isoplete, è possibile scegliere quali risultati della simulazione esportare sottoforma di file ASCII (Fig. 2.17). Nel caso in esame, i parametri in fase di output che si è scelto di esportare (per controllare i casi più gravosi di formazione di umidità nella chiusura) sono:

- 1) Flusso termico della superficie interna [W/m^2];
- 2) Temperatura dello strato di intonaco interno [$^{\circ}C$];
- 3) Temperatura della superficie interna [$^{\circ}C$];
- 4) Contenuto di umidità dello strato di intonaco interno [-];
- 5) Umidità relativa della superficie interna [-];
- 6) Contenuto di umidità totale [-].

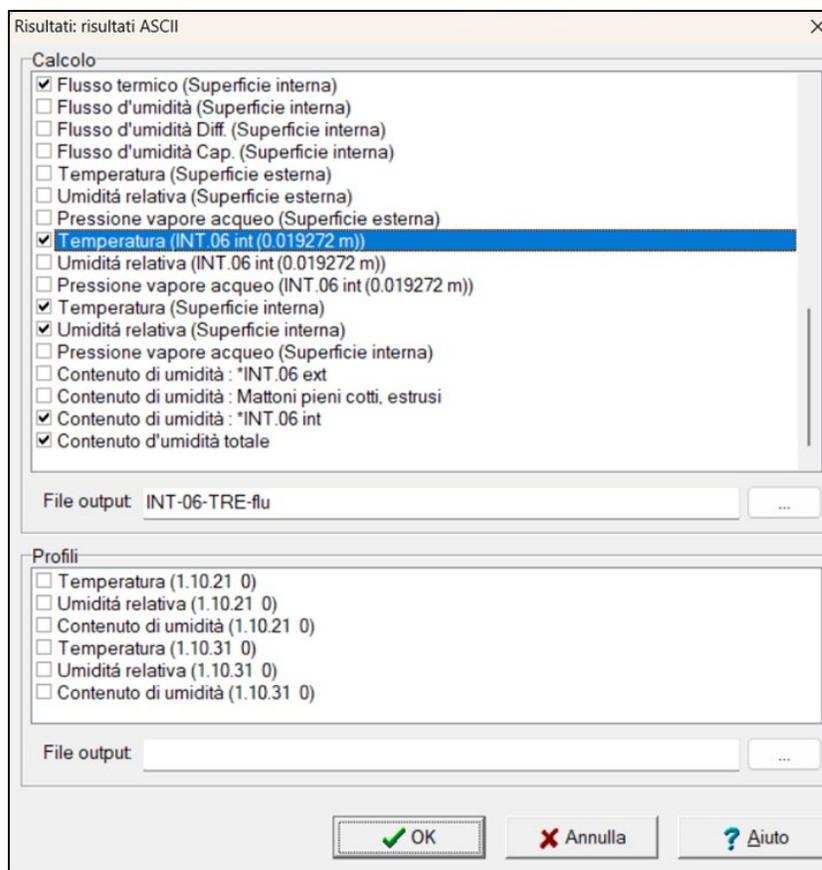


Fig. 2.17 Finestra con i risultati ASCII da esportare.

Poiché tutte le simulazioni hanno durata di 10 anni, ogni file ASCII è caratterizzato da 87600 righe ($24 \text{ ore} * 365 \text{ giorni} * 10 \text{ anni}$) e da due colonne, di cui la prima rappresenta la scala temporale e la seconda la grandezza esportata. Una volta eseguita l'esportazione, i file ASCII sono stati aperti in Excel e Origin Pro, da cui sono stati creati dei grafici a dispersione, ognuno dei quali presenta sulle ordinate le condizioni igrometriche di temperatura, umidità e flusso di calore da analizzare, e sulle ascisse il tempo di simulazione in ore.

2.1.2.1. Flusso termico della superficie interna

Nel contesto di simulazione fornito da WUFI® Pro 6.0, il flusso termico, espresso in termini di W/m^2 , viene calcolato e visualizzato per comprendere come le condizioni termiche evolvono nel tempo e attraverso i componenti costruttivi. Queste informazioni sono cruciali per progettare edifici energeticamente efficienti e confortevoli. Il grafico in

Fig. 2.18 rappresenta il flusso termico sulla superficie interna nel corso di 10 anni, con l'asse delle ascisse che denota il tempo in ore e l'asse delle ordinate che indica il flusso termico in W/m^2 . La scala temporale si estende da 0 a 87.000 ore, coprendo

l'intero periodo di analisi. Osservando il grafico, emergono variazioni periodiche nel flusso termico, evidenziando possibili cicli stagionali o influenze climatiche sul comportamento termico dell'edificio. I picchi di massimo e minimo sono chiaramente identificabili, rappresentando rispettivamente i valori più elevati e più bassi del flusso termico registrati durante l'intero periodo, con oscillazioni stagionali costanti comprese tra gli -8.92 W/m^2 e i 5.8 W/m^2 .

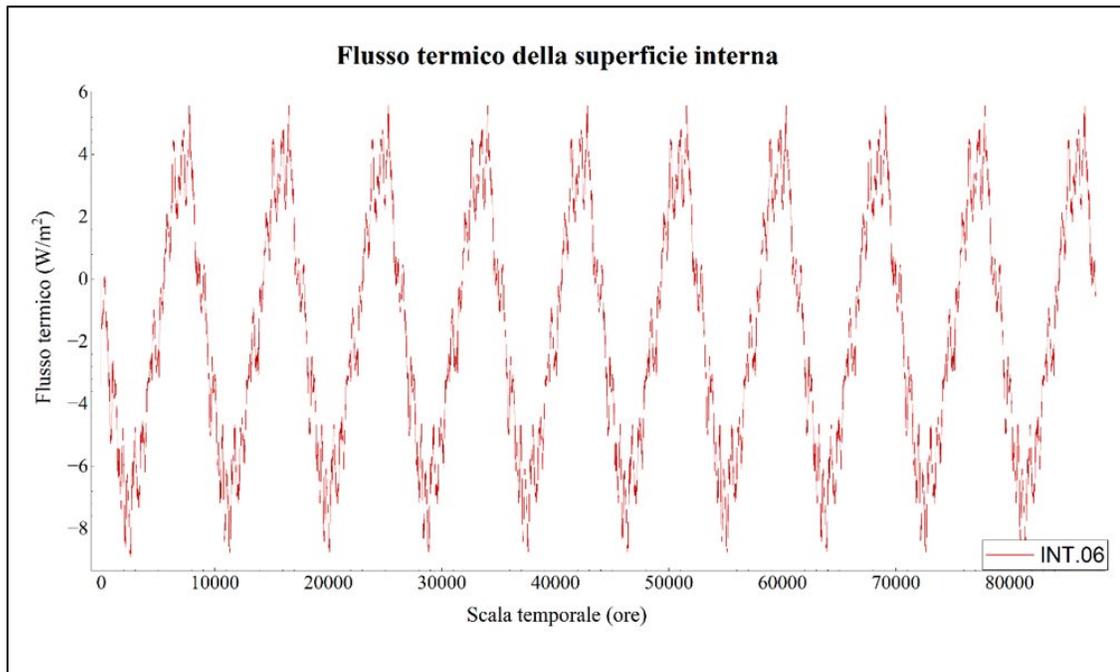


Fig. 2.18 Flusso termico della superficie interna: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.

2.1.2.2. Temperatura dello strato di intonaco interno

La temperatura dello strato di intonaco interno in WUFI® Pro 6.0 rappresenta la temperatura all'interno dello strato di intonaco della superficie interna del componente edilizio simulato nel software. Tale parametro è espresso in gradi Celsius [°C] e fornisce informazioni sul profilo termico interno del materiale dell'intonaco. La variazione di temperatura all'interno dello strato di intonaco può essere influenzata dalle condizioni climatiche esterne, dalla struttura della parete e dalle dinamiche termoigrometriche.

Il grafico in Fig. 2.19 mostra la temperatura dell'intonaco interno misurata in gradi Celsius nel corso di un periodo di dieci anni, espressi in ore. L'andamento del grafico della temperatura dell'intonaco interno nel corso del tempo mostra una variazione ciclica, correlata a fattori esterni come le stagioni o i cambiamenti climatici nel luogo di studio. Durante il periodo considerato di 10 anni, la temperatura dell'intonaco

interno ha registrato un valore minimo di circa 16.25 °C e un valore massimo di circa 21.88 °C. Questi estremi termici forniscono un'indicazione della variazione termica che l'intonaco interno ha sperimentato nel corso del tempo.

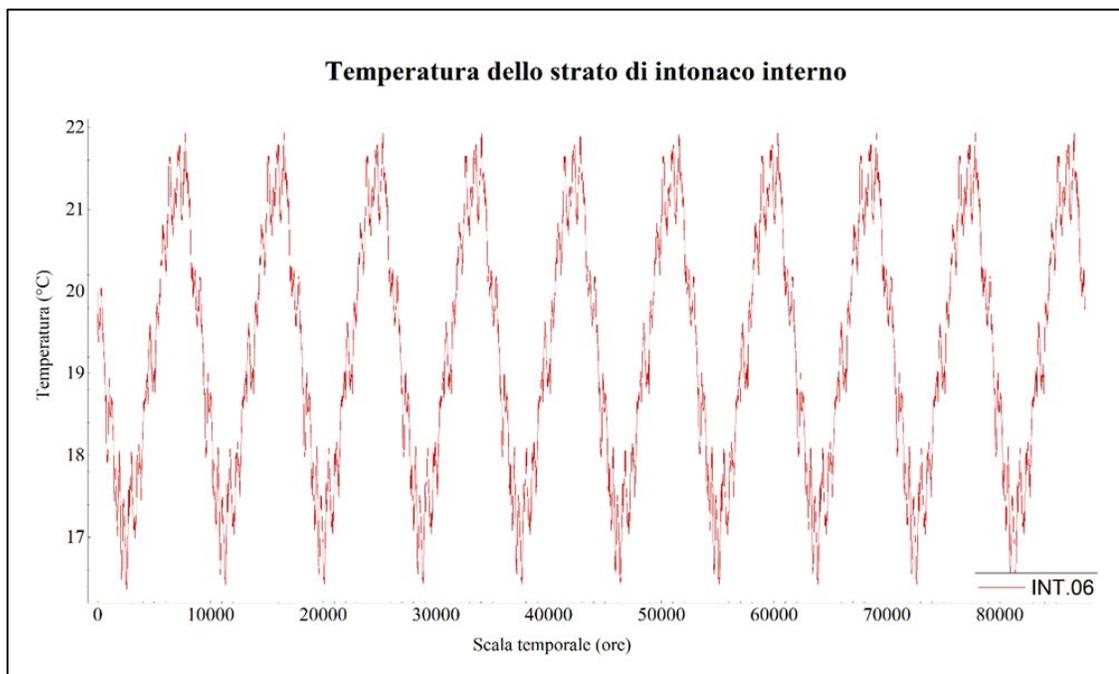


Fig. 2.19 Temperatura dello strato di intonaco interno: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.

2.1.3. Temperatura della superficie interna

La temperatura della superficie interna in WUFI ® Pro 6.0 si riferisce alla temperatura della superficie interna del componente edilizio simulato nel software. È espressa in gradi Celsius [°C] ed è un parametro importante per valutare le condizioni termiche interne e il comfort degli utenti. La temperatura della superficie interna può variare nel tempo in risposta alle condizioni climatiche esterne, al comportamento termico della struttura e all'interazione con sistemi di riscaldamento o raffreddamento interni.

L'andamento complessivo del grafico (Fig. 2.20) è caratterizzato da una salita graduale della temperatura nel corso del tempo, con picchi e cali locali, caratterizzati dalla stessa ampiezza nel tempo.

Nei primi periodi, la temperatura oscilla tra i valori minimi di circa 18.87 °C e i massimi di circa 20.70 °C. Nel corso delle 87,600 ore, si possono osservare fluttuazioni periodiche, ma la temperatura complessiva mostra un aumento graduale. La temperatura media della superficie interna sembra aumentare nel lungo periodo considerato, nonostante si verificano fluttuazioni più brevi o locali.

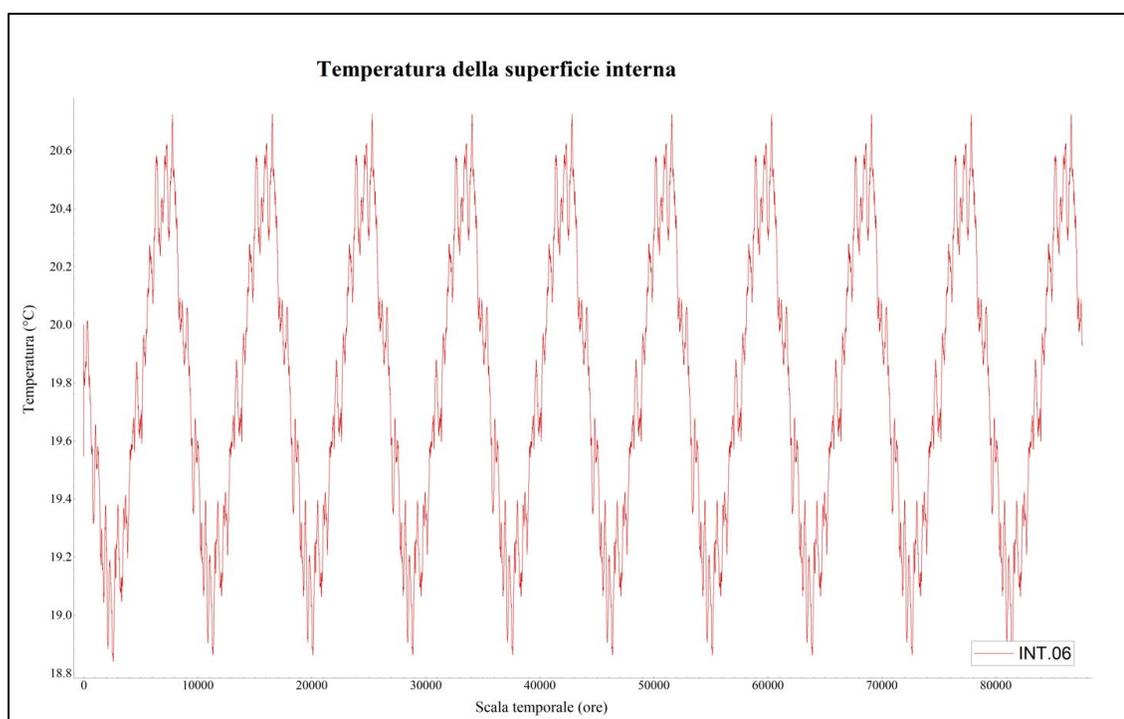


Fig. 2.20 Temperatura della superficie interna: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.

2.1.3.1. Contenuto di umidità dello strato di intonaco interno

Il "contenuto di umidità nello strato di intonaco interno" in WUFI ® Pro 6.0 indica la quantità di acqua presente all'interno dello strato di intonaco della superficie interna del componente edilizio simulato nel software. Questo parametro, indicato in percentuale [-], fornisce informazioni sul livello di umidità nella parte interna della struttura, rilevante per valutare il comfort ambientale e la condizione termoigrometrica delle pareti. Il dato può variare nel tempo in risposta a condizioni climatiche esterne e dinamiche termoigrometriche interne.

L'analisi del contenuto umidità nello strato di intonaco interno nel corso di 10 anni rivela variazioni significative. Nel grafico in Fig. 2.21, l'asse delle ascisse rappresenta il tempo in ore, mentre l'asse delle ordinate indica l'umidità in percentuale.

Inizialmente, si osserva che il livello di umidità si attesta a circa il 37%. Successivamente, si verifica una progressiva diminuzione dell'umidità, raggiungendo il valore minimo di circa il 26.14%. Subito dopo, si osserva un repentino aumento dell'umidità, con un picco di circa il 39.63%. Conseguentemente, l'umidità subisce una nuova fase di decremento, toccando un minimo di circa il 26.01% (dopo 70.000 ore).

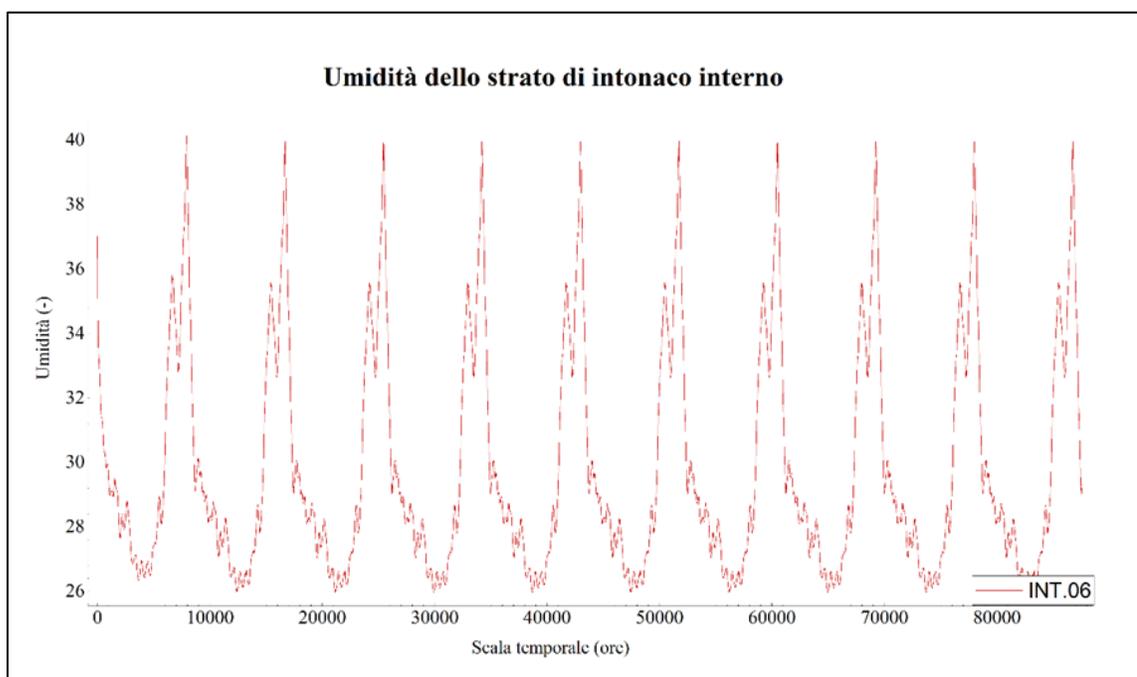


Fig. 2.21 Contenuto di umidità dello strato di intonaco interno: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.

2.1.3.2. Contenuto di umidità della superficie interna

L'analisi dell'umidità relativa della superficie interna è un aspetto importante per valutare le condizioni di comfort e la possibilità di formazione di condensa all'interno

degli edifici. WUFI ® Pro 6.0 tiene conto delle condizioni climatiche esterne, tra cui la temperatura e l'umidità relativa dell'aria. Questi parametri influenzano l'umidità relativa sulla superficie interna. Il software simula il trasporto di umidità attraverso gli elementi costruttivi in risposta alle condizioni ambientali e alle caratteristiche dei materiali. Nel caso in analisi, ciò include la migrazione dell'umidità attraverso pareti.

Il grafico in Fig. 2.22 illustra il contenuto di umidità della superficie interna nel corso di un periodo di dieci anni, espresso in ore. Sulle ascisse è riportato il tempo, mentre sulle ordinate è rappresentato il contenuto di umidità in percentuale.

È importante notare che, nonostante il superamento del limite critico dell'80% secondo la normativa EN 15026:2023 [72], tale condizione è mantenuta per un periodo inferiore a dieci giorni e a temperature superiori a 13 °C, evitando la crescita microbiologica di muffe [82].

Inizialmente, si osserva un'umidità iniziale del 80%, seguita da una leggera diminuzione nelle prime 1000 ore.

Successivamente, si osserva una graduale diminuzione dell'umidità fino a raggiungere circa il 59.91% intorno alle 1100 ore. Da questo punto, si instaura una tendenza altalenante con variazioni sia in aumento che in diminuzione. Dopo tale periodo, si osserva un aumento costante, quando il contenuto di umidità raggiunge l'86.85%.

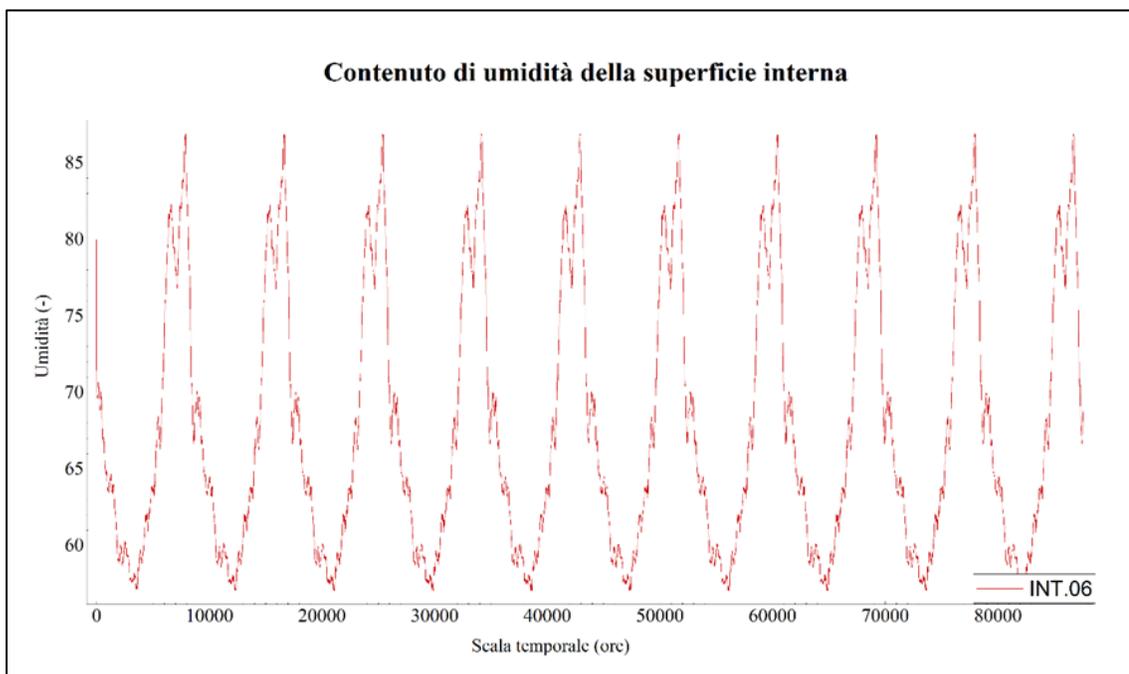


Fig. 2.22 Contenuto di umidità della superficie interna: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.

2.1.3.3. Contenuto di umidità totale

Il contenuto di umidità totale si riferisce alla quantità totale di acqua presente in un materiale o componente durante un determinato periodo di tempo, e viene indicata in percentuale [-]. Questo valore è importante per comprendere come varia l'umidità nel tempo e come può influire sulle prestazioni dell'isolamento o sulla salute complessiva della struttura.

I punti di massimo e di minimo nel grafico in Fig. 2.23 indicano, rispettivamente, i periodi in cui il materiale raggiunge il massimo livello di saturazione d'acqua o periodi in cui l'asciugatura è più pronunciata. Nello specifico, i valori di massimo e minimo contenuto di umidità che ha raggiunto INT.06 a Firenze su una muratura in mattoni a tre teste, e equivalgono, rispettivamente, al 9.52% e al 4.45%.

Il grafico dell'umidità totale rappresentato nel corso di un periodo di 10 anni rivela variazioni significative nel tempo. Emergono fluttuazioni regolari, suggerendo possibili cicli stagionali o influenze ambientali. Diversi picchi e minimi indicano momenti di massima e minima umidità, fornendo un'indicazione della dinamica complessiva.

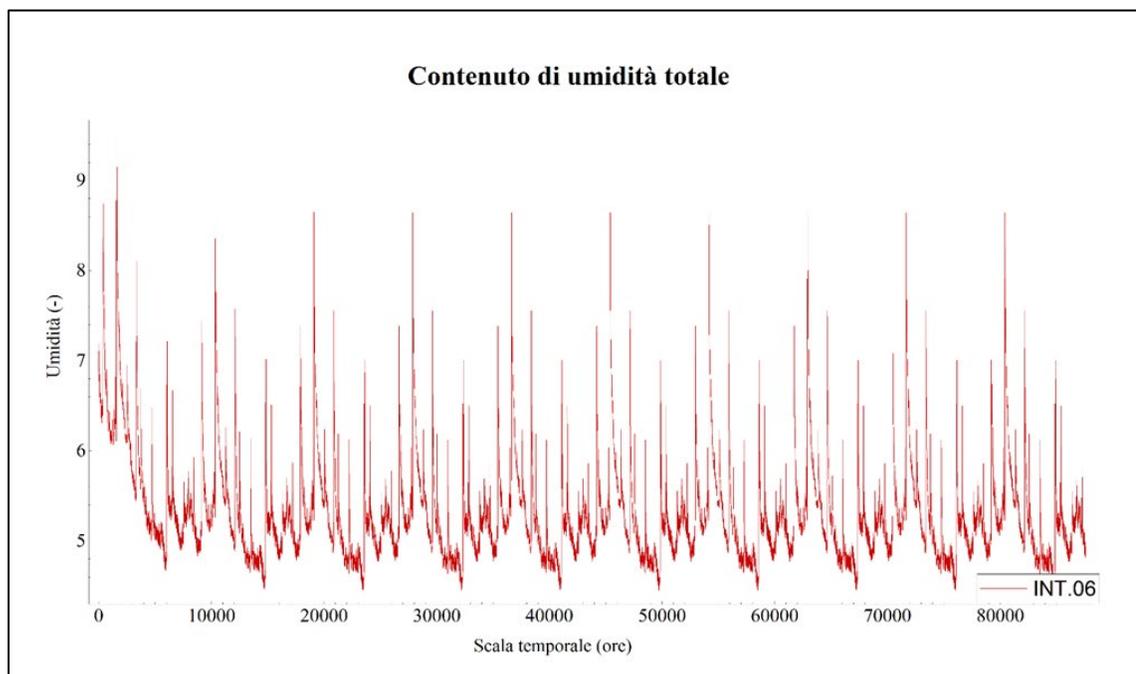


Fig. 2.23 *Contenuto di umidità totale: muratura in pieni a tre teste con applicazione di intonaco termico INT.06 all'interno (40mm) e all'esterno (60 mm) a Firenze.*

2.1.4. Interpretazione dei risultati

Nel paragrafo si presentano i risultati sperimentali ottenuti tramite simulazioni energetiche dinamiche, focalizzandosi sull'analisi igrotermica di soluzioni per l'isolamento dell'involucro edilizio di edifici in muratura esistenti.

L'obiettivo principale di queste analisi è quello di fornire una panoramica generale sulle simulazioni dinamiche di diverse soluzioni tecniche e in diversi contesti ambientali differenti, ai fini di un miglioramento dal punto di vista igrotermico degli edifici esistenti in muratura presenti nel contesto italiano.

Le simulazioni, condotte con il software WUFI Pro ® 6.0, sono state eseguite considerando undici termintonaci applicati su tre diverse soluzioni di chiusura verticale in muratura M1 (

Fig. 2.3), M2 (Fig. 2.4) e M3 (Fig. 2.5) in tre differenti contesti climatici: Milano, Firenze e Palermo. La scelta delle località si basa sull'importanza di comprendere come le prestazioni del sistema edilizio possano variare in risposta a differenti condizioni climatiche. Questo approccio mira a fornire una panoramica completa e rappresentativa delle performance del sistema edilizio, facilitando l'applicazione pratica dei risultati ottenuti.

L'uso di WUFI ® Pro 6.0, validato secondo normative internazionali [72], [76], [77], consente una valutazione dinamica delle condizioni igrotermiche reali, aspetto fondamentale per una progettazione accurata secondo gli standard europei.

Attraverso l'analisi dettagliata di parametri chiave come la conducibilità termica, la permeabilità al vapore, e le risposte igrotermiche nei diversi contesti climatici, questa analisi si propone di fornire insights utili per la selezione ottimale delle soluzioni tecniche.

La scelta di parametri specifici per l'output, come il contenuto di umidità e la temperatura della superficie interna, riflette la volontà di analizzare le condizioni più critiche di formazione di umidità nella chiusura.

In particolare, l'attenzione si concentra sulla muratura a tre teste a Firenze, una scelta guidata dalla sua frequente presenza nell'architettura locale. L'intonaco termico INT.06 è quello risultato migliore dal punto di vista igrotermico, seguito da INT.01 e INT.05, mostrando entrambi un accumulo percentuale di umidità totale (pari al 4.41 %.) nettamente inferiore alle altre soluzioni analizzate, che hanno presentato un accumulo di acqua totale medio pari a più del 4.70%. Inoltre, tutte le analisi riferite al "Contenuto di umidità totale" rivelano variazioni significative nel tempo, con fluttuazioni regolari che suggeriscono possibili cicli stagionali o influenze ambientali.

L'analisi della temperatura della superficie interna non è soltanto un parametro necessario per l'individuazione di possibile formazione di muffa e condensa, ma soprattutto è un ottimo parametro per valutare in comfort interno una volta applicata la matrice all'edificio esistente [83]. Per quanto riguarda l'analisi della temperatura della superficie interna, anche in questo caso INT.06 ha mostrato il miglior

comportamento, seguito da INT.01 e INT.05. Nella stagione fredda, con l'applicazione di INT. 06, INT.01 e INT.05 si mantiene una temperatura interna pari a 19 °C. In estate la temperatura rimane costante con l'applicazione di tutti gli intonaci, raggiungendo picchi di 21°C, collaborando decisamente al raffrescamento dell'ambiente interno.

A questo proposito, nell'ambito della ricerca MIRACLE, in [84] è stato analizzato il comfort indoor (come descritto nelle UNI EN ISO 7730 [85]) mediante simulazioni energetiche in una room virtuale con l'utilizzo del software gratuito open source Energyplus [86]. Nello specifico, l'attività di ricerca studia il comportamento dei due termointonaci INT.01 e INT.06 quando applicati sulle soluzioni tecniche M1, M2 e M3 a Firenze.

Per l'implementazione delle simulazioni energetiche dinamiche, è stata modellata una Test Cell non adiabatica, utilizzata durante il progetto di ricerca "Abitare Mediterraneo" finanziato dalla Regione Toscana nell'ambito POR CREO FESR 2007-2013 e sviluppato dal Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design dell'Università di Firenze.

La Test Cell poggia su una base girevole ed è costituita da una camera di prova (Test Room) e da una Service Room, che permette la raccolta dei dati misurati all'interno in relazione alla temperatura ambiente, all'umidità relativa e al flusso termico che attraversa la camera di prova e il componente da testare, ossia il Test Wall da inserire nella Building Prototypes Location (Fig. 2.24).

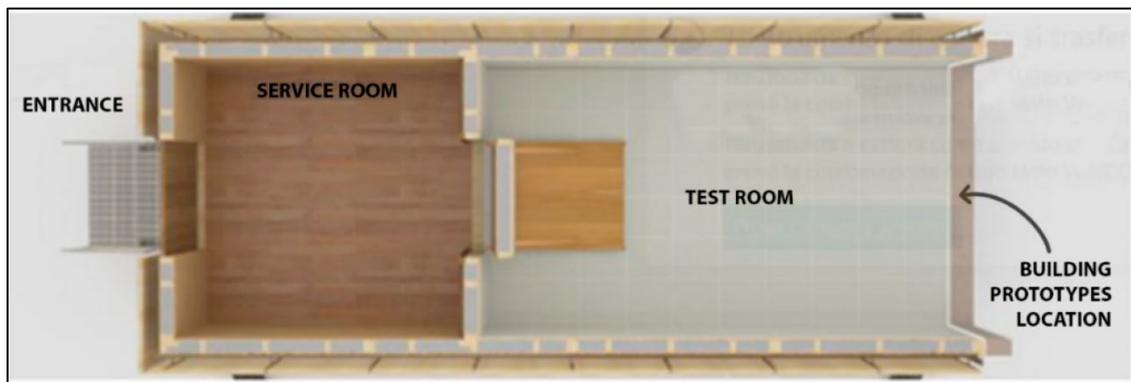


Fig. 2.24 Sezione orizzontale della Test Cell.

Il Test Wall rappresenta le varie tecniche costruttive analizzate, riportate in Tab. 2-1. I risultati sono stati ottenuti confrontando l'applicazione di un intonaco classico a base cementizia, con l'applicazione delle due matrici INT.1 (Case 1) e INT.06 (Case 2) alle tre tipologie di muratura [87].

		Specimen Type	Thermal Transmittance (W/m ² K)	Thickness (mm)
M1	Base case	Traditional plaster	1.340	20 (int) and 20 (ext)
	Case 1	INT.01	0.514	40 (int) and 60 (ext)
	Case 2	INT.06	0.449	40 (int) and 60 (ext)
M2	Base case	Traditional plaster	2.330	20 (int) and 20 (ext)
	Case 1	INT.01	0.640	40 (int) and 60 (ext)
	Case 2	INT.06	0.542	40 (int) and 60 (ext)
M3	Base case	Traditional plaster	1.020	20 (int) and 20 (ext)
	Case 1	INT.01	0.517	40 (int) and 60 (ext)
	Case 2	INT.06	0.449	40 (int) and 60 (ext)

Tab. 2-1 Soluzioni tecniche costruttive analizzate.

Di tutti i modelli implementati, la migliore soluzione in termini di comfort interno, è risultata l'applicazione dei due intonaci di muratura in mattoni a tre teste.

Rispettivamente, INT.01 e INT.06 producono l'effetto benefico di ridurre le dispersioni di calore del 60% e del 70%, aumentando così la capacità isolante del Test Wall.

Gli istogrammi a barre verticali in

Fig. 2.25 e in Fig. 2.26, descrivono il comportamento delle tre tecniche costruttive analizzate in termini di comfort energetico. I grafici mostrano che non ci sono differenze significative tra INT.01 e INT.06. Nella stagione invernale, entrambi riducono le perdite di calore (heat losses) di circa il 70% rispetto al classico intonaco a matrice cementizia, mentre, nella stagione estiva, le heat gains si riducono notevolmente, garantendo un aumento delle prestazioni di circa l'80% [87].

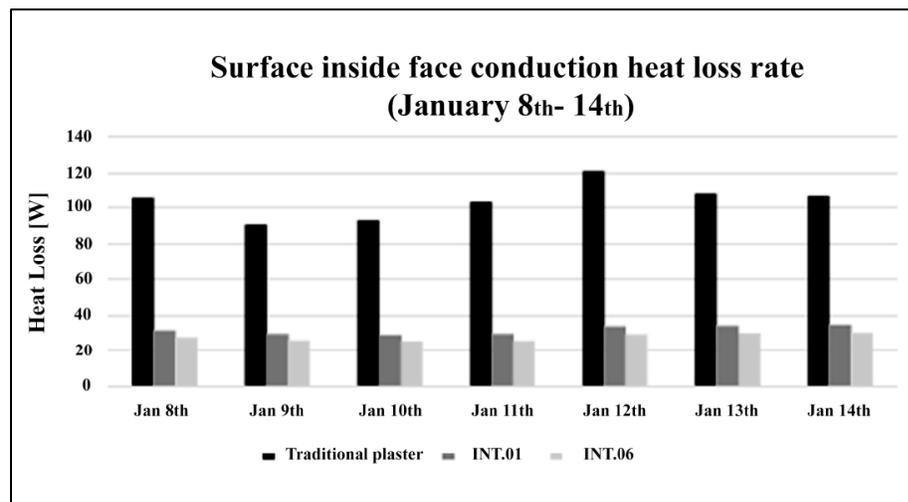


Fig. 2.25 Risultati in termini di perdite di calore delle simulazioni on Energyplus

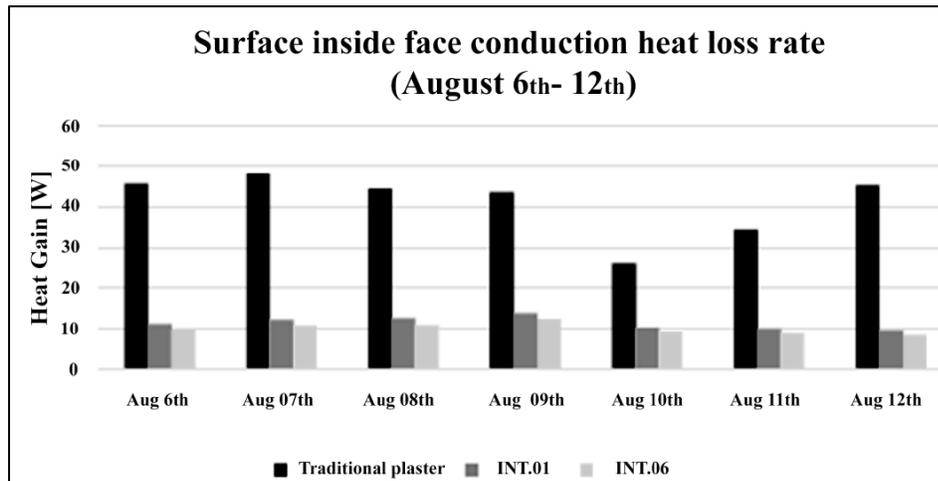


Fig. 2.26 Risultati in termini di guadagno termico delle simulazioni con Energyplus.

L'approccio metodologico avanzato, l'uso di software validati e la selezione accurata dei materiali e dei parametri di input e output sono fondamentali per condurre un'analisi dettagliata e applicabile a qualsiasi contesto geografico nel campo della progettazione e dell'ottimizzazione dell'involucro edilizio e delle relative tecniche. I risultati ottenuti attraverso simulazioni igrometriche dinamiche e analisi del comfort indoor forniscono una visione chiara delle prestazioni delle soluzioni tecniche considerate, consentendo una valutazione approfondita per la progettazione e l'ottimizzazione dell'involucro edilizio.

È importante notare che i risultati di queste simulazioni sono stati limitati allo studio delle chiusure verticali in tre zone climatiche specifiche in Italia. Tuttavia, è auspicabile che in futuro si possa estendere questo studio ad altre componenti dell'involucro edilizio, come le coperture, e ampliare la casistica delle località considerate. Questo permetterebbe una comprensione più completa delle prestazioni dell'involucro edilizio in una gamma più ampia di condizioni climatiche e contesti geografici, consentendo una progettazione più efficiente e ottimizzata, permettendo un miglioramento continuo delle prestazioni.

Nel seguente paragrafo, si analizzano le proprietà di resistenza meccanica a flessione e a compressione degli undici intonaci termici. I risultati delle resistenze a compressione verranno poi confrontati con quelli forniti da scheda tecnica (si ricorda tutti caratterizzati da un valore non inferiore a 1,50 N/mm², come descritto nel paragrafo 1.3).

2.2. Determinazione della resistenza a flessione e a compressione delle undici matrici

La caratterizzazione meccanica degli undici intonaci termici è stata ottenuta mediante prove di flessione e compressione, normate dall'Ente Italiano di Unificazione nella norma UNI EN 1015 – 11 “Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita” [61]. La norma specifica un metodo per determinare la resistenza a flessione e a compressione di campioti di malta preparati in stampi. Si ricorda che un ulteriore metodo per valutare la resistenza a compressione è descritta nelle ASTM C109/C109M-21 [62], analizzata dettagliatamente nel paragrafo...

I campioni di prova sono ricavati con l'impiego di opportuni stampi metallici, costituiti da un telaio aperto di elementi removibili formanti, quando assemblati, tre comparti.

Durante la preparazione delle miscele, si è notato come la lavorabilità delle matrici fosse molto ridotta, a causa della presenza degli aggregati presenti all'interno dei prodotti. Riguardo la quantità di acqua di impasto, si è utilizzata la quantità consigliata dalle schede tecniche, pari a circa il 75% per ogni prodotto. Tutte le matrici sono state impastate mediante miscelatore apposito a basso numero di giri, come indicato specificatamente dalle ASTM C305-20 [88].

I campioni ricavati hanno dimensioni pari a $40\text{ mm} \cdot 40\text{ mm} \cdot 160\text{ mm}$, testati non appena raggiunto il tempo di stagionatura pari a 28 giorni a temperatura ambiente.

Su un medesimo prisma di termointonaco si sono eseguiti test di flessione e successivi test a compressione, sui monconi ottenuti dalla rottura dei test di flessione.

Nello specifico, il programma sperimentale ha previsto le prove su tre campioni per ogni tipologia di intonaco termico, di cui:

- 3 prove di flessione per tre punti;
- 6 prove di compressione (due prove per ogni intonaco termico) sui monconi ottenuti dalle prove di flessione per tre punti.

Su entrambe le tipologie di prova, i campioni di intonaco sono stati posizionati sotto una pressa universale della INSTRON modello 5590 HVL serie SATECTM dotata di cella di carico da 600 kN.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento. Tutte le misure di spostamento sono state acquisite mediante un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) integrato al macchinario di prova, con capacità di risoluzione pari a 1 mm.

I test di flessione e compressione sono stati svolti presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiale e Strutture dell'Università di Firenze e presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali del dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Cagliari, con cui è stata svolta una collaborazione nella fase iniziale della ricerca.

Nello specifico, a Firenze sono stati testati, sia a flessione che a compressione, i termointonaci INT.06, INT.07, INT.08, INT.09, INT. 10, mentre a Cagliari si sono testati INT.01, INT.02, INT.03, INT.04, INT 05 e INT. 11. Per questo motivo, nelle foto è riportata una nomenclatura differente rispetto ai codici INT.01-INT.11.

2.2.1. Prove di flessione per tre punti

Ogni campione di prova è stato posizionato con la parte di intradosso supportata da due cilindri in acciaio di diametro pari a 10 mm, posizionati a 50 mm dalla mezzeria a una distanza tra di loro pari a 100 mm.

Nella parte superiore del provino, in mezzeria, è stato sistemato un altro cilindro allineato con la verticale del carico, in modo da trasferirlo in maniera concentrata sul campione (Fig. 2.27).

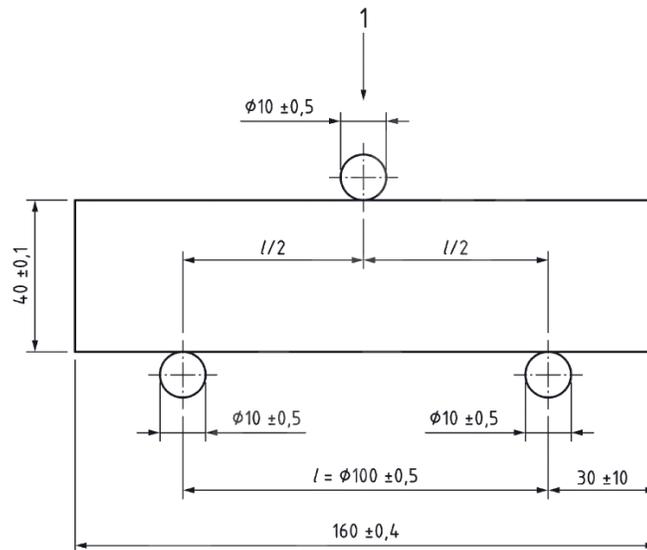


Fig. 2.27 Schema di set up di prova della prova di resistenza a flessione [61].

La resistenza a flessione è stata ricavata mediante la relazione seguente:

$$fb = 1,5 F l / bd^2 [N/mm^2]$$

Equazione 1

In cui:

- F è il carico massimo applicato al centro del provino [N]

- l è la distanza compresa tra i cilindri di appoggio [mm]
- b è la larghezza del provino [mm]
- d è la profondità del provino [mm]

2.2.1.1. Analisi dei risultati delle prove di flessione per tre punti

A seguire, sono riportati i risultati delle prove di flessione per tre punti, eseguite con una velocità di carico pari a 50N/s. Per ogni prova vengono riportate le foto, i grafici- stress strain (con i valori di resistenza a flessione [N/mm²] sulle ordinate e i valori di deformazione sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti. I provini che sono stati sottoposti a test di flessione per tre punti sono indicati con il codice dell'intonaco testato, seguito dai codici F.1, F.2, e F.3, ad indicare i tre test di flessione eseguiti sullo stesso campione di prova.

Nello specifico, in ogni tabella viene indicato:

- Il codice del provino testato.
- La distanza compresa tra i cilindri di appoggio l [mm].
- La larghezza del provino b [mm].
- La profondità del provino d [mm].
- Il valore del carico massimo raggiunto durante la prova F_{max} [N].
- La deformazione $\epsilon_{b_{max}}$, corrispondente alla massima tensione di flessione raggiunta.
- Il valore massimo di tensione f_b [N/mm²].
- Il valore $f_b(\text{datasheet})$ [N/mm²], che equivale al valore della resistenza a flessione riportata nella scheda tecnica del produttore. Si noti che in INT.03, INT.08 e INT.10, $f_b(\text{datasheet})$ non viene indicata per mancanza di documentazione.

Dai risultati ottenuti, si osserva che tutti gli intonaci termici presentano una consistente variabilità nei valori di resistenza a flessione.

INT.01 e INT.06 sono le due matrici che hanno mostrato il miglior comportamento a flessione, caratterizzate, rispettivamente, da 0.30 N/mm² e 0.27 N/mm². Ad ogni modo, i risultati ottenuti sono differenti da quelli indicati da scheda tecnica, che indicano valori di circa tre volte superiori.

Anche le matrici INT.05 e INT.11 mostrano valori simili di resistenza a flessione, rispettivamente 0.10 N/mm^2 e 0.12 N/mm^2 , anche in questo caso risultando minori dei valori indicati dalle schede tecniche.

Le matrici risultate peggiori dal punto di vista della resistenza a flessione sono INT. 08 (0.024 N/mm^2) e INT.09 (0.032 N/mm^2); quest'ultima, in particolare, ha presentato la maggiore differenza rispetto al valore indicato da scheda tecnica, risultando più di dieci volte inferiore.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.01



Fig. 2.28 Campioni INT.01-F.1, INT.01-F.2 e INT.01-F.3 al termine del test.

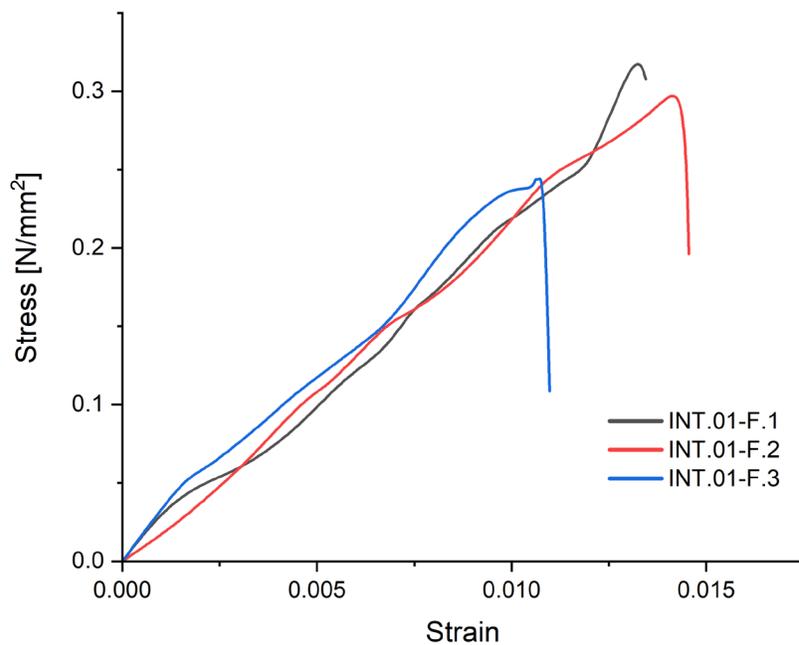


Fig. 2.29 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.01.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵb_{max} [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (datasheet)
INT.01 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.013	0.329	
INT.01 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.014	0.310	
INT.01 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.011	0.249	
Valore medio				473.42	0.013	0.296	> 1.00
Deviazione standard				67.02	0.002	0.042	
Coefficiente di variazione				0.14	0.121	0.141	

Tab. 2-2 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.01.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.02

4



Fig. 2.30 Campioni INT.02-F.1, INT.02-F.2 e INT.02-F.3 al termine del test.

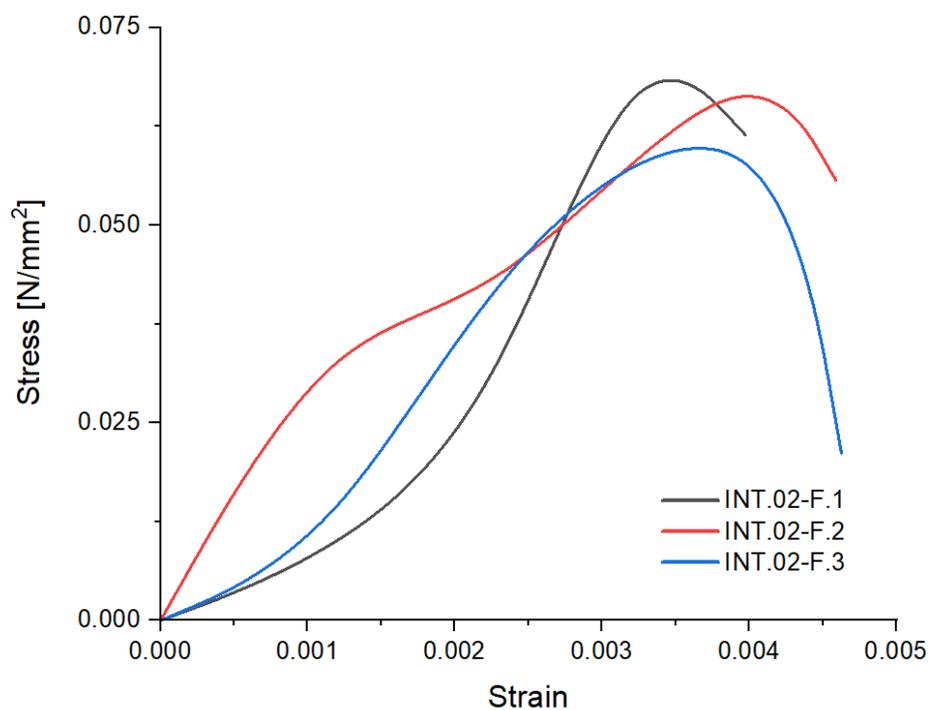


Fig. 2.31 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.02.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵb max [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (datasheet)
INT.02 F.1	100.00	40.00	40.00	122.45	0.003	0.077	
INT.02 F.2	100.00	40.00	40.00	119.59	0.004	0.075	
INT.02 F.3	100.00	40.00	40.00	110.87	0.004	0.069	
Valore medio				117.64	0.004	0.074	0.40
Deviazione standard				6.17	0.001	0.004	
Coefficiente di variazione				0.05	0.157	0.057	

Tab. 2-3 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.02.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.03



Fig. 2.32 Campioni INT.03-F.1, INT.03-F.2 e INT.03-F.3 al termine del test.

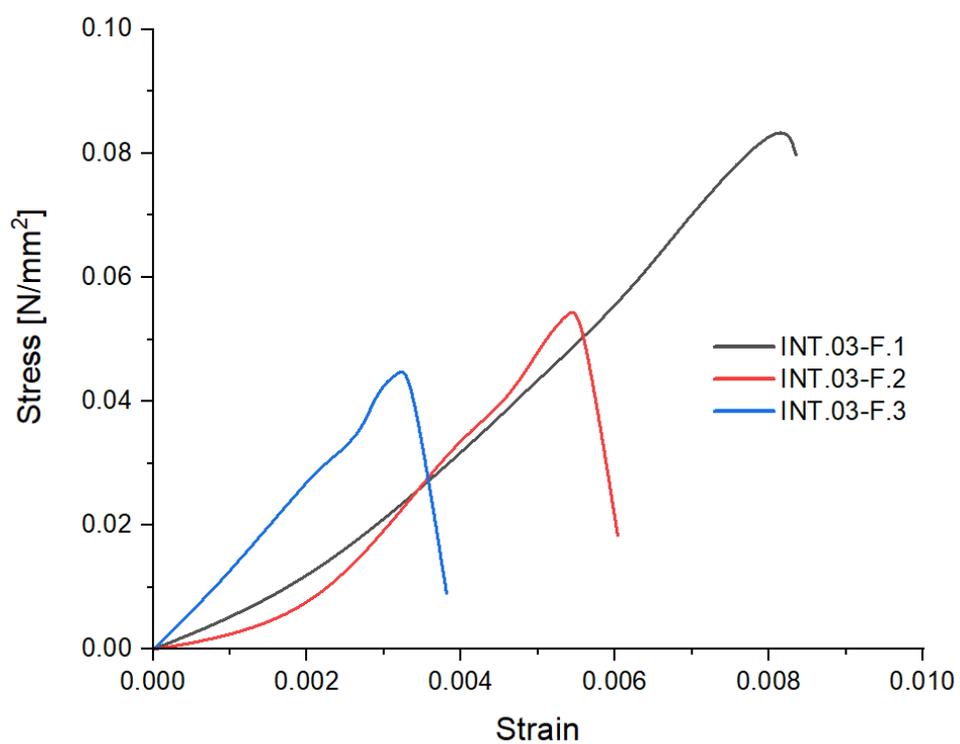


Fig. 2.33 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.03.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵb_{max} [-]	f_b [N/mm ²]	f_b [N/mm ²] (dat sheet)
INT.03 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.008	0.086	
INT.03 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.006	0.055	
INT.03 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.003	0.046	
Valore medio				473.42	0.006	0.062	-
Deviazione standard				67.02	0.003	0.021	
Coefficiente di variazione				0.14	0.444	0.337	

Tab. 2-4 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.03.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.04



Fig. 2.34 Campioni INT.04-F.1, INT.04-F.2 e INT.04-F.3 al termine del test.

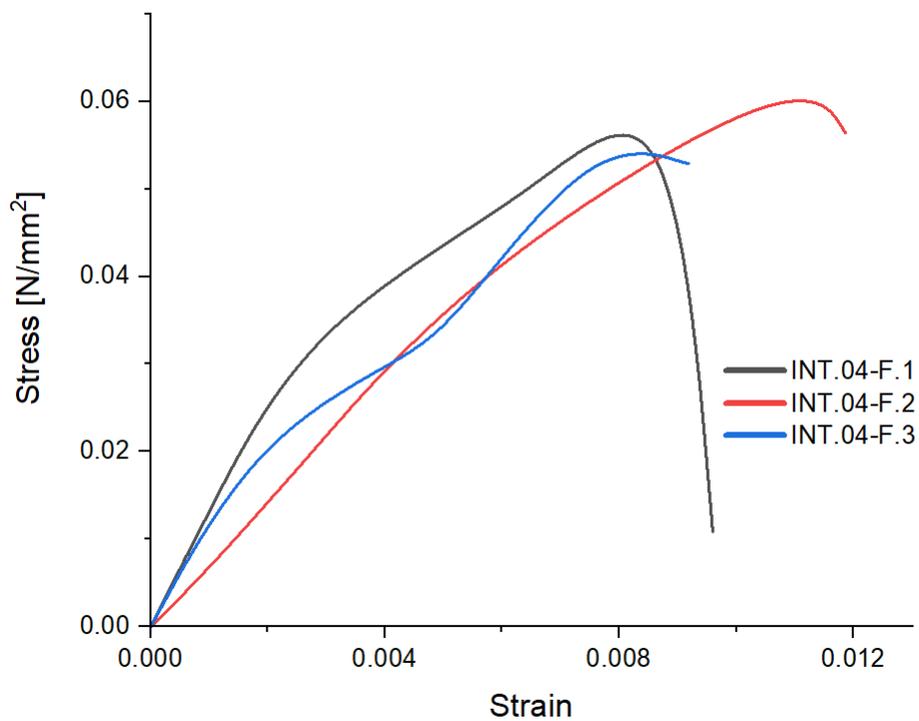


Fig. 2.35 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.04.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_b max [-]	f_b [N/mm ²]	f_b [N/mm ²] (datasheet)
INT.04 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.009	0.064	
INT.04 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.012	0.064	
INT.04 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.008	0.056	
Valore medio				473.42	0.010	0.061	1.00
Deviazione standard				67.02	0.002	0.005	
Coefficiente di variazione				0.14	0.215	0.075	

Tab. 2-5 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.04.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.05



Fig. 2.36 Campioni INT.05-F.1, INT.05-F.2 e INT.05-F. al termine del test.

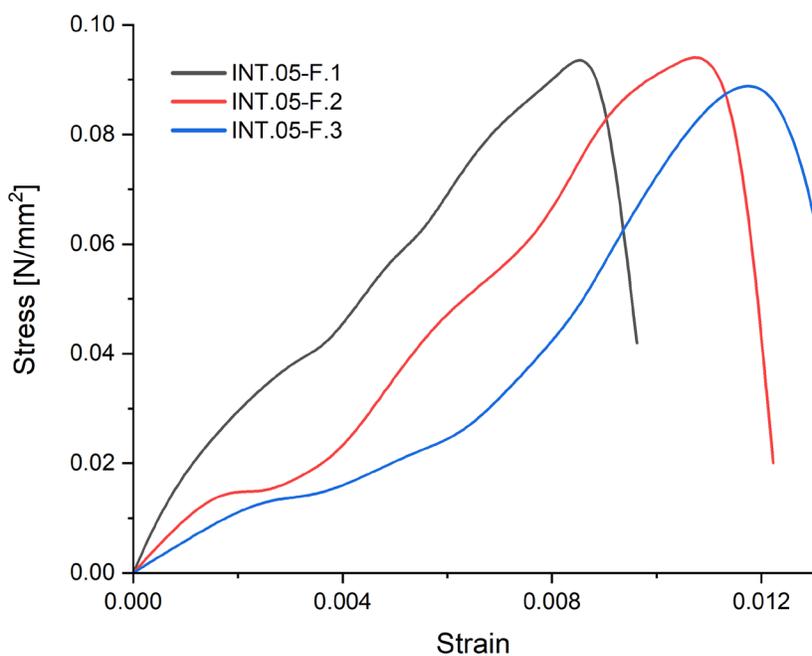


Fig. 2.37 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.05.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_b max [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (dat sheet)
INT.05 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.009	0.099	
INT.05 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.011	0.098	
INT.05 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.012	0.104	
Valore medio				473.417	0.011	0.100	0.50
Deviazione standard				67.022	0.002	0.003	
Coefficiente di variazione				0.142	0.143	0.032	

Tab. 2-6 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.05.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.06

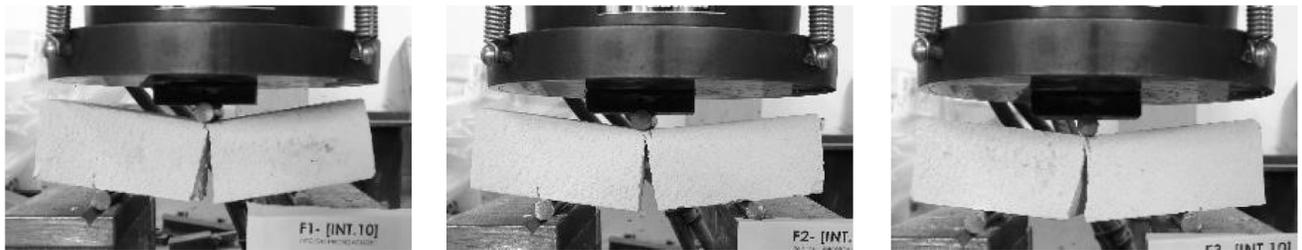


Fig. 2.38 Campioni INT.06-F.1, INT.06-F.2 e INT.06-F. al termine del test.

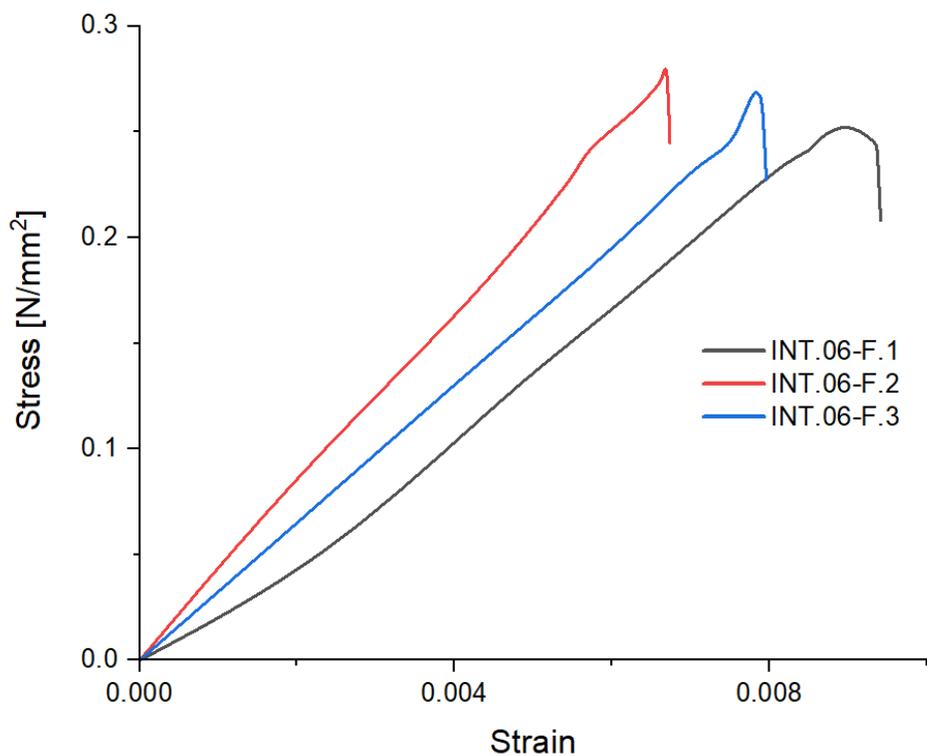


Fig. 2.39 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.06.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_b max [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (datasheet)
INT.06 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.009	0.255	
INT.06 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.007	0.286	
INT.06 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.008	0.272	
Valore medio				473.417	0.008	0.271	0.60
Deviazione standard				67.022	0.001	0.016	
Coefficiente di variazione				0.142	0.125	0.057	

Tab. 2-7 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.06.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.07



Fig. 2.40 Campioni INT.07-F.1, INT.07-F.2 e INT.07-F. al termine del test

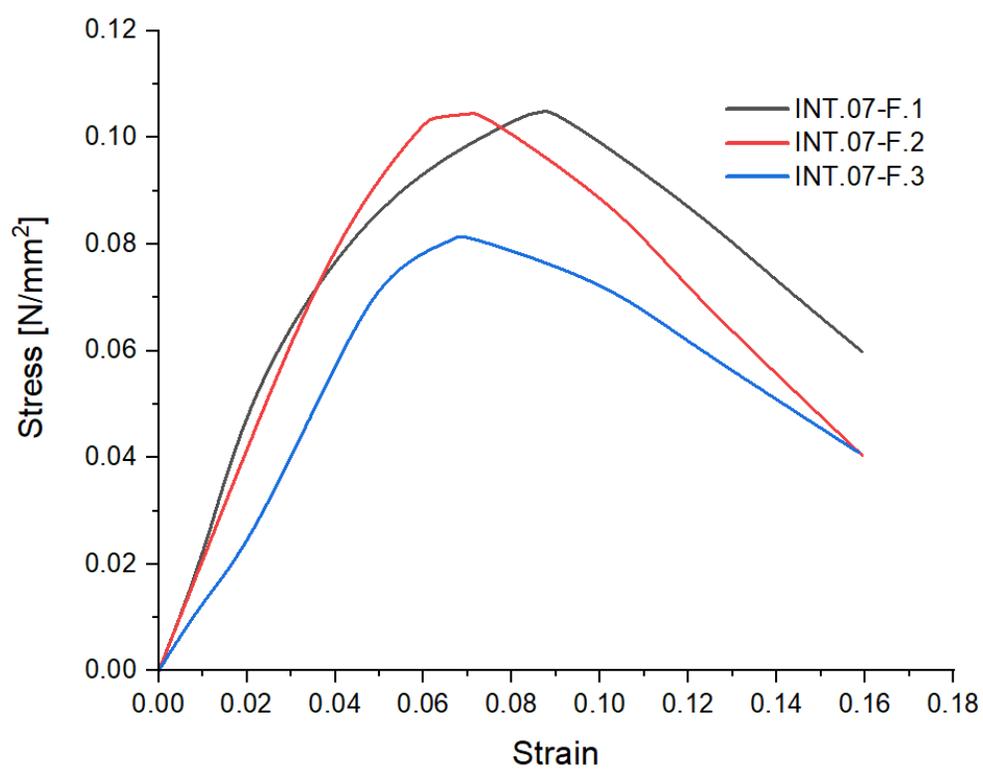


Fig. 2.41 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.07.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵb_{max} [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (dat sheet)
INT.07 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.089	0.105	
INT.07 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.073	0.105	
INT.07 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.070	0.082	
Valore medio				473.417	0.077	0.097	-
Deviazione standard				67.022	0.010	0.013	
Coefficiente di variazione				0.142	0.132	0.136	

Tab. 2-8 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.07.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.08

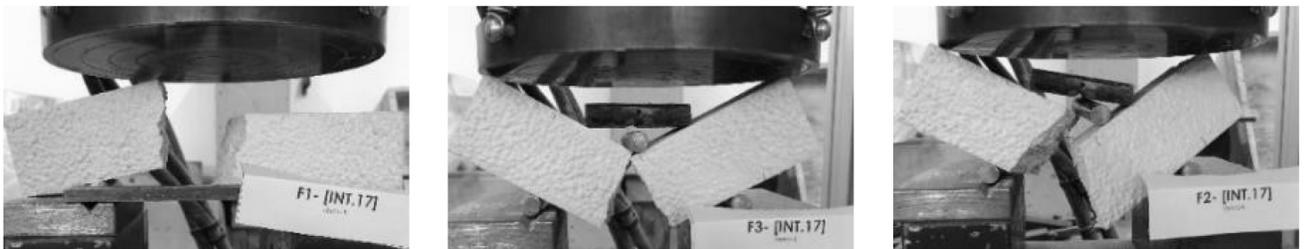


Fig. 2.42 Campioni INT.08-F.1, INT.08-F.2 e INT.08-F. al termine del test.

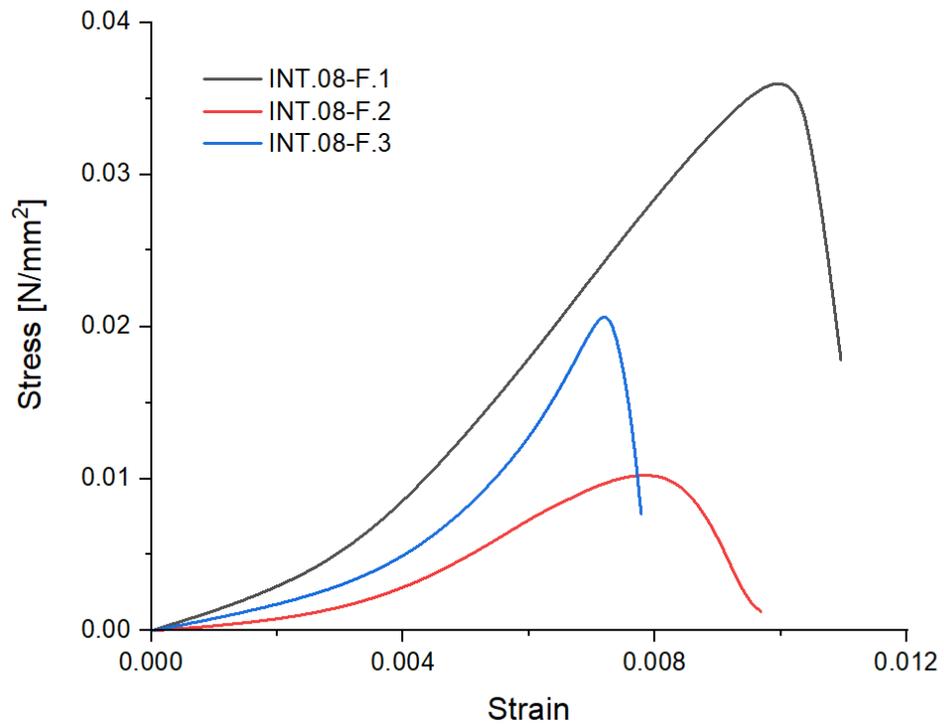


Fig. 2.43 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.08.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	$\epsilon b \max$ [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (datasheet)
INT.08 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.010	0.039	
INT.08 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.008	0.012	
INT.08 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.007	0.022	
Valore medio				473.417	0.008	0.024	-
Deviazione standard				67.022	0.002	0.014	
Coefficiente di variazione				0.142	0.183	0.561	

Tab. 2-9 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.08.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.09

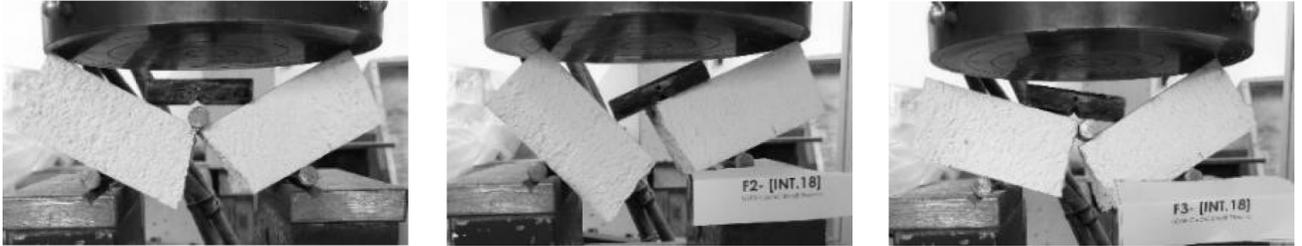


Fig. 2.44 Campioni INT.09-F.1, INT.09-F.2 e INT.09-F. al termine del test.

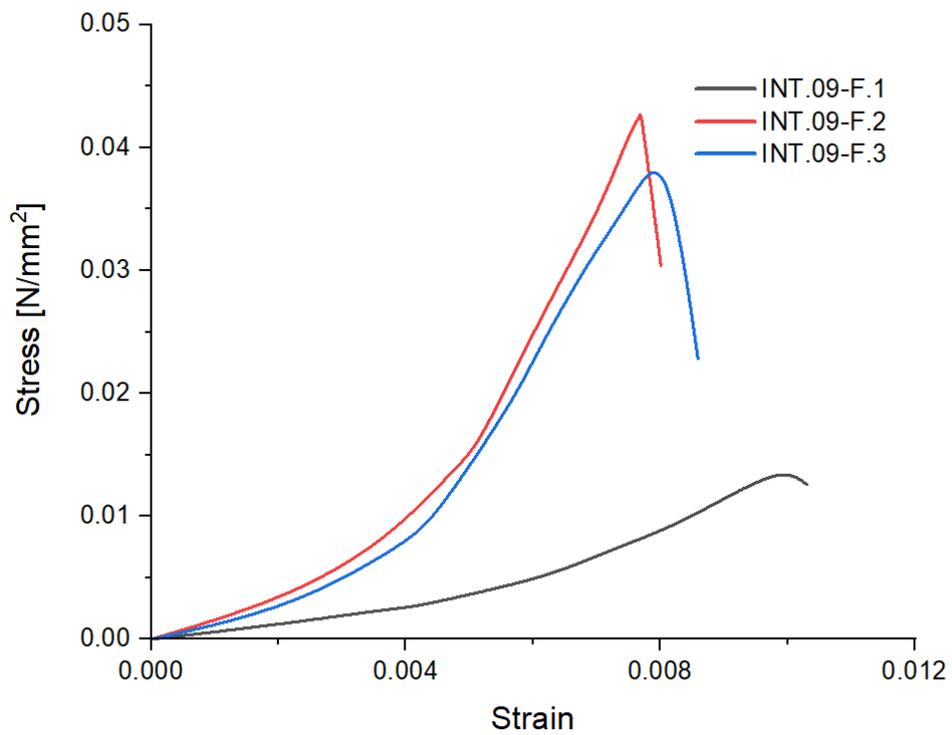


Fig. 2.45 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.09.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F _{max} [N]	ε _b max [-]	f _b [N/mm ²]	f _b [N/mm ²] (datasheet)
INT.09 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.010	0.014	
INT.09 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.008	0.043	
INT.09 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.008	0.040	
Valore medio				473.417	0.009	0.032	≥ 0.40
Deviazione standard				67.022	0.001	0.016	
Coefficiente di variazione				0.142	0.133	0.493	

Tab. 2-10 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.09.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.10



Fig. 2.46 Campioni INT.10-F.1, INT.10-F.2 e INT.10-F. al termine del test.

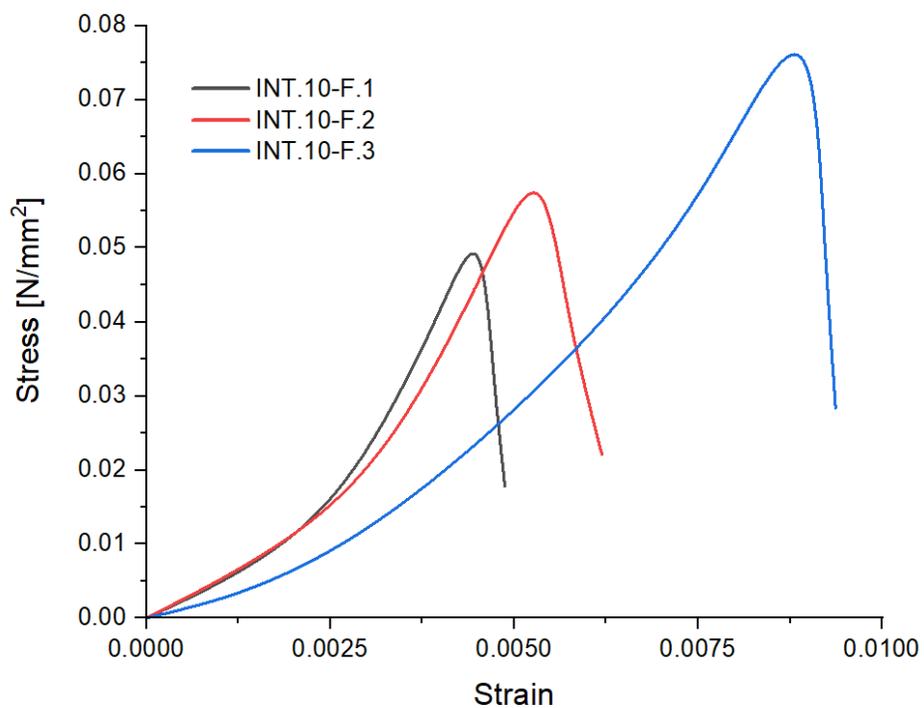


Fig. 2.47 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.10.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_b max [-]	fb [N/mm ²]	fb [N/mm ²] (datasheet)
INT.10 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.005	0.054	
INT.10 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.005	0.063	
INT.10 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.009	0.084	
Valore medio				473.417	0.006	0.067	-
Deviazione standard				67.022	0.002	0.015	
Coefficiente di variazione				0.142	0.365	0.230	

Tab. 2-11 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.10.

Risultati sperimentali di resistenza a flessione INT.11



Fig. 2.48 Campioni INT.11-F.1, INT.11-F.2 e INT.11-F. al termine del test.

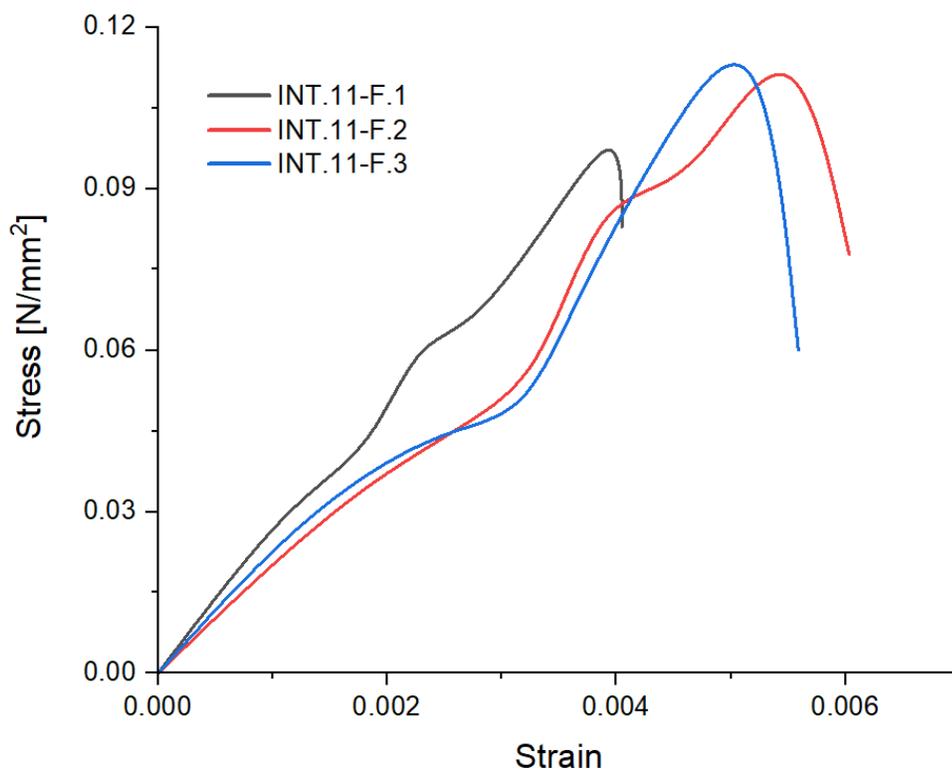


Fig. 2.49 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.11.

Campione	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ε_b max [-]	f_b [N/mm²]	f_b [N/mm²] (dat sheet)
INT.11 F.1	100.00	40.00	40.00	526.61	0.004	0.103	
INT.11 F.2	100.00	40.00	40.00	495.50	0.006	0.123	
INT.11 F.3	100.00	40.00	40.00	398.14	0.005	0.125	
Valore medio				473.417	0.005	0.117	0.58
Deviazione standard				67.022	0.001	0.012	
Coefficiente di variazione				0.142	0.200	0.104	

Tab. 2-12 Risultati prove di flessione sull'intonaco termico INT.11.

2.2.2. Prove compressione

Le prove di compressione uniassiale sono state effettuate sui due monconi ottenuti dalla prova a flessione per tre punti, al fine di determinare la resistenza a compressione degli intonaci termici.

La resistenza a compressione è stata ottenuta secondo la seguente relazione:

$$f_c = \frac{F}{A} [\text{N/mm}^2]$$

Equazione 2

In cui:

- F è il carico massimo applicato al centro del provino [N]
- A è l'area della superficie di contatto con le piastre della macchina di prova, pari a 1600 mm².

Per lo svolgimento della prova, ogni campione è stato posizionato tra due piastre metalliche di ripartizione del carico, allineate e opportunamente sagomate, aventi entrambe un'area di contatto con il provino.

I provini sono stati sottoposti ad un carico monotono applicato in controllo di spostamento.

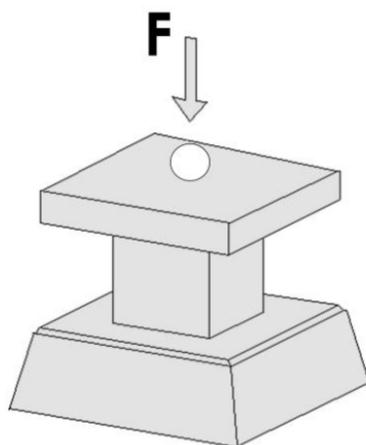


Fig. 2.50 Schema di set up di prova della prova di resistenza a compressione [89].

2.2.2.1. Analisi dei risultati delle prove di compressione

A seguire, sono riportati i risultati delle prove a compressione, effettuate sui due monconi ottenuti dalla rottura a flessione. Per ogni prova vengono riportate le foto, i grafici- stress strain (con i valori di resistenza a compressione [N/mm²] sulle ordinate e i valori di deformazione sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti [90]. I provini che sono stati sottoposti a test di compressione sono indicati con il codice dell'intonaco testato, seguito dai codici C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b, ad indicare i tre test di compressione eseguiti sui due monconi dello stesso campione di prova.

Nello specifico, in ogni tabella viene indicato:

- Il codice del provino testato.
- La larghezza del provino b [mm].
- La profondità del provino d [mm].
- Il valore del carico massimo raggiunto durante la prova F_{max} [N].
- La deformazione $\epsilon_{c\ max}$, corrispondente alla massima tensione di compressione raggiunta.
- Il valore massimo di tensione f_c [N/mm²].
- Il valore f_c (datasheet) [N/mm²], che equivale al valore della resistenza a compressione riportata nella scheda tecnica del produttore.
- Il valore del modulo elastico E_c [N/mm²] per ogni matrice, calcolato tra il 30% e il 60% del carico massimo [91].

Per ogni campione testato si è registrato il valore del carico che lo ha portato a rottura che, diviso per l'area trasversale (pari a 1600 mm² per tutti i provini), ha fornito il valore della resistenza a compressione degli undici intonaci termici testati [92]. Per ogni campione si riporta il valore di resistenza a compressione medio, con deviazione standard e coefficiente di variazione per valutare la dispersione dei risultati ottenuti. Dai grafici si osserva il comportamento anomalo di INT.03. Il test effettuato su INT.10- C.1a, infatti, ha riportato un valore di resistenza a compressione pari a 0.06 N/mm², valore quasi dieci volte inferiore rispetto alla media degli altri provini di INT.03. Inoltre, il valore della resistenza a compressione f_c [N/mm²] media, pari a 0.46 N/mm² è risultato molto inferiore rispetto ai 5.00 N/mm² dichiarati dalla scheda tecnica del produttore. Lo stesso si è verificato per INT.02, ricavando una f_c media pari a 0.38 N/mm², più di cinque volte minore rispetto a quella dichiarata dal produttore. Al contrario, gli intonaci che hanno presentato i migliori risultati sono INT.01, INT.06 e INT.10, mostrando valori di resistenza a compressione maggiori rispetto a quelli dichiarati da scheda tecnica, rispettivamente pari a 2.41 N/mm², 2.49 N/mm² e 1.86 N/mm², rispettando quindi il requisito imposto in accordo alla UNI EN 998-1 [31] (paragrafo 1.3).

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.01

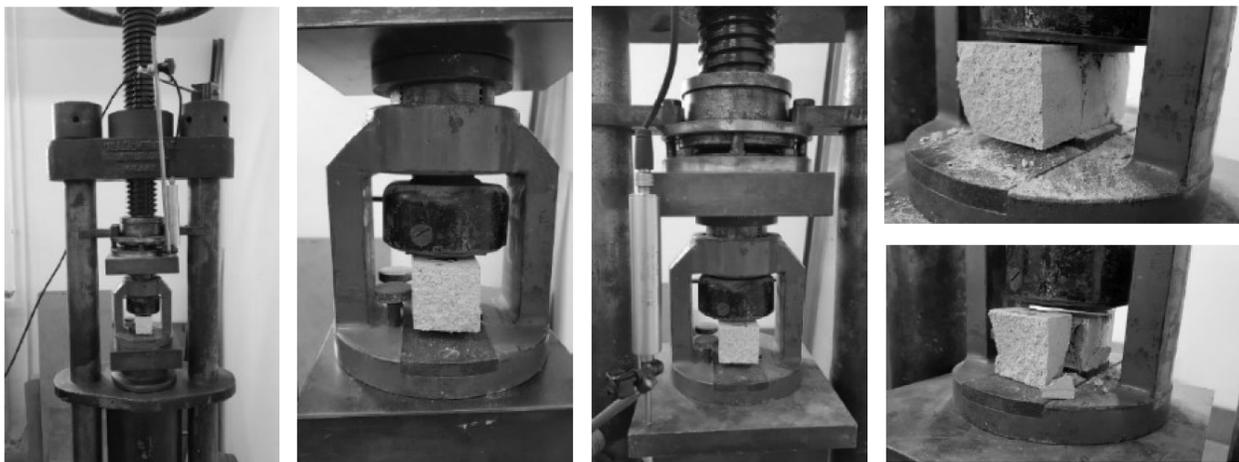


Fig. 2.51 Campioni INT.01 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

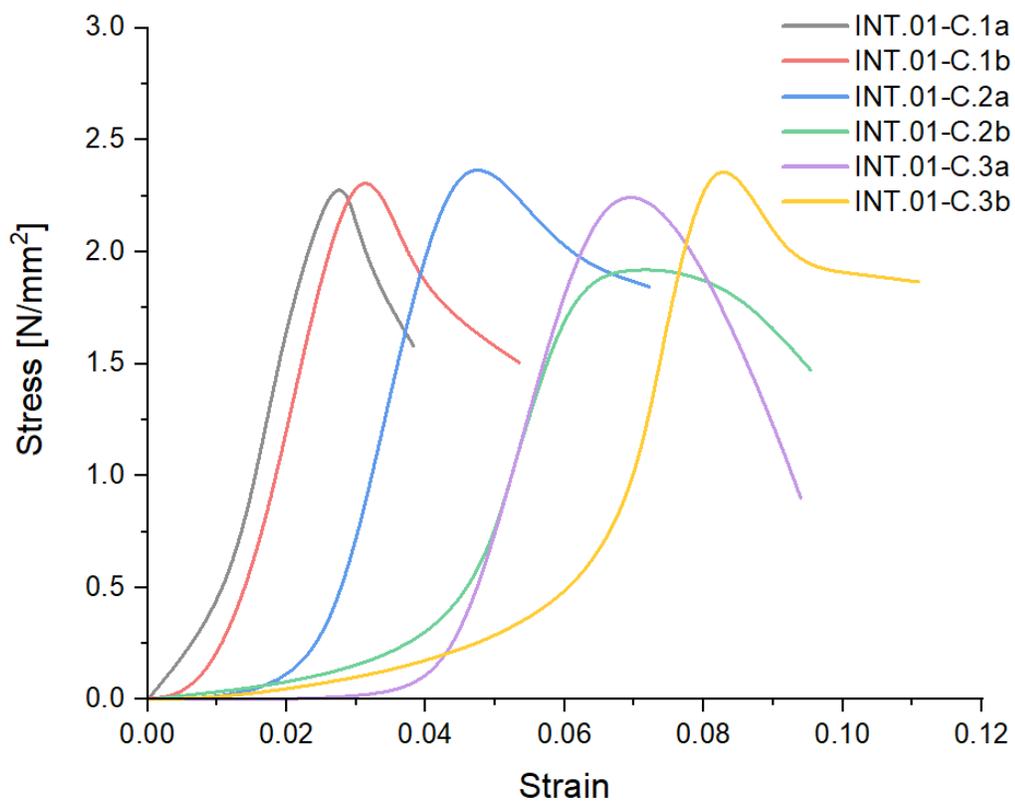


Fig. 2.52 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.01.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	$\epsilon c \text{ max}$ [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.01- C.1a	40.00	40.00	3876.67	0.027	2.42		89.05
INT.01- C.1b	40.00	40.00	4005.28	0.031	2.50		80.52
INT.01- C.2a	40.00	40.00	4073.52	0.045	2.55		56.85
INT.01- C.2b	40.00	40.00	3089.57	0.069	1.93		27.90
INT.01- C.3a	40.00	40.00	3839.57	0.065	2.40		36.72
INT.01- C.3b	40.00	40.00	4233.90	0.081	2.65		32.50
Valore medio			3853.09	0.05	2.41	1.50	53.92
Deviazione standard			400.12	0.02	0.25		26.01
Coefficiente di variazione			0.10	0.42	0.10		0.48

Tab. 2-13 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.01.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.02



Fig. 2.53 Campioni INT.02 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

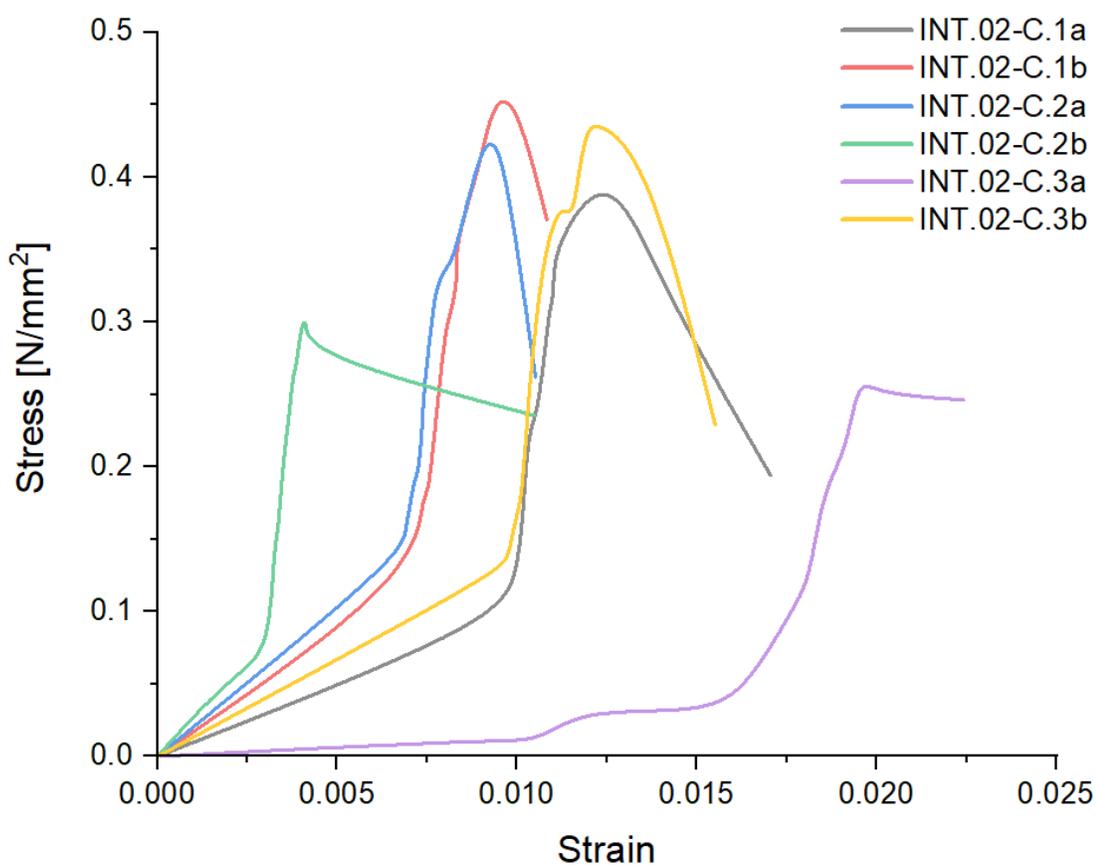


Fig. 2.54 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di flessione su INT.02.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵc max [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.02- C.1a	40.00	40.00	625.25	0.013	0.39		30.22
INT.02- C.1b	40.00	40.00	726.59	0.009	0.45		48.52
INT.02- C.2a	40.00	40.00	683.18	0.009	0.43		46.06
INT.02- C.2b	40.00	40.00	481.52	0.004	0.30		72.52
INT.02- C.3a	40.00	40.00	410.80	0.020	0.26		13.00
INT.02- C.3b	40.00	40.00	705.34	0.012	0.44		36.31
Valore medio			605.45	0.01	0.38	2.50	41.11
Deviazione standard			129.87	0.01	0.08		19.99
Coefficiente di variazione			0.21	0.46	0.21		0.49

Tab. 2-14 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.02.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.03



Fig. 2.55 Campioni INT.03 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

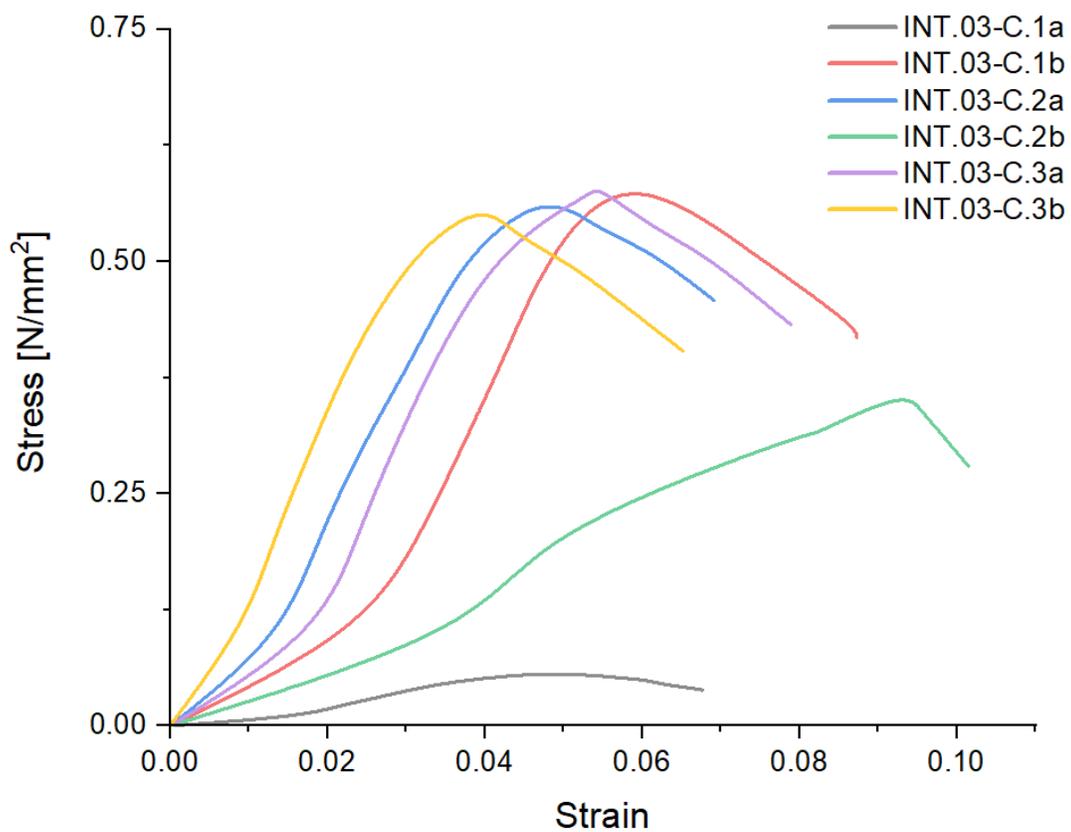


Fig. 2.56 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.03.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	$\epsilon c \text{ max}$ [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.03- C.1a	40.00	40.00	93.81	0.049	0.06		1.21
INT.03- C.1b	40.00	40.00	971.25	0.058	0.61		10.51
INT.03- C.2a	40.00	40.00	921.55	0.048	0.58		12.06
INT.03- C.2b	40.00	40.00	575.65	0.093	0.36		3.85
INT.03- C.3a	40.00	40.00	929.33	0.054	0.58		10.71
INT.03- C.3b	40.00	40.00	901.98	0.040	0.56		14.18
Valore medio			732.26	0.06	0.46	5.00	8.75
Deviazione standard			344.31	0.02	0.22		5.07
Coefficiente di variazione			0.47	0.33	0.47		0.58

Tab. 2-15 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.03.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.04



Fig. 2.57 Campioni INT.04 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

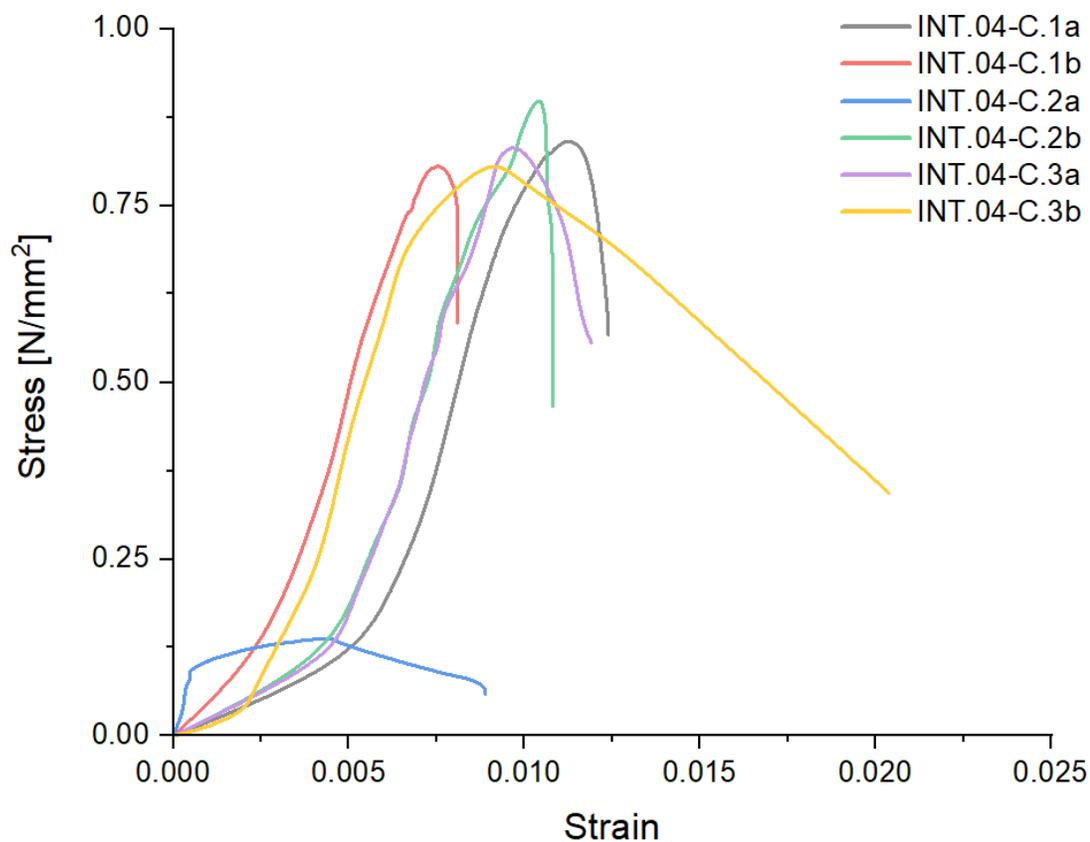


Fig. 2.58 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.04.

Campione	b [mm]	d [mm]	F _{max} [N]	ε _c max [-]	f _c [N/mm ²]	f _c [N/mm ²] (datasheet)	E _c [N/mm ²]
INT.04- C.1a	40.00	40.00	1347.30	0.011	0.84		74.72
INT.04- C.1b	40.00	40.00	1290.10	0.007	0.81		108.08
INT.04- C.2a	40.00	40.00	220.66	0.005	0.14		29.92
INT.04- C.2b	40.00	40.00	1470.70	0.010	0.92		87.71
INT.04- C.3a	40.00	40.00	1332.30	0.010	0.83		85.93
INT.04- C.3b	40.00	40.00	1320.70	0.009	0.83		91.21
Valore medio			1163.63	0.01	0.73	2.00	79.59
Deviazione standard			466.12	0.00	0.29		26.62
Coefficiente di variazione			0.40	0.28	0.40		0.33

Tab. 2-16 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.04.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.05

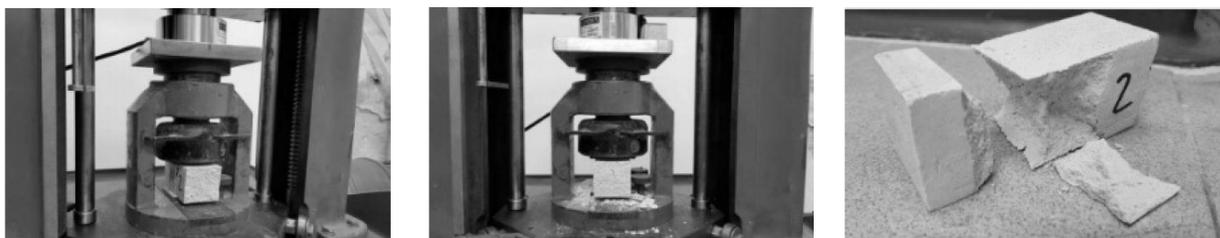


Fig. 2.59 Campioni INT.05 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

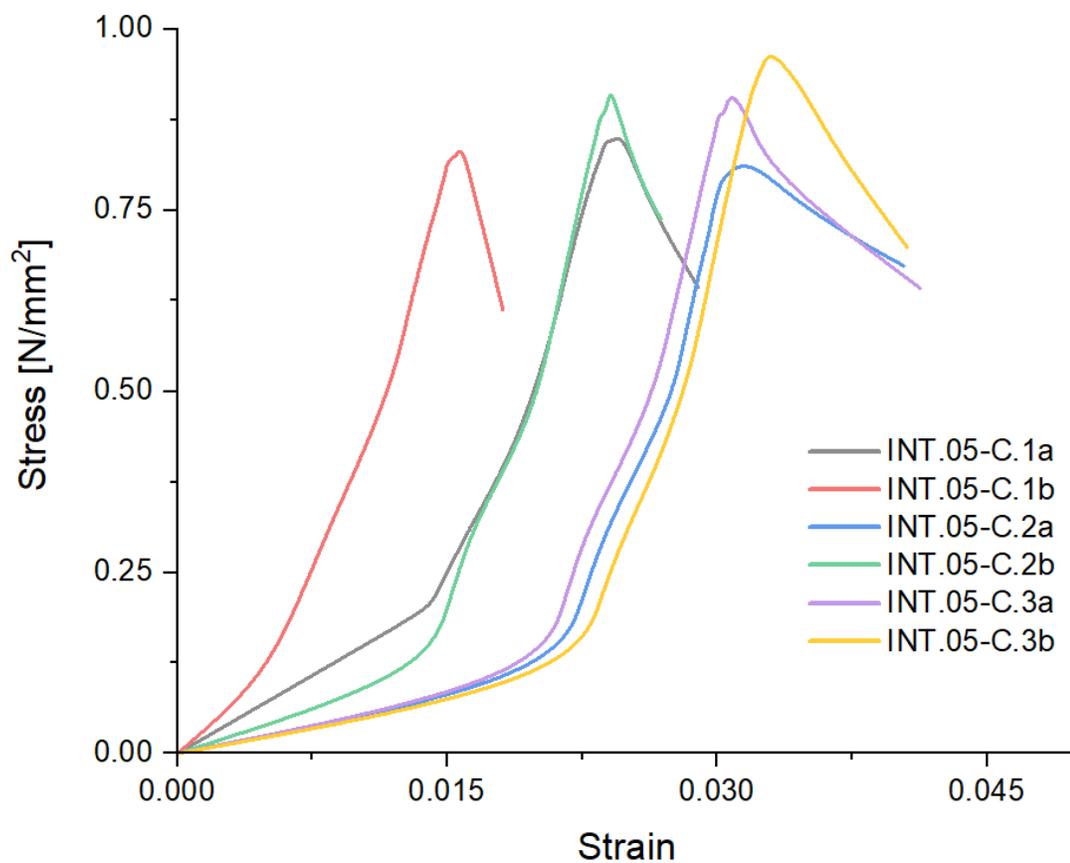


Fig. 2.60 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.05.

Campione	b [mm]	d [mm]	F _{max} [N]	ε _c max [-]	f _c [N/mm ²]	f _c [N/mm ²] (datasheet)	E _c [N/mm ²]
INT.05- C.1a	40.00	40.00	1365.25	0.025	0.85		34.62
INT.05- C.1b	40.00	40.00	1339.01	0.016	0.84		53.17
INT.05- C.2a	40.00	40.00	1318.08	0.032	0.82		26.03
INT.05- C.2b	40.00	40.00	1460.88	0.024	0.91		38.00
INT.05- C.3a	40.00	40.00	1461.70	0.031	0.91		29.70
INT.05- C.3b	40.00	40.00	1559.52	0.033	0.97		29.52
Valore medio			1417.41	0.03	0.89	2.00	35.17
Deviazione standard			92.50	0.01	0.06		9.77
Coefficiente di variazione			0.07	0.24	0.07		0.28

Tab. 2-17 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.05.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.06

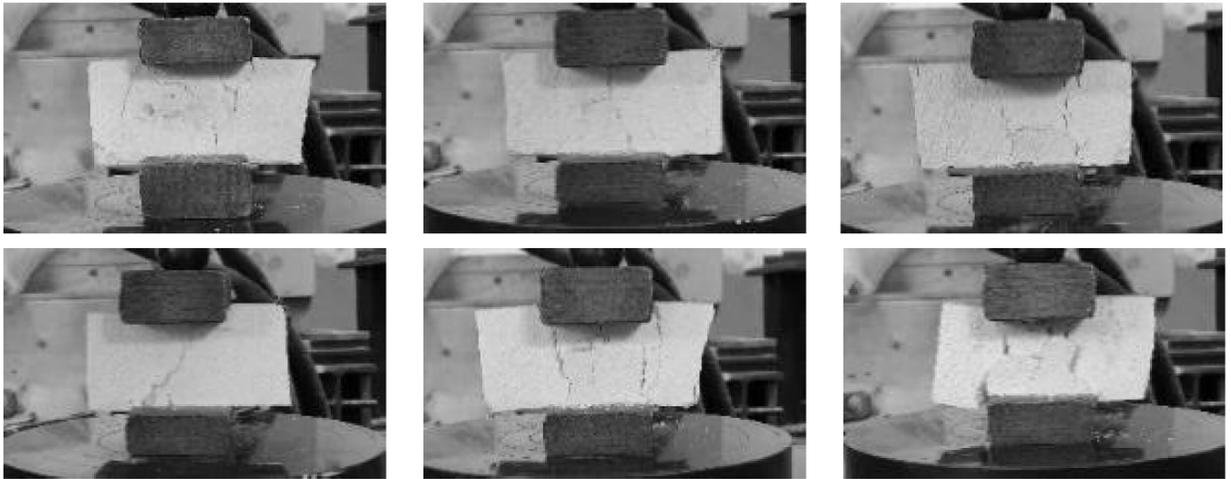


Fig. 2.61 Campioni INT.06 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

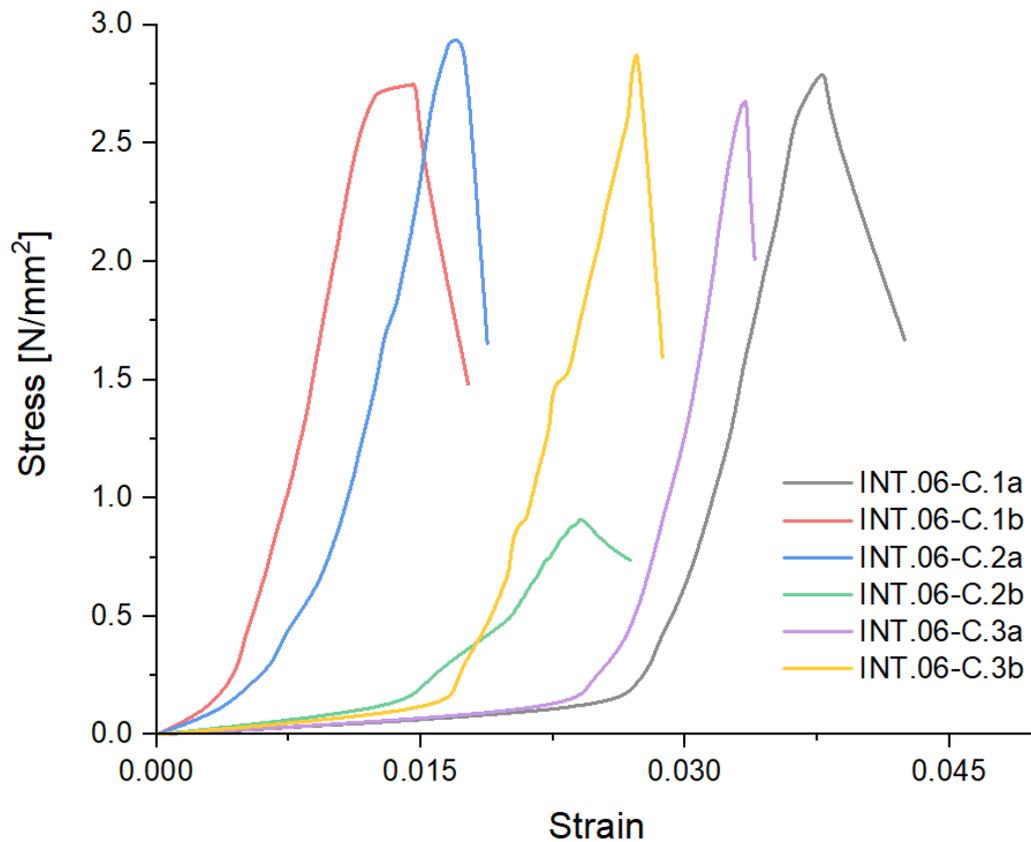


Fig. 2.62 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.06.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵc max [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.06- C.1a	40.00	40.00	4400.90	0.037	2.75		73.80
INT.06- C.1b	40.00	40.00	4398.93	0.015	2.75		188.83
INT.06- C.2a	40.00	40.00	4703.36	0.017	2.94		173.74
INT.06- C.2b	40.00	40.00	1460.88	0.024	0.91		38.00
INT.06- C.3a	40.00	40.00	4287.60	0.033	2.68		80.21
INT.06- C.3b	40.00	40.00	4607.63	0.027	2.88		105.83
Valore medio			3976.55	0.03	2.49	2.00	110.07
Deviazione standard			1241.80	0.01	0.78		59.46
Coefficiente di variazione			0.31	0.35	0.31		0.54

Tab. 2-18 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.06

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.07



Fig. 2.63 Campioni INT.06 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

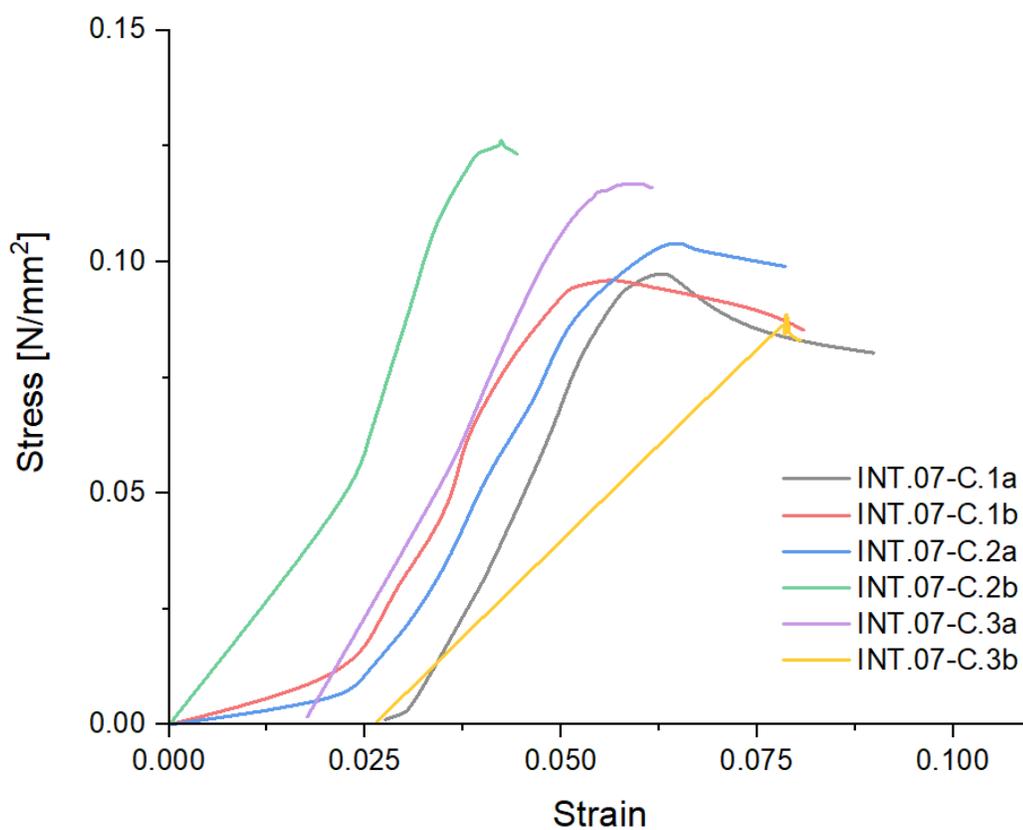


Fig. 2.64 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.07.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	$\epsilon c \text{ max}$ [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.07- C.1a	40.00	40.00	156.14	0.063	0.10		1.54
INT.07- C.1b	40.00	40.00	154.26	0.057	0.10		1.71
INT.07- C.2a	40.00	40.00	166.69	0.065	0.10		1.60
INT.07- C.2b	40.00	40.00	202.51	0.042	0.13		2.99
INT.07- C.3a	40.00	40.00	187.06	0.060	0.12		1.95
INT.07- C.3b	40.00	40.00	143.44	0.079	0.09		1.14
Valore medio			168.35	0.06	0.11	1.50	1.82
Deviazione standard			22.31	0.01	0.01		0.63
Coefficiente di variazione			0.13	0.19	0.13		0.35

Tab. 2-19 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.07.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.08

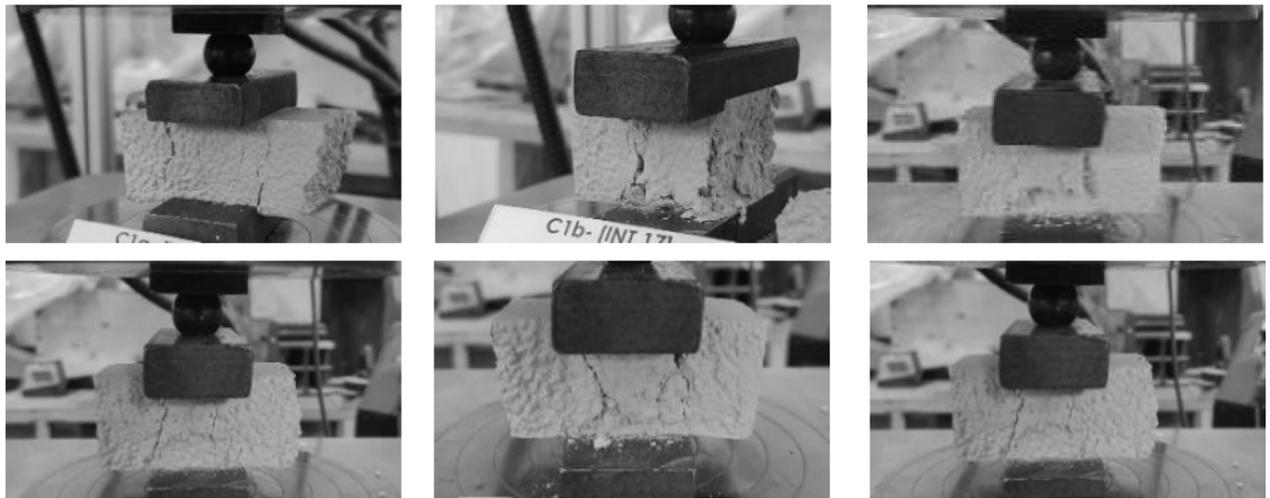


Fig. 2.65 Campioni INT.08 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

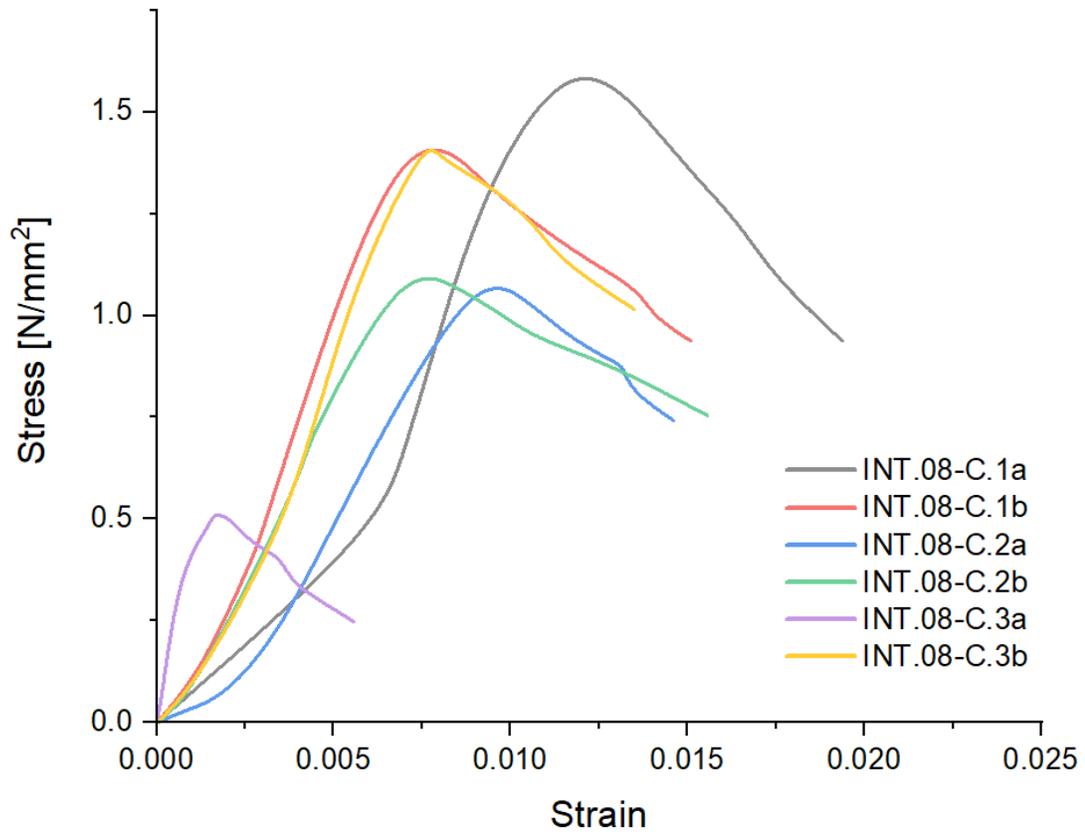


Fig. 2.66 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.08.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_c max [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.08- C.1a	40.00	40.00	2668.30	0.012	1.67		140.02
INT.08- C.1b	40.00	40.00	2430.50	0.007	1.52		217.32
INT.08- C.2a	40.00	40.00	1777.41	0.009	1.11		124.96
INT.08- C.2b	40.00	40.00	1816.90	0.007	1.14		162.45
INT.08- C.3a	40.00	40.00	818.54	0.002	0.51		292.34
INT.08- C.3b	40.00	40.00	2301.20	0.008	1.44		188.75
Valore medio			1968.81	0.01	1.23	1.50	187.64
Deviazione standard			662.68	0.00	0.41		61.11
Coefficiente di variazione			0.34	0.45	0.34		0.33

Tab. 2-20 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.08.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.09



Fig. 2.67 Campioni INT.09 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

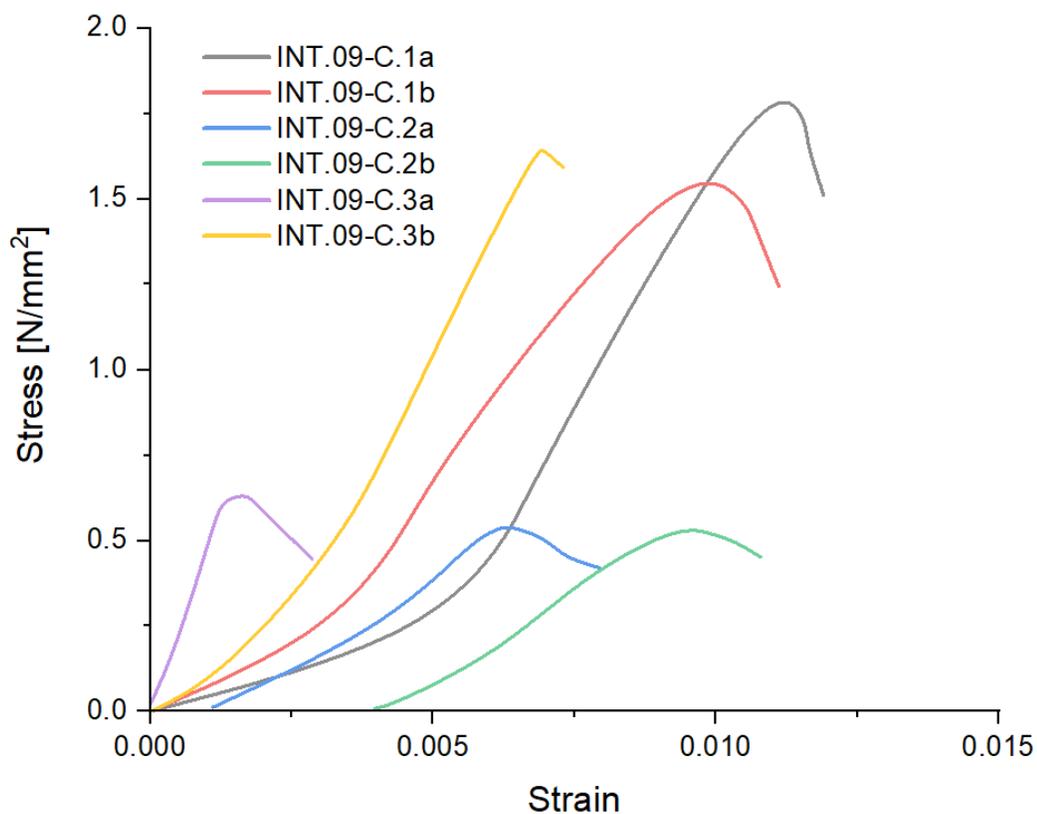


Fig. 2.68 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.09.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	$\epsilon c \text{ max}$ [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.09- C.1a	40.00	40.00	2976.40	0.011	1.86		172.25
INT.09- C.1b	40.00	40.00	2602.00	0.009	1.63		173.56
INT.09- C.2a	40.00	40.00	867.46	0.006	0.54		85.38
INT.09- C.2b	40.00	40.00	880.03	0.009	0.55		58.70
INT.09- C.3a	40.00	40.00	1011.10	0.002	0.63		397.45
INT.09- C.3b	40.00	40.00	2662.21	0.007	1.66		243.61
Valore medio			1833.20	0.01	1.15	2.00	188.49
Deviazione standard			1010.17	0.00	0.63		122.20
Coefficiente di variazione			0.55	0.45	0.55		0.65

Tab. 2-21 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.09.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.10

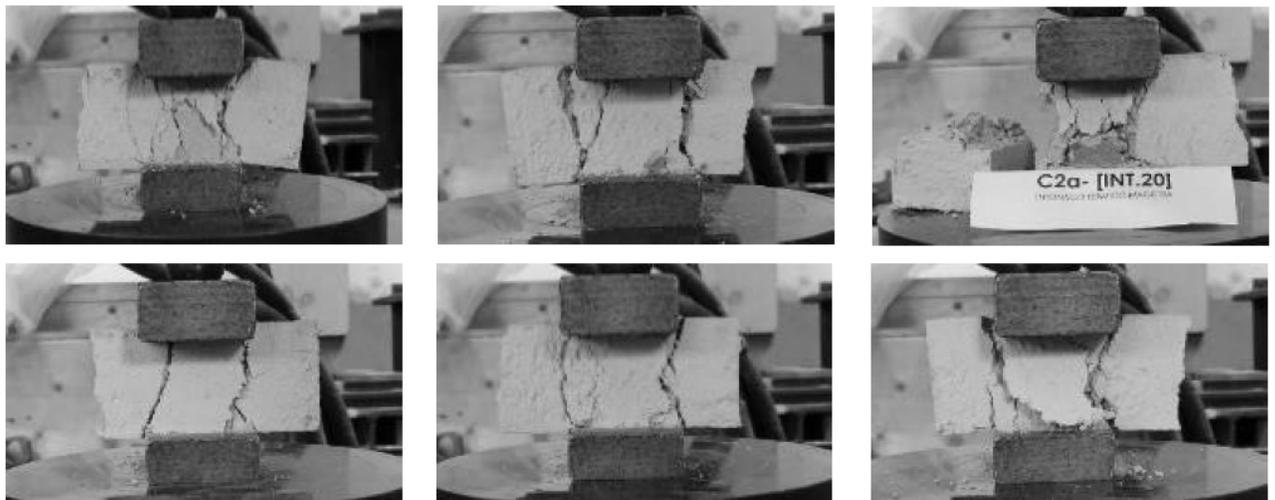


Fig. 2.69 Campioni INT.10 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

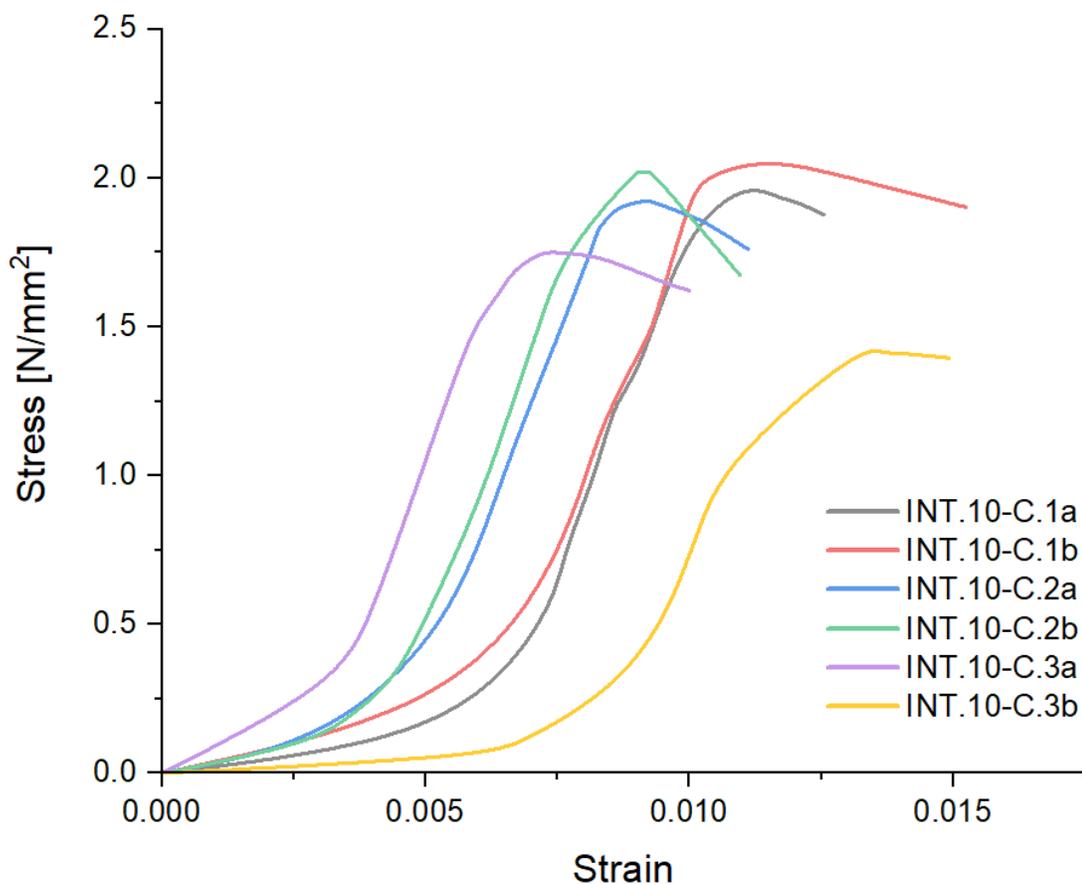


Fig. 2.70 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.10.

Campione	b [mm]	d [mm]	F_{max} [N]	ϵ_c max [-]	f_c [N/mm ²]	f_c [N/mm ²] (datasheet)	E_c [N/mm ²]
INT.10- C.1a	40.00	40.00	3164.40	0.011	1.978		180.45
INT.10- C.1b	40.00	40.00	3300.80	0.011	2.06		180.49
INT.10- C.2a	40.00	40.00	3079.30	0.009	1.92		208.96
INT.10- C.2b	40.00	40.00	3252.61	0.009	2.03		224.63
INT.10- C.3a	40.00	40.00	2802.30	0.007	1.75		239.92
INT.10- C.3b	40.00	40.00	2284.30	0.013	1.43		108.32
Valore medio			2980.62	0.01	1.86	1.50	190.46
Deviazione standard			383.84	0.00	0.24		46.70
Coefficiente di variazione			0.13	0.20	0.13		0.25

Tab. 2-22 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.10.

Risultati sperimentali di resistenza compressione INT.11

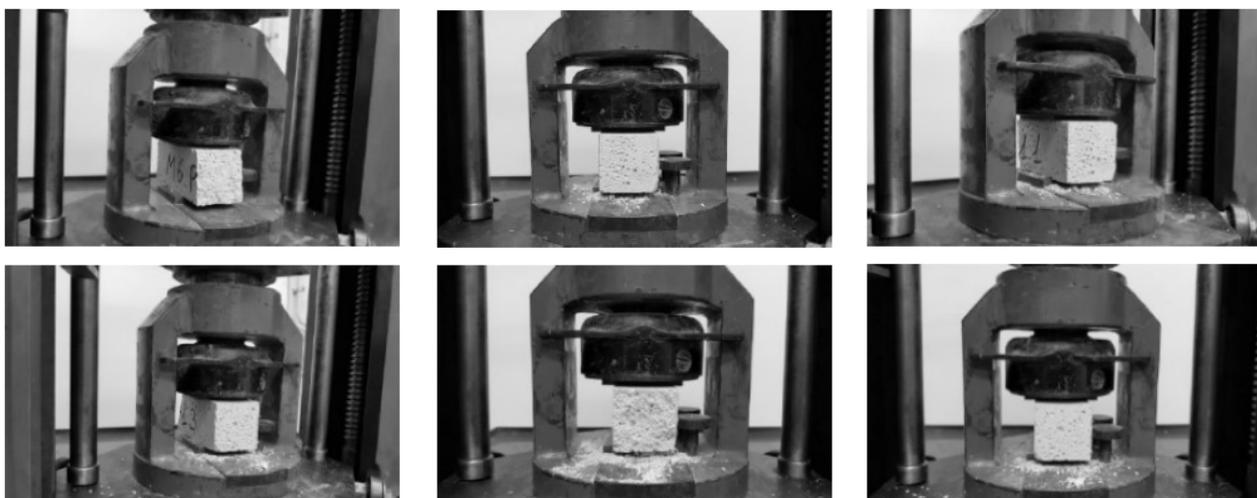


Fig. 2.71 Campioni INT.11 C.1a-b, C.2a-b e C.3a-b. al termine del test.

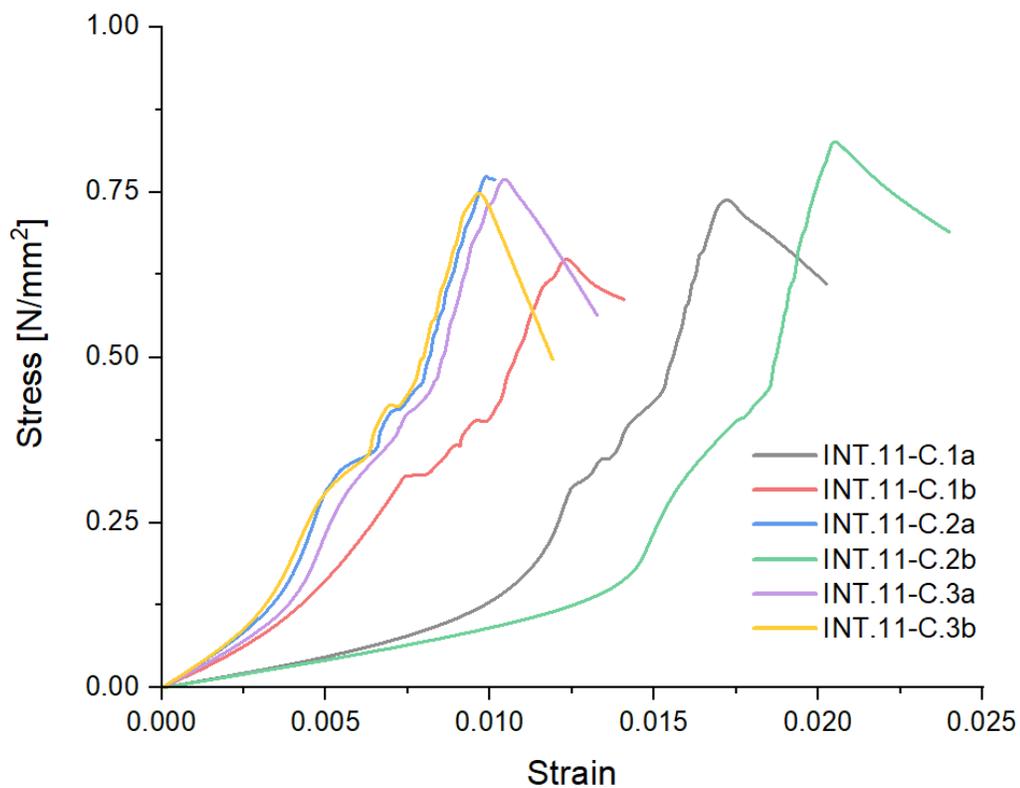


Fig. 2.72 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su INT.11.

Campione	b [mm]	d [mm]	F _{max} [N]	ε _c max [-]	f _c [N/mm ²]	f _c [N/mm ²] (datasheet)	E _c [N/mm ²]
INT.11- C.1a	40.00	40.00	1191.17	0.017	0.74		43.06
INT.11- C.1b	40.00	40.00	1043.60	0.012	0.65		53.33
INT.11- C.2a	40.00	40.00	1241.70	0.010	0.78		78.87
INT.11- C.2b	40.00	40.00	1327.92	0.020	0.83		40.64
INT.11- C.3a	40.00	40.00	1243.58	0.010	0.78		74.38
INT.11- C.3b	40.00	40.00	1202.82	0.010	0.75		78.15
Valore medio			1208.46	0.01	0.76	2.50	61.40
Deviazione standard			93.93	0.00	0.06		17.81
Coefficiente di variazione			0.08	0.34	0.08		0.29

Tab. 2-23 Risultati prove di compressione sull'intonaco termico INT.11.

2.3. Prove di trazione diretta sulla fibra di rinforzo

La fibra che si è utilizzata per il rinforzo dei coupon FRLM è una rete in fibra di basalto biassiale, rinforzata con fili in acciaio Inox, caratterizzata da una maglia di dimensioni pari a $17 \times 17 \text{ mm}^2$ e da uno spessore equivalente di 0.032 mm.

In tabella (Tab. 2-25) si riportano le caratteristiche tecniche e meccaniche dei materiali costituenti la rete, come riportato da scheda tecnica del produttore.

Dati tecnici dei materiali costituenti la rete	
Basalto	
Tensione caratteristica a trazione	3000 N/mm ²
Modulo Elastico	87000 N/mm ²
Acciaio Inox	
Tensione caratteristica a trazione	750 N/mm ²
Modulo Elastico	200000 N/mm ²
Rete in fibra di basalto con acciaio inox	
Spessore equivalente della rete	0,032 mm
Carico a trazione per unità di larghezza	40 kN/m
Tensione limite convenzionale	945,50 N/mm ²
Deformazione limite convenzionale	1,52%
Modulo elastico	62000 N/mm ²

Tab. 2-24 Proprietà della rete in fibra di basalto e dei suoi elementi costituenti (dati da scheda tecnica).

Le proprietà meccaniche della rete sono state ottenute mediante test di trazione diretta, in accordo con la normativa ASTM D3039/D3039M [74], svolti presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiale e Strutture dell'Università di Firenze.

Le prove sono state effettuate su quattro tipologie di campioni differenti e sono stati eseguiti tre test per tipologia di provino, ognuno caratterizzato da un diverso numero di multi-filamenti, descritti di seguito:

- n.3 campioni BT.01 caratterizzati da un multi-filamento longitudinale
- n.3 campioni BT.02 caratterizzati da due multi-filamenti longitudinali
- n.3 campioni BT.03 caratterizzati da tre multi-filamenti longitudinali
- n.3 campioni BT.04 caratterizzati da quattro multi-filamenti longitudinali

Per ogni provino, si è mantenuta una lunghezza costante pari a 625 mm.

Le prove sono state condotte in controllo di spostamento ad una velocità di 0.25 [mm/min]. I campioni di fibre sono stati posizionati sotto una pressa universale della INSTRON modello 5590- 315 HVL serie SATECTM, dotata di cella di carico da 600 kN (Fig. 2.74). Le misure di spostamento sono state acquisite attraverso un estensimetro integrato alla macchina di prova, con range di misura di 0.25 mm/min, è stato installato al centro del provino per ottenere misure di deformazione locali [93].



Fig. 2.73 Rete in fibra di basalto utilizzata per il rinforzo del nuovo composito FRLM.

Per garantire una distribuzione uniforme del carico tra i filamenti costituenti la rete e per evitare la possibile rottura della fibra causata dalle ganasce della macchina, sono state applicate alle estremità del provino due piastre in alluminio di dimensioni $120 \times 75 \times 0.8$ mm³ mediante collante adesivo bicomponente a base di resina epossidica.

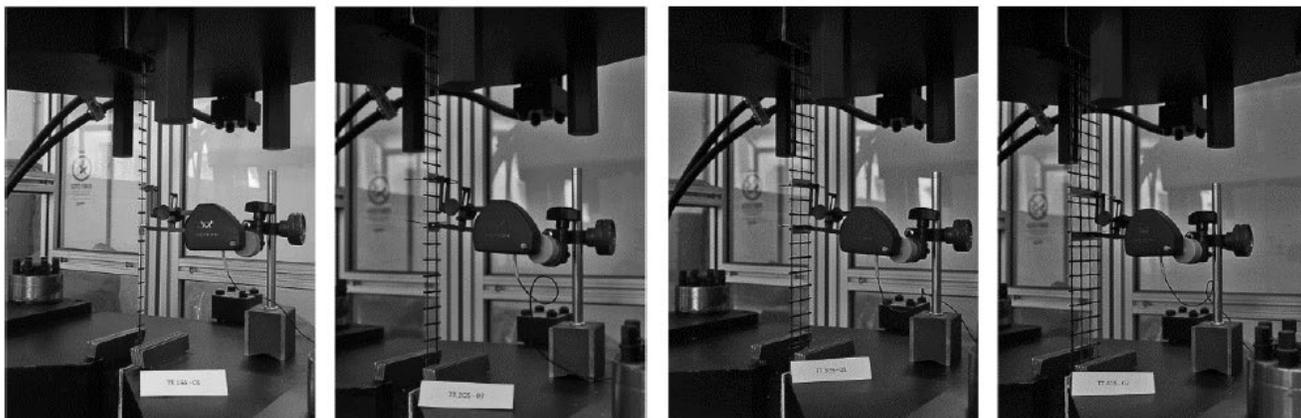


Fig. 2.74 Prova di trazione diretta su provini di rete di fibra di basalto BT.01, BT.02, BT.03 e BT.04 [94].

Per ogni prova vengono riportati i grafici- stress strain (con i valori di resistenza a flessione [N/mm²] sulle ordinate e i valori di deformazione sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti. I provini in rete di basalto che sono stati sottoposti a test di trazione diretta sono indicati con il codice BT01, BT 02, BT 03 e BT 04, seguiti dai numeri da 1 a 3, che rappresentano il numero di test effettuati sul medesimo provino.

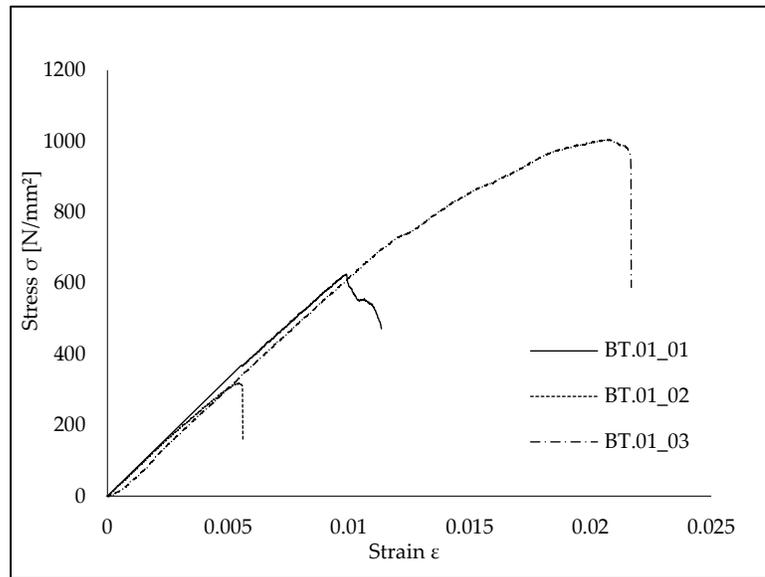


Fig. 2.75 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di trazione su diretta BT.01.

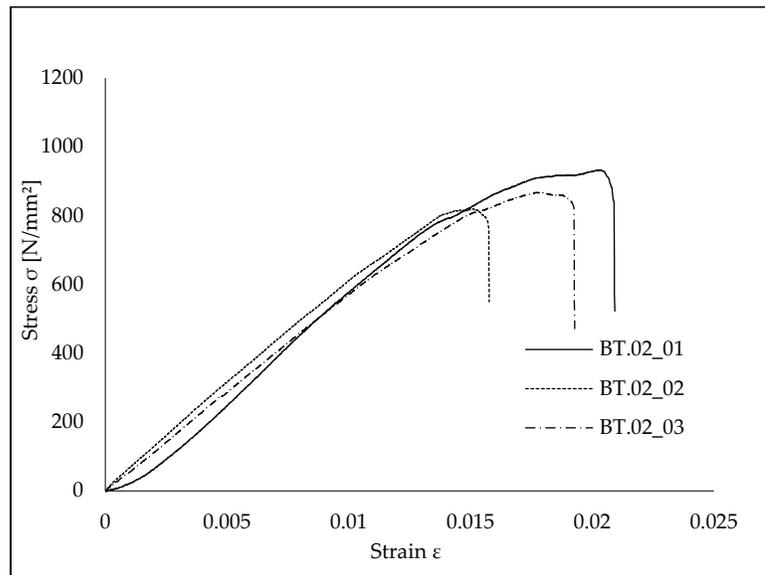


Fig. 2.76 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di trazione diretta su BT.02.

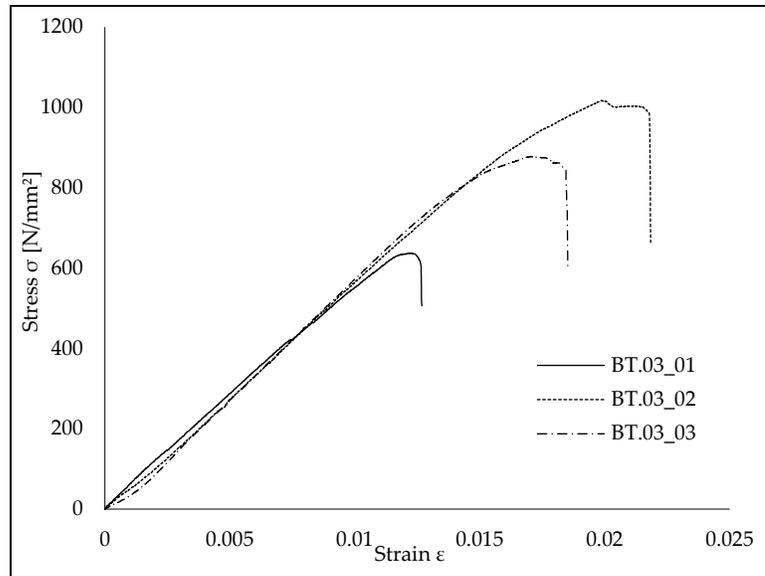


Fig. 2.77 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di trazione diretta su BT.03.

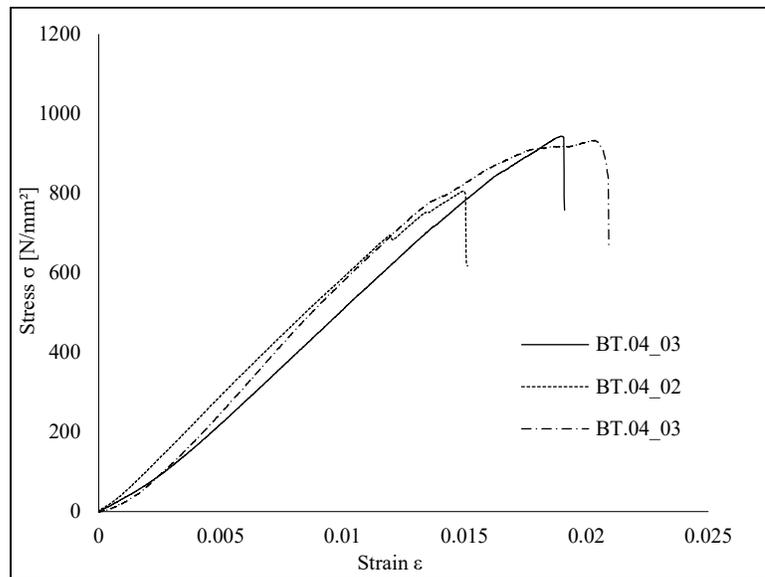


Fig. 2.78 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di trazione diretta su BT.04.

Tutti i grafici tensione-deformazione mostrano un andamento simile, con un primo ramo quasi elastico lineare seguito da un breve tratto non lineare prima del raggiungimento della resistenza massima, ovvero della crisi a trazione di alcuni dei multi-filamenti longitudinali. Una volta raggiunta la tensione a trazione massima, la curva diminuisce rapidamente, evidenziando il comportamento fragile della rete di fibra [94].

In Tab. 2-25 si riportano i risultati ottenuti mediante le prove di trazione diretta sulla rete in fibra di basalto, in termini di:

- Valore del carico massimo raggiunto durante la prova F_{max} [N].
- Deformazione ϵ_t , corrispondente alla massima tensione di trazione.
- Valore massimo di sforzo di trazione raggiunto f_t [N/mm²], ottenuto mediante l'equazione:

$$f_t = \frac{F_{max}}{n \cdot b \cdot t} \text{ N/mm}^2$$

Equazione 3

In cui:

- n è il numero di multi-filamenti della fibra di basalto.
- b è la larghezza della fibra.
- t è lo spessore equivalente della fibra, indicato da scheda tecnica del produttore pari a pari a 0.032 mm.
- Valore del modulo elastico E_t [N/mm²] del modulo elastico.

Campione	F_{max} [N]	ϵ_t	f_t [N/mm ²]	E_t [N/mm ²]
BT.01	340.67	0.013	649.72	50438.53
BT.02	950.47	0.019	873.59	46503.49
BT.03	1377.4	0.018	844	47734.24
BT.04	167.43	0.018	894.24	48654.73
Valore medio	708.99	0.017	815.39	48332.75
Deviazione standard	483.23	0.002	97.3	1435.48
Coefficiente di variazione	0.68	0.14	0.12	0.03

Tab. 2-25 Risultati delle prove di trazione diretta sui provini in fibra di basalto.

Parte II: Analisi delle proprietà meccaniche del materiale composito fibrorinforzato

3. Prove di trazione diretta sui coupon

Per la preparazione dei coupon da sottoporre alle prove di trazione diretta [74] dei compositi FRLM costituiti dalla matrice migliore dal punto di vista termico e meccanico e rinforzati con fibre di basalto, si è scelto di utilizzare INT.01, INT.06 e INT.05, ognuno caratterizzato da ottime proprietà igrometriche. In termini di resistenza a compressione, INT.05 ha riportato un valore medio pari 0.89 N/mm^2 , inferiore quindi al limite imposto inizialmente di 1.50 N/mm^2 [31]. Il motivo per cui si è scelto di analizzare INT.05 è dovuto alla presenza nella miscela di sughero e alla volontà di voler progettare il mix design della matrice per il nuovo composito FRLM con l'aggiunta di puro sughero in granuli. Questo materiale, infatti, come verrà descritto accuratamente nella terza parte, è l'aggregato naturale che, se additivato a malte NHL, presenta i migliori risultati in termini di miglioramento delle proprietà termiche e delle capacità igrometriche in generale, senza ridurre drasticamente i valori di resistenza meccanica.



Fig. 3.1 Fasi di preparazione dei coupon di prova.

I provini sono stati realizzati mediante l'utilizzo di casseforme in legno appositamente progettate e costruite, in modo da facilitare l'applicazione degli strati dei termointonaci e del posizionamento della fibra di rinforzo (Fig. 3.1).

Il primo strato di getto ha uno spessore pari a 5 mm, su cui è stata applicata la rete in fibra di basalto costituita da quattro multi-filamenti longitudinali, e a seguire il secondo strato di matrice, per uno spessore totale pari a 10 mm. I provini sono stati lasciati maturare per 28 giorni a temperatura ambiente, dopodiché sono stati estratti dalle casseforme.

Alle estremità di ogni coupon sono state applicate delle piastre in alluminio (tabs) di dimensione $75\text{mm} \times 120\text{mm}$ mediante adesivo epossidico bicomponente, per evitare il danneggiamento delle zone di afferraggio dei campioni (Fig. 3.2)a.



Fig. 3.2 Applicazione delle tabs e ancoraggio dei coupon alle piastre metalliche.

Le estremità dei coupon sono state ancorate a due piastre metalliche di dimensione $150 \times 170 \times 80 \text{mm}^3$ mediante tre bulloni per lato e il provino è stato posto sul macchinario di prova mediante le due cerniere metalliche poste all'estremità delle piastre, su cui sono stati fissati due profilati a sezione a L per il posizionamento dei trasduttori di spostamento, nominati displacement trasducer 1 e displacer trasducer 2, situati, rispettivamente, sulla parte superiore della piastra in basso e sulla parte inferiore della piastra collocata in alto (Fig. 3.3), posti a una distanza tra loro pari a 260 mm. La misurazione degli spostamenti è effettuata con il misuratore a contatto dei trasduttori, capace di rilevare le piccole deformazione che si verificano durante la prova.

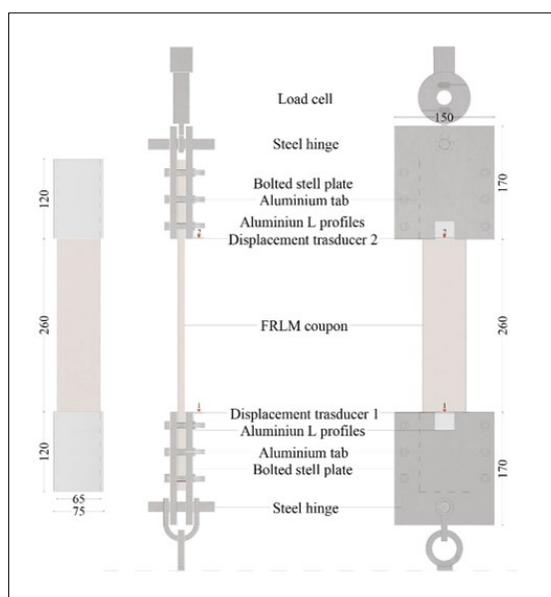


Fig. 3.3 Schema di preparazione del set-up di prova dei coupon [87].

Le prove di trazione diretta sono state eseguite su un totale di diciotto provini, sei per ogni tipologia di matrice selezionata, di dimensioni $500 \times 65 \times 10 \text{ mm}^3$, in particolare:

- N. 6 coupon con INT.01 rinforzato con la rete in fibra di basalto, nominati INT.01-C1-6.
- N.6 coupon con INT.05, rinforzati con la rete in fibra di basalto, nominati INT.05-C1-6.
- N.6 coupon con INT.06, rinforzati con la rete in fibra di basalto, nominati INT.06-C1-6.

I test sono stati eseguiti mediante macchina di prova universale INSTRON modello 5590- 315 HVL serie SATECTM (Fig. 3.4), dotata di cella di carico da 600 kN.

Il carico di trazione diretta è stato applicato all'estremità superiore del coupon, mediante una cerniera metallica inserita nei due fori posizionati alle estremità superiore delle piastre metalliche di ammortamento.

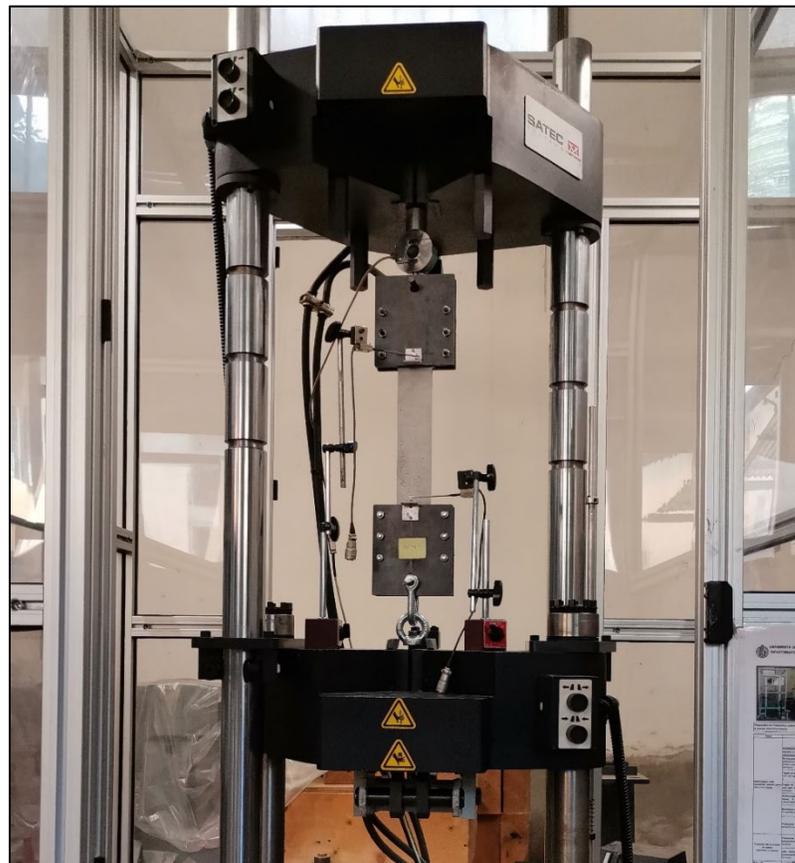


Fig. 3.4 Apparato di prova per l'esecuzione dei test.

3.1. Analisi dei risultati delle prove di trazione diretta sui coupon

Le prove di trazione diretta sui coupon sono state svolte seguendo le specifiche dettate dalla ASTM D3039/D3039M [74].

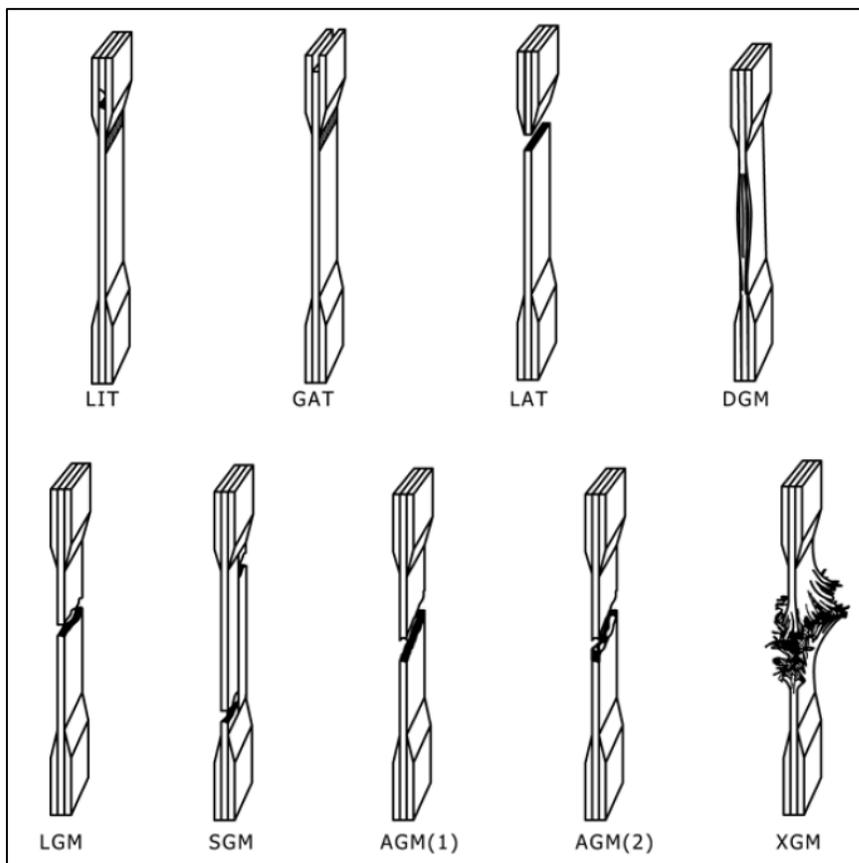


Fig. 3.5 Modalità di rottura con nomenclatura dei rispettivi codici, in accordo alle ASTM D3039/D3039M [74].

Modalità di rottura	Cod.	Superficie di rottura	Cod.	Posizione della rottura	Cod.
Angolare	A	All'interno della tab	I	Inferiormente	B
Delaminazione del bordo	D	In prossimità della tab	A	Superiormente	T
Rottura delle tabs	G	Nel baricentro	G	A sinistra	L
Laterale	L			A destra	R
Divisione netta	S			In mezzera	M
Esplosione	X				

Tab. 3-1 Codici delle tipiche modalità di rottura che si verificano durante un test di trazione diretta su materiale composito.

In Fig. 3.5 sono riportate le tipiche modalità di rottura che si verificano durante le prove di trazione diretta su materiali compositi, ognuna seguita da un codice specifico, in cui la prima lettera indica il tipo di rottura avvenuto, la seconda la porzione di superficie in cui si è verificata la crisi e la terza la posizione della rottura, come indicato in Tab. 3-1.

Il grafico in Fig. 3.6 rappresenta il tipico legame stress-strain di un sistema FRCM in una prova di trazione mono-assiale. La curva descrive una polilinea costituita da tre rami consecutivi, corrispondenti allo stato del campione non fessurato (Stadio A), allo stato in fase di fessurazione (Stadio B) e, infine, allo stato fessurato (Stadio C).

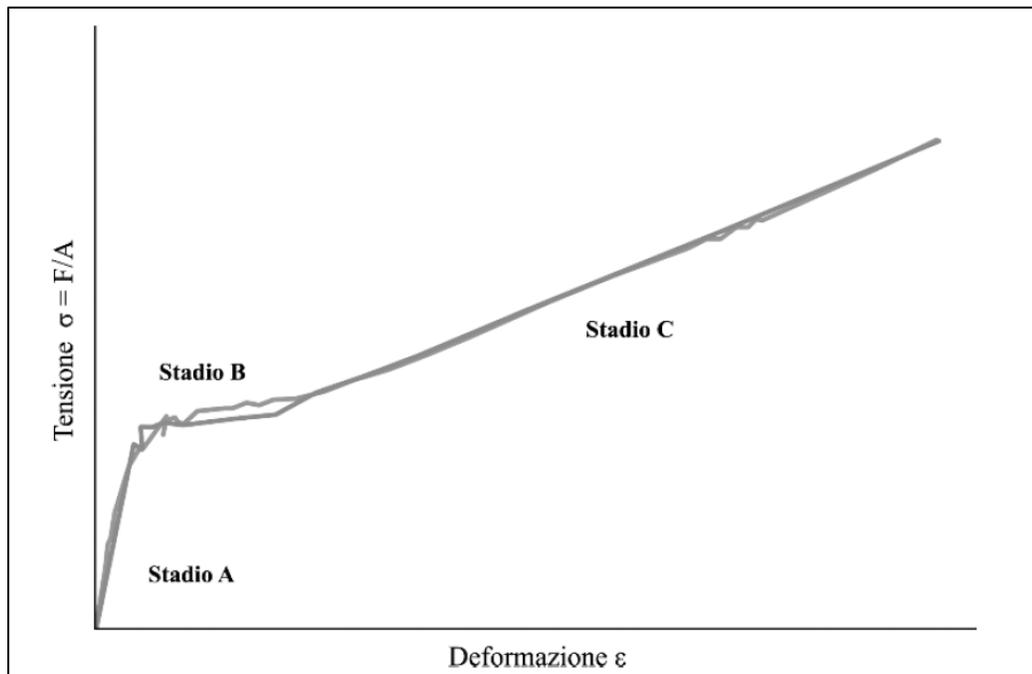


Fig. 3.6 Legame costitutivo tipo a trazione uniassiale di un provino di FRCM [95].

Secondo quanto riportato nelle ASTM D3039/D3039M [74] e nelle AC343 (ultima edizione nel dicembre 2022) [96] per ogni prova effettuata, sono stati valutati i seguenti parametri:

- f_{tu} , vale a dire la tensione massima a trazione del coupon [N/mm^2], calcolata mediante l'equazione:

$$f_{tu} = \frac{P_{max}}{A} [N/mm^2] [74]$$

Equazione 4

In cui:

- P_{max} , il carico massimo registrato durante la prova [N]
 - A , che rappresenta l'area della sezione trasversale del provino della sola fibra di rinforzo [96], pari a 2.08 mm^2 , calcolata come rapporto tra lo spessore equivalente della fibra (0.032 mm) e la larghezza del provino (65 mm).
-
- ϵ_{tu} , il valore di deformazione ottenuto dai dati registrati dai misuratori a contatto dei due trasduttori.
 - E_f modulo elastico del composito lesionato, valutato mediante l'individuazione dei punti corrispondenti al 90% e al 60% del valore di tensione massima f_{tu} [96], calcolato con la seguente equazione:

$$E_f = (0.90 f_{tu} - 0.60 f_{tu}) / (0.90 \epsilon_{tu} - 0.60 \epsilon_{tu})$$

Equazione 5 [96]

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove a trazione diretta eseguite sui campioni di FRLM costituiti dalle matrici INT.01, INT.05 e INT.06, rinforzate dalla fibra di basalto. Per ogni test sono riportate le immagini fronte-retro dei coupon dopo la prova, i grafici- stress strain (con i valori di tensione di trazione [N/mm^2] sulle ordinate e i valori di deformazione sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti, con l'aggiunta del parametro l_t , vale a dire la distanza tra i due trasduttori di spostamento pari a 260 mm . I provini che sono stati sottoposti a test di compressione sono indicati con il codice dell'intonaco testato, seguito dai codici C1-6, ad indicare i sei test di trazione diretta eseguiti su ogni coupon di prova.

Risultati sperimentali delle prove di trazione diretta su INT.01-C

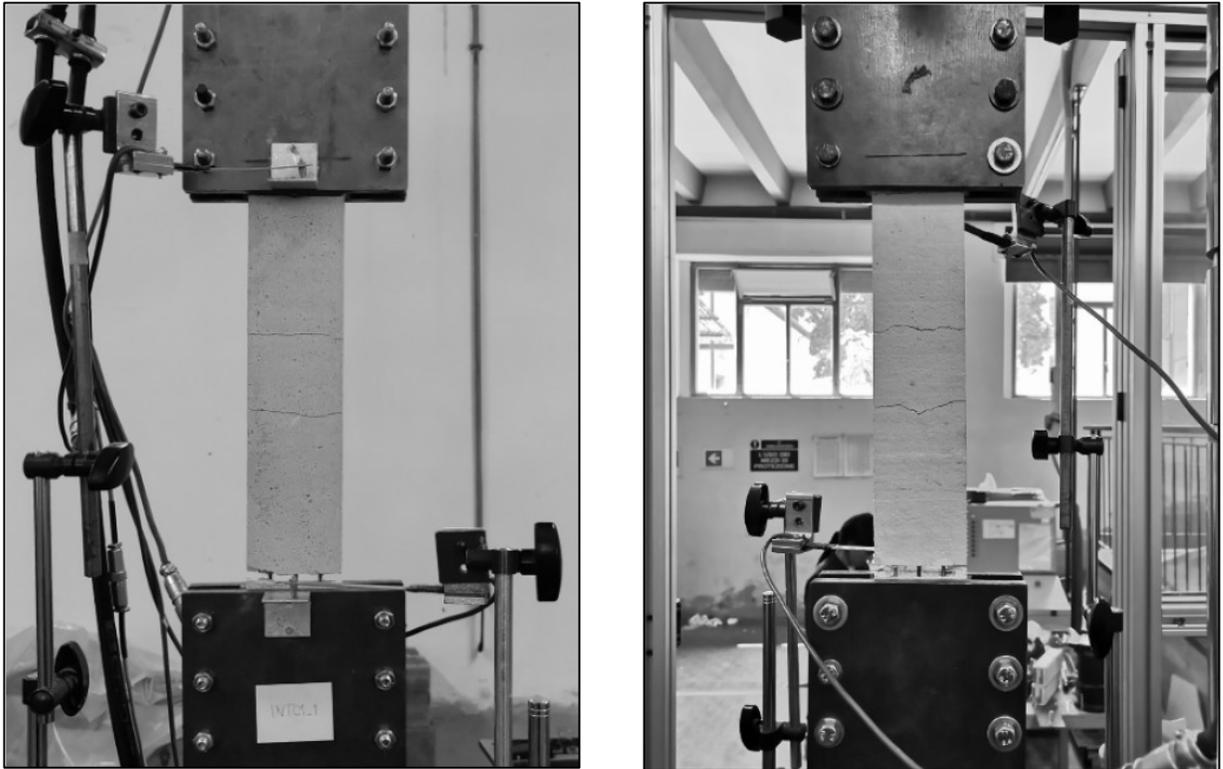


Fig. 3.7 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C1.

Dopo una prima fase di assestamento, INT.01-C1 ha presentato una lesione trasversale nella parte centrale per una tensione di 239 N/mm^2 causando la prima perdita di carico. Una seconda lesione centrale si è presentata a un valore di tensione pari a 369 N/mm^2 , registrando un'ulteriore perdita di carico, che ha comportato la prima lesione sulla superficie opposta). Il carico massimo è risultato pari a 642 N , caratterizzato da una tensione di 387 N/mm^2 e una deformazione pari a $0,013$, causando l'apertura di una lesione in prossimità della tabs inferiori e quindi una perdita di tensione fino a 306 N/mm^2 e un'ulteriore lesione nella parte centrale, con una ripresa di carico fino a 340 N/mm^2 . Il quadro fessurativo si è evoluto con la formazione di una lesione in prossimità delle tabs superiori e l'aumento della fessurazione inferiore, fino a rendere visibili le fibre in trazione. Il coupon ha mostrato un comportamento duttile con una costante leggera perdita di carico che ha portato alla formazione di una lesione poco profonda nella porzione inferiore, fino all'interruzione della prova, avvenuta al 60% del valore di picco del carico massimo.

Secondo lo schema riportato nelle ASTM D3039/D3039M [74], rappresentato in Fig. 3.5, il provino è stato soggetto a una tipologia di rottura del tipo "SAG", caratterizzata da una divisione netta della matrice in prossimità della tab inferiore.



Fig. 3.8 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C2.

In INT.01-C2 la prima lesione si è manifestata a una tensione pari a 165 N/mm^2 nella parte bassa del provino, tra l'estremità inferiore delle tabs e la parte centrale del coupon, seguita da una successiva perdita di carico. Dopo una breve fase di ripresa, una nuova lesione si è sviluppata nella parte di ancoraggio superiore, causando il distacco della matrice dell'estremità delle tabs e un'ulteriore perdita di carico, associata alle lesioni avvenute nella parte inferiore di ancoraggio. Dopo questa fase, il quadro fessurativo è rimasto stabile e il carico è aumentato fino al raggiungimento della massima tensione pari a 432 N/mm^2 . Un'ulteriore lesione passante per il centro del coupon ha causato un'ulteriore perdita di carico, causando l'ultima lesione tra il centro del provino e la zona di ancoraggio superiore. Il test è stato terminato prima che si verificasse la crisi della fibra di rinforzo, a circa il 50% del valore della tensione massima.

In accordo alle ASTM D3039/D3039M [74], il coupon ha presentato una tipologia di rottura di tipo "SAT" (Fig. 3.5), mostrando una divisione netta presso l'estremità superiore delle tabs.



Fig. 3.9 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C3.

INT.01-C3 è stata caratterizzata da una prima fase approssimativamente lineare fino al raggiungimento di un valore di tensione pari a 120 N/mm^2 , interrotta da un forte aumento del carico che ha causato la formazione della prima lesione, localizzata nella parte inferiore alla zona baricentrica del coupon. Dopo la successiva perdita di carico, è stato registrato un valore della tensione di picco, pari a 461 N/mm^2 alla corrispondente deformazione di 0.0013 e si è verificata una lesione in corrispondenza della zona di ancoraggio superiore. La successiva perdita e ripresa del carico hanno provocato l'allargamento delle lesioni e l'apertura delle lesioni presso la zona inferiore di ancoraggio, fino a mostrare la fibra di rinforzo in trazione. La prova è stata interrotta quando si è raggiunto il 60% del massimo valore di tensione registrato.

Secondo quanto riportato nello schema in Fig. 3.5 [74], il provino è stato soggetto a una tipologia di rottura del tipo "LAT", caratterizzata da una divisione laterale della matrice nella parte inferiore in prossimità delle tabs.



Fig. 3.10 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C4.

Il provino INT.01-C4 ha presentato una tipologia di rottura del tipo LAB, laterale localizzata inferiormente presso le zone di ancoraggio del provino.

La prova effettuata su INT.01-C4 ha presentato un comportamento approssimativamente lineare per i valori di tensione compresi tra i 100 e i 280 N/mm². Dopo il primo picco registrato a 290 N/mm², di è manifestata la prima lesione, con conseguente ripresa di carico, fino al raggiungimento del massimo valore di trazione, pari a 291 N/mm², presentando un'ulteriore lesione nella di ancoraggio superiore. Dopo la frattura, la curva ha presentato una perdita di carico, per recuperare successivamente fino a circa 290 N/mm². A questo punto, si sono aperte nuove fessure presso le quattro zone di ancoraggio, che si sono allargate nella fase finale di prova, interrotta al raggiungimento del 50% del carico massimo.



Fig. 3.11 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C5.

Prima dell'inizio del test, si è notata una rottura nella prossimità inferiore del provino, che si è diffusa dopo il raggiungimento di una tensione pari circa 370 N/mm^2 , che ha causato l'apertura di una lesione in mezzeria del coupon.

Dopo una fase di perdita di carico, ha inizio una fase approssimativamente lineare fino al raggiungimento della tensione di picco pari a 229 N/mm^2 , a cui segue l'apertura di una lesione passante per la zona di ancoraggio inferiore, causando una perdita del 30% del carico massimo. Dopo una breve fase di recupero, l'apertura di lesione in prossimità della zona di ancoraggio superiore ha provocato un'ulteriore perdita di carico. La prova è stata interrotta quando si è raggiunto il 50% del valore di tensione massima raggiunta.



Fig. 3.12 Tipologia di rottura del coupon INT.01-C6.

Analogamente al coupon INT.01-C5, anche in questo caso si sono osservate lesioni presenti sul provino, localizzate nei pressi delle zone di ancoraggio superiori e inferiori. Durante la prova, dopo una fase approssimativamente lineare, a un valore di tensione pari a circa 170 N/mm^2 si è manifestata una lesione presso la zona di ancoraggio inferiore. Raggiunto il picco di tensione, pari a 231 N/mm^2 , un'ulteriore lesione diagonale è apparsa nella zona di ancoraggio superiore. La ripresa del carico ha provocato la comparsa di due lesioni nelle zone di contatto con le tabs inferiori, lasciando scoperta la rete in fibra di basalto. Dopo una modesta fase di deformazione plastica, la prova è stata interrotta a un valore pari al 60% del carico di picco.

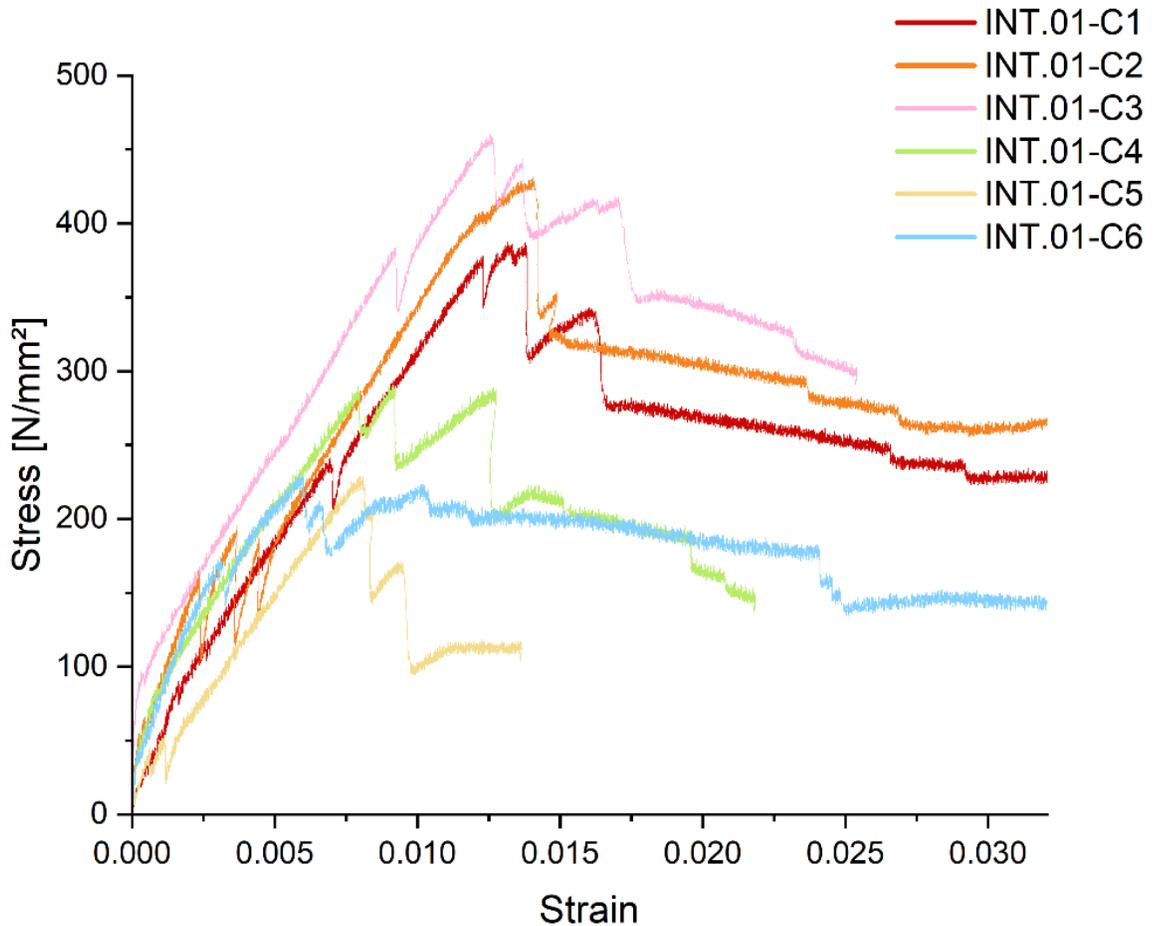


Fig. 3.13 Sovrapposizione dei grafici tensione- deformazione per INT.01-C.

La sovrapposizione dei grafici tensione- deformazione può essere definito da due tipologie di curve differenti. I coupon INT.01-C1, C2 e C3 raggiungono valori medi di tensione a circa 430 N/mm², mentre i provini INT.01-C4, C5 e C6 son caratterizzati da un valore di tensione nettamente inferiore, pari a circa 250 N/mm². Dopo il raggiungimento della massima tensione, tutti i provini mostrano un andamento analogo, fatta eccezione per la curva INT.01-C6, in cui, dopo una fase di perdite e recuperi di carico, si ha un andamento costante di tensione fino alla fine della prova, pari al valore della tensione massima.

Campione	Lunghezza di ancoraggio lt [mm]	Carico massimo Fmax [N]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione etu	Modulo elastico del provino lesionato Ef [N/mm ²]
INT.01-C1	259.00	643.00	387.00	0.010	25310.00
INT.01-C2	261.00	899.00	432.00	0.010	30995.00
INT.01-C3	261.00	958.00	461.00	0.010	28167.00
INT.01-C4	261.00	605.00	291.00	0.009	26436.00
INT.01-C5	262.00	476.00	229.00	0.008	27065.00
INT.01-C6	262.00	480.00	231.00	0.006	26194.00
Valore medio	261.00	676.83	338.50	0.009	27361.17
Deviazione standar	1.10	206.78	101.89	0.002	2018.28
Coefficiente di variazione	0.00	0.31	0.30	0.181	0.07

Tab. 3-2 Risultati delle prove di trazione diretta su INT.01-C.

Risultati sperimentali delle prove di trazione diretta su INT.05-C

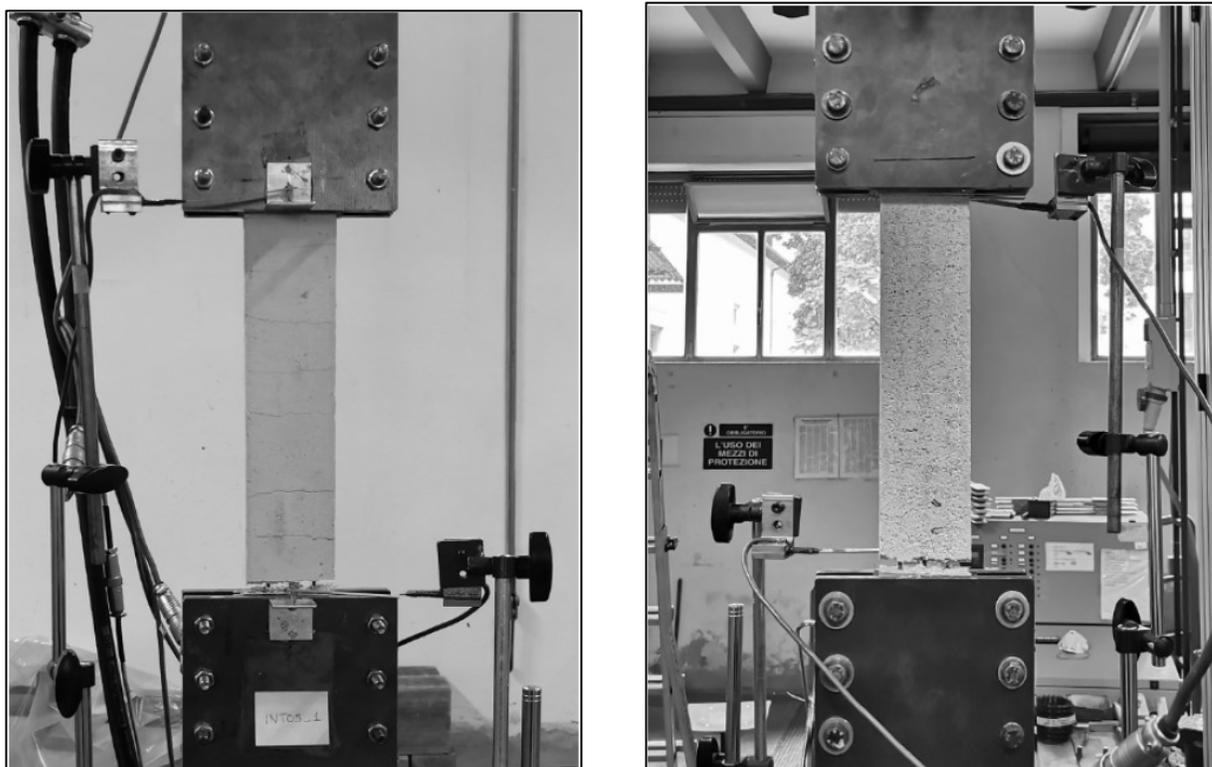


Fig. 3.14 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C1.

Dopo una prima fase di assestamento, caratterizzata da perdite e riprese di carico causate dall'apertura di lesioni nella parte centrale del coupon, la curva ha presentato un andamento iniziale approssimativamente lineare, che ha portato al raggiungimento della tensione di picco pari a 286 N/mm^2 , per un carico di 596 N e una deformazione di $0,009$; a questo punto si è manifestata una lesione in prossimità della zona di ancoraggio inferiore, che ha provocato una perdita di carico del 20%.

La tensione è risalita fino a 248 N/mm^2 fin quando, a causa dalla fessurazione di più parti del provino in corrispondenza delle zone di ancoraggio, si è registrata una nuova perdita di carico, seguita da fase di stabilità che ha portato all'ampliamento del quadro fessurativo nella parte inferiore, con conseguente visibilità delle fibre.

La prova è proseguita a carico costante, interrotta per un valore di tensione pari al 60% di quella registrata in fase di picco.



Fig. 3.15 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C2.

Il provino ha presentato una lesione diagonale (0) nella parte centrale prima di effettuare il test. La prima parte della prova è stata caratterizzata da un assetamento succeduto da uno stadio approssimativamente lineare. Segue la fase di picco registrata per un carico di 570 N e una tensione di 274 N/mm² con una deformazione di 0,009 durante la quale si sono aperte le prime lesioni (1-2) alle estremità opposte del provino. Dopo la perdita di carico correlata ne è stata registrata un'altra a seguito del manifestarsi di due lievi lesioni (3-4) nella parte centrale. Una nuova fase di crescita della tensione ha portato a una nuova caduta causata dall'apertura sulla parte opposta del provino di due lesioni (5-6) alle estremità già presenti dopo il raggiungimento del carico di picco. Da qui ha inizio una fase di stabilità durante la quale la lesione inferiore si è allargata fino a rendere visibile le fibre e si sono aperte altre due fessure (7-8) nella parte centrale del provino. La prova è stata fermata per un valore della tensione inferiore al 50% di quella raggiunta in fase di picco.



Fig. 3.16 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C3.

Prima dell'inizio della prova, si sono osservate due lesioni nella parte centrale del coupon. Durante la prima fase di assestamento, si sono aperte altre lesioni (1) nella parte centrale e nella parte superiore del provino (2-3). Raggiunto il carico di picco per 675 N per una tensione di 325 N/mm² e una deformazione di 0,011, si sono manifestate le lesioni (2-3-4-5) in prossimità delle zone di ancoraggio inferiore e superiore. Di conseguenza si è assistito a una rapida perdita di carico, a una breve ripresa e a un'altra perdita di carico fino al 50% della forza di picco dovuta all'apertura di altre lesioni (6-7-8-9-10) nella parte centrale del coupon. Ha avuto inizio successivamente, per una tensione di 141 N/mm² e una deformazione di 0,012, una fase di stabilità durante la quale si è amplificata la dimensione delle lesioni agli estremi e si è verificato il distaccamento di una parte dello strato di malta nella parte inferiore del campione. La prova è stata interrotta per un valore del carico inferiore al 50% del valore del carico di picco.



Fig. 3.17 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C4.

Nella prima parte della prova, l'apertura di una fessura si è manifestata all'inizio del tratto approssimativamente lineare, nella parte inferiore del coupon, seguita da una lesione passante nella parte centrale a una tensione di tensione di 380 N/mm^2 . Dopo una perdita di carico, il provino raggiunge un valore di tensione di 371 N/mm^2 , provocando lesioni all'estremo superiore che hanno portato a un decremento del carico massimo al 10%. Da questo punto, la curva stress-strain presenta una fase caratterizzata da una maggior duttilità, causando l'apertura di lievi lesioni nella parte centrale del coupon e l'allargamento della fessurazione nella parte superiore del provino in corrispondenza della zona di ancoraggio, mostrando la fibra di rinforzo da uno dei due lati. La prova è stata terminata a un valore pari al 30% del carico di picco.



Fig. 3.18 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C5.

La prima parte della prova è stata definita da una curva stress-strain con andamento costante, approssimativamente lineare, in cui si è manifestata l'apertura di tre lievi lesioni nella parte centrale del provino, fino al raggiungimento del carico di picco pari a 826 N, corrispondente al valore di tensione massima di 397 N/mm^2 . Dopo questo punto, si sono presentate delle lesioni su entrambi gli estremi di ancoraggio, causando una repentina perdita di carico pari al 50% e il manifestarsi di ulteriori lesioni presso la mezzeria del provino. A questo punto ha avuto inizio una fase di mantenimento di carico con una tensione costante di circa 200 N/mm^2 fino alla fine della prova.



Fig. 3.19 Tipologia di rottura del coupon INT.05-C6.

Prima dell'inizio della prova è stata segnalata una lesione nella parte inferiore del provino, che si è allargata durante la prima fase di assestamento del carico, generando alcune lesioni nella parte centrale del coupon. Il carico di picco è stato registrato pari a 683 N, relativo a un valore di tensione di 328 N/mm², che ha provocato le lesioni nella parte corrispondente alla zona di ancoraggio superiore. Dalla ripresa di carico, si apre una nuova lesione nella parte centrale a una tensione pari a 308 N/mm², dopo di che si presenta a una perdita di carico pari al 15% del valore di picco e a una nuova ripresa per un valore di tensione pari a 270 N/mm². A questo punto si sono manifestate nuove brevi lesioni nella parte centrale e la tensione si è attestata su un valore pari al 60% del valore di picco. Successivamente il quadro fessurativo si è stabilizzato, con l'allargamento della sola lesione all'estremo inferiore del provino che ha portato al distaccamento di una parte della malta e alla visibilità della fibra di basalto. La prova è stata interrotta per un carico pari al 50% del picco massimo raggiunto.

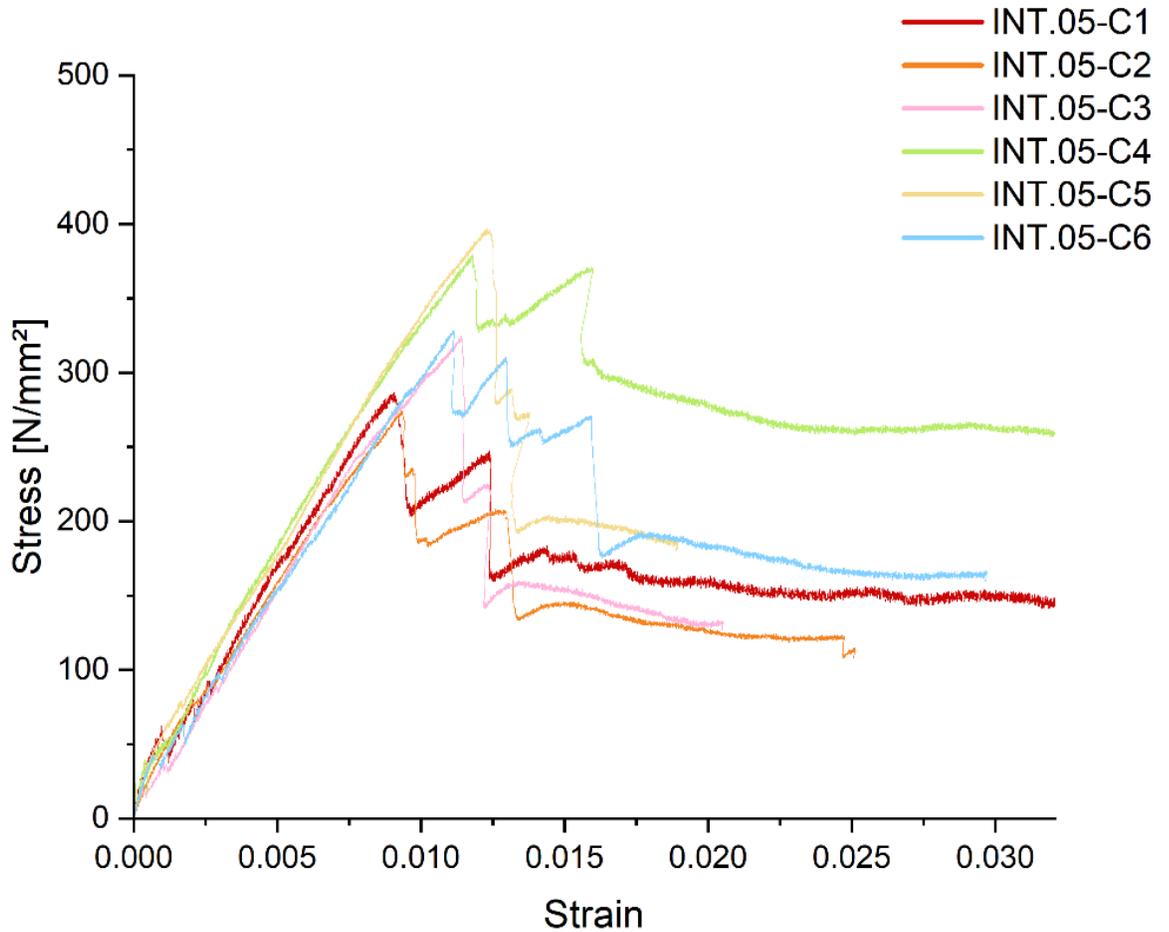


Fig. 3.20 Sovrapposizione dei grafici tensione- deformazione per INT.05-C.

Per quanto riguarda le prove effettuate su INT.05-C, è importante osservare che i quattro coupon INT.05-C2, C4, C5 e C6 presentavano lesioni prima dell'inizio del test, causate dagli spostamenti dei provini in laboratorio durante a fase di montaggio del set-up di prova. Le curve stress strain che presentano andamento analogo sono, in ordine crescente, INT.05-C1 e C2, con un valore medio di tensione pari a circa 280 N/mm², INT.05-C3 e C5, e INT.05-C4 e C6, questi ultimi caratterizzati da valori di tensione pressoché differenti. Inoltre, si nota che per i primi due test, il raggiungimento della tensione massima è seguita da un picco intermedio che precede la fase costante, comportamento simile ai test effettuati su INT.05-C4 e C6. La terza e la quinta prova, invece, presentano la fase di carico costante al raggiungimento di circa il 50% del valore di tensione massima pervenuta.

Campione	Lunghezza di ancoraggio lt [mm]	Carico massimo Fmax [N]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione etu	Modulo elastico del provino lesionato Ef [N/mm ²]
INT.05-C1	260.00	596.00	286.00	0.009	29330.00
INT.05-C2	260.00	570.00	274.00	0.009	27647.00
INT.05-C3	260.00	676.00	325.00	0.011	26087.00
INT.05-C4	260.00	790.00	380.00	0.012	28882.00
INT.05-C5	261.00	826.00	397.00	0.012	31709.00
INT.05-C6	260.00	683.00	328.00	0.011	28948.00
Valore medio	260.17	690.17	331.67	0.011	28767.17
Deviazione standar	0.41	101.96	49.14	0.001	1868.43
Coefficiente di variazione	0.00	0.15	0.15	0.128	0.06

Tab. 3-3 Risultati delle prove di trazione diretta su INT.05-C.

Risultati sperimentali delle prove di trazione diretta su INT.05-C



Fig. 3.21 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C1.

Prima dell'inizio della prova sono state segnalate cinque lesioni, localizzate nella parte inferiore e centrale del provino. Il test ha dimostrato come, nonostante la presenza di un quadro fessurativo già avviato, dopo una fase iniziale approssimativamente lineare, il coupon abbia sopportato una prima tensione pari a 304 N/mm^2 , che ha causato la formazione di una lesione passante nella parte centrale. Dopo una ripresa di carico, è stato raggiunto il carico di picco per un valore di 681 N e una tensione di 327 N/mm^2 , al cui è seguita l'apertura di una lesione nella parte superiore del campione e di due lesioni nella parte inferiore.

Si ha nuovamente una perdita di carico e una ripresa fino a un valore di tensione pari a 299 N/mm^2 per cui si sono aperte nuove fessurazioni nella parte superiore, nella parte centrale e dei pressi dell'ancoraggio superiore. Con la diminuzione del carico fino a un 60% del valore di picco ha inizio una fase di allargamento del quadro fessurativo, seguita dall'interruzione della prova per un valore del carico pari al 50% del corrispondente valore di picco.



Fig. 3.22 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C2.

Dopo la fase iniziale di assestamento il coupon ha manifestato le prime lesioni in corrispondenza degli estremi superiori e inferiori, registrando una fase approssimativamente lineare fino a un valore di tensione pari a 350 N/mm^2 .

Il carico di picco è stato raggiunto per una forza di 881 N corrispondente a una tensione di 424 N/mm^2 . A questo punto le due lesioni agli estremi si sono presentate anche sul lato opposto e si è manifestata l'apertura di una lesione diagonale nella parte centrale inferiore. La tensione ha subito una diminuzione fino al raggiungimento del valore di 362 N/mm^2 , per poi incrementare nuovamente fino a 408 N/mm^2 . In questa fase si sono manifestate due lesioni in corrispondenza della precedente frattura diagonale e si è verificata una diminuzione del carico, in cui le lesioni hanno subito un ampliamento delle loro dimensioni. Nella parte superiore del provino, in corrispondenza della zona di ancoraggio, si sono rese visibili le fibre di basalto. La prova è stata interrotta per un valore del carico pari al 60% di quello massimo registrato.



Fig. 3.23 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C3.

Dopo una prima fase di assestamento, la curva stress-strain è definita da un tratto approssimativamente lineare, fino al raggiungimento di una tensione pari a 204 N/mm^2 , che ha provocato una lesione passante nella parte inferiore del provino in corrispondenza della zona di ancoraggio. Durante la fase successiva il carico è stato recuperato fino al raggiungimento del valore di picco per pari a 795 N e tensione di 338 N/mm^2 , con deformazione di 0.018 . A questo punto si sono aperte le due lesioni in corrispondenza dell'ancoraggio superiore e, dopo una breve fase di recupero di carico, si è assistito a una nuova perdita di resistenza con l'apertura di una lesione centrale, visibile su entrambi i lati del provino (Fig. 3.23). Da questo punto in poi il carico è diminuito gradualmente e si sono ampliate le dimensioni delle tre lesioni passanti. In questo caso sia le fratture inferiori che quelle superiori hanno subito una dilatazione tale da rendere visibili le fibre di basalto in trazione. La prova è stata interrotta al raggiungimento del valore di carico pari al 50% del picco.



Fig. 3.24 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C4.

Poco dopo l'inizio della prova, si sono manifestate quattro lesioni nella zona centrale del provino, che hanno causato una leggera perdita di carico. Al termine di una fase approssimativamente lineare, per una tensione di 184 N/mm^2 , si sono presentate altre due fessurazioni in mezzeria del coupon. Le lesioni alle estremità sono invece emerse a seguito del raggiungimento del carico di picco di 735 N per una tensione di 353 N/mm^2 e una deformazione di 0.011 . Dopo una breve perdita di carico è stato segnalato nuovamente un picco per un valore di tensione di 333 N/mm^2 , che ha causato l'apertura di un'ulteriore lesione nella parte centrale. Dopo una nuova perdita e recupero di carico, si sono manifestate due nuove fessure nella parte inferiore del provino. Ciò ha determinato una nuova perdita del carico pari al 30% del valore di picco. Da questo punto in poi, oltre allo sviluppo di nuove lesioni, le fratture presenti in corrispondenza dell'ancoraggio superiore hanno subito un'apertura maggiore che ha permesso la visione della fibra rinforzo tesa. La prova è stata interrotta per valore del carico pari al 50% del carico di picco raggiunto.



Fig. 3.25 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C5.

Prima dell'inizio della prova è stata segnalata una lesione a circa 30 mm dal bordo dell'ancoraggio inferiore, che si è allargata prima dell'inizio del tratto approssimativamente lineare. Al termine di tale fase, per una tensione di 241 N/mm^2 , si è assistito a una prima perdita di carico a seguito dell'apertura di due lesioni nella parte superiore del coupon, a cui è seguita una fase di ripresa e un'ulteriore ricaduta e perdita del 30% del carico acquisito dopo l'apertura di una lesione centrale e di una nella parte inferiore del provino. Il carico di picco è stato raggiunto a un valore pari a pari a 764 N per una tensione di 367 N/mm^2 , causando la formazione di una lesione passante nella parte centrale. Dopo un'ulteriore perdita di carico, il quadro fessurativo si è ampliato con la comparsa di nuove lesioni nella parte inferiore e con l'apertura di una lesione in prossimità della zona di ancoraggio superiore, tale da rendere visibile la fibra di basalto in trazione. La prova è stata interrotta per un valore del carico pari al 60% del valore registrato in fase di picco.



Fig. 3.26 Tipologia di rottura del coupon INT.06-C6.

Dopo una prima fase di assestamento si è subito manifestata una rapida perdita di più del 60% di carico, corrispondente a una tensione pari a 158 N/mm^2 , causata dall'apertura di due lesioni ai due estremi del provino, a cui è seguita una fase approssimativamente lineare di riacquisizione di carico, terminata con una nuova perdita di resistenza dovuta alla formazione di una lesione inferiore e una centrale. Questa lesione è diventata passante contestualmente alla successiva perdita di carico, causata dall'apertura della lesione centrale corrispondente e di una lesione all'esterno superiore. Da questo momento, la curva stress-strain ha presentato una fase di continue perdite e riprese di carico, dovute alla formazione manifestarsi di numerose fessure in mezzeria del coupon.

Il carico massimo viene registrato a un valore di tensione corrispondente pari a 509 N/mm^2 , a seguito della quale si sono aperte una lesione superiore, una longitudinale e una passante. Poco dopo il raggiungimento del carico di picco viene segnalata una drastica perdita di carico del 20%, in cui si presenta un ampliamento del quadro fessurativo, con la dilatazione della lesione centrale e l'apertura di diverse lesioni lungo due terzi del provino. La prova è stata interrotta per una perdita di carico pari al 60% del valore di picco raggiunto.

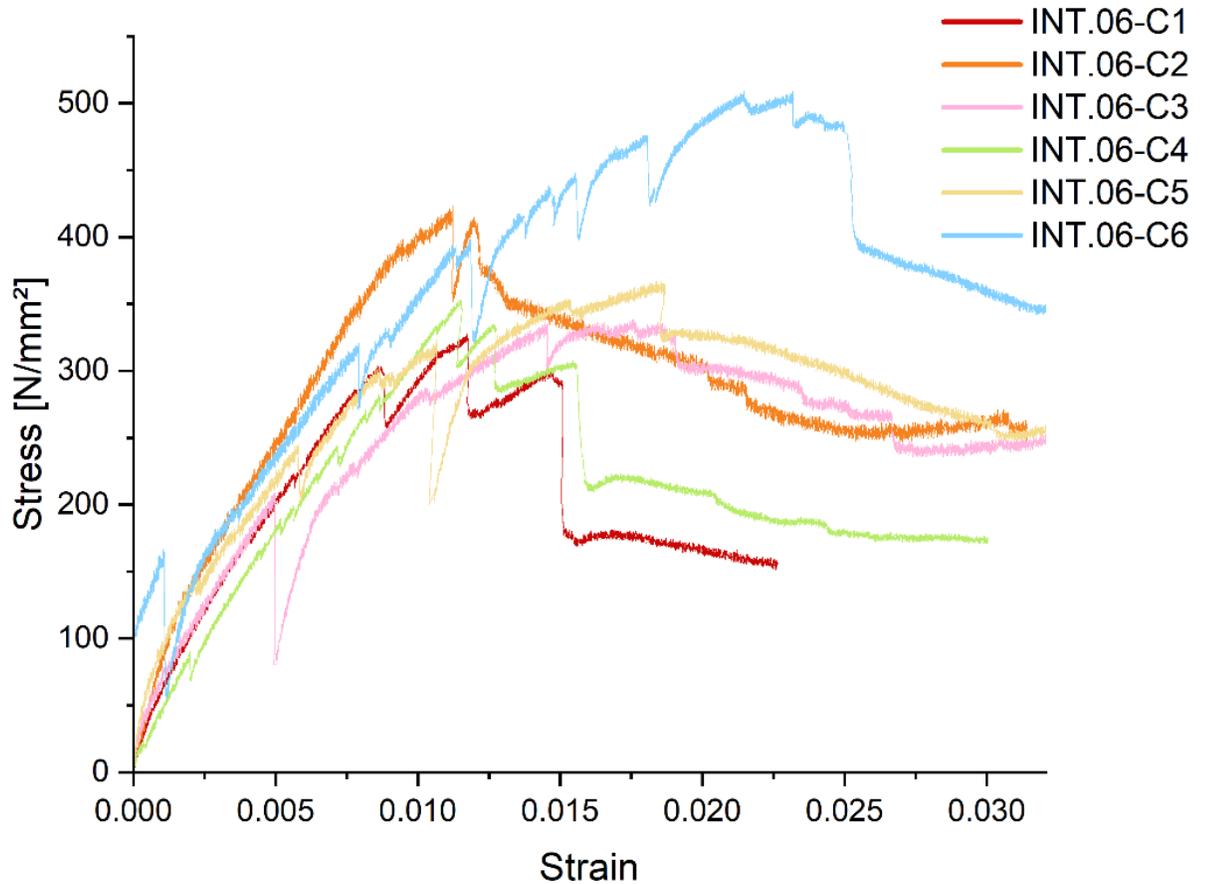


Fig. 3.27 Sovrapposizione dei grafici tensione- deformazione per INT.06-C.

Le curve che presentano andamento e valore massimo di resistenza a trazione sono, in ordine crescente, INT.06-C1 e C4, con un valore medio di tensione pari a circa 340 N/mm², e INT.06-C3 e C5, con una tensione media pari a circa 350 N/mm². La curva derivata prova effettuate sul coupon INT.01-C2 presenta un andamento segnato da due picchi di tensione molto ravvicinati tra di loro, pari a 425 N/mm², seguiti da una perdita costante del carico. Il provino INT.01-C6 è invece caratterizzato da un comportamento anomalo, raggiungendo una tensione massima pari a 509 N/mm², valore molto elevato rispetto a quello degli altri provini.

Campione	Lunghezza di ancoraggio lt [mm]	Carico massimo Fmax [N]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione etu	Modulo elastico del provino lesionato Ef [N/mm ²]
INT.06-C1	260.00	681.00	327.00	0.010	27743.00
INT.06-C2	260.00	881.00	424.00	0.010	34639.00
INT.06-C3	260.00	704.00	338.00	0.020	19181.00
INT.06-C4	260.00	735.00	353.00	0.010	26159.00
INT.06-C5	260.00	764.00	367.00	0.020	15491.00
INT.06-C6	260.00	1059.00	509.00	0.020	16498.00
Valore medio	260.00	804.00	386.33	0.015	23285.17
Deviazione standar	0.00	143.14	69.00	0.005	7492.66
Coefficiente di variazione	0.00	0.18	0.18	0.365	0.32

Tab. 3-4 Risultati delle prove di trazione diretta su INT.0-C.

4. Prove di adesione su elementi in laterizio

La definizione del legame costitutivo tensione-deformazione non definisce in maniera esaustiva il comportamento meccanico del materiale composito FRCM quando applicato su un supporto in muratura. In questi termini, è necessario valutare sperimentalmente le proprietà di adesione interfacciale, in modo da contribuire al miglior trasferimento applicabile delle tensioni tra le superfici di contatto [97].

Vi è pertanto la necessità di testare meccanicamente il distacco dal supporto da rinforzare mediante ulteriori prove appropriate, in relazione alle caratteristiche specifiche del sistema strutturale oggetto di analisi.

Uno degli aspetti più indagati dei compositi FRCM è l'aderenza tra supporto da rinforzare e composito fibrorinforzato, fattore che determina significativamente l'efficacia dell'intervento di recupero. Un'adeguata adesione tra il supporto e il composito è essenziale per permettere il trasferimento delle tensioni dal supporto al materiale composito fibrorinforzato [98]. Tale fenomeno riguarda non solo le proprietà meccaniche e geometriche del sistema, ma anche la compatibilità chimico-fisica tra i materiali componenti e il supporto. In accordo alle CNR-DT 215/2018 [18] Ulteriori problemi sono legati al distacco dell'interfaccia tra supporto e matrice, allo scorrimento della fibra nella matrice o al distacco all'interfaccia tra matrice e fibra, meccanismo consistente nella graduale perdita di aderenza tra le fibre e la matrice, mentre quest'ultima rimane perfettamente aderente al supporto. Altri meccanismi di crisi che possono manifestarsi sono lo scorrimento della fibra dalla matrice, con conseguente fessurazione dello strato di matrice esterno e la rottura a trazione della fibra di rinforzo [18].

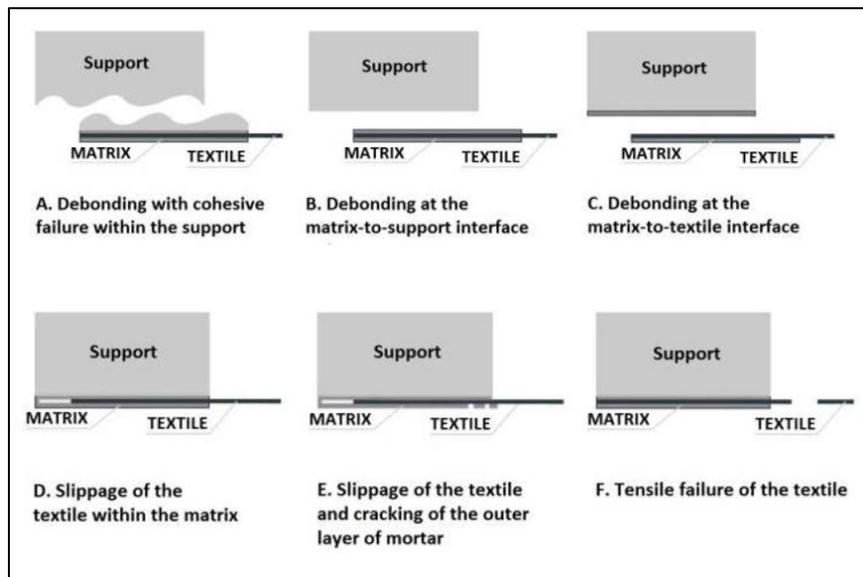


Fig. 4.1 Schema dei più frequenti meccanismi di crisi dei sistemi FRCM [18].

Lo schema di Fig. 4.1 descrive i fenomeni appena elencati, la cui combinazione determina solitamente la crisi del sistema composito FRCM

Per la determinazione delle proprietà di adesione dei materiali compositi fibrorinforzati, le modalità di prove sperimentali, analizzate sia nella letteratura scientifica che nei codici normativi, sono le seguenti:

- Test a flessione (Beam Test), in accordo a quanto specificato nelle ASTM C78/C78M – 22 [99]. Nell'ambito di materiali compositi FRCM applicati su elementi in laterizio [100], si analizza la capacità di adesione, calcolata valutando il momento interno e il momento della sezione in mezzera in funzione del carico massimo.
- Test a taglio singolo (Single-Shear Test) e Test a taglio doppio (Double-Shear Test), che sono le tipologie di prova di strappo a taglio più diffuse, caratterizzate dall'applicazione di strisce di materiale composito su supporti in muratura o in calcestruzzo, rispettivamente su un solo lato (single shear test) o su entrambi i lati del supporto (double shear test). I provini sono costituiti dal composito applicato al supporto, in cui la parte della fibra che costituisce il rinforzo, annegata all'interno della matrice, viene sottoposta a carico di trazione. Tali prove vengono analizzate approfonditamente in [101], [94] e [95]. In particolare, quest'ultimo lavoro di ricerca deriva da un'intensa collaborazione nell'ambito del progetto PRIN “Unified approach for improving structural and thermal response of masonry buildings with optimized sustainable composite materials—ASThRO-Co”, in cui sono stati analizzati i tre materiali compositi costituiti da INT.01, INT.05 E INT.06, rinforzati da fibra di basalto.
- Test a trazione (Pull-Off Test), in accordo alla normativa ASTM C1583/C1583M – 20 [102], tipologia di prova approfonditamente analizzata nel capitolo 13, in cui il provino viene sottoposto a una prova di strappo normale [18].

A seguire, vengono descritte le prove di adesione a taglio mediante single shear test, eseguiti su elementi in laterizio con applicazione dei compositi FRLM con lunghezze di ancoraggio differenziate, nello specifico:

- N.3 provini con INT.01 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm, nominati SST10_INT.01_1-2-3.
- N.3 provini con INT.05 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm, nominati SST10_INT.05_1-2-3.
- N.3 provini con INT.06 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm, nominati SST10_INT.06_1-2-3.
- N.3 provini con INT.01 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 220 mm, nominati SST22_INT.01_1-2-3.
- N.3 provini con INT.05 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 220 mm, nominati SST22_INT.05_1-2-3.
- N.3 provini con INT.06 rinforzato con rete in fibra di basalto, con lunghezza di ancoraggio pari a 220 mm, nominati SST22_INT.06_1-2-3.

I provini sono stati preparati mediante l'utilizzo di casseforme lignee appositamente costruite, al fine di garantire la stesura del prodotto per 10 mm di spessore, caratterizzato da una dimensione pari a $95 \times 100 \text{ mm}^2$ per le prime triplette e $95 \times 220 \text{ mm}^2$ per le seconde.

Una volta bagnate accuratamente le superfici in laterizio per favorire una migliore adesione tra gli elementi, è stato applicato il primo strato di matrice, con uno spessore pari a 5 mm. Di seguito è stata posizionata la rete in fibra di basalto, con dimensioni pari a $90 \times 600 \text{ mm}^2$ e il secondo strato di matrice, fino a raggiungere lo spessore totale di 10 mm. In Fig. 4.2 vengono mostrate le fasi di preparazioni dei provini che, una volta terminato il getto, sono lasciati maturare a temperatura ambiente per 28 giorni, dopodiché sono stati rimossi dalle casseforme. A questo punto si è proceduto con la stesura della resina epossidica sulla parte libera della rete in fibra di basalto, evitando il contatto con la matrice e il laterizio. Dopo il tempo di asciugatura pari a 24 ore, su entrambi i lati della fibra di basalto sono state applicate delle tabs metalliche di dimensione $120 \times 95 \text{ mm}^2$ a una distanza di 200 mm dal bordo della matrice, incollate mediante resina epossidica (Fig. 4.3) e lasciate asciugare per un periodo di cinque giorni (come indicato nella scheda tecnica).



Fig. 4.2 Fase di preparazione dei provini.



Fig. 4.3 Configurazione dei provini dopo la stesura della resina (a sinistra) e l'applicazione delle tabs metalliche (a destra).

Le prove di single shear test sui provini sono state effettuate mediante l'utilizzo di una pressa universale della INSTRON modello 5590- 315 HVL serie SATECTM, dotata di cella di carico da 600 kN. I test si sono eseguiti applicando il carico di trazione alla sola fibra di basalto, valutando le dinamiche di collasso del composito FRLM e il comportamento nei confronti del laterizio, in relazione alla lunghezza di ancoraggio. La parte terminale della fibra rinforzata con le tabs è stata posizionata tra due piastre in acciaio bullonate di dimensione $150 \times 170 \text{ mm}$, e il provino è stato assicurato al macchinario mediante la cerniera metallica inserita nella parte superiore delle piastre (Fig. 4.4). Il supporto in laterizio, di dimensione $250 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$ per tutti i provini, è stato assicurato alla macchina di prova mediante l'utilizzo di due piastre metalliche ancorate alla macchina di prova (Fig. 4.4), garantendo uno spostamento pressoché nullo. Per registrare gli eventuali spostamenti della fibra, sono stati applicati quattro trasduttori di spostamento, i cui misuratori a contatto sono stati posizionati su altrettanti profilati a L di supporto (Fig. 4.4).

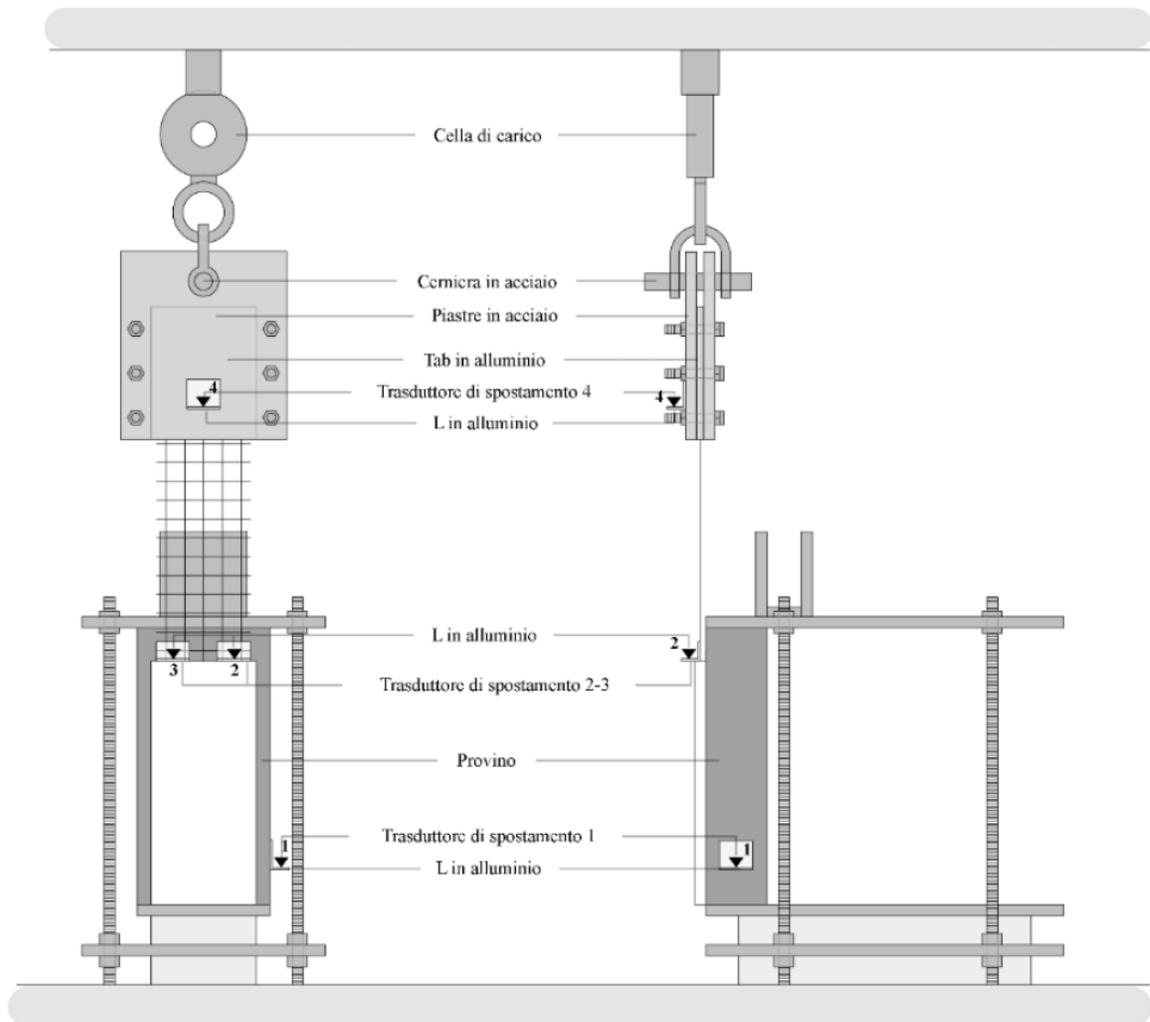


Fig. 4.4 Configurazione del set-up di prova di single shear test [95].

4.1. Analisi dei risultati delle prove di adesione single shear test su elementi in laterizio

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove di single shear test eseguite sui campioni di FRLM costituiti dalle matrici INT.01, INT.05 e INT.06, rinforzate dalla fibra di basalto, applicate su superficie in laterizio.

Per ogni test sono riportate le foto e i relativi schemi, in cui sono indicate le lesioni verificatesi dopo la prova, i grafici- load-displacement (con i valori di carico [N] sulle ordinate e i valori di spostamento [mm] sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti, in termini di:

- F_{max} carico massimo [N]
- δ_{max} spostamento corrispondente al carico massimo [mm]
- f_{max} tensione di adesione massima di trazione nel composito [N/mm²] valutata mediante l'equazione:

$$f_{max} = F_{max} / (l \times s)$$

Equazione 6

In cui:

- l è la larghezza del provino, pari a 95 mm
- s è lo spessore equivalente della fibra di basalto, pari a 0.032 mm
- ε_{max} deformazione corrispondente alla massima tensione di trazione, valutata mediante la relazione:

$$\varepsilon_{max} = \delta_{max} / l_f$$

Equazione 7

In cui:

- l_f è la lunghezza libera della rete in fibra di basalto [mm]

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST10_INT.01

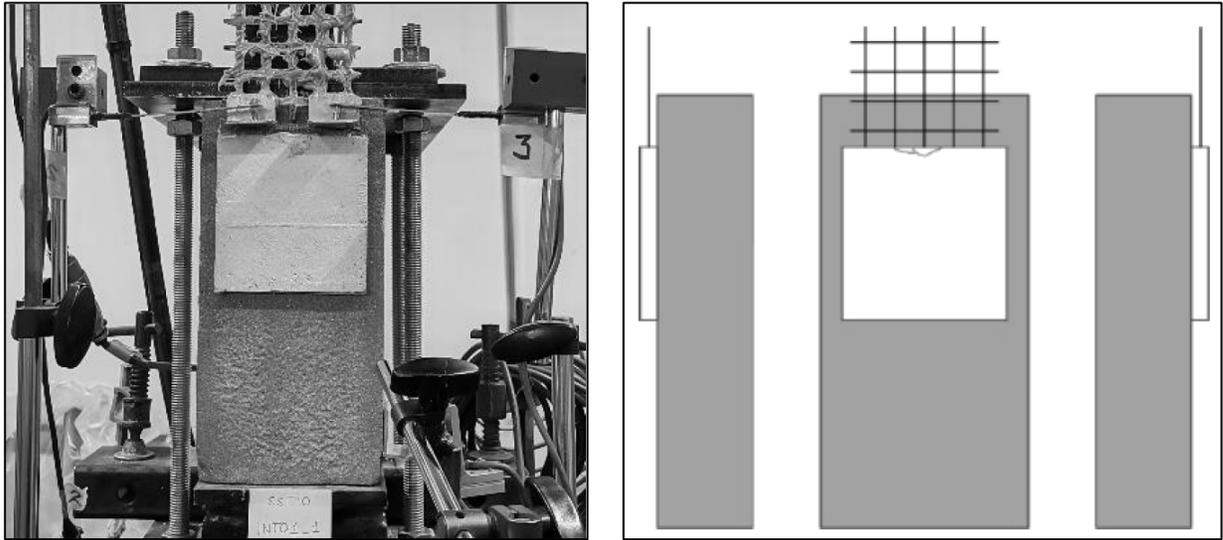


Fig. 4.5 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT01_1 [95].

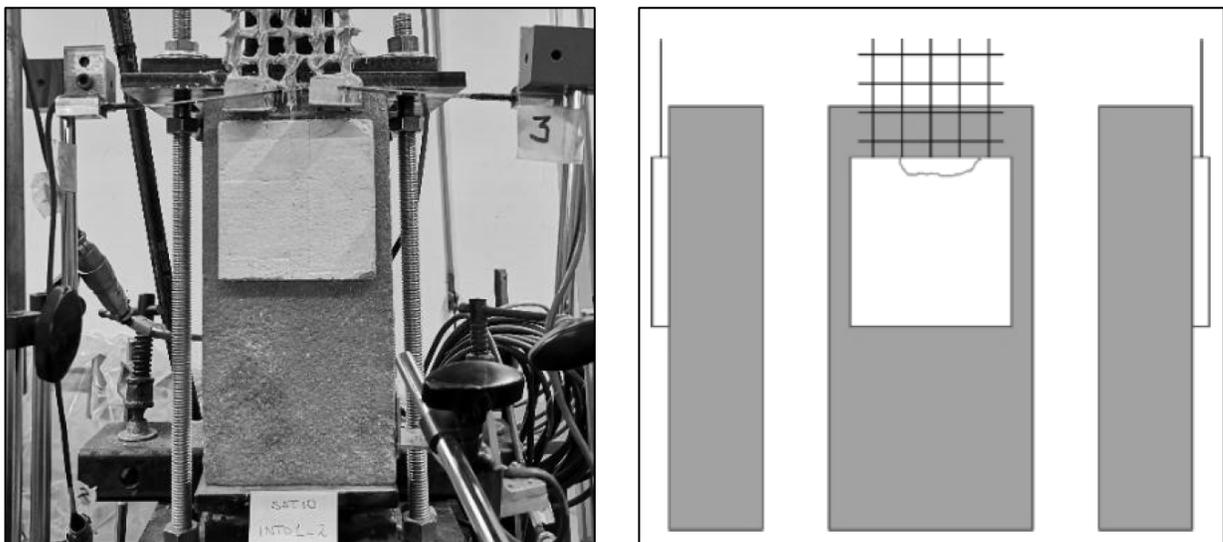


Fig. 4.6 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT01_2 [95].

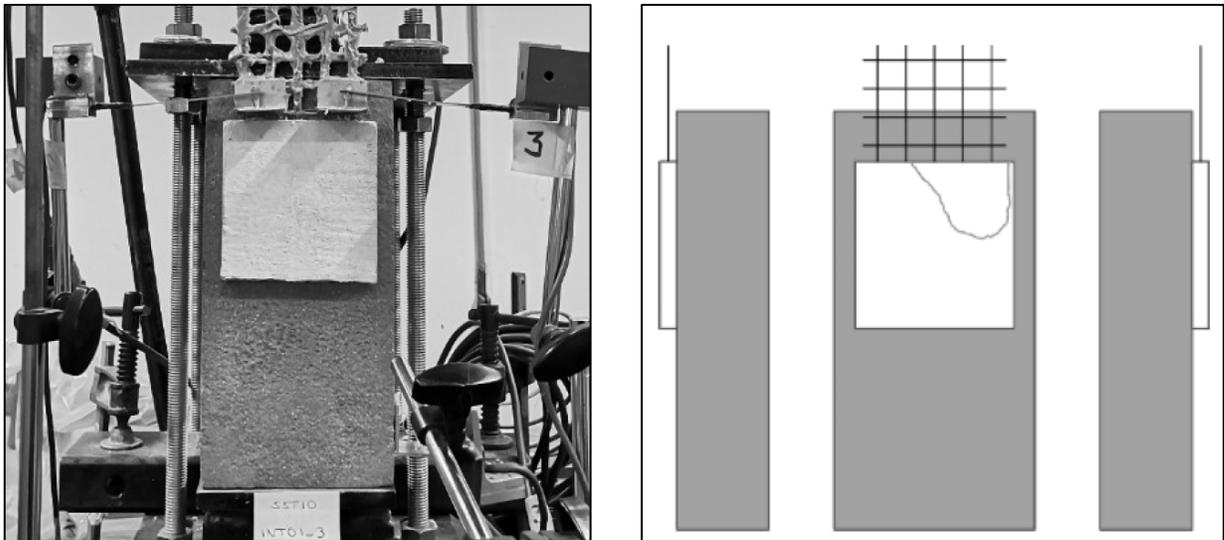


Fig. 4.7 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT01_3 [95].

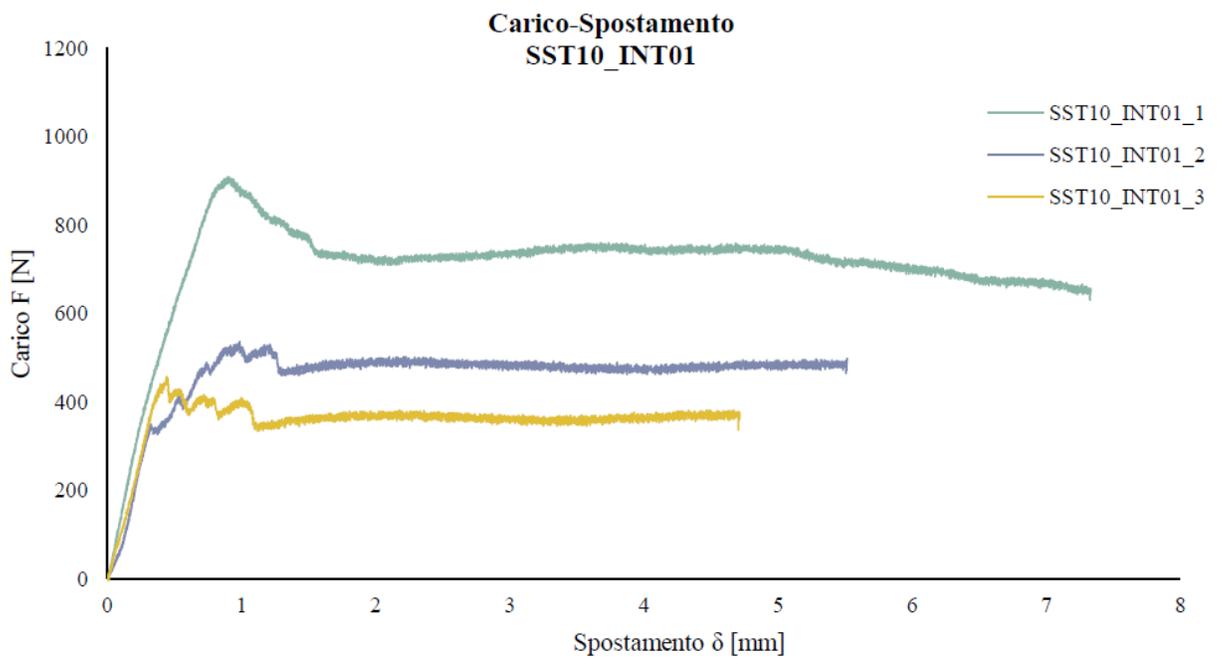


Fig. 4.8 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST10_INT01 [95].

Le tre curve di carico spostamento ottenute dalle prove di shear test su per SST10_INT01 hanno mostrato un primo tratto lineare pressappoco analogo per tutti e tre i provini. I provini SST10_INT01_2 e 3 hanno presentato un comportamento e risultati

analoghi, mentre la prima prova è risultata anomala sia in termini di carico massimo che di sviluppo della fase costante del carico. Per quanto riguarda il quadro fessurativo, i primi due provini hanno presentato lievi lesioni in corrispondenza dello strato superiore di matrice a contatto con la fibra, presentando un meccanismo di crisi di tipo D, caratterizzato dallo scorrimento della fibra all'interno della matrice. SST10_INT01_3, invece, ha subito una lesione situata nella zona superiore del provino, che ha provocato il distacco di una parte della matrice esterna, presentando una rottura di tipo E.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST10_INT01_1	908.00	0.91	299.00	0.0046	D
SST10_INT01_2	537.00	0.98	177.00	0.0049	D
SST10_INT01_3	457.00	0.44	150.00	0.0022	E
Valore medio	634.00	0.78	208.67	0.0039	
Deviazione standar	240.64	0.29	79.39	0.0015	
Coefficiente di variazione	0.38	0.38	0.38	0.3795	

Tab. 4-1 Risultati delle prove di single shear test per SST10_INT01.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST10_INT.05

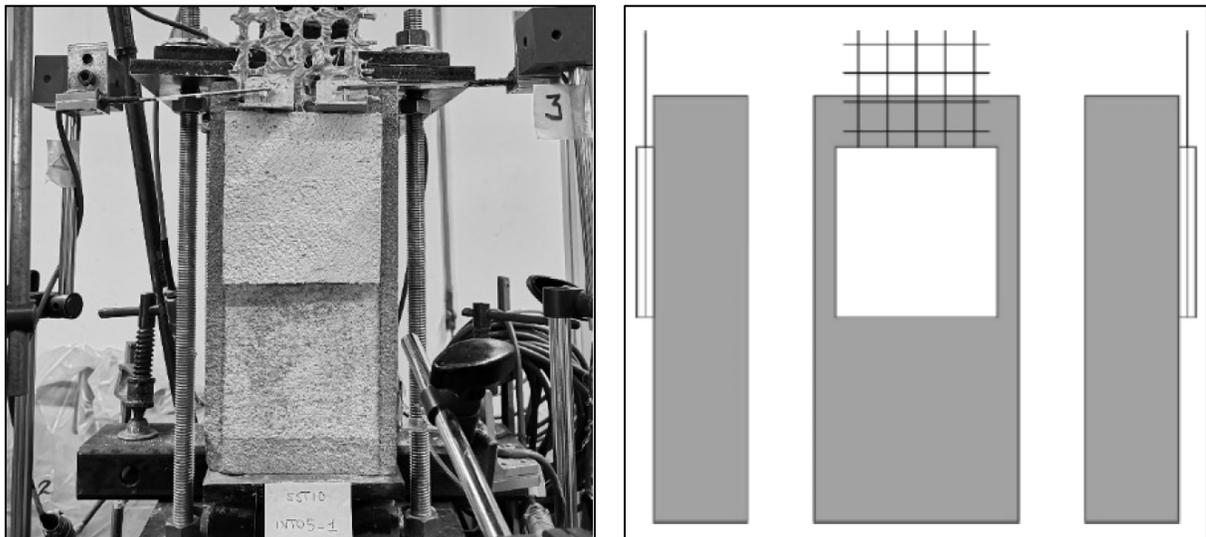


Fig. 4.9 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT05_1 [95].

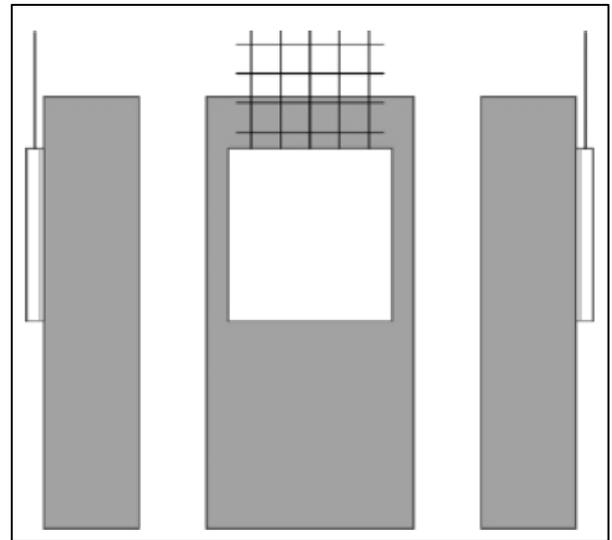
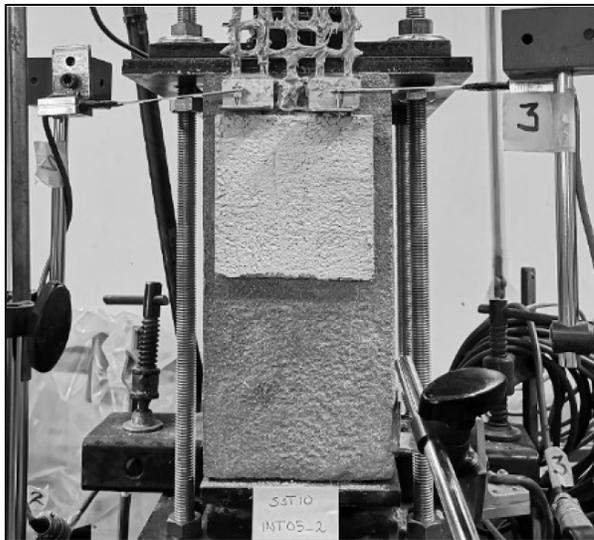


Fig. 4.10 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT05_2 [95].

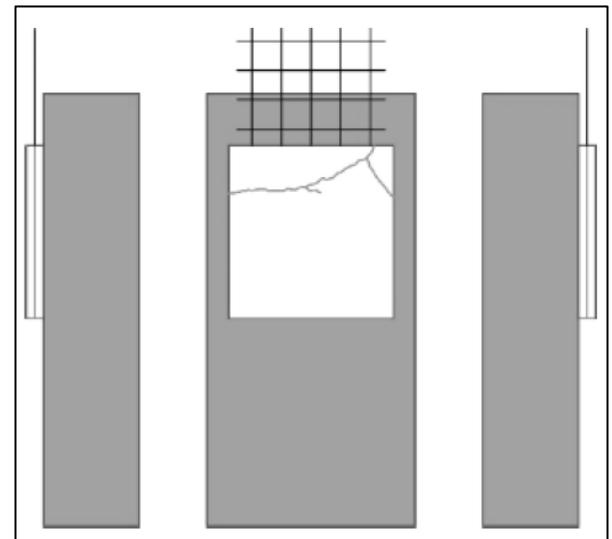
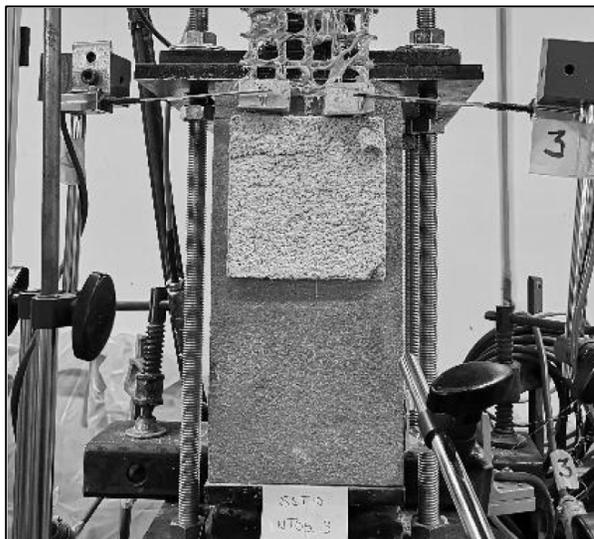


Fig. 4.11 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT05_3 [95].

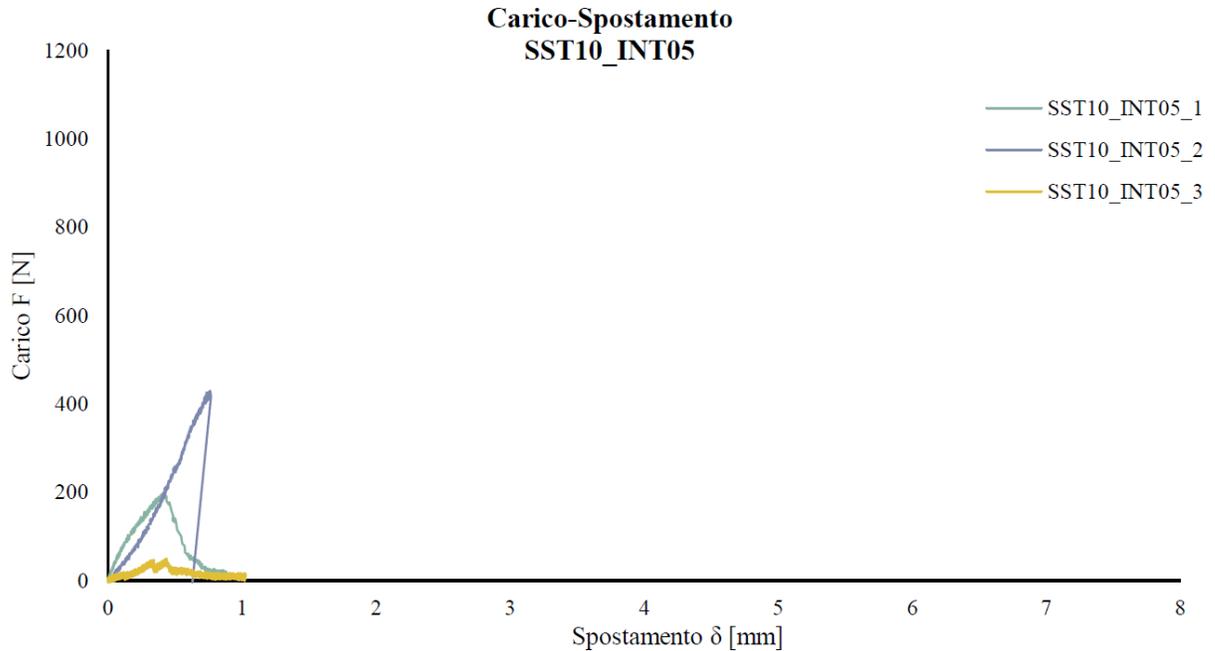


Fig. 4.12 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST10_INT05 [95].

Nel grafico carico- spostamento in Fig. 4.12, si nota che tutti i provini hanno mostrato un comportamento decisamente differente tra di loro in termini di carico. Inoltre, durante il test effettuato su SST10_INT05_3, l'esito della prova è stato compresso dalla lesione che era già presente sul provino. Per questo motivo, i risultati ottenuti dalla terza prova non sono stati considerati per il calcolo dei valori medi dei parametri e per la valutazione della deviazione standard. Per il primo e il terzo provino, si è verificata una modalità di crisi di tipo C, vale a dire distacco all'interfaccia della matrice tessuto, seguito dal distacco all'interfaccia della matrice dal supporto per SST10_INT05_2.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δmax [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione εmax	Tipologia di crisi
SST10_INT05_1	197.00	0.41	65.00	0.0021	C
SST10_INT05_2	430.00	0.76	141.00	0.0038	B/C
SST10_INT05_3	50.00	0.44	16.00	0.0022	C/E
Valore medio	313.50	0.59	103.00	0.0030	
Deviazione standar	164.76	0.25	53.74	0.0012	
Coefficiente di variazione	0.53	0.42	0.52	0.4075	

Tab. 4-2 Risultati delle prove di single shear test per SST10_INT05.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST10_INT.06

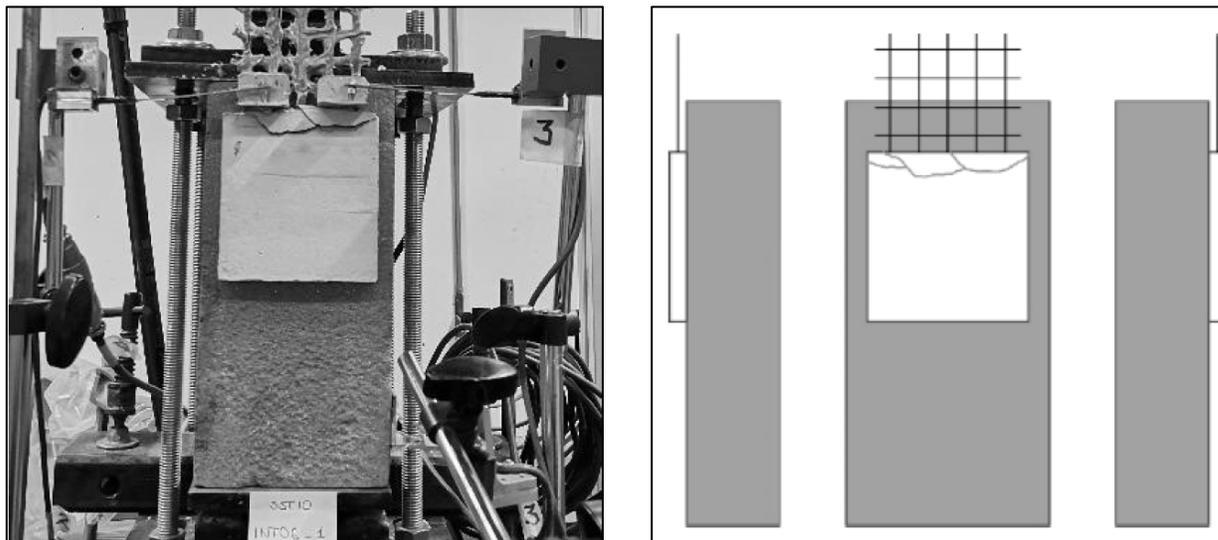


Fig. 4.13 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT06_1 [95].

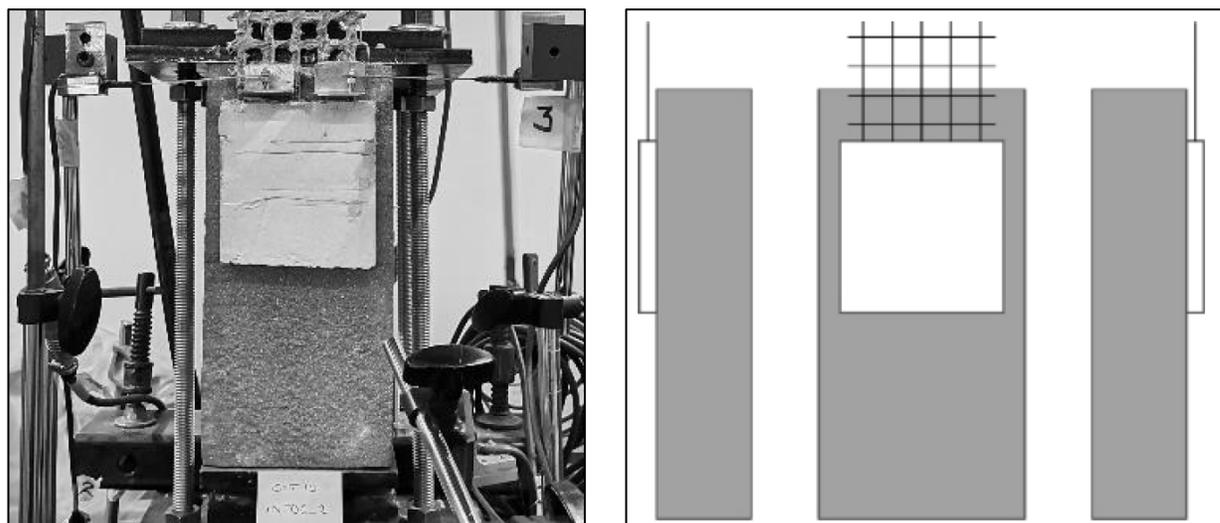


Fig. 4.14 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT06_2 [95].

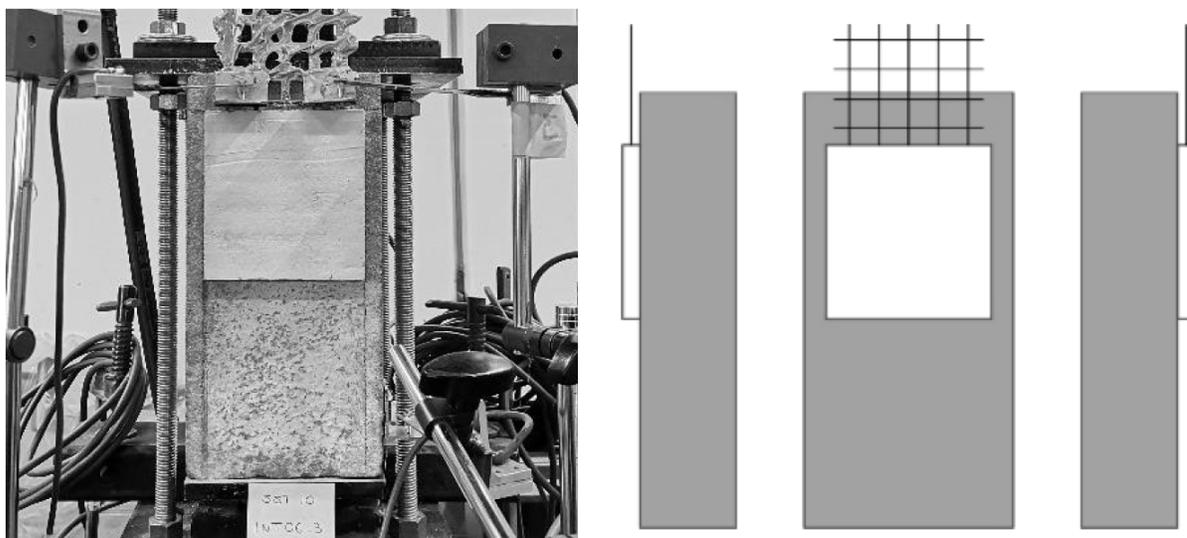


Fig. 4.15 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST10_INT06_3 [95].

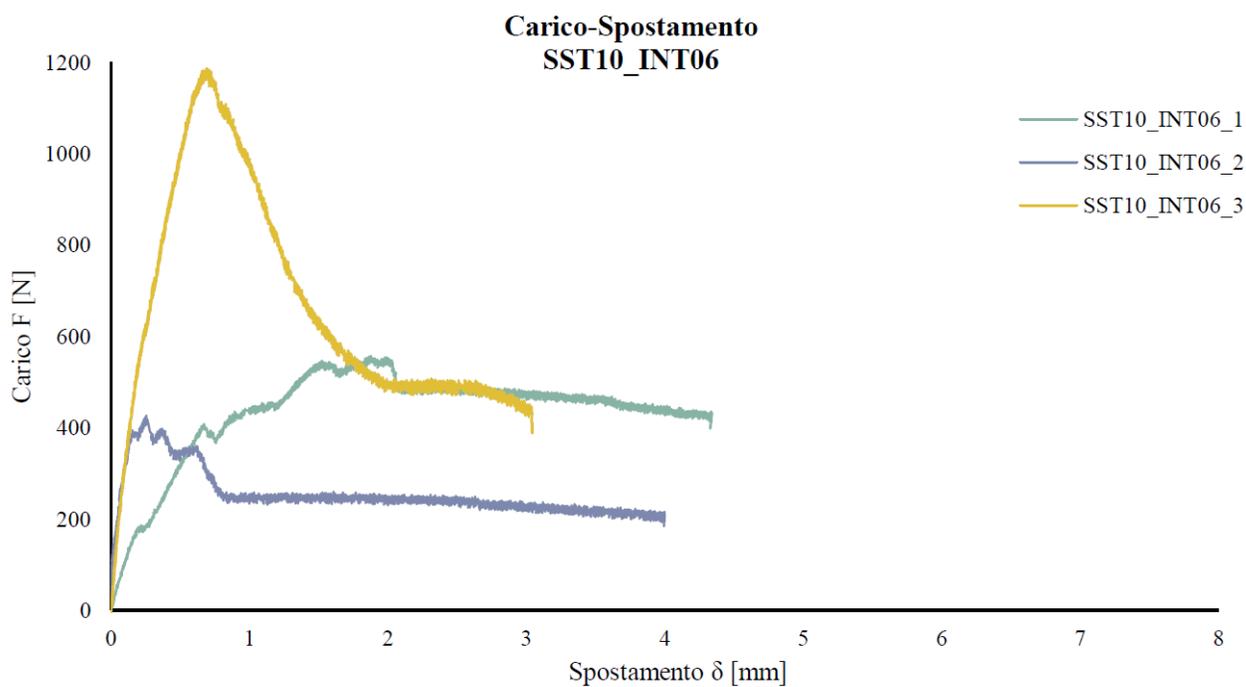


Fig. 4.16 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST10_INT06 [95].

Ossevando i grafici carico- spostamento per le prove effettuate su SST10_INT06, si nota che il secondo e il terzo provino presentano la medesima pendenza nel tratto lineare, ma i risultati ottenuti su I SST10_INT06_3 in termini di carico massimo sono risultati anomali, caratterizzati da valori quasi due volte superiori al primo e al secondo test. Dopo una variazione di carico dovuto a un assestamento iniziale, le curve della prima e della seconda prova presentano una fase costante post-picco allineata durante la fase post-picco. Il primo provino ha presentato una modalità di crisi di tipo E, caratterizzata dallo scorrimento della fibra di rinforzo e da successiva fessurazione dello strato di matrice esterno, mentre SST10_INT06_2 e SST10_INT06_3 sono caratterizzate da una crisi di tipo D, in cui si è verificato lo scorrimento della fibra nella matrice.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST10_INT06_1	557.00	1.88	183.00	0.0094	E
SST10_INT06_2	426.00	0.26	140.00	0.0013	D
SST10_INT06_3	1187.00	0.70	390.00	0.0035	D
Valore medio	723.33	0.95	237.67	0.0047	
Deviazione standar	406.85	0.84	133.67	0.0042	
Coefficiente di variazione	0.56	0.88	0.56	0.8849	

Tab. 4-3 Risultati delle prove di single shear test per SST10_INT06.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST22_INT.01

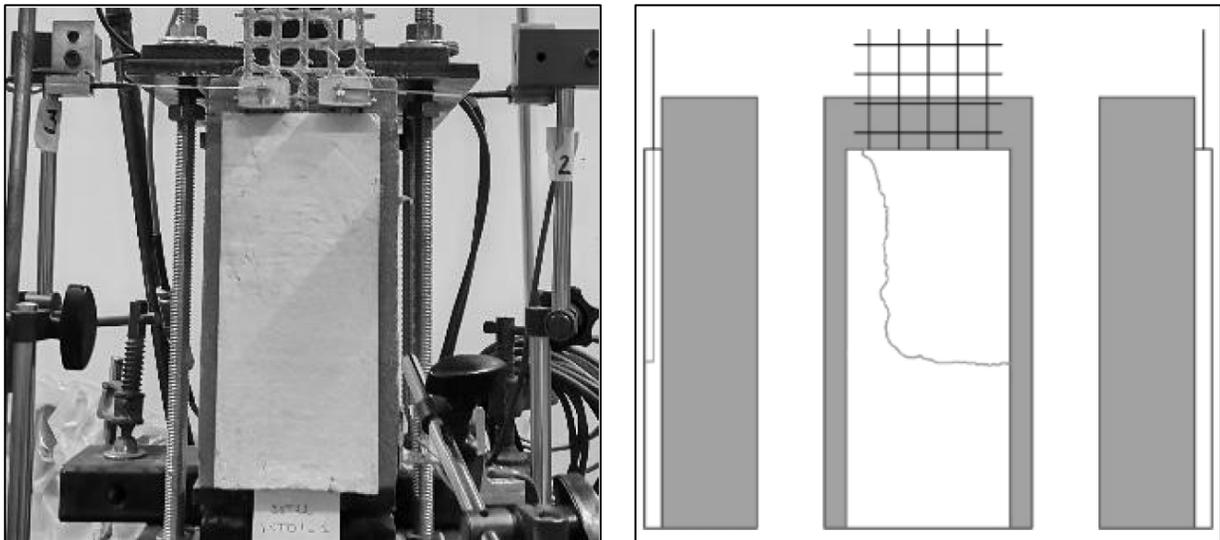


Fig. 4.17 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT01_1 [95].

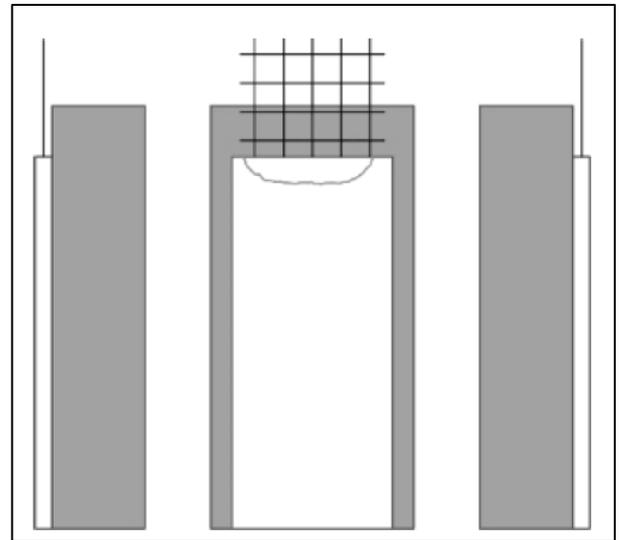
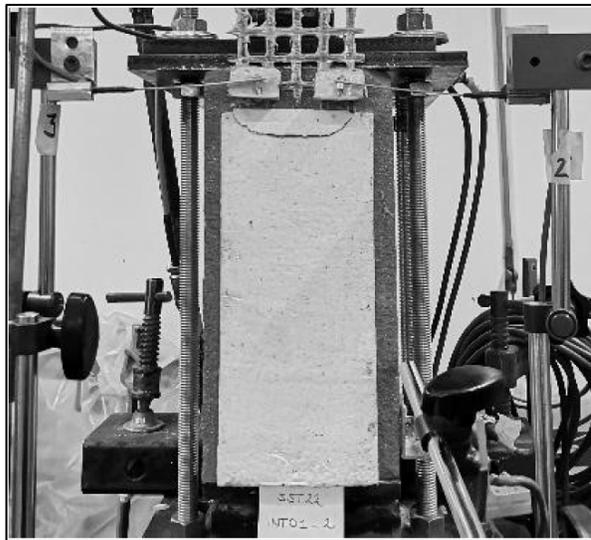


Fig. 4.18 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT01_2 [95].

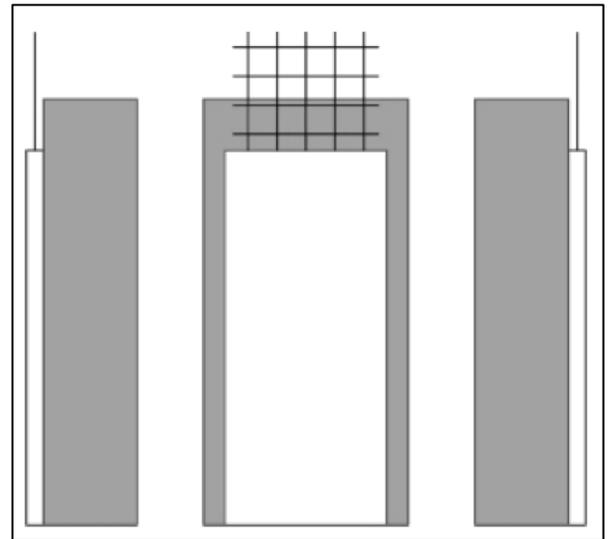
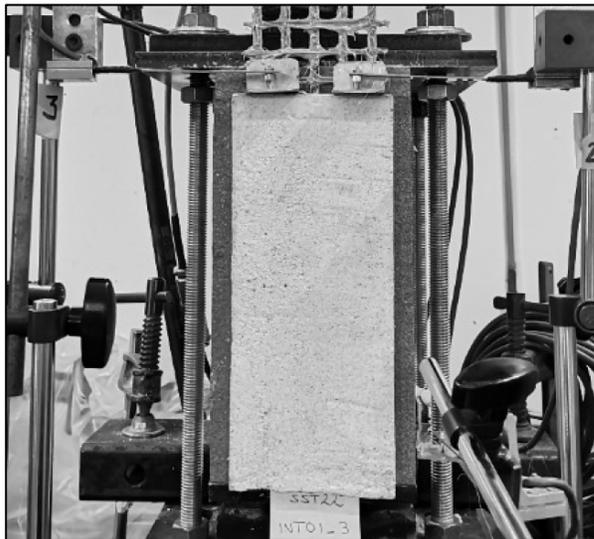


Fig. 4.19 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT01_3 [95].

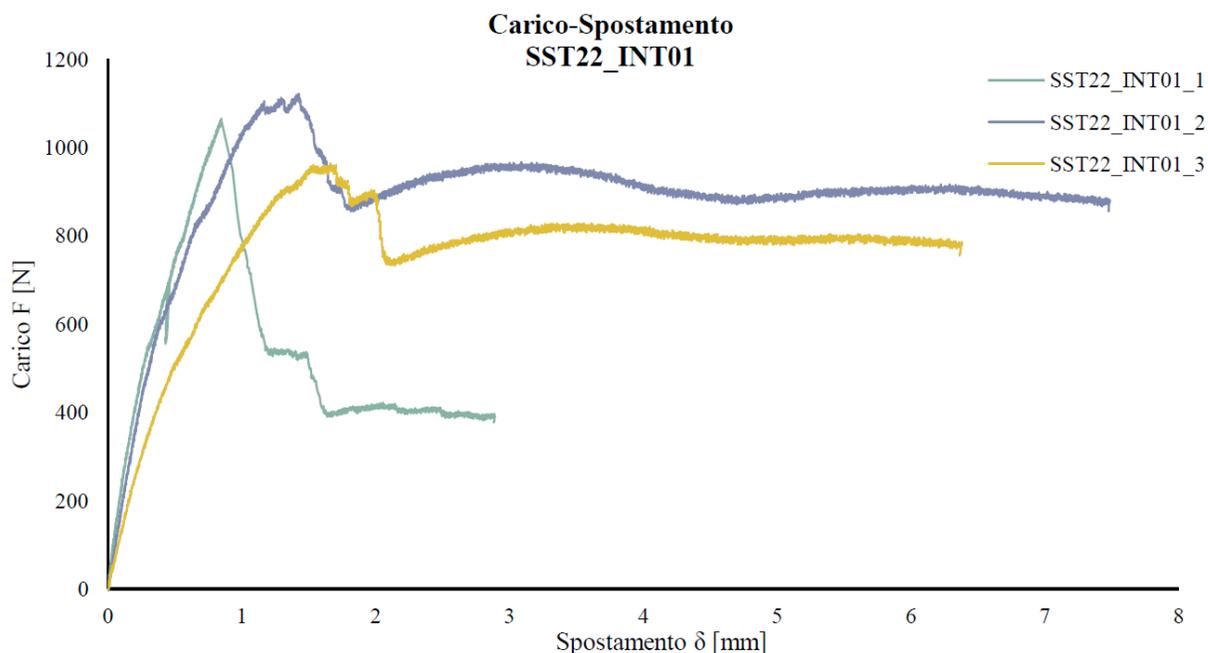


Fig. 4.20 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST22_INT01 [95].

Nel grafico in Fig. 4.20, la curva corrispondente a SST22_INT01_1 mostra un'elevata perdita di carico dopo il raggiungimento del carico massimo F_{max} , mentre le due prove successive hanno mostrato un andamento pressappoco analogo, con una fase di carico costante che si è presentata a circa l'80% del valore di carico massimo. Il comportamento fragile della prima prova è riscontrabile anche sulle lesioni presenti sul provino, che hanno portato al distacco della matrice dal supporto. Un a tipologia di crisi analoga è avvenuta sul secondo provino, mentre il provino SST22_INT01_3 ha sviluppato un meccanismo di crisi di tipo D, con lo scorrimento della fibra di basalto all'interno della matrice.

Campione	Carico massimo F_{max} [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST22_INT01_1	1066.00	0.85	351.00	0.0043	E
SST22_INT01_2	1121.00	1.43	369.00	0.0072	E
SST22_INT01_3	964.00	1.16	317.00	0.0058	D
Valore medio	1050.33	1.15	345.67	0.0058	
Deviazione standar	79.66	0.29	26.41	0.0015	
Coefficiente di variazione	0.08	0.25	0.08	0.2515	

Tab. 4-4 Risultati delle prove di single shear test per SST22_INT01.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST22_INT.05

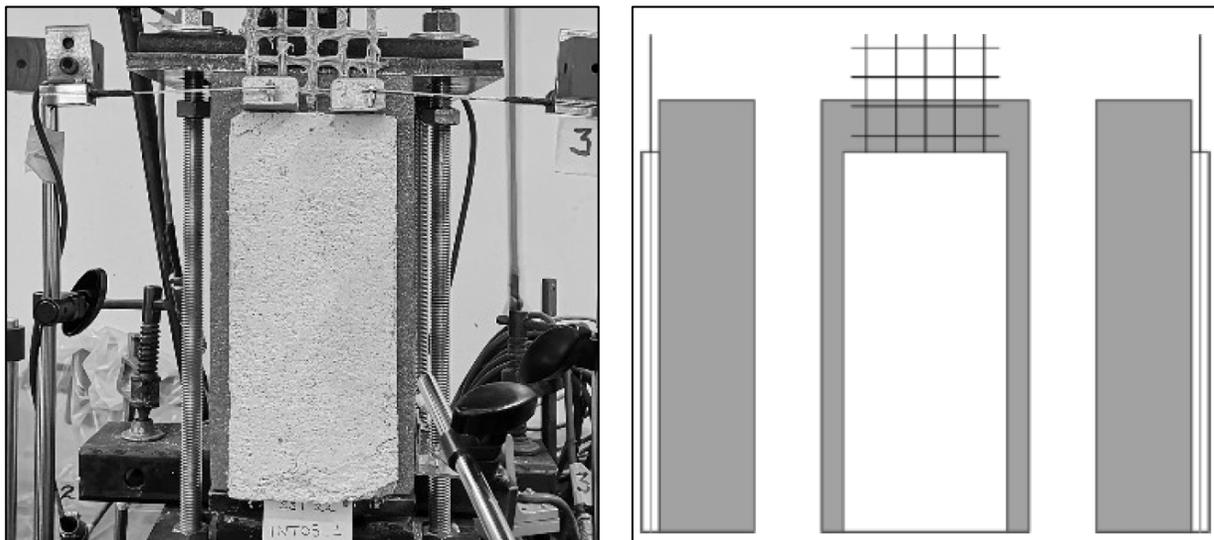


Fig. 4.21 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT05_1 [95].

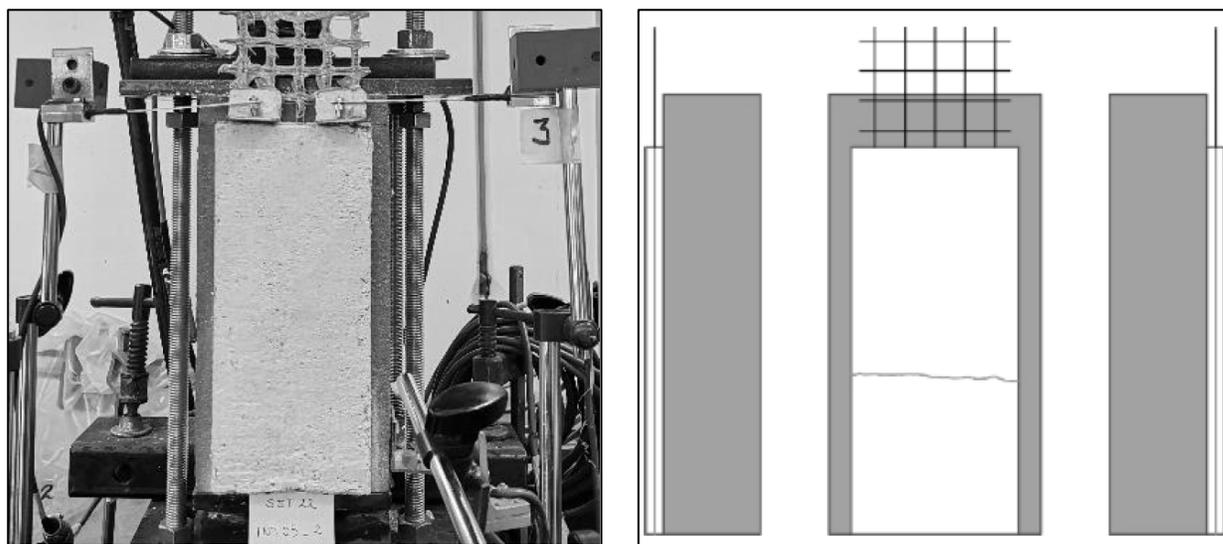


Fig. 4.22 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT05_2 [95].

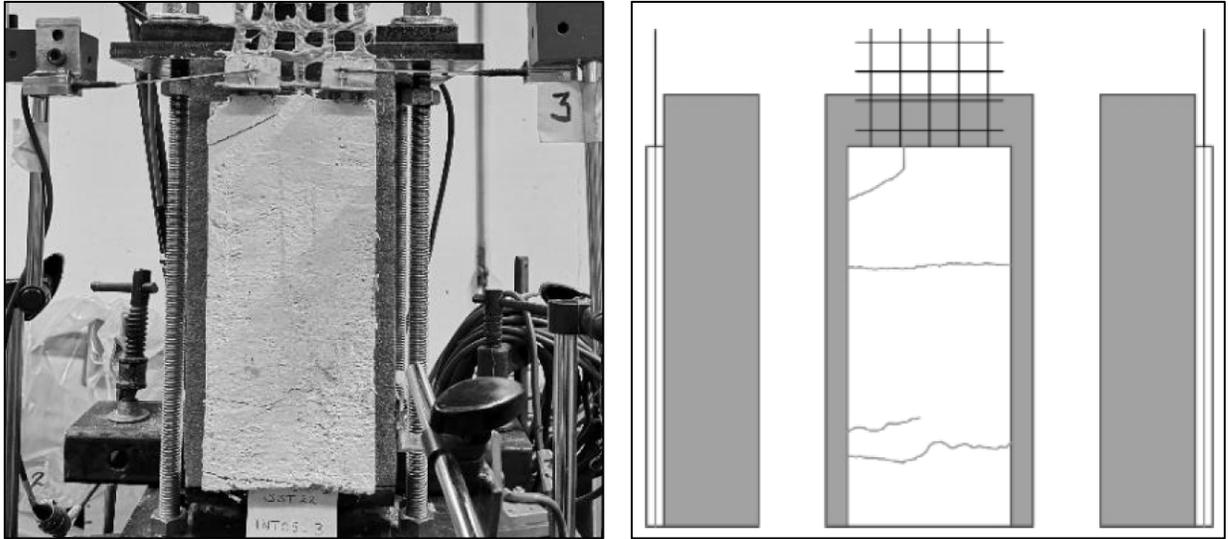


Fig. 4.23 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT05_3 [95].

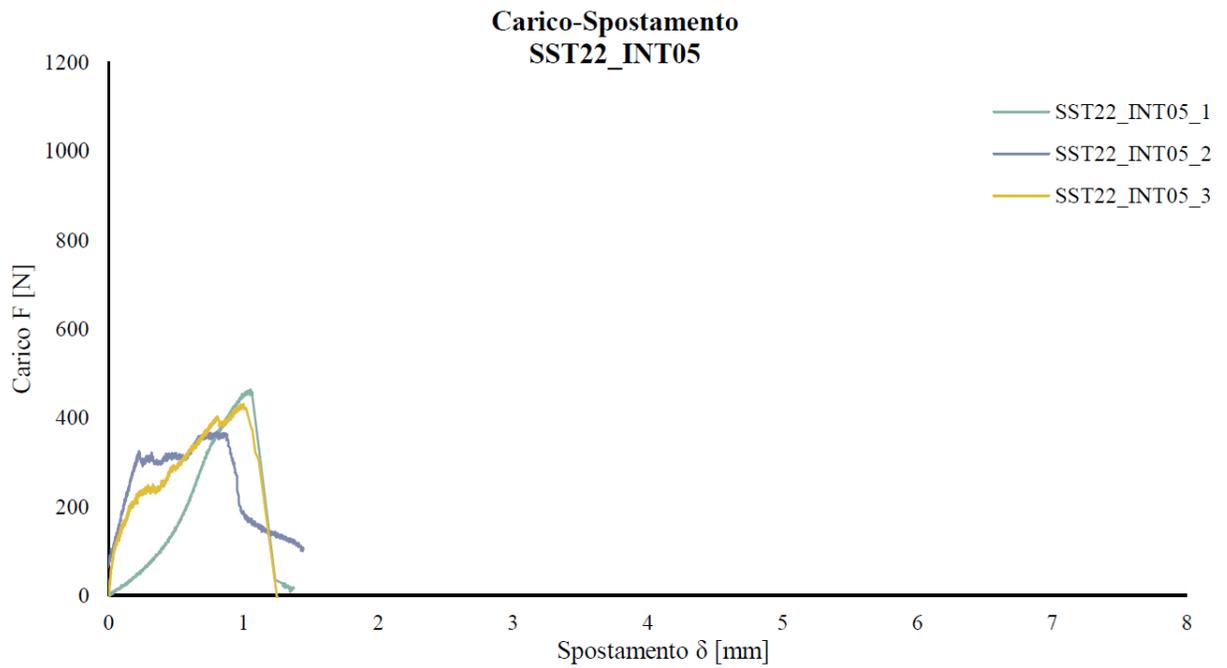


Fig. 4.24 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST22_INT05 [95].

Nel grafico carico- spostamento, l'andamento delle curve per le tre prove presenta andamenti differenti. Il primo tratto lineare è caratterizzato da pendenze decisamente differenti, mentre per la prima e la seconda prova, dopo il carico di picco la fase di scarico è rappresentata da un crollo totale, causato dal distacco completo della matrice dalla fibra di rinforzo (meccanismo di crisi di tipo C). Tale comportamento ha denotato il comportamento fragile della matrice INT.05, difetto che si era già riscontrato nelle prove dai risultati delle prove di adesione sul medesimo materiale con lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm. Il campione SST22_INT05_2, invece, ha presentato una fase di carico costante dopo circa il 50% del carico massimo raggiunto.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST22_INT05_1	464.00	1.05	153.00	0.0053	C
SST22_INT05_2	369.00	0.80	121.00	0.0040	C/E
SST22_INT05_3	431.00	1.00	142.00	0.0050	C/E
Valore medio	421.33	0.95	138.67	0.0048	
Deviazione standar	48.23	0.13	16.26	0.0007	
Coefficiente di variazione	0.11	0.14	0.12	0.1428	

Tab. 4-5 Risultati delle prove di single shear test per SST22_INT05.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST22_INT.06

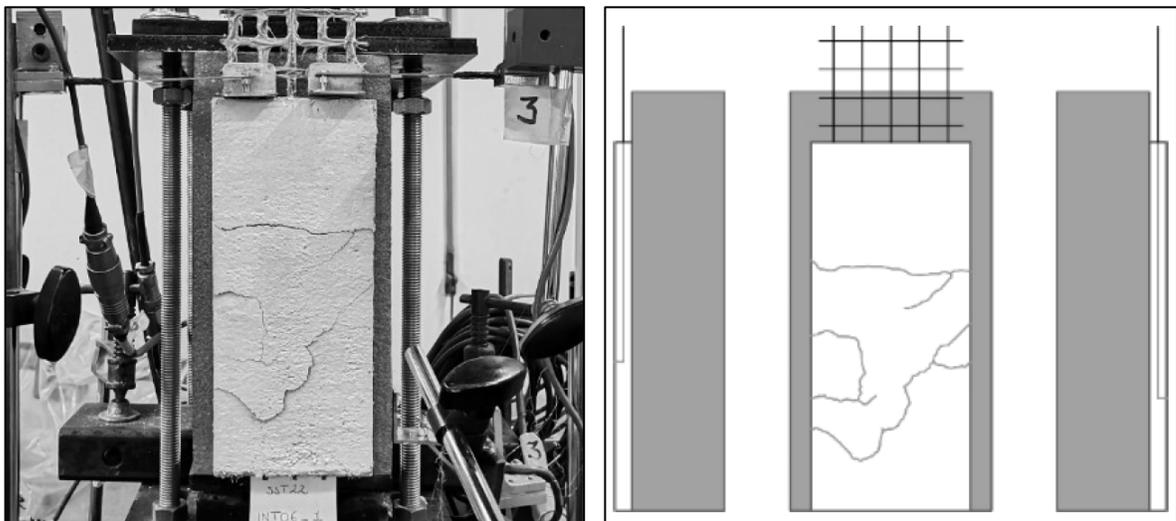


Fig. 4.25 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT06_1 [95].

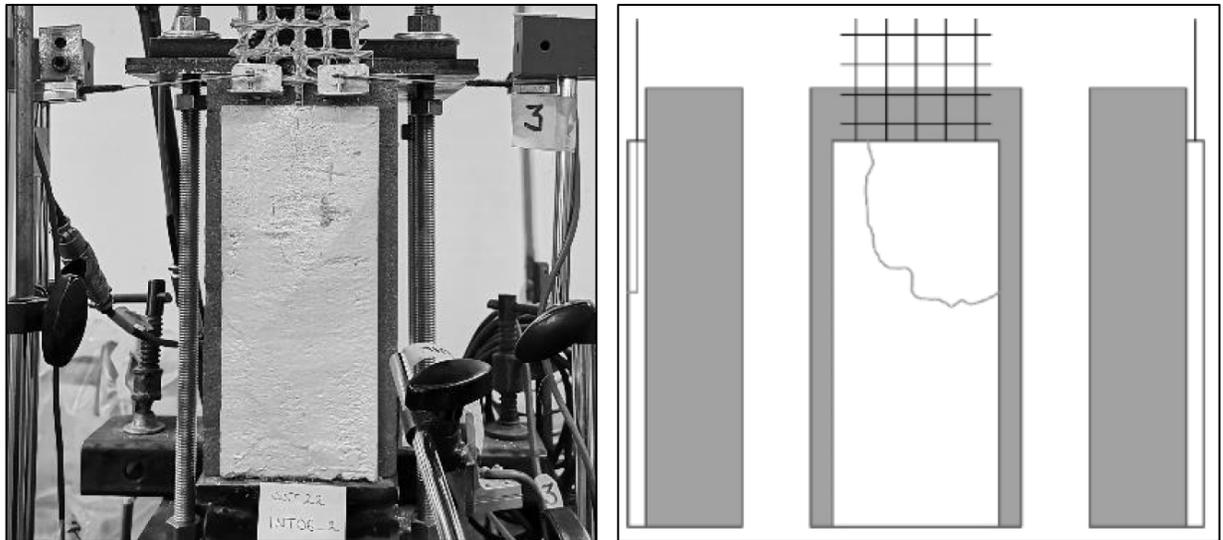


Fig. 4.26 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT06_2 [95].

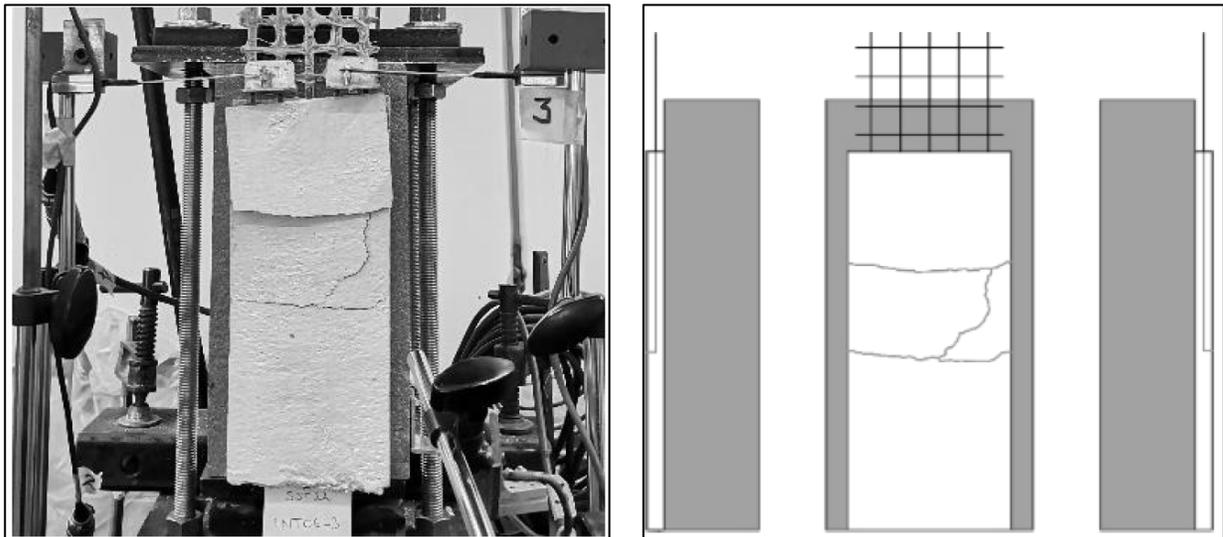


Fig. 4.27 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST22_INT06_3 [95].

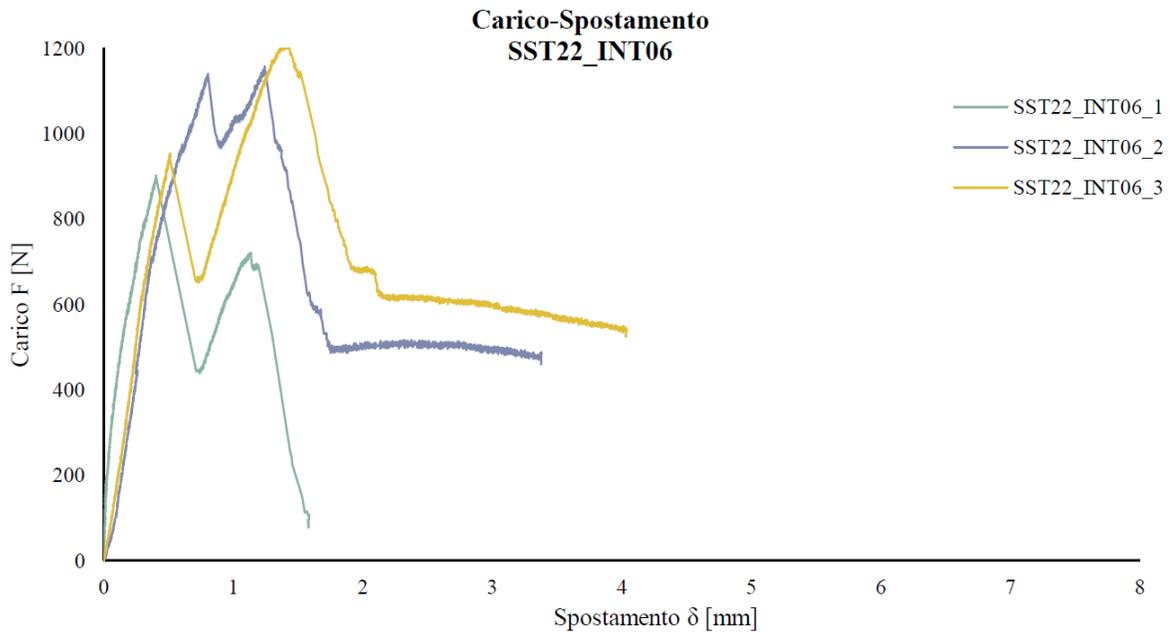


Fig. 4.28 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST22_INT06 [95].

Nonostante gli ottimi risultati in termini di carico massimo e di resistenza a trazione, caratterizzata da un valore medio pari a circa 360 N/mm², le tre prove di single shear test hanno evidenziato il comportamento fragile della matrice INT.06, in cui la fase a carico costante è assente per la curva carico- deformazione di SST22_INT06_1 e pari al 50% del carico massimo per la seconda e la terza prova.

Per quanto riguarda le modalità di crisi, per tutti e sei provini è avvenuta una prima crisi di tipo E, con lo scorrimento della fibra e la fessurazione dello strato di matrice interno, seguito dal distacco dell'interfaccia fibra- matrice, vale a dire un meccanismo di crisi di tipo C.

Campione	Carico massimo F _{max} [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ _{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ε _{max}	Tipologia di crisi
SST22_INT06_1	903.00	0.40	297.00	0.0020	C/E
SST22_INT06_2	1158.00	1.25	381.00	0.0063	C/E
SST22_INT06_3	1209.00	1.43	398.00	0.0072	C/E
Valore medio	1090.00	1.03	358.67	0.0052	
Deviazione standar	163.94	0.55	54.08	0.0028	
Coefficiente di variazione	0.15	0.54	0.15	0.5379	

Tab. 4-6 Risultati delle prove di single shear test per SST22_INT06.

4.2. Analisi dei risultati delle prove di adesione single shear test su pilastrini costituiti da elementi in laterizio

Dai risultati ottenuti dalle prove di single shear test sui provini costituiti da lunghezza di ancoraggio pari a 100 mm (vale a dire SST10_INT.01_1-2-3, SST10_INT.05_1-2-3 e SST10_INT.06_1-2-3), e quelli costituiti da lunghezza di ancoraggio pari a 220 mm (SST22_INT.01_1-2-3, SST22_INT.05_1-2-3 e SST22_INT.06_1-2-3), si è deciso di procedere con la campagna sperimentale scartando a matrice INT.05, che ha presentato risultati non ottimali in termine di adesione con superfici in muratura in laterizio.

Sono stati perciò preparati sei provini, tre per ogni tipologia di matrice, nello specifico:

- N.3 pilastrini costituiti da cinque elementi in mattone, a cui è applicato INT.01 rinforzato con fibra di basalto, posizionato verticalmente lungo il lato di 120 mm, nominati SST29_INT01_1-2-3.
- N.3 pilastrini costituiti da cinque elementi in mattone, a cui è applicato INT.06 rinforzato con fibra di basalto, posizionato verticalmente lungo il lato di 120 mm, nominati SST29_INT06_1-2-3.

I pilastrini sono stati preparati sovrapponendo cinque mattoni in laterizio di dimensione $250 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$, alternandoli a letti di malta bastarda pari a 10 mm, appositamente preparata mescolando una parte di cemento, una parte di calce, due parti di acqua e otto parti di sabbia [92].

La dimensione complessiva finale dei pilastrini è pari a $315 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$. I pilastrini sono lasciati maturare per un periodo di dieci giorni in posizione verticale, dopodiché sono stati ribaltati in posizione orizzontale per facilitare l'applicazione del rinforzo che è stato applicato mediante la guida di casseforme lignee appositamente progettate e costruite (Fig. 4.29).

Il primo strato di getto ha uno spessore pari a 5 mm, su cui è stata applicata la rete in fibra di basalto costituita da quattro multi-filamenti longitudinali, e a seguire il secondo strato di matrice, per uno spessore totale pari a 10 mm.

I provini sono stati lasciati maturare per 28 giorni a temperatura ambiente, dopodiché sono stati estratti dalle casseforme (Fig. 4.29) e si proceduto all'irrigidimento delle fibre di basalto con la stesura della resina epossidica bicomponente, seguita dall'applicazione delle tabs in alluminio, posizionate alle estremità della fibra Fig. 4.30.



Fig. 4.29 Fase di preparazione dei pilastrini rinforzati.

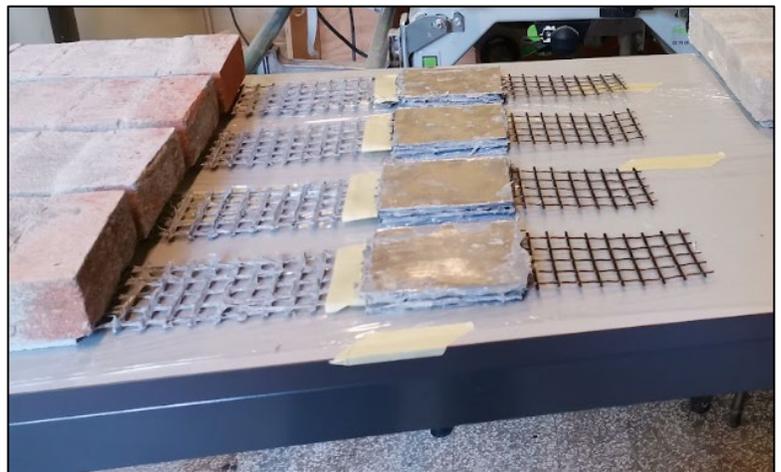


Fig. 4.30 Campioni dopo la stesura della resina epossidica e l'applicazione delle tabs in alluminio.

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove di single shear test eseguite sui campioni di FRLM costituiti dalle matrici INT.01 e INT.06, rinforzate dalla fibra di basalto, applicate sui pilastrini in laterizio. In questo caso, oltre alla valutazione del comportamento del materiale composito fibrorinforzato con la superficie in laterizio, è stato possibile verificare il comportamento relativo all'iterazione con il laterizio e con i giunti in malta bastarda.

Per ogni test sono riportati le foto e i relativi schemi, in cui sono indicate le lesioni verificatesi dopo la prova, i grafici- load-displacement (con i valori di carico [N] sulle ordinate e i valori di spostamento [mm] sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti, come indicate nel paragrafo 4.1.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST29_INT.01

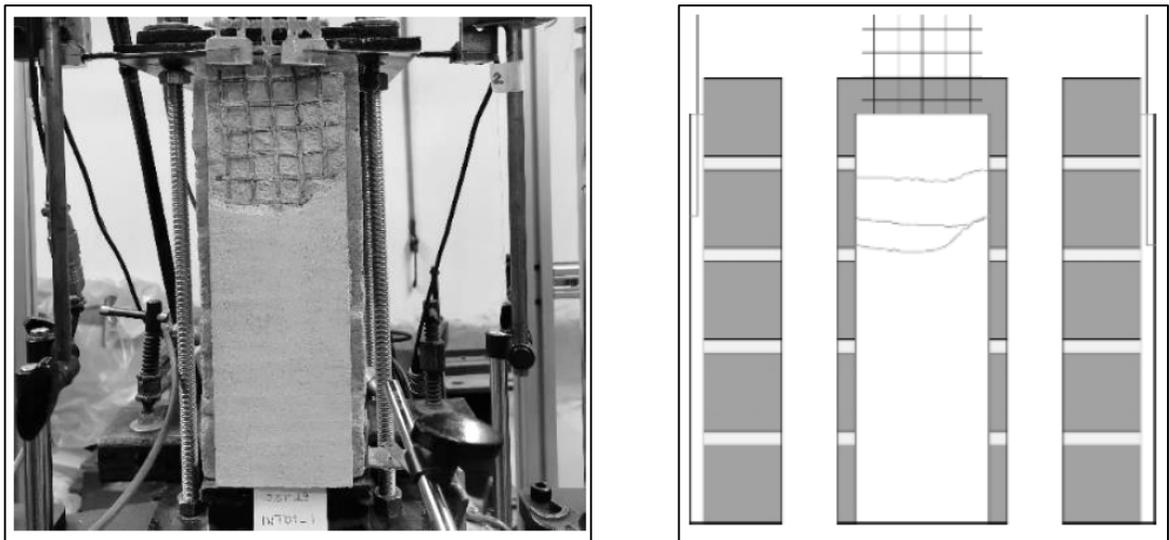


Fig. 4.31 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT01_1 [95].

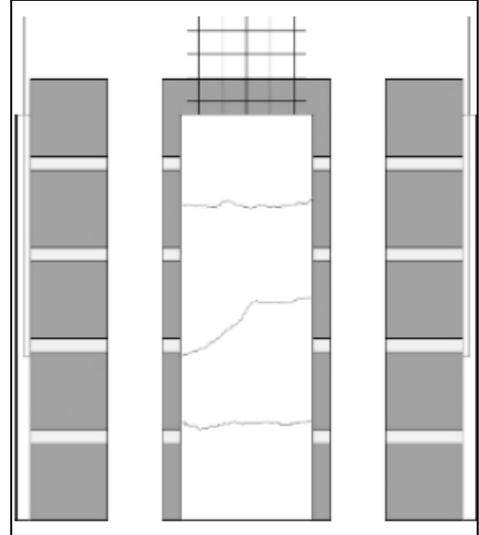


Fig. 4.32 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT01_2 [95].

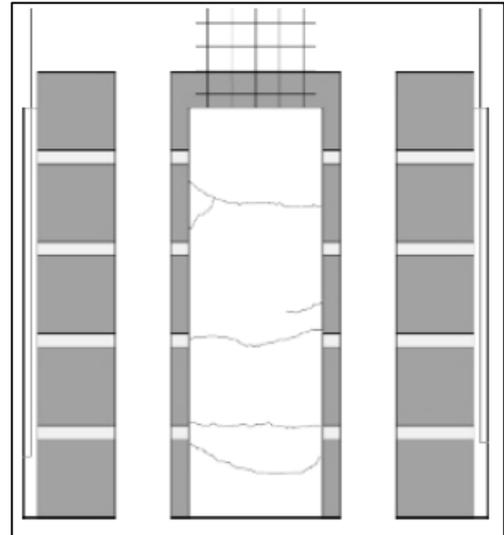
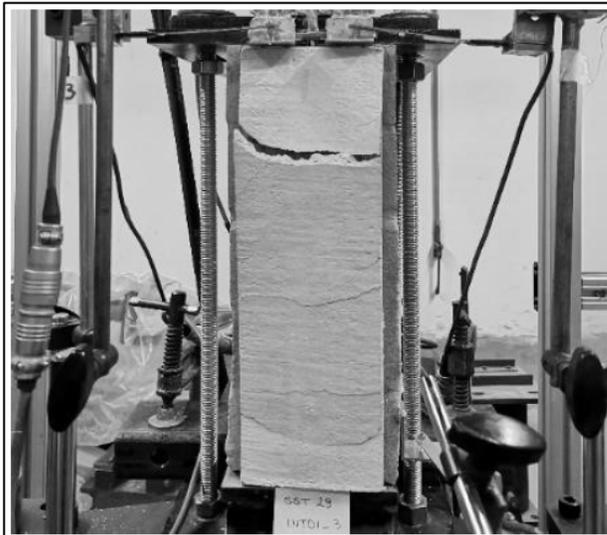


Fig. 4.33 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT01_3 [95].

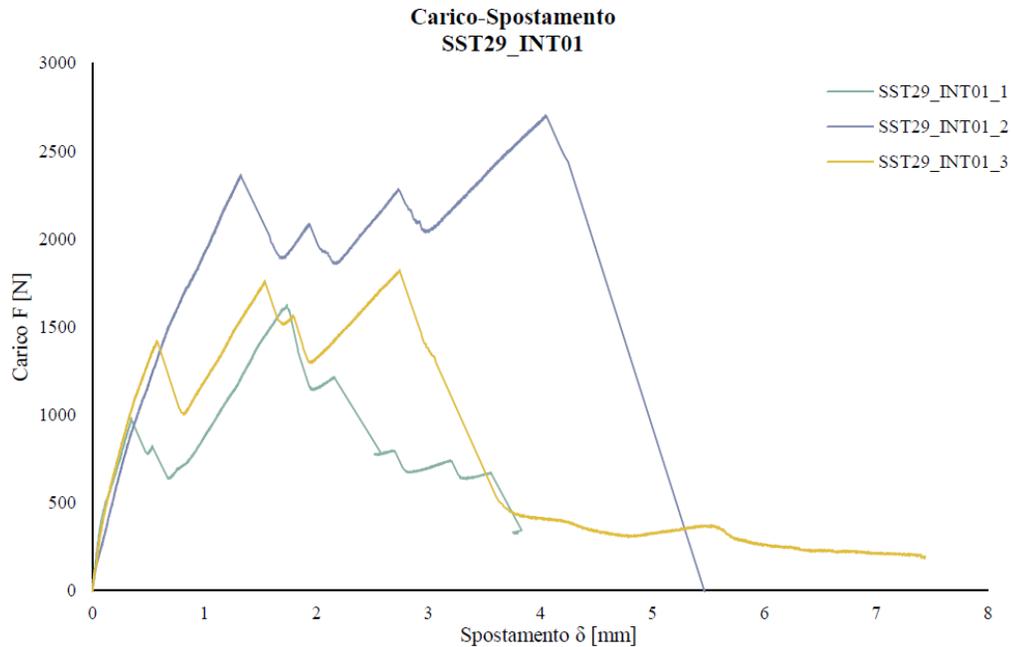


Fig. 4.34 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST29_INT01 [95].

Il primo tratto delle curve carico spostamento è caratterizzato da un andamento lineare quasi coincidente. Dopo una serie di perdite e recuperi di carico, soltanto il provino SST29_INT01_3 è risultato capace di mantenere uno sforzo in maniera costante, mentre il primo e il secondo provino hanno raggiunto una crisi di tipo fragile, causate dal decadimento delle proprietà della matrice. Tutti e tre i provini hanno presentato un meccanismo di crisi misto di tipo C/E, con lo scorrimento della fibra e la fessurazione dello strato di matrice interno, seguito dal distacco dell'interfaccia fibra- matrice. Il provino SST29_INT01_2 ha presentato una modalità di tipo B, con il distacco dell'interfaccia matrice supporto.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST29_INT01_1	1625.00	1.74	535.00	0.0087	C/E
SST29_INT01_2	2705.00	4.05	890.00	0.0203	B/C/E
SST29_INT01_3	1825.00	2.74	600.00	0.0137	C/E
Valore medio	2051.67	2.84	675.00	0.0142	
Deviazione standar	574.57	1.16	189.01	0.0058	
Coefficiente di variazione	0.28	0.41	0.28	0.4088	

Tab. 4-7 Risultati delle prove di single shear test per SST29_INT01.

Risultati sperimentali delle prove di single shear test su SST29_INT.065

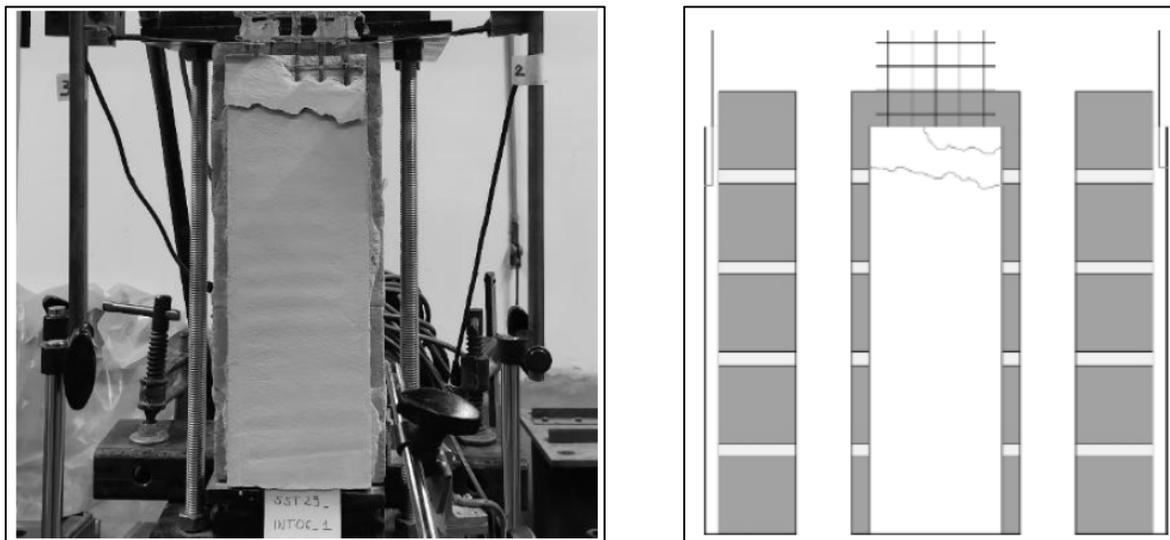


Fig. 4.35 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT06_1 [95].

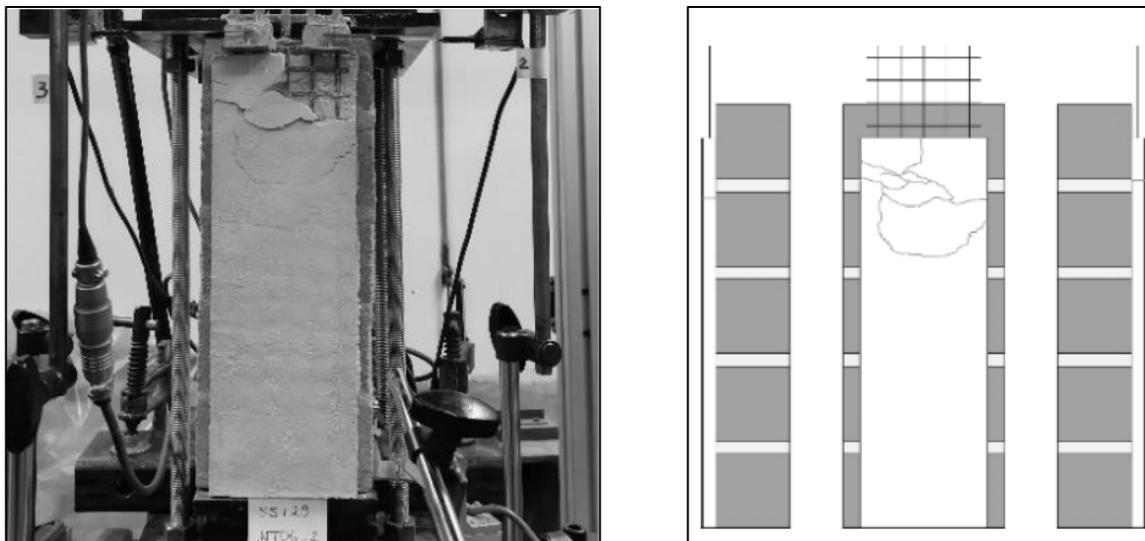


Fig. 4.36 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT06_2 [95].

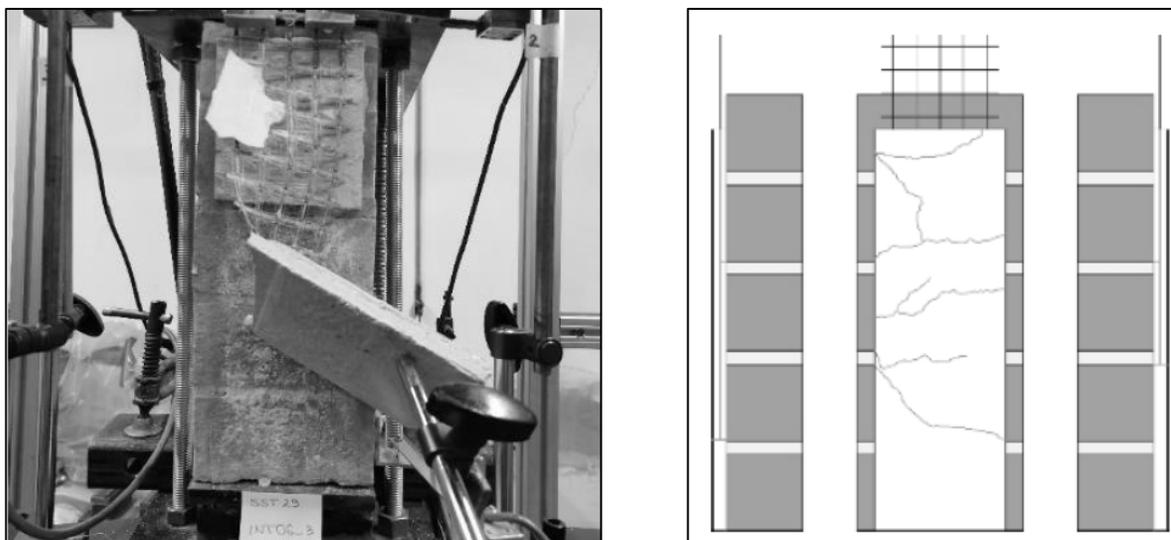


Fig. 4.37 Configurazione del provino dopo la rottura e relativo schema delle lesioni per SST29_INT06_3 [95].

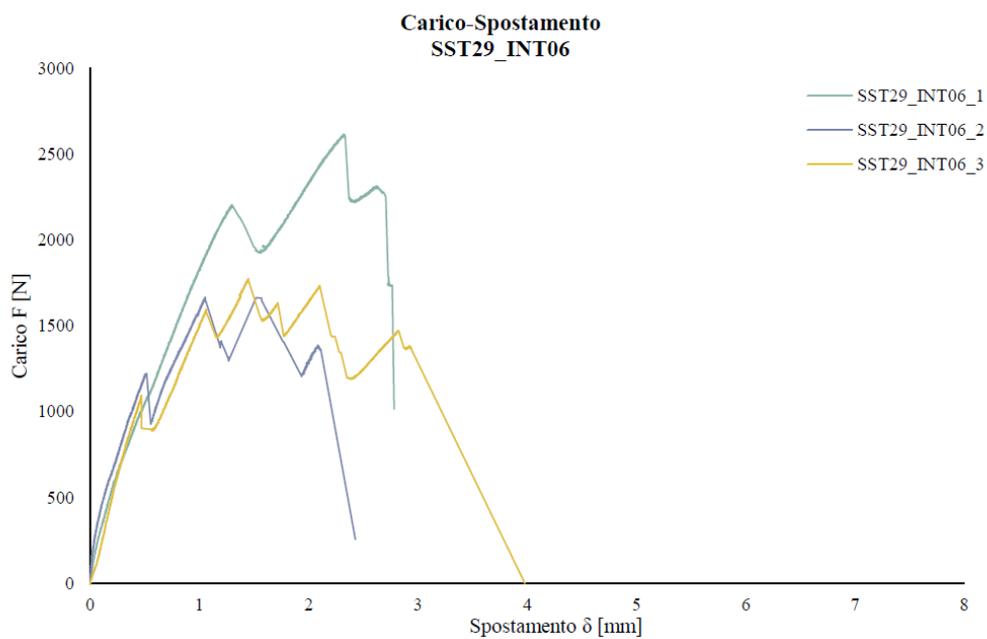


Fig. 4.38 Sovrapposizione dei grafici carico- spostamento per SST29_INT06 [95].

Dal grafico carico- spostamento in Fig. 4.38, si osserva che le tre curve sono accomunate dalla medesima pendenza nel primo tratto approssimativamente lineare e dall'assenza di un andamento costante, presentando un comportamento fragile. Si registrano valori di carico massimo comparabile per le prove effettuate sul secondo e sul terzo provino, caratterizzati da un valore di carico massimo pari a circa 1720 N, mentre la prima prova risulta anomala, con un valore di carico massimo che raggiunge i 2613 N. I meccanismi di crisi registrati durante le prove sono di tipo E/F per il primo e il secondo provino, quest'ultimo che ha presentato un'ulteriore modalità di rottura, distaccandosi completamente dal pilastro, meccanismo avvenuto anche per SST29_INT06_3.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento riferito al carico massimo δ_{max} [mm]	Tensione massima [N/mm ²]	Deformazione ϵ_{max}	Tipologia di crisi
SST29_INT01_1	2613.00	2.05	860.00	0.0102	E/F
SST29_INT01_2	1664.00	1.06	547.00	0.0053	B/E/F
SST29_INT01_3	1772.00	1.45	583.00	0.0073	B/C/E
Valore medio	2016.33	1.52	663.33	0.0076	
Deviazione standar	519.54	0.50	171.27	0.0025	
Coefficiente di variazione	0.26	0.33	0.26	0.3242	

Tab. 4-8 Risultati delle prove di single shear test per SST29_INT06.

5. Prove di compressione diagonale su pannelli in muratura

La prova di compressione diagonale, conosciuta anche come Diagonal Tension Shear test, è regolata dalla normativa ASTM E519/E519M – 22 [75]. È un metodo di indagine distruttivo, capace di valutare la resistenza al taglio e il modulo di taglio secante G della muratura, applicando una sollecitazione di compressione lungo la diagonale della porzione di muratura da analizzare.

Per quanto riguarda la scelta del dimensionamento dei provini, si è deciso di non utilizzare le misure standard di $1200 \times 1200 \times 120 \text{ mm}^3$ dettate dall'ASTM [75], in quanto l'apparecchiatura disponibile in laboratorio non è capace di ospitare un provino di tali dimensioni. A questo proposito, si è effettuata un'attenta ricerca dello stato dell'arte in letteratura, valutando quale possa essere un dimensionamento adatto per il set-up di prova. Mentre alcuni autori propongono di scalare il provino [103], nel caso in esame ciò andrebbe a compromettere le proprietà e i risultati della rete in fibra di basalto, caratterizzata da una maglia già preparata, impossibile quindi da scalare.

Altri autori, invece, effettuano le prove di compressione diagonale su provini costituiti da muratura in laterizio di grandezza ridotta, caratterizzati da dimensioni pari a circa $500 \times 500 \times 120 \text{ mm}^3$ [104], [105], [106], $600 \times 600 \times 120 \text{ mm}^3$ [107], e $390 \times 390 \times 120 \text{ mm}^3$ [108].

Da queste analisi in letteratura e dalla capacità dimensionale della macchina di prova, il dimensionamento scelto per la costruzione dei pannelli murari è pari a $445 \times 445 \times 120 \text{ mm}^3$.

Con lo scopo di determinare la resistenza a taglio, in funzione della diversa modalità di applicazione del rinforzo su una e su entrambe le facce dei pannelli in muratura di laterizio, le prove di compressione diagonale sono state effettuate su sette provini, nello specifico:

- N.1 pannello in muratura non rinforzato, nominato M1_DTNR, di dimensione $445 \times 445 \times 120 \text{ mm}^3$.
- N. 3 pannelli in muratura rinforzati solo da un lato, nominati M2-3-4_DTR1, di dimensione $445 \times 445 \times 120 \text{ mm}^3$.
- N.3 pannelli in muratura rinforzati da entrambi i lati, nominati M5-6-7_DTR2, di dimensione $445 \times 445 \times 120 \text{ mm}^3$.

Per la preparazione dei campioni, ogni modello è stato realizzato in muratura di mattoni in laterizio pieni a una testa e malta bastarda di allettamento. Con l'uso di una sega circolare ad acqua con disco diamantato, sono stati tagliati i mattoni per assicurarsi le misure prestabilite per la costruzione del pannello murario, disposti in modo da ottenere i giunti verticali sfalsati e uno strato di malta bastarda di allettamento tra i ricorsi orizzontali, con uno spessore pari a 10 mm, preparati mediante

l'utilizzo di guide in legno a sezione quadrata di lato pari allo spessore della malta (Fig. 5.1). I provini sono stati preparati su tavole lignee, disposte orizzontalmente mediante la guida di livelle a bolla d'aria, in modo da garantire planarità durante la fase costruttiva. Una volta terminata la costruzione, la malta in eccesso presente sulla superficie dei pannelli è stata rimossa mediante raschiatura con spugna in acciaio. Una volta terminata la preparazione, i muretti sono lasciati maturare per un periodo di 28 giorni a temperatura ambiente (Fig. 5.1).



Fig. 5.1 Fase di costruzione dei pannelli murari.

Trascorso il tempo di maturazione, si è proceduto all'applicazione del rinforzo sui pannelli. La matrice utilizzata per la preparazione del composito è INT.06, che è quella risultata migliore sia dal punto di vista igrometrico che dal punto di vista meccanico.

Una volta inumidite le superfici del supporto, è stato applicato il primo strato matrice con uno spessore pari a 5 mm, su cui è stata poggiata la rete in fibra di basalto. A seguire è stato applicato il secondo strato di matrice, per uno spessore totale pari a 10

mm. Nello specifico, il composito FRLM è stato applicato su tre provini lungo una sola superficie e per gli altri tre su entrambi le superfici. Prima di procedere ai test, i provini rinforzati sono stati lasciati maturare ulteriormente per un periodo 28 giorni a temperatura ambiente.



Fig. 5.2 Fasi di applicazione del rinforzo su una e su entrambi le superfici.

I provini sono stati inseriti all'interno della macchina di prova Galdabini modello PCM/300, ruotati di 45° rispetto all'orizzontale, posizionati su due scarpe metalliche appositamente preparate per le prove di compressione diagonale, come descritto in [109] (Fig. 5.3), seguendo le specifiche dettate dall'ASTM E519/E519M – 22 [75]. La funzione di queste piastre in acciaio quello di ricevere le azioni trasmesse dalla cella di carico e ritrasmetterle all'intero provino sottoposto al test.

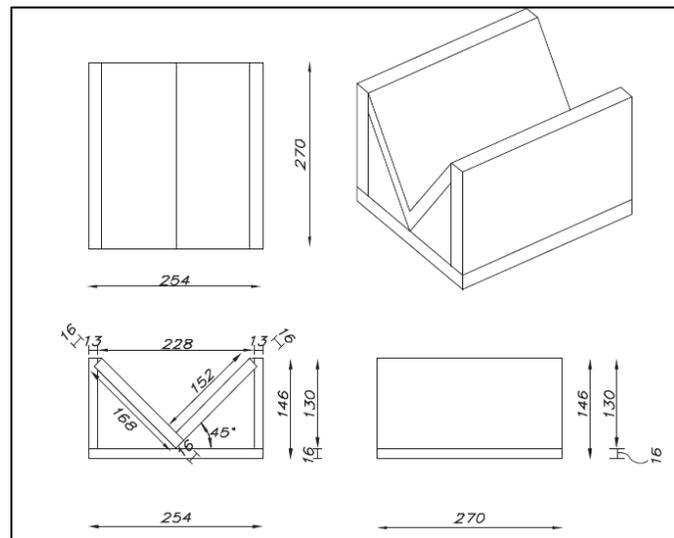


Fig. 5.3 Disegno preparatorio per la progettazione delle scarpe metalliche [109].

Per prima cosa, viene posizionata la scarpa metallica inferiore, dopodiché si procede al posizionamento del provino in posizione baricentrica rispetto alla piastra inferiore, mediante cappatura in gesso, necessaria a formare uno strato di allettamento tra il muretto e la base metallica, in modo da garantire una distribuzione omogenea del carico. Successivamente, si procede al posizionamento della scarpa metallica superiore, assicurandosi che sia allineata a quella inferiore, su cui è stata collocata una piastra metallica collegata alla cella di carico mediante una sfera in acciaio, in prossimità della quale sono stati collocati due trasduttori di spostamento. Al fine di determinare le deformazioni lungo le direttrici delle diagonali del provino, e quindi misurare l'eventuale accorciamento della verticale e allungamento dell'orizzontale, sono stati installati quattro trasduttori di spostamento a forma arcuata, collocati al centro del campione, rispettivamente due verticali e due orizzontali, posizionati sul fronte e sul retro del provino.

A titolo di esempio, in Fig. 5.4 è rappresentata la configurazione del set-up di prova del pannello murario non rinforzato.

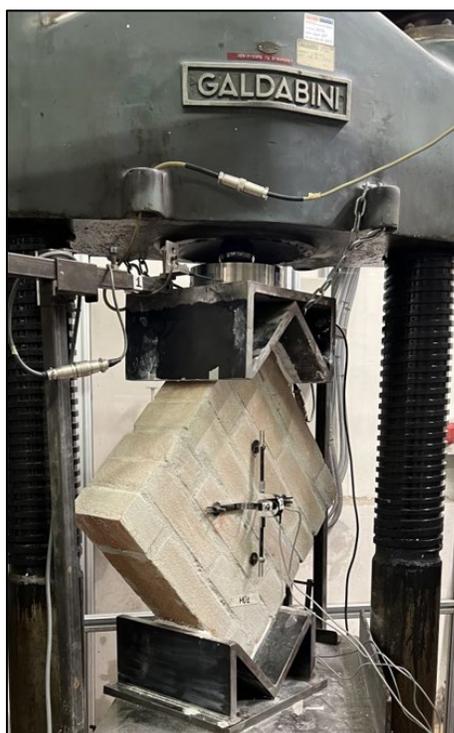


Fig. 5.4 Configurazione del set-up di prova di compressione diagonale.

5.1. Analisi dei risultati delle prove di compressione diagonale su pannelli in muratura rinforzato dal composito FRLM

In accordo con l'ASTM E519/E519M – 22 [75], la tensione tangenziale è definita mediante l'equazione:

$$S_s = 0.707P / A_n$$

Equazione 8 [75].

In cui:

- S_s è la tensione tangenziale, ricavata sull'area netta di applicazione del carico [N/mm²].
- P è il carico applicato lungo la diagonale del pannello murario [N]
- A_n è l'area netta del provino su cui è applicato il carico [mm²], calcolata mediante la formula:

$$A_n = \frac{(w + h)}{2} t$$

Equazione 9 [75].

In cui:

- w rappresenta la larghezza del provino
- h è l'altezza del pannello
- t indica lo spessore del pannello.

Per la valutazione del valore degli spostamenti, sono state calcolate le medie delle posizioni dei due trasduttori di spostamento situati in cima alla scarpa metallica superiore. Inoltre, sono stati registrati gli accorciamenti Δy [mm] della diagonale compressa e gli allungamenti Δx [mm] della diagonale tesa localizzati perpendicolarmente alla direttrice del carico.

Per ogni test sono riportati le foto fronte-retro e i relativi schemi, in cui sono indicate le lesioni verificatesi dopo la prova, i grafici load- displacement (con i valori di carico [N] sulle ordinate e gli spostamenti [mm] sulle ascisse) e i grafici stress- strain (con i valori di tensione di trazione e compressione [N/mm²] sulle ordinate e le deformazioni sulle ascisse), valutati sia sul fronte che sul retro del provino testato.

Si riportano, inoltre, le tabelle con i risultati ottenuti, valutati in termini di:

- Carico massimo F_{max} [N] applicato lungo la diagonale del pannello murario.
- Valore dello spostamento [mm] relativo al carico massimo.
- Area netta A_n [mm²] del provino su cui è applicato il carico.
- Deformazione media relativa all'allungamento Δx [mm], misurata tra le distanze dei due trasduttori di spostamento orizzontali, posizionati sul fronte e sul retro del pannello, di dimensione pari a 200 mm.
- Deformazione media relativa all'accorciamento Δy [mm], misurata tra le distanze dei due trasduttori di spostamento verticali, posizionati sul fronte e sul retro del pannello, di dimensione pari a 200 mm.
- Tensione tangenziale S_s [N/mm²], ricavata sull'area netta di applicazione del carico.

Dall'osservazione dei risultati ottenuti dalle prove di compressione diagonale effettuate, si nota un importante incremento di resistenza di picco al variare della quantità del rinforzo applicato. Il pannello murario non rinforzato M1_DTNR ha presentato un valore massimo di tensione tangenziale S_s pari a 0.57 N/mm², caratterizzato da un comportamento fragile a trazione e compressione pressoché analogo su entrambe le facce. Per i provini rinforzati da un solo lato, il valore di tensione massima aumenta, risultando pari a circa 0.85 N/mm² per M3_DTR1 e M4_DTR1, mentre il pannello M2_DTR1 ha raggiunto una tensione di picco pari a 1.26 N/mm². I primi due pannelli hanno presentato un comportamento in trazione e compressione molto simile, mentre M4_DTR1 è caratterizzato da curve anomale in compressione, probabilmente verificatesi dal distaccamento del rinforzo al raggiungimento del valore di carico massimo, pari a 63371.57 N/mm². Le prove di compressione diagonale eseguite sui pannelli murari rinforzati su entrambi i lati, hanno registrato risultati nettamente superiori, rispettivamente 1.64 N/mm² per M5_DTR2 e 1.46 N/mm² per M6_DTR2 e M7_DTR2, i grafici stress- strain evidenziano un andamento analogo delle due curve relative al comportamento a trazione e a compressione del pannello sollecitato, bilanciato dalla presenza del rinforzo su entrambe le facce del pannello. Per quanto riguarda il quadro fessurativo dei pannelli in muratura rinforzati su entrambi i lati, una volta rimosso il composito dai muretti rinforzati, si è osservato che su ogni pannello si sono manifestate rotture di tipo miste, presentando lesioni nei pressi dei giunti e dei ricorsi di malta e rottura degli elementi in laterizio.

Di seguito sono riportate i risultati per ogni provino testato, corredati da descrizione specifica relativa al comportamento delle curve in trazione e in compressione del pannello sottoposto a compressione diagonale e le analisi del quadro fessurativo generale.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M1_DTNR**

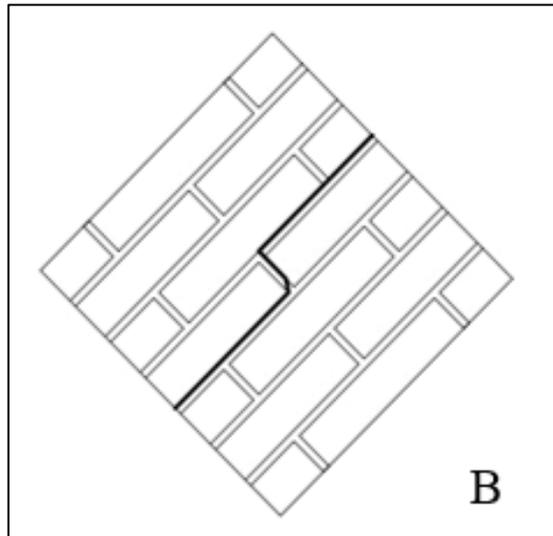
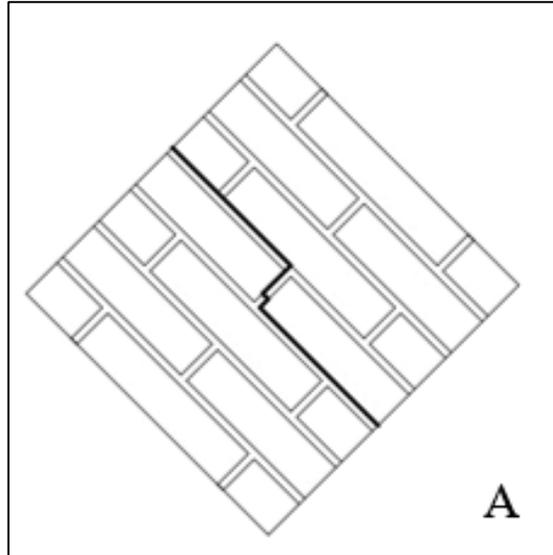
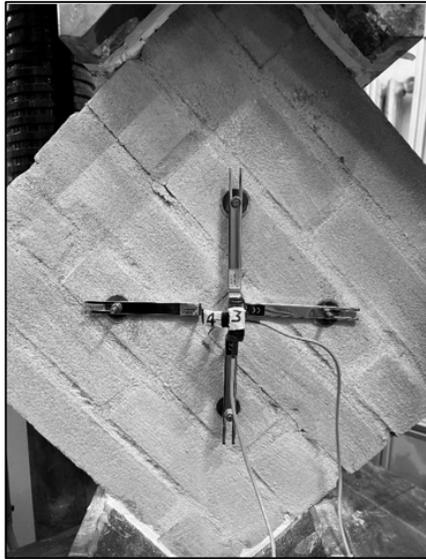


Fig. 5.5 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M1_DTNR dopo la rottura.

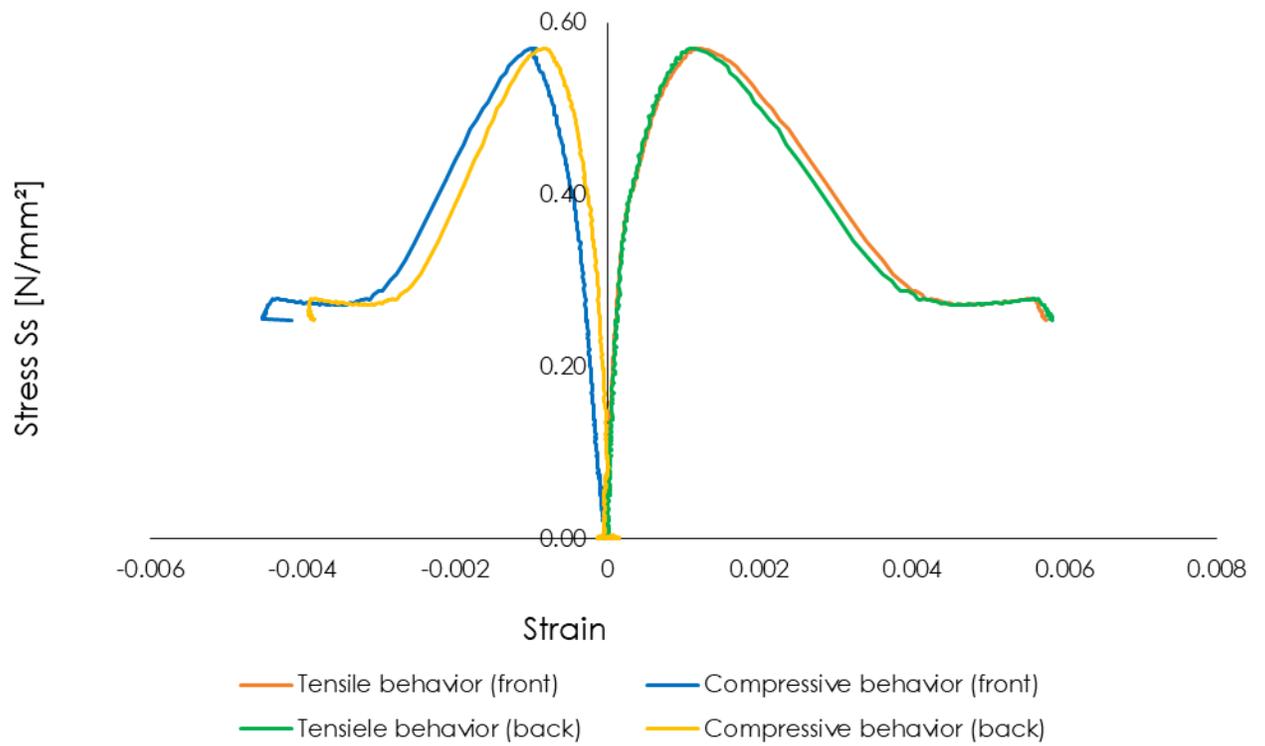


Fig. 5.6 Comportamento a compressione e a trazione di M1_DTNR sottoposto a prove di compressione diagonale.

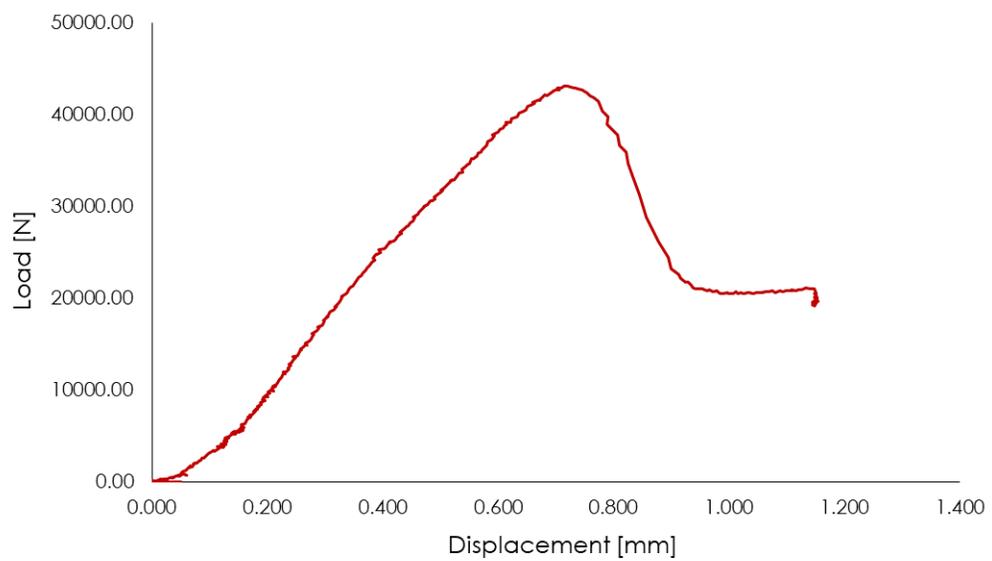


Fig. 5.7 Grafico carico- spostamento di M1_DTNR sottoposto a prove di compressione diagonale.

Il pannello in muratura non rinforzato ha presentato un primo cedimento in corrispondenza del giunto di malta in mezzera, provocando una fessurazione in corrispondenza del punto d'incontro delle diagonali, passante per tutto il pannello.

Tale lesione ha provocato una modesta perdita di carico, raggiungendo un valore di tensione pari a circa 0.25 N/mm².

In Fig. 5.6 è riportato il grafico tensione deformazione; dove si indica il valore delle deformazioni in termini di accorciamenti lungo l'asse verticale e allungamenti lungo la direttrice orizzontale su entrambi i lati del pannello.

In Tab. 5-1 sono rappresentati i valori di carico massimo e tensione tangenziale corrispondente, valutando le deformazioni verificatesi sia sul fronte che sul retro del pannello.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm ²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm ²]
M1_DTNR	43104.27	0.71	52500	0.0011	-0.0009	0.57

Tab. 5-1 Risultati delle prove di compressione diagonale su M1_DTNR.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M2_DTR1**

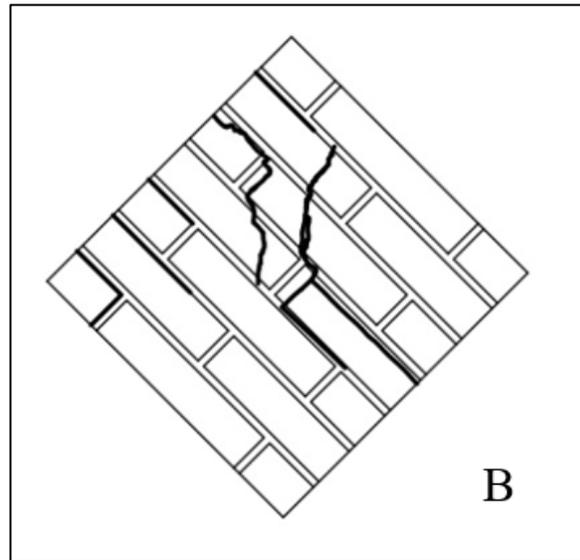
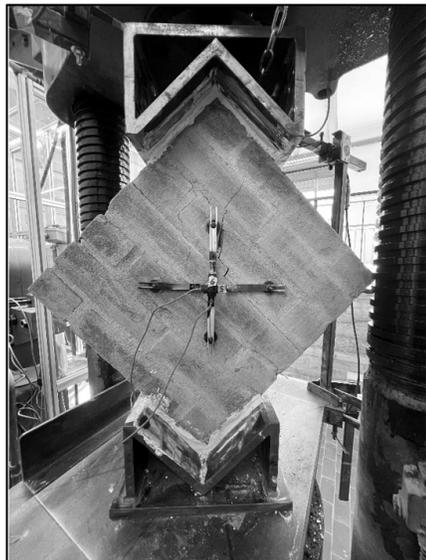
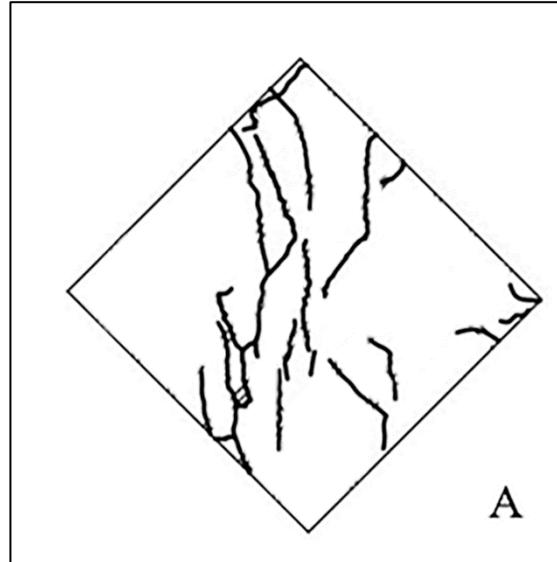
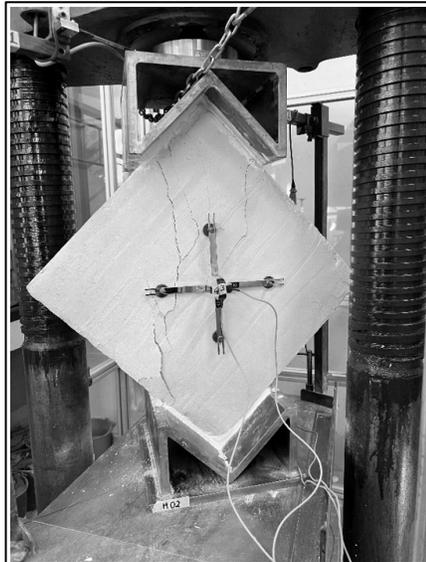


Fig. 5.8 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M2_DTR1 dopo la rottura.

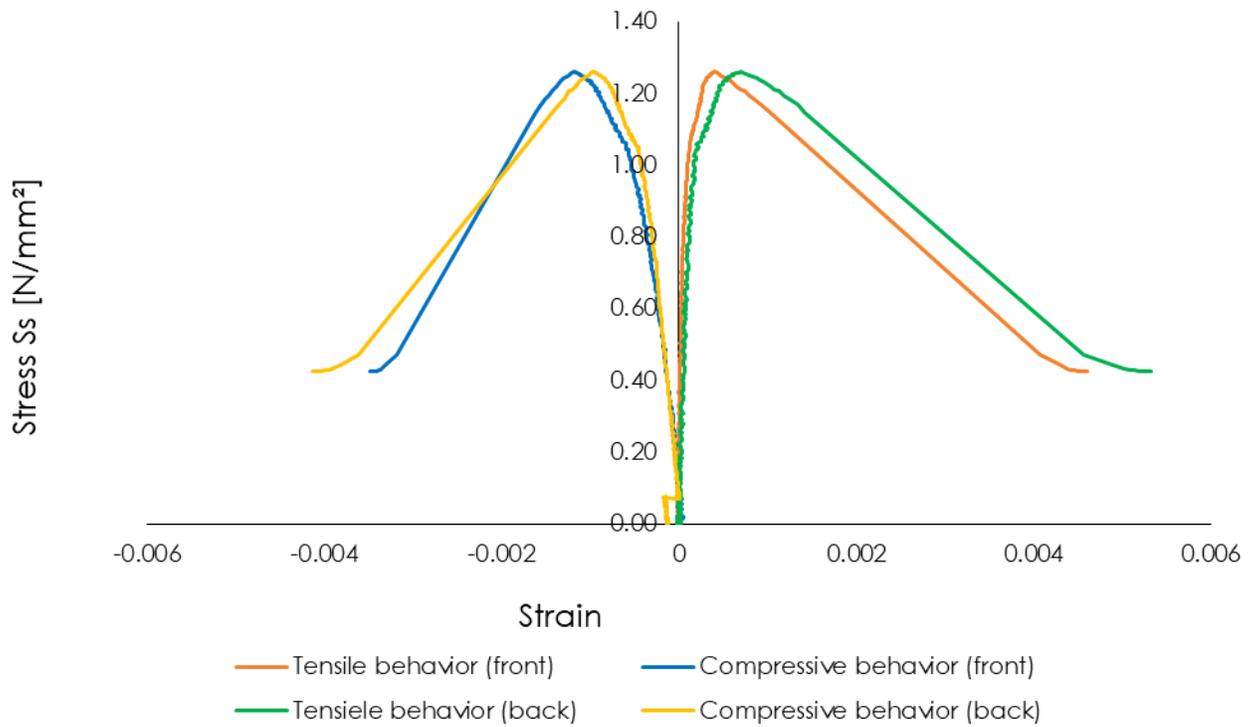


Fig. 5.9 Comportamento a compressione e a trazione di M2_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

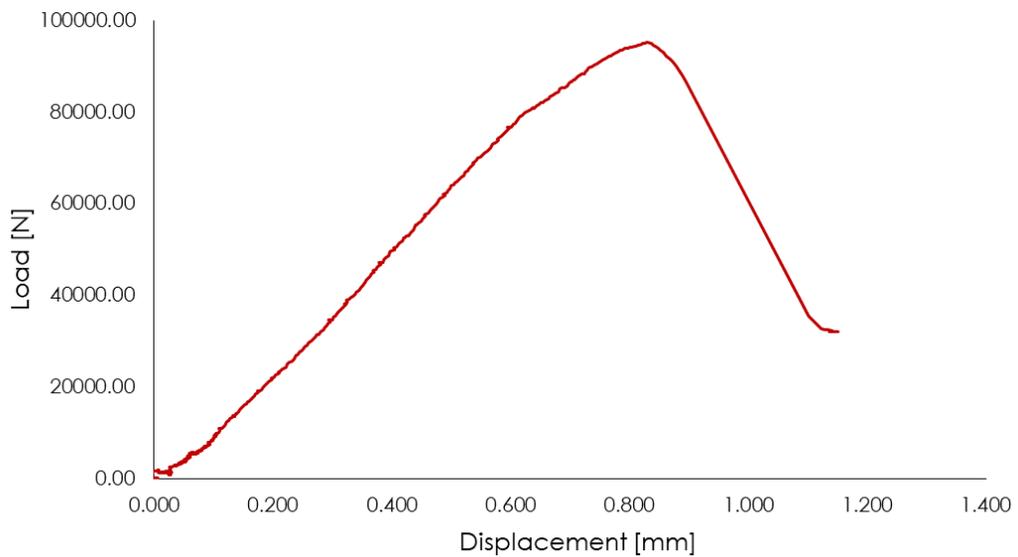


Fig. 5.10 Grafico carico- spostamento di M2_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

Sulla superficie rinforzata, le lesioni hanno raggiunto ampiezze notevoli, causando la rottura di alcuni elementi in laterizio (Fig. 5.8). In particolare, le lesioni che si sono manifestate in prossimità dei punti di contatto tra la piastra superiore e il pannello, hanno provocato lesioni molto profonde, una delle quali è tracciata per tutto il pannello lungo la direzione di applicazione del carico.

Le curve tensione- deformazione sono caratterizzate da un andamento iniziale pressoché lineare, fino al raggiungimento di circa 1.00 N/mm², seguita da una scarsa deformazione plastica e dal raggiungimento del valore di tensione massima pari a 1.26 N/mm². L' interruzione della prova è avvenuta a circa l'80% del carico massimo, pari a circa 20000 N.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm²]
M2_DTR1	95199.62	0.83	52500	0.0006	-0.0011	1.26

Tab. 5-2 Risultati delle prove di compressione diagonale su M2_DTR1.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M3_DTR1**

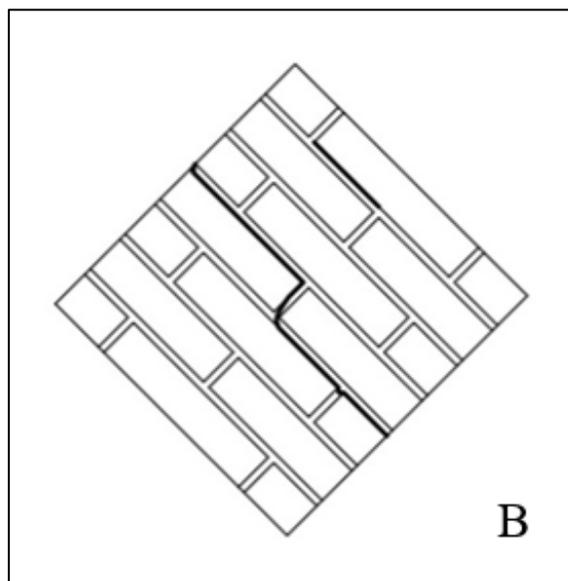
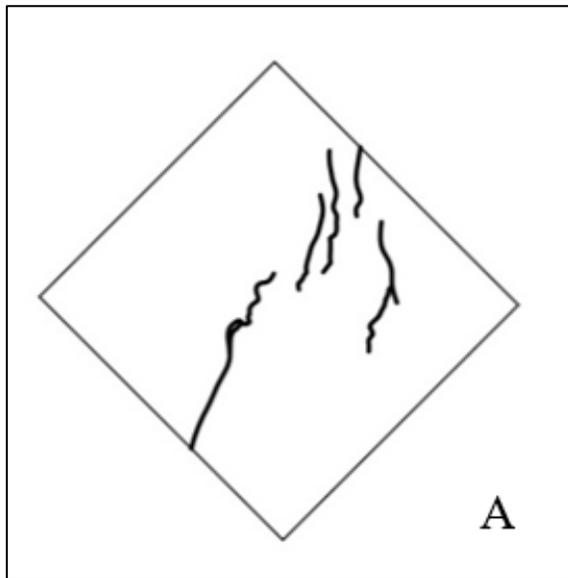
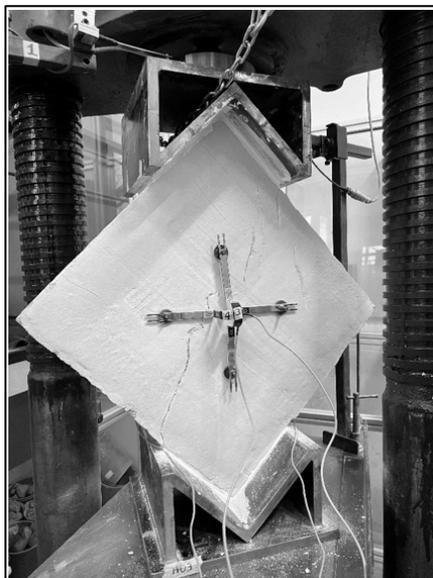


Fig. 5.11 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M3_DTR1 dopo la rottura.

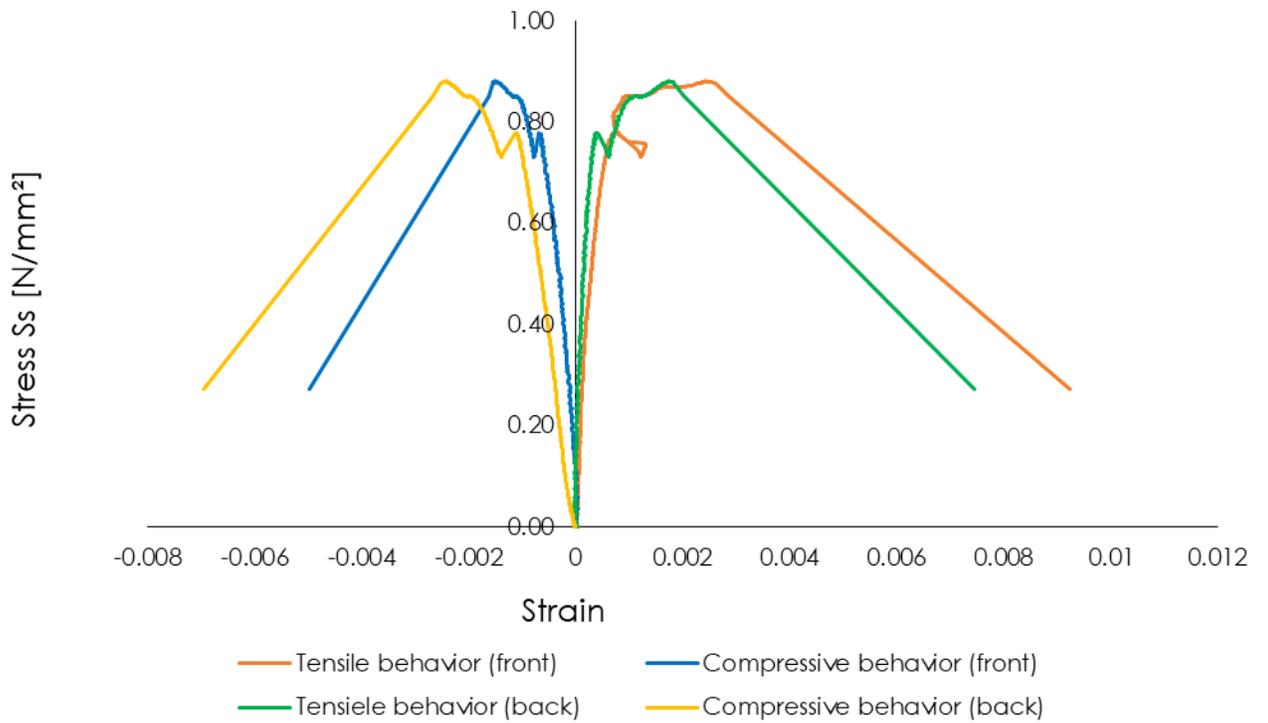


Fig. 5.12 Comportamento a compressione a trazione di M3_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

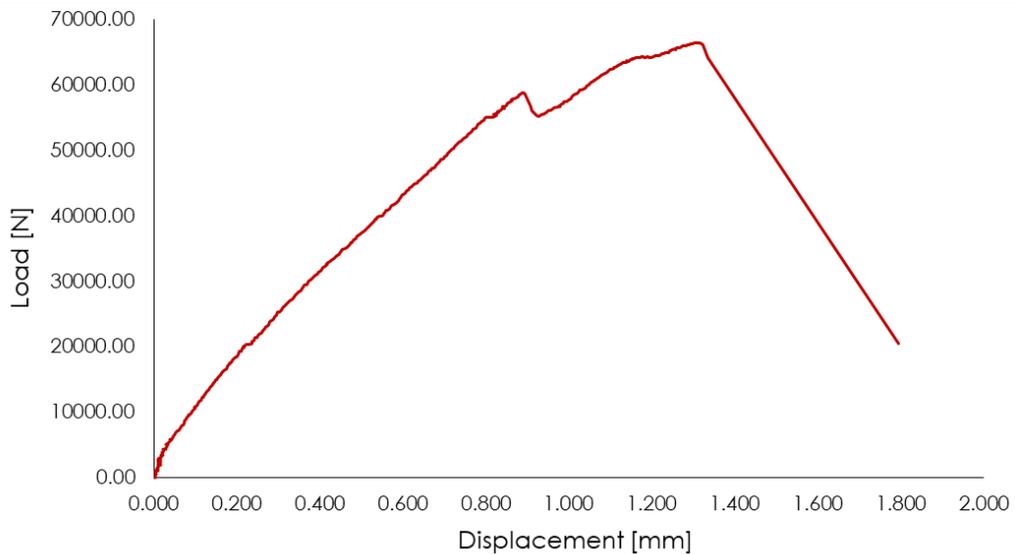


Fig. 5.13 Grafico carico- spostamento di M3_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

Come nel caso del pannello in muratura non rinforzato, anche in questo caso la crisi di carico si è manifestata in zona baricentrica, causando lo scorrimento dei giunti di malta in direzione dell'altezza del pannello. In questo caso, la conformazione del quadro fessurativo è probabilmente dovuta alla lesione che si è formata nel punto di contatto tra la piastra inferiore e il pannello, causando lo scorrimento i dei ricorsi orizzontali di malta.

Le curve tensione- deformazione sono caratterizzate da uno stato iniziale lineare molto ripido, fino al raggiungimento del valore di tensione massima pari a 0.88 N/mm² (Fig. 3.12). Una volta raggiunta la tensione di picco, la curva subisce una repentina perdita di carico, durante la quale si sono formate le prime lesioni, generando il distaccamento dei ricorsi di malta, ma senza presentare alcuna frattura negli elementi in laterizio.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm ²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm ²]
M3_DTR1	66505.08	1.31	52500	0.0021	-0.0019	0.88

Tab. 5-3 Risultati delle prove di compressione diagonale su M3_DTR1.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M4_DTR1**

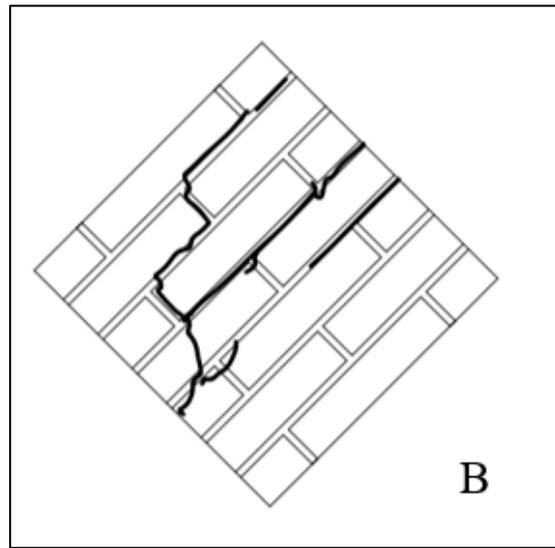
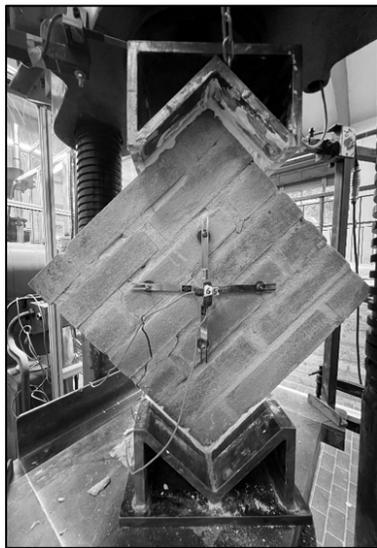
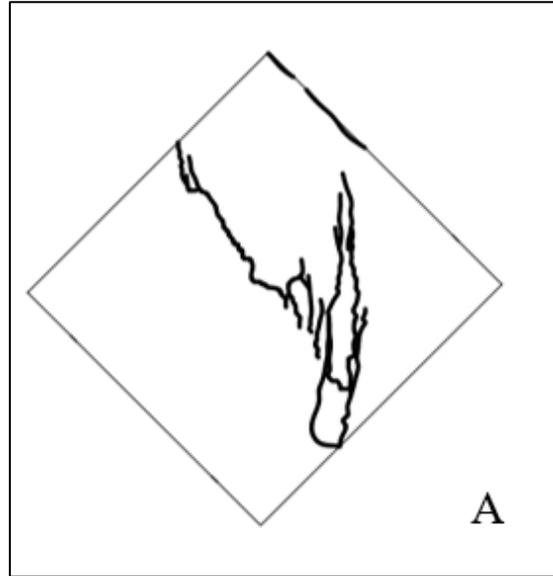
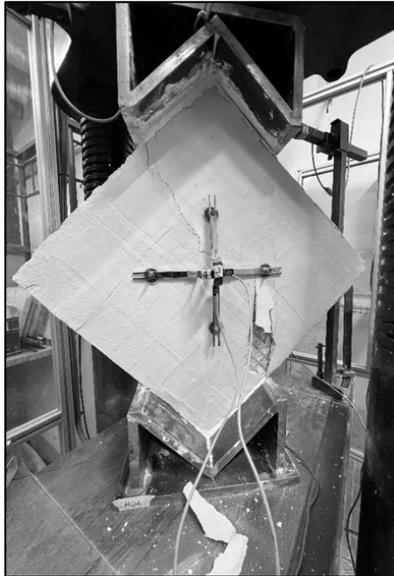


Fig. 5.14 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M4_DTR1 dopo la rottura.

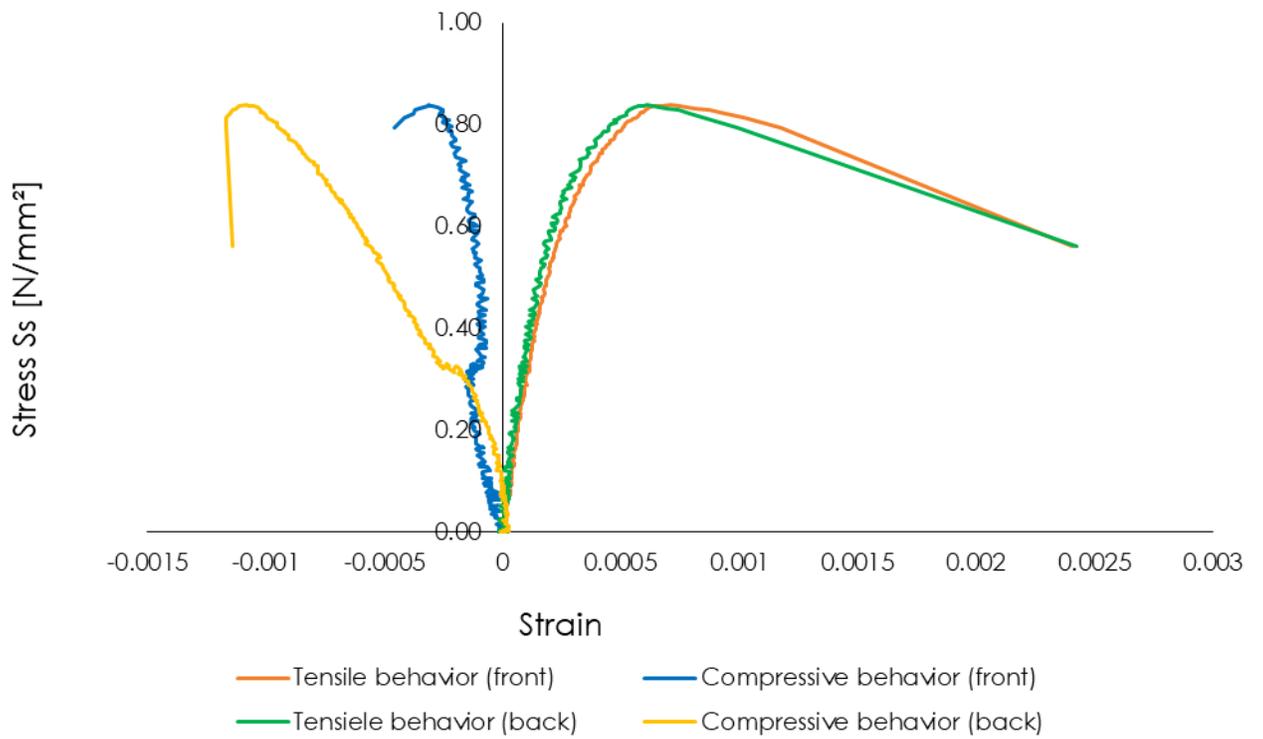


Fig. 5.15 Comportamento a compressione a trazione di M4_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale..

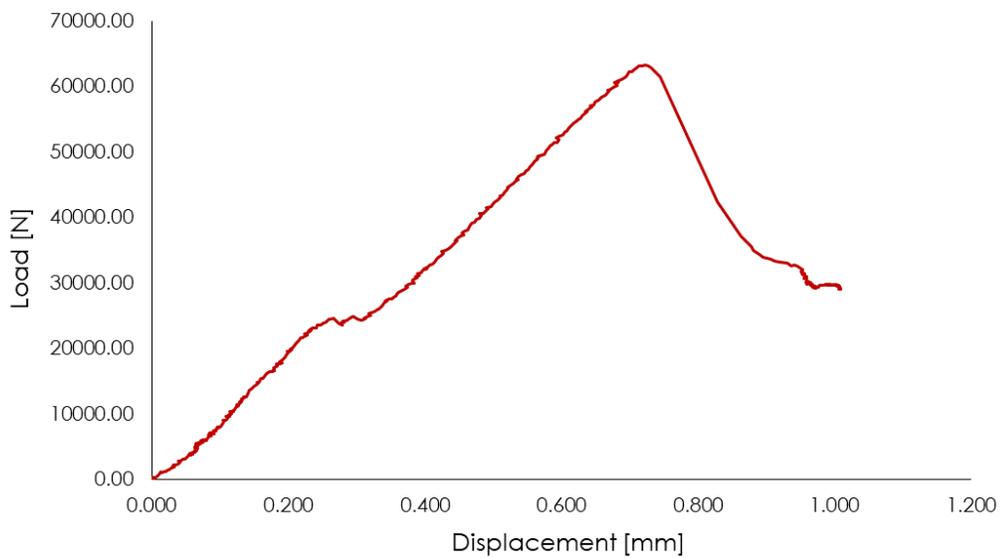


Fig. 5.16 Grafico carico- spostamento di M4_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

Le prove effettuate sul provino M4_DTR1 hanno generato la formazione di lesioni nella zona di estremità del provino, ampliandosi sulla parte rinforzata e sul retro lungo la direzione della diagonale compresa tra le piastre.

Il valore massimo di tensione di trazione raggiunto è pari a 0.84 N/mm², seguito da una fase deformativa plastica fino al raggiungimento del 75% di massima tensione. Il comportamento a compressione del pannello ha presentato una fase plastica quasi inesistente sia sul fronte che sul retro, descrivendo il distaccamento del composito dal pannello murario, verificatosi al raggiungimento del valore di carico massimo pari a 63371.6 N/mm².

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm ²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm ²]
M4_DTR1	63371.57	0.72	52500	0.0007	-0.0007	0.84

Tab. 5-4 Risultati delle prove di compressione diagonale su M4_DTR1.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M5_DTR2**

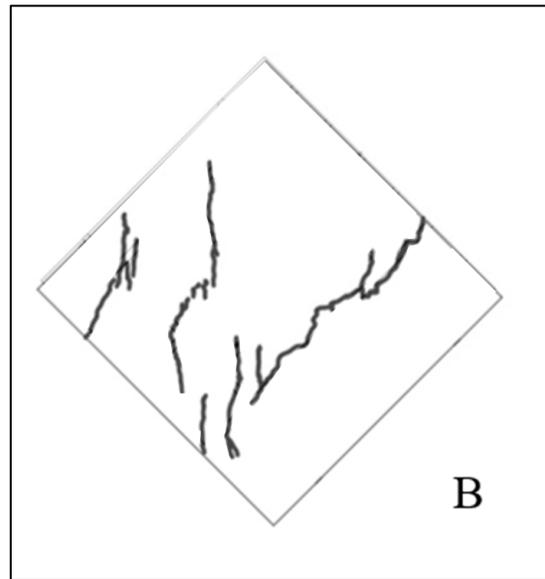
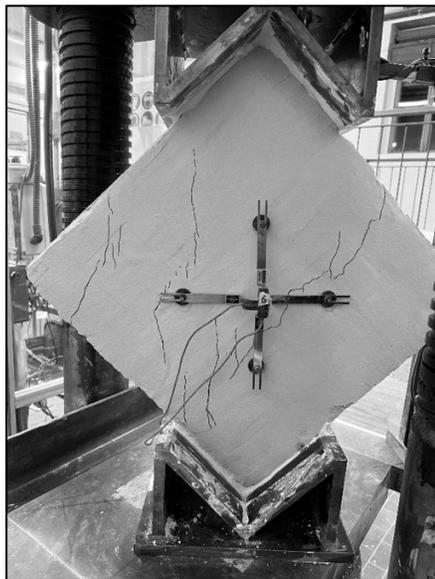
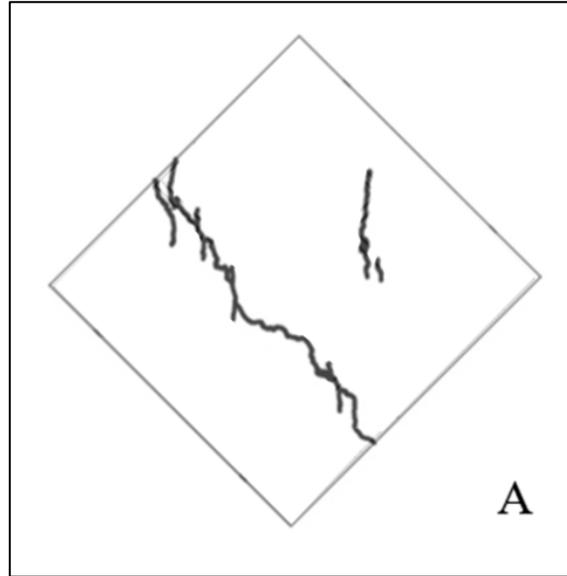
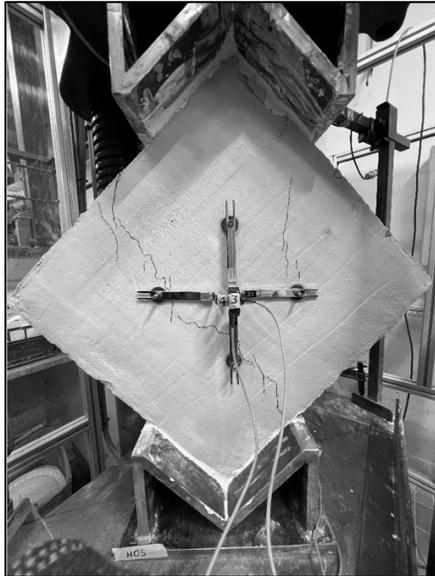


Fig. 5.17 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M5_DTR2 dopo la rottura.

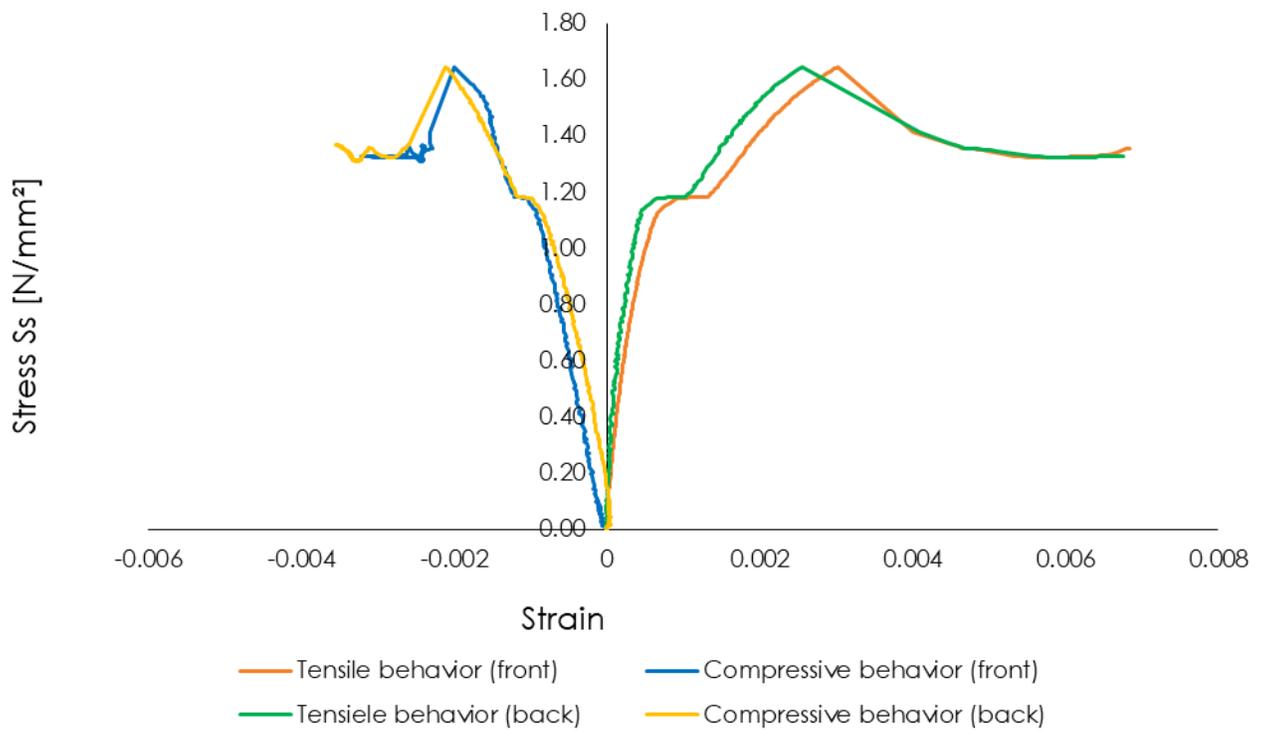


Fig. 5.18 Comportamento a compressione a trazione di M5_DTR2 sottoposto a prove di compressione diagonale.

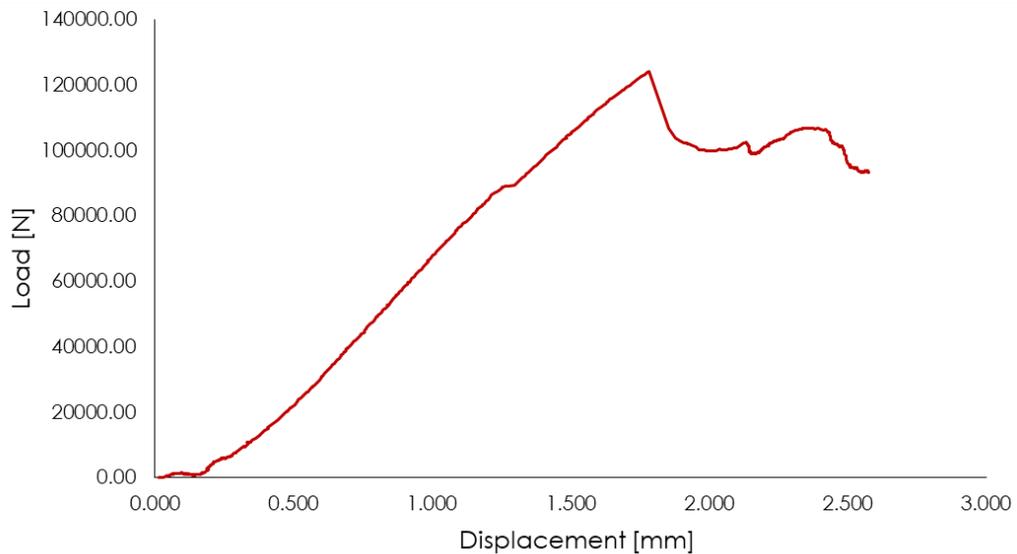


Fig. 5.19 Grafico carico- spostamento di M5_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

Dopo un primo tratto lineare, la curva ha aggiunto il valore di massima tensione pari a 1.64 N/mm², seguita da una fase pseudo costante di deformazione plastica per il comportamento a trazione, fino al raggiungimento del valore di deformazione ultimo pari a 0.0028. Le curve che descrivono il comportamento in compressione, invece, definiscono una perdita di carico improvvisa al raggiungimento del valore di carico massimo pari a 124216 N/mm², seguito da una breve fase costante fino all'interruzione della prova.

Per quanto riguarda il quadro fessurativo, in questo caso si è verificata una lesione a contatto della piastra inferiore, che ha seguito un andamento a 45° lungo tutta la superficie frontale del rinforzo. Sul retro, invece, si è presentata un'ulteriore lesione presso la porzione del muro in trazione,

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm ²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm ²]
M5_DTR2	124216.02	1.78	52500	0.0028	-0.0020	1.64

Tab. 5-5 Risultati delle prove di compressione diagonale su M5_DTR2.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M6_DTR2**

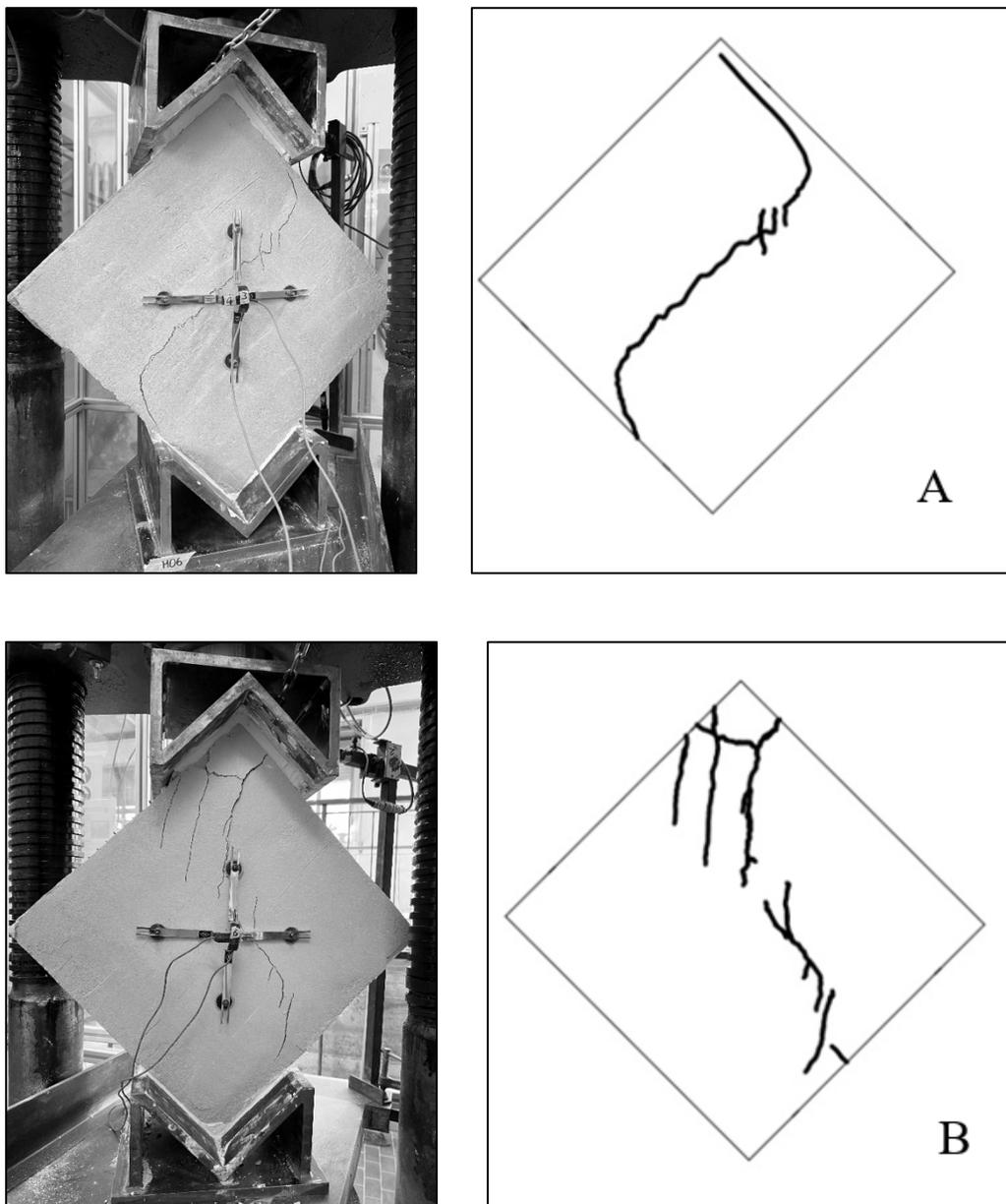


Fig. 5.20 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M6_DTR2 dopo la rottura.

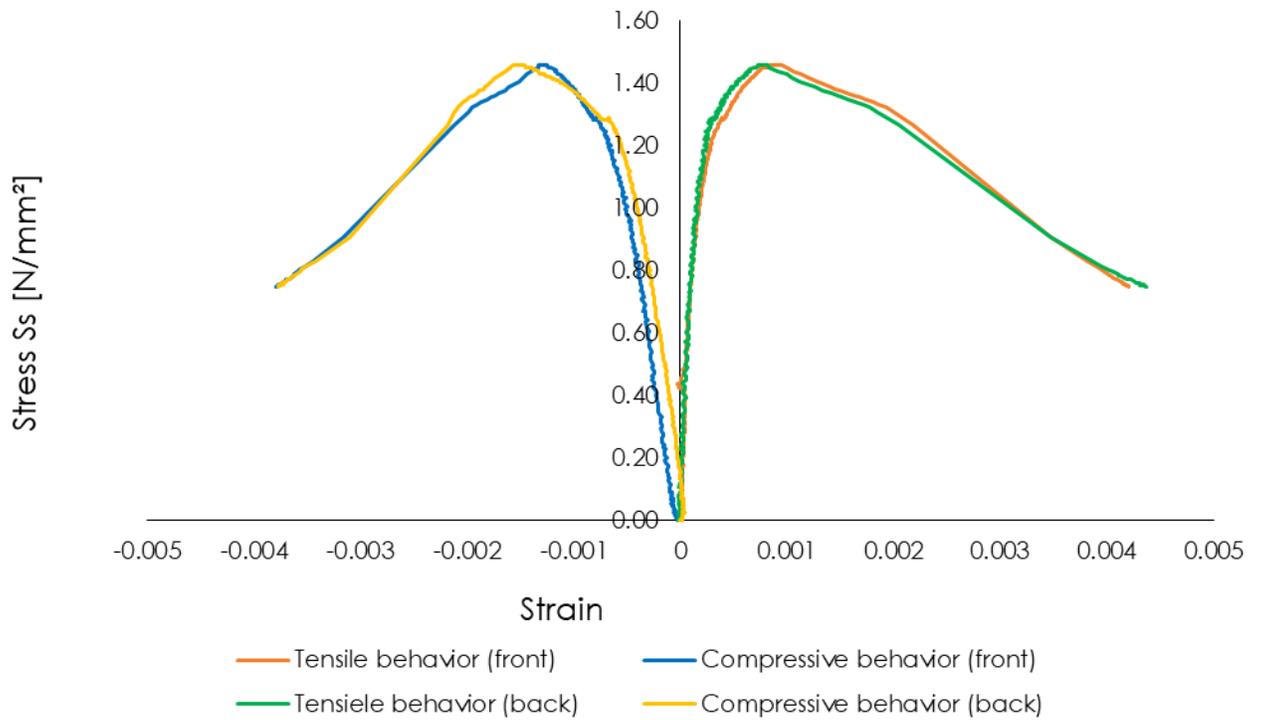


Fig. 5.21 Comportamento a compressione a trazione di M6_DTR2 sottoposto a prove di compressione diagonale.

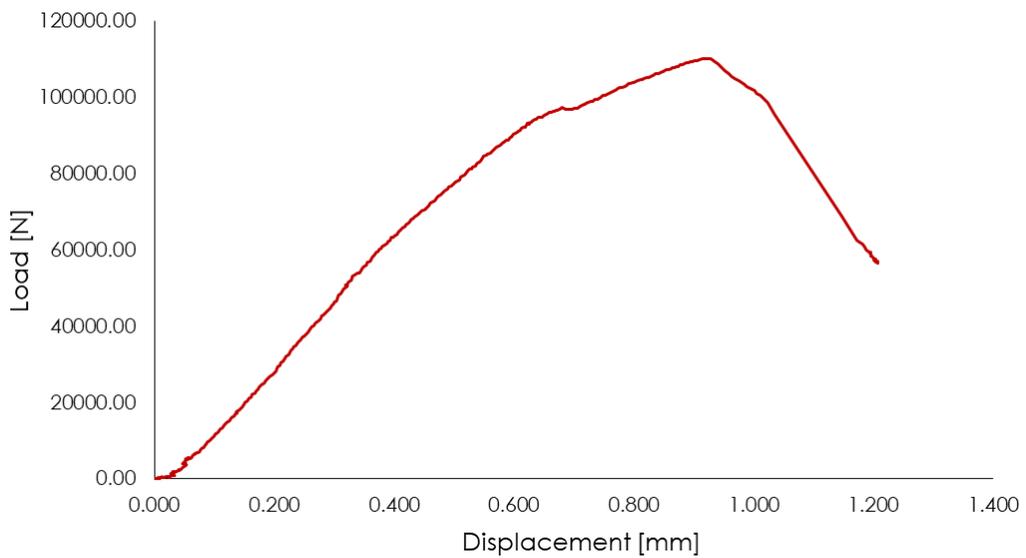


Fig. 5.22 Grafico carico- spostamento di M6_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

Il grafico stress- strain mostra un andamento analogo delle due curve relative al comportamento a trazione e a compressione del pannello sollecitato, bilanciato dalla presenza del rinforzo su entrambe le facce del pannello. Dopo un primo tratto lineare, la curva raggiunge il valore di massima tensione pari a 1.46 N/mm², seguita da una perdita di carico fino al 50% del valore di picco, garantendo una buona capacità deformativa dovuta dalla presenza del rinforzo su entrambe le superfici del muretto. Per quanto riguarda il quadro fessurativo, in questo caso si sono verificate le rotture degli elementi in laterizio in prossimità della scarpa metallica superiore, proseguendo lungo tutta la direttrice verticale.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm ²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm ²]
M6_DTR2	110226.64	0.93	52500	0.0009	-0.0014	1.46

Tab. 5-6 Risultati delle prove di compressione diagonale su M6_DTR2.

**Risultati sperimentali delle prove di compressione diagonale su
M7_DTR2**

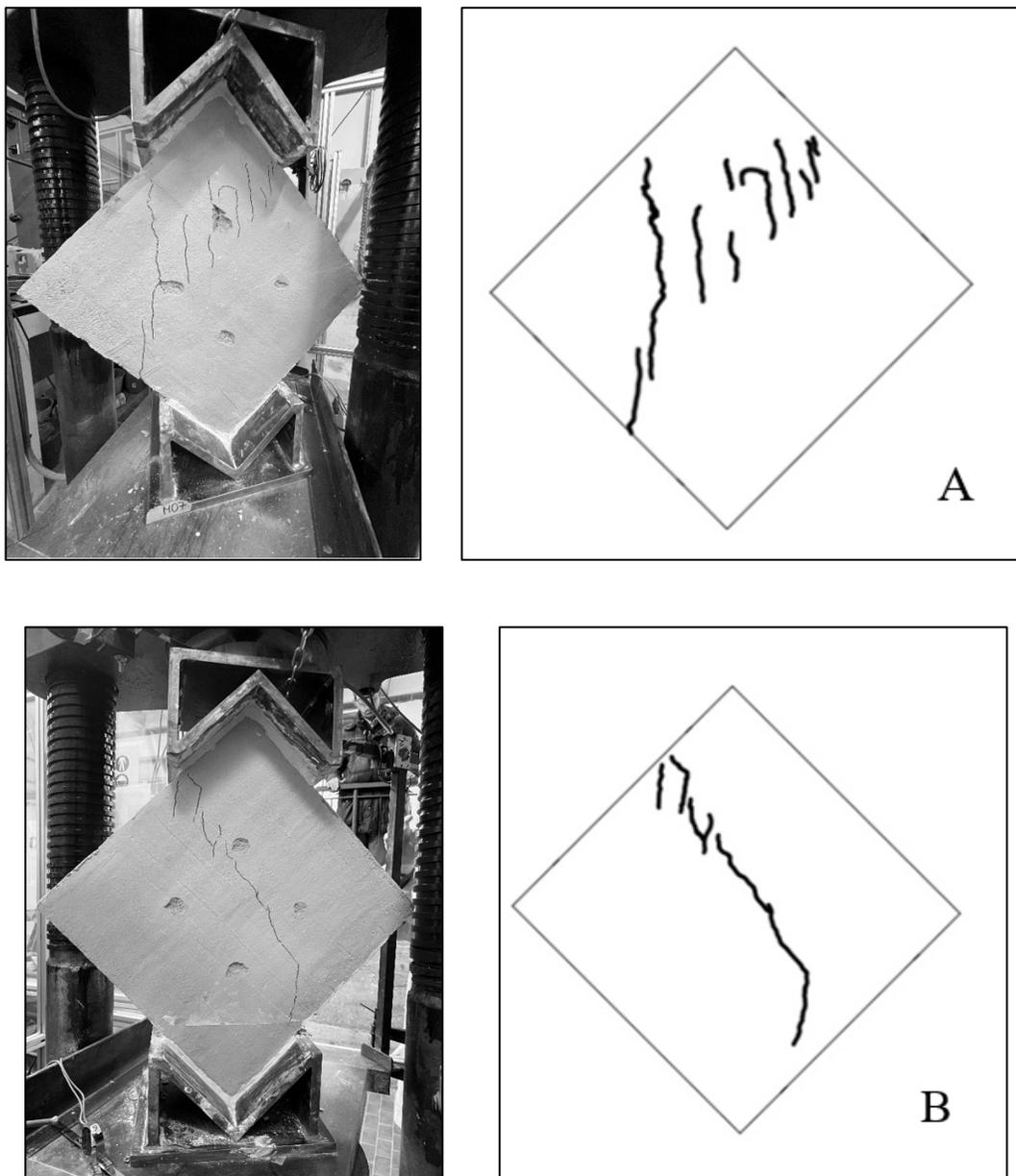


Fig. 5.23 Configurazione fronte (A) retro (B) del provino M7_DTR2 dopo la rottura.

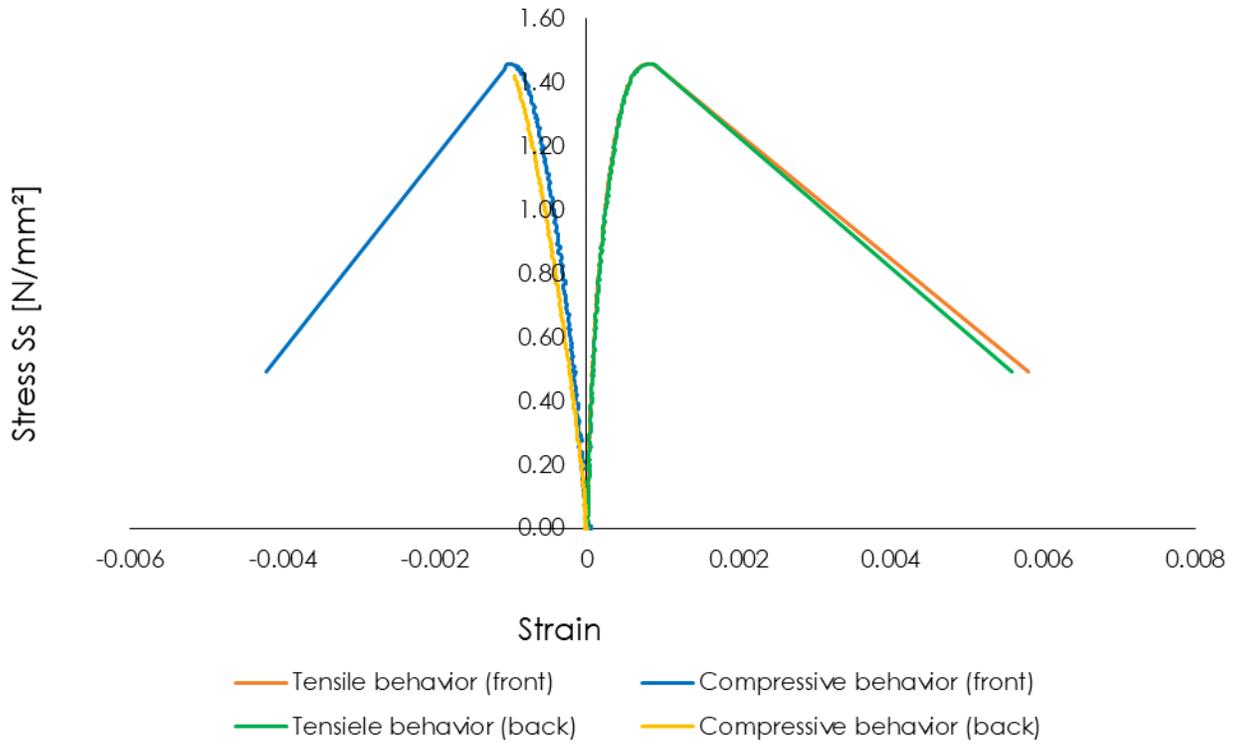


Fig. 5.24 Comportamento a compressione a trazione di M7_DTR2 sottoposto a prove di compressione diagonale.

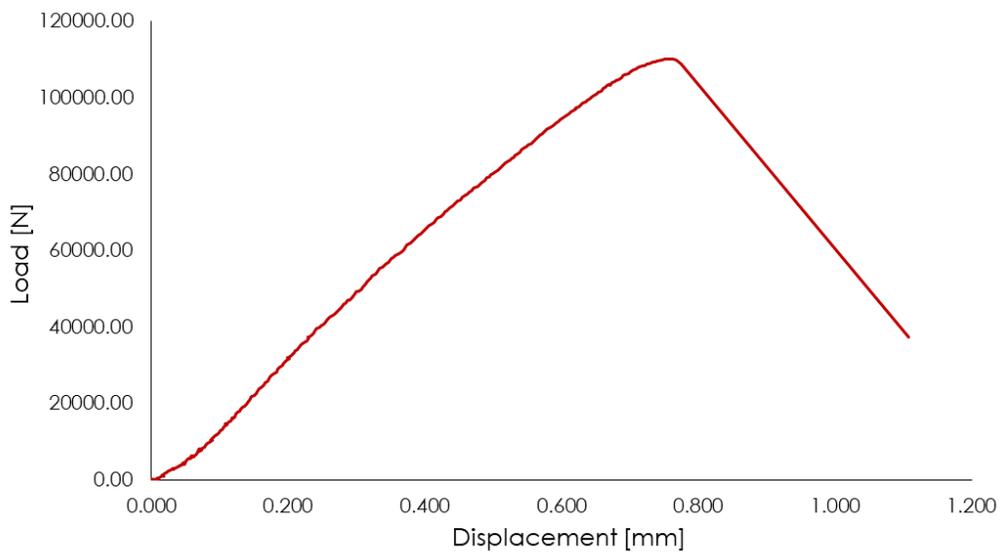


Fig. 5.25 Grafico carico- spostamento di M7_DTR1 sottoposto a prove di compressione diagonale.

In questo caso, l'andamento delle curve in trazione e in compressione è analogo, caratterizzato da un primo stato lineare fino a circa il 90% della massima tensione pari a 1.46 N/mm², seguita da una quasi inesistente fase plastica e dalla perdita di carico al 20% del valore di carico massimo (1120162 N), momento in cui si è interrotta la prova.

Il quadro fessurativo è caratterizzato dalla presenza di una lesione frontale verticale, posizionata in prossimità di due vertici delle scarpe metalliche, mentre sul retro si è sviluppata una lesione passante per il pannello in direzione della diagonale compressa.

Campione	Carico massimo Fmax [N]	Spostamento [mm]	Area netta An [mm²]	Deformazion e orizzontale	Deformazione verticale	Tensione tangenziale Ss [N/mm²]
M7_DTR2	110162	0.75	52500	0.0008	-0.0010	1.46

Tab. 5-7 Risultati delle prove di compressione diagonale su M7_DTR2.

Parte III: Progettazione di un intonaco termico costituito da calce idraulica naturale con l'aggiunta sughero in granuli

6. Descrizione generale delle procedure di analisi

La terza parte del lavoro di ricerca mira allo studio del mix design di una matrice ideale per la progettazione del materiale composito FRLM utilizzabile come rinforzo su edifici in muratura esistenti. Tale studio è stato svolto mediante attività di ricerca, test in laboratorio e procedure di prova volte ad analizzare le proprietà del materiale, che hanno portato alla realizzazione della miscela finale.

Per prima cosa, è stato selezionato un intonaco esistente sul mercato internazionale, che, se rinforzato con fibre di basalto, presenta ottime caratteristiche meccaniche di compressione e adesione quando applicato su pareti in muratura.

L'intonaco selezionato, che si indica con il codice INT.GFA, rispetta tutti i valori limite imposti delle proprietà analizzate nella prima parte della ricerca, analizzati nel capitolo 1.

La seconda fase riguarda la scelta dell'aggregato naturale, sostenibile e riciclabile da aggiungere a INT.GFA, in modo da migliorarne le proprietà igrometriche e di isolamento termico. In questi termini, il materiale che sembra essere il miglior aggregato è il sughero in granuli, che, se aggiunto a malte o intonaci a base di calce, ottimizza notevolmente le proprietà termiche generali della miscela.

Una volta scelto il tipo di aggregato da aggiungere a INT.GFA, è stata controllata la granulometria di INT.GFA con l'aggiunta del sughero in granuli. Per definire la curva granulometrica della nuova miscela sono stati esaminati dei modelli matematici teorici, rintracciati mediante un'accurata lettura dello stato dell'arte in letteratura, e confrontati con i limiti imposti dalle normative ASTM C144 – 18 [110]. La costruzione dei modelli matematici e della curva granulometrica relativa all'ASTM è stato un elemento cruciale al fine di verificare la fattibilità del progetto.

Successivamente, si sono definite le tipologie di matrice da testare, analizzando il contenuto di sughero all'interno della miscela in termini di peso in percentuale rispetto a INT.GFA. Dopo un'analisi approfondita dello stato dell'arte attuale in termini di malte a base di calce additivate da sughero in granuli, si è deciso di sviluppare sei miscele differenti, caratterizzate da percentuali in peso del sughero aggiunto alla miscela che variano dallo 0% al 3%, indicate dal codice Mix.1- Mix.6, in cui Mix.1 rappresenta la matrice di controllo, vale a dire INT.GFA senza alcuna aggiunta del sughero in granuli.

Per controllare la corretta progettazione della miscela, bisogna assicurarsi che non si verifichino fenomeni di segregazione, fenomeno caratterizzato dalla separazione dei diversi componenti costituenti la miscela. Nel caso in esame, attraverso un'analisi tomografica computerizzata e l'elaborazione tridimensionale dei

campioni delle sei miscele, è stato possibile verificare che non si presentano fenomeni di segregazione, valutando il posizionamento e le quantità in volume del sughero in granuli per ogni miscela.

Un'ulteriore analisi è stata svolta per determinare la lavorabilità delle miscele, mediante "flow test" in accordo con le normative ASTM [111]. I risultati finali hanno dimostrato che, all'aumentare del volume di sughero, diminuisce la lavorabilità, mostrando valori pressoché accettabili nei limiti imposto dall'ASTM.

Al fine di valutare le proprietà termo-igrometriche delle nuove miscele, sono state effettuate le prove di assorbimento d'acqua per capillarità, seguendo le specifiche dell'ASTM C1403 – 22a [67]. Tale metodo di prova non distruttivo ha permesso di determinare il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità di malte e intonaci per muratura induriti. Dai calcoli effettuati mediante le equazioni indicate dalle ASTM e dalle UNI EN, si è dimostrato che il coefficiente di assorbimento per capillarità è compreso nei limiti imposti inizialmente dalle UNI EN 1015-18:2004 I[68] (paragrafo 1.7), rientrando nella categoria W1.

Sui provini sottoposti alle prove di assorbimento capillare, sono state effettuate le prove a compressione in accordo all'ASTM C109/C109M-21 [62]. I risultati dei test hanno presentato valori positivi accettabili, in quanto il valore della resistenza a compressione non è mai inferiore a 1,5 N/mm², rispettando i limiti stabiliti nel paragrafo 1.3.

Nell'ultima fase del lavoro di ricerca si analizza il comportamento dell'adesione delle matrici mediante prove di adesione pull-off, procedura specificata nelle ASTM C1583/C1583M – 20 [102]. Queste prove vengono effettuate per misurare la resistenza dell'adesione tra il materiale composito FRLM, composto dalle sei matrici rinforzate con la fibra di basalto (analizzata nel paragrafo 1.6) e il supporto in muratura su cui è applicato il composito.

I test di adesione pull-off sono stati eseguiti su due tipi di superfici molto diversi tra loro: mattoni in tufo e mattoni in laterizio. I risultati ottenuti dalle prove di pull-off hanno dimostrato che le sei matrici hanno un buon comportamento quando applicate sui mattoni in tufo. Dai valori di resistenza di adesione ottenuti sui mattoni in laterizio rinforzati, si è osservata una forte dispersione tra i risultati ottenuti. Ciò è dipeso dalla diversità della rugosità superficiale dei mattoni utilizzati. I test effettuati sui mattoni caratterizzati da una superficie più liscia, hanno presentato un critico distacco all'interfaccia matrice-supporto, denotando la completa perdita di adesione.

Infine, in accordo alle UNI EN ISO 25178 [112], un'ulteriore analisi è stata svolta per misurare i parametri di rugosità superficiale dei mattoni di laterizio mediante l'utilizzo di un profilometro ottico.

7. Sviluppo e formazione della nuova matrice

Da un'attenta ricerca dello stato dell'arte in letteratura, l'aggregato naturale che ha presentato i migliori risultati in termini di miglioramento delle proprietà termiche e delle proprietà meccaniche se aggiunto a malte a base di calce idraulica naturale, è il sughero in granuli.

Diversi studi hanno dimostrato le ottime proprietà del sughero, materiale leggero, impermeabile, isolante dal punto di vista termico e acustico, resistente a fuoco e sostenibile, perché naturale, biodegradabile e riciclabile.

il sughero in granuli utilizzato per questa ricerca è caratterizzato da un peso specifico pari a 90 kg/m^3 e da un intervallo granulometrico pari a $0.5\div 0.8 \text{ mm}$, ottenuto da scarti di lavorazione di un'azienda italiana produttrice di tappi in sughero naturale, che ha fornito il materiale, sostenendo la ricerca.

L'intonaco selezionato a cui sarà aggiunto il sughero in granuli, è un prodotto che rispetta determinati valori delle proprietà analizzate nella prima fase del lavoro di ricerca, fatta eccezione per i valori di resistenza a compressione e conducibilità termica, parametri essenziali per questa sperimentazione.

La scelta di tale intonaco, che viene indicato con INT.GFA, è derivata dal fatto che è un materiale certificato per il rinforzo strutturale di elementi in muratura quando accoppiato a rete in fibra di basalto.

In Tab. 7-1 sono indicate le proprietà di INT.GTA riportate nella scheda tecnica del prodotto.

In tabella si nota un valore di conducibilità termica pari a 0.82 W/mK , molto elevato rispetto al limite stabilito nella prima fase della ricerca, pari a 0.1 W/mK , vale a dire appartenente alla categoria T1 secondo le UNI EN 998-1:2016 [64]. Tale scelta è stata effettuata perché l'aggiunta del sughero in granuli, come riportato da diversi studi in letteratura [113], [114], [115], [116], ha la capacità di ridurre drasticamente la conducibilità termica, proprietà che renderebbe l'intonaco INT.GFA una vera e propria matrice termica, ideale per la riqualificazione energetica e sismica degli edifici esistenti in muratura.

Un'ulteriore importante proprietà di INT.GTA da osservare è l'elevata resistenza a compressione, dichiarata da scheda tecnica maggiore di 15 N/mm^2 dopo i 28 giorni dalla maturazione, di dieci volte superiore al limite stabilito nella prima fase della ricerca, pari a 1.5 N/mm^2 in accordo alle UNI EN 998-1:2016 [64]. Questo valore così elevato rispetto ai limiti prestabiliti rende INT.GFA, anche in questo caso, un prodotto ideale per questa sperimentazione perché, secondo quanto analizzato dai dati presenti in letteratura, l'aggiunta del sughero in granuli in malte a base di calce idraulica naturale riduce, ma non in modo eccessivo, le proprietà meccaniche generali della miscela [117], [118].

<i>Matrice</i>	INT. GTA
<i>Legante</i>	Calce idraulica naturale NHL 3.5
<i>Aggregati</i>	Sabbia silicea, calcare, polveri di marmo
<i>Resistenza alla compressione [N/mm²]</i>	> 15
<i>Conducibilità termica λ [W/mK]</i>	0.82
<i>Massa volumica apparente [kg/m³]</i>	1580
<i>Resistenza di adesione su laterizio [N/mm²]</i>	> 1
<i>Coefficiente di assorbimento acqua [Kg/m² min^{1/2}]</i>	0.3
<i>Intervallo granulometrico [mm]</i>	0 ÷ 1.4
<i>Resistenza alla diffusione del vapore [-]</i>	15 ÷ 35
<i>Spessore di applicazione [mm]</i>	Max. 1.5 per strato

Tab. 7-1 Proprietà di INT.GFA descritte nella scheda tecnica del prodotto.

Il passo successivo è stato quello di determinare la percentuale in peso del sughero in granuli all'interno di INT.GTA, con l'obiettivo di ottenere un intonaco termico ideale per la creazione della nuova matrice per il materiale compositi FRLM, senza modificare i parametri di intervallo granulometrico, lavorabilità, idrorepellenza.

Per la ricerca delle percentuali in peso da aggiungere alla matrice di controllo, si è effettuato un attento studio dei lavori esistenti in letteratura, osservando che non c'è conformità tra le quantità utilizzate: alcuni autori analizzano le miscele in base alla percentuale di volume all'interno della miscela di controllo, proponendo valori molto elevati che rendono la nuova miscela non fluida, quindi non lavorabile, come indicato nelle ASTM C230/C230M – 23 [119] e nelle UNI EN 12350-2:2019 [120].

In [121] vengono analizzate le proprietà di adesione su supporti ceramici di malte a base cementizia con l'aggiunta di sughero in granuli; in questo caso, alla malta di controllo sono state aggiunte quantità di sughero in base alla percentuale in volume, in cui ogni miscela è caratterizzata da percentuali uguali o addirittura maggiori rispetto alla quantità di legante cementizio, quantità che renderebbero impossibile la preparazione della miscela, se si pensa all'elevata differenza tra la densità del cemento e quello del sughero, in questo caso, rispettivamente, pari a 3050 kg/m³ e 55÷75 kg/m³.

In [122], invece, le percentuali di sughero aggiunte a una malta a base di calce idraulica naturale, vengono calcolate in base al peso, precisamente viene preparata la malta di controllo con lo 0% di sughero, a cui viene aggiunto progressivamente il 2%,

il 4%, il 6% e l'8% del sughero in granuli in peso, di cui viene analizzata la resistenza meccanica a compressione, classificata come CSII per la malta di controllo e CSI per la malta con l'aggiunta dell'8% di sughero in peso, dimostrando che la resistenza meccanica diminuisce gradualmente all'aumentare del sughero.

Basandoci su quest'ultimo lavoro, analizzato, sono state preparate le miscele, aggiungendo a 100 g di INT.GTA percentuali di sughero in peso ad intervalli dello 0,5%. Le miscele ottenute sono state preparate a mano, senza variare le quantità di acqua d'impasto indicate dalla scheda tecnica. Ad ogni aggiunta di sughero, la lavorabilità dell'impasto diminuiva, finché si è deciso di non superare il 3% del sughero rispetto alla malta di controllo, analizzando, nello specifico le sei matrici elencate in Tab. 7-2, di cui si riportano le quantità di materiale utilizzato.

Campione	INT.GTA [g]	Sughero in granuli [g]	Acqua d'impasto [ml]
Mix.1 (0.0% cork)	100	0	21.24
Mix.2 (0.5% cork)	100	0.5	21.24
Mix.3 (1.0% cork)	100	1	21.24
Mix.4 (1.5% cork)	100	1.5	21.24
Mix.5 (2.0% cork)	100	2	21.24
Mix.6 (3.0% cork)	100	3	21.24

Tab. 7-2 Composizione delle sei nuove matrici.

Nell'ambito della ricerca, una volta identificate le miscele da utilizzare come matrici del materiale composito FRLM da progettare, è stata svolta un'accurata e dettagliata campagna sperimentale, in cui sono state analizzate le proprietà delle sei miscele Mix.1 – Mix.6, in termini di:

- Distribuzione granulometrica, mediante costruzione di curva granulometrica ottenuta dallo studio accurato di modelli matematici teorici presenti in letteratura, confrontati con i valori limite indicati dalle ASTM C144 – 18 [47]
- Studio di eventuali fenomeni di segregazione all'interno delle miscele, valutati con la tecnica diagnostica non distruttiva della tomografia computerizzata
- Valutazione della lavorabilità della miscela mediante flow test, in accordo alle ASTM C1437 – 20 [111] e ASTM C230/C230M – 23[119].

- Proprietà idrorepellenti e calcolo del coefficiente di assorbimento d'acqua capillare delle matrici, seguendo le specifiche relative alle ASTM C1403 – 22a [67].
- Valutazione della resistenza meccanica a compressione, in accordo alle ASTM C109/C109M-21 [62].
- Resistenza di adesione su supporti in laterizio e in tufo, condotte in conformità con gli standard internazionali ASTM D4541-22 [31] e UNI EN ISO 4624 [32].

Il motivo principale di questo studio è quello di comprendere e valutare le proprietà delle miscele a base di calce idraulica naturale con l'aggiunta di sughero, al fine di sviluppare un materiale composito FRLM con prestazioni ottimali in termini di resistenza, lavorabilità e adesione, per potenziali applicazioni nel settore conservativo di edifici esistenti in muratura.

8. Analisi granulometrica delle miscele

La curva granulometrica, anche chiamata distribuzione granulometrica, è una rappresentazione grafica delle dimensioni delle particelle in una miscela di materiali [70], rappresentata mediante un grafico sulle ascisse sono riportate le dimensioni del diametro delle particelle [mm], mentre sull'asse delle ordinate è indicata la percentuale della massa passante delle particelle, vale a dire i pesi delle singole frazioni granulometriche [123].

Solitamente, la curva granulometrica viene ottenuta attraverso un'analisi granulometrica, che può essere eseguita attraverso metodi meccanici o elettronici, mediante l'utilizzo di setacci con maglie di dimensioni da 0.075 mm a un massimo 75 mm [69].

Nel caso delle malte, la curva granulometrica può influenzare diverse proprietà del materiale indurito, come la lavorabilità, la resistenza e la permeabilità [123]. Ad esempio, la presenza di particelle fini può influenzare positivamente la lavorabilità della malta, mentre particelle più grosse possono contribuire alla resistenza meccanica.

La conoscenza della distribuzione granulometrica consente di regolare la quantità e il tipo di materiali in modo da ottenere le caratteristiche meccaniche e di lavorabilità desiderate nella malta [123].

8.1. Modelli matematici numerici relativi all'analisi granulometrica

Per definire della curva granulometrica che rappresenta il comportamento dell'intonaco termico INT.GFA con l'aggiunta del sughero in granuli, sono stati esaminati cinque modelli matematici [124]: il modello di Fuller-Thomson, il modello di Weymouth, il modello di Sánchez de Guzmán (o Talbot & Richart), il modello di Bolomey e il modello matematico relativo all' ASTM C144 – 18 [125]. È importante sottolineare che, per realizzare una miscela con la massima densità possibile, ossia con il minor contenuto di vuoti interstiziali tra i singoli granuli, la curva granulometrica del sistema solido (nel nostro caso INT.GFA più sughero) deve seguire tutte e cinque i modelli elencati.

Modello di Fuller-Thomson

Il primo modello analizzato è il modello di Fuller-Thomson, che calcola la percentuale degli aggregati passanti attraverso il setaccio mediante l'Equazione 10, in cui "P" è il passante dell'aggregato, "d" rappresenta la dimensione della maglia del setaccio, "D" denota la dimensione massima degli aggregati, con esponente pari a 1/2.

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/2}$$

Equazione 10

Modello di Weymouth

Il secondo modello consiste nell'approccio di Weymouth (Equazione 11), che si sviluppa seguendo il modello di Fuller-Thomson, sostituendo l'esponente con "n", valore che determina la distribuzione degli aggregati. In caso di aggregato fine, cioè quando il valore di "d" non supera i 4.76 mm [125], si pone "n" pari a 0.305

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.305}$$

Equazione 11

Modello di Sánchez de Guzmán (o Talbot & Richart)

Nell'equazione di Sánchez de Guzmán (o Talbot & Richart), il valore dell'esponente "n" viene sostituito con 0.45 **Error! Reference source not found.**, in modo da tener conto della lavorabilità richiesta del materiale [126].

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.45}$$

Equazione 12

Modello di Bolomey

L'ultimo modello analizzato è l'equazione di Bolomey, considerata la più accurata dal punto di vista della lavorabilità. Nell'Equazione 13 "A" indica una costante empirica che dipende dalla forma e dalla consistenza del tipo di inerte [126]

e dalla lavorabilità richiesta, determinabile tramite la procedura descritta negli standard ASTM C1437 – 20 [111] e ASTM C230/C230M – 23 [119].

$$P = A + (100 - A) \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5}$$

Equazione 13

Modello matematico relativo all'ASTM C144 – 18

In conformità con l'ASTM C144 – 18 [125], gli aggregati di malte per muratura devono essere selezionati in base ai limiti indicati in tabella **Error! Reference source not found.**, a seconda che si utilizzi sabbia naturale o sabbia lavorata.

Sieve Designation		Percent Passing	
		Natural Sand	Manufactured Sand
4.75-mm	(No. 4)	100	100
2.36-mm	(No. 8)	95 to 100	95 to 100
1.18-mm	(No. 16)	70 to 100	70 to 100
600-µm	(No. 30)	40 to 75	40 to 75
300-µm	(No. 50)	10 to 35	20 to 40
150-µm	(No. 100)	2 to 15	10 to 25
75-µm	(No. 200)	0 to 5	0 to 10

Tab. 8-1 Distribuzione granulometrica adottata dall' ASTM C144 – 18.

Per la costruzione della curva granulometrica di INT.GFA con l'aggiunta del sughero in granuli, si è fatto affidamento alle accurate schede tecniche dei produttori.

INT.GFA è composto da una legante e 5 aggregati differenti, caratterizzati da un intervallo granulometrico da 0 mm a 1.4 mm.

Nello specifico, gli elementi costituenti il termointonaco INT.GTA sono:

- Pura calce idraulica naturale NHL 3.5: granulometria 0- 0.6 mm
- Legante minerale: granulometria 0 – 0.1 mm
- Sabbietta silicea lavata di cava fluviale: granulometria 0.1- 0.5 mm
- Sabbia silicea lavata di cava fluviale: granulometria 0.1 – 1.0 mm
- Calcare: granulometria 0- 1.4 mm
- Fino di marmo bianco: granulometria 0 – 0.2 mm
- Sughero in granuli: granulometria: 0.5 – 0.8 mm

Conoscendo la granulometria degli aggregati costituenti INT.GTA e il sughero in granuli, è stato possibile determinare la curva granulometrica della miscela, caratterizzata da una granulometria totale complessiva pari a 0- 1.4 mm.

Nel corso dell'analisi granulometrica, è stata sviluppata la curva granulometrica di INT.GFA con l'aggiunta del sughero in granuli, definita sulla base dei quattro modelli matematici teorici analizzati (il modello di Fuller-Thomson, il modello di Weymouth, il modello di Sánchez de Guzmán e il modello di Bolomey). Ogni curva è stata poi confrontata con la curva granulometrica di riferimento dell'ASTM C144 – 18 [125], con l'obiettivo di valutare la congruenza del nuovo intonaco termico in fase di sviluppo.

Il confronto tra le curve costruite dai i modelli matematici e la curva standard ASTM è stato un elemento cruciale per verificare la fattibilità del progetto. Si osserva che tutte le curve generate dai modelli matematici tendono ad essere o all'interno o ad intersecare la curva generata dai limiti imposti dalla curva ASTM C144 – 18. Fig. 8.1 Confronto tra curva di Fuller-Thomson e limiti imposti dall' ASTM C144 – 18 [47] ,(Fig. 8.2, Fig. 8.3, Fig. 8.4) suggerendo che il materiale proposto possiede caratteristiche granulometriche in linea con gli standard specificati nelle ASTM.

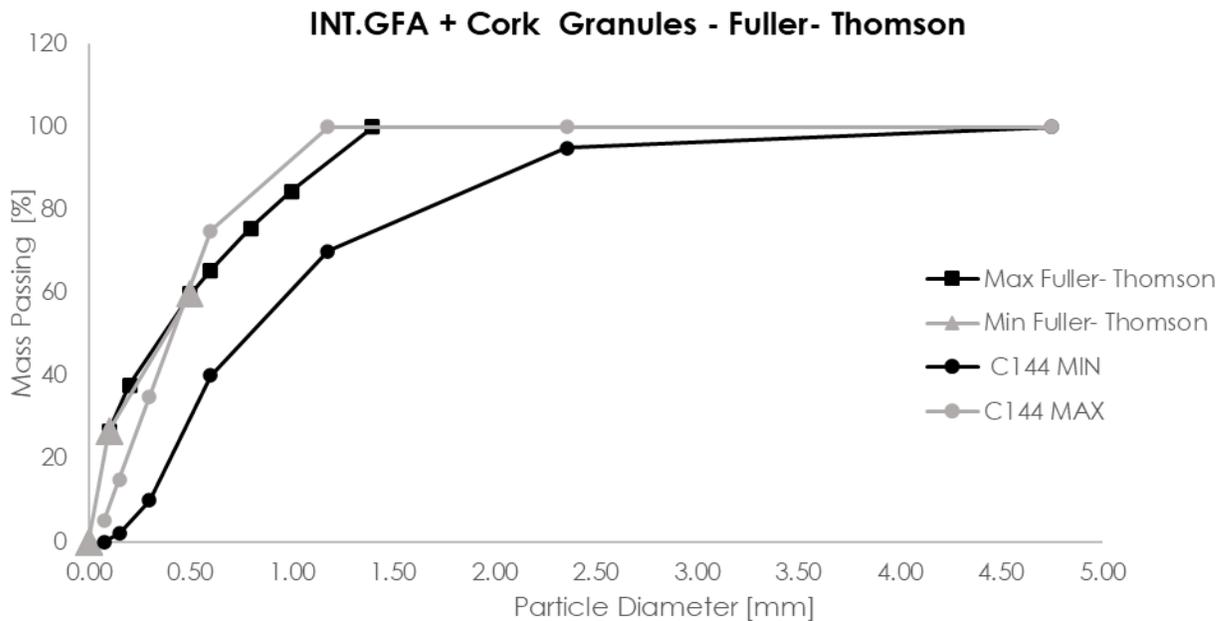


Fig. 8.1 Confronto tra curva di Fuller-Thomson e limiti imposti dall' ASTM C144 – 18.

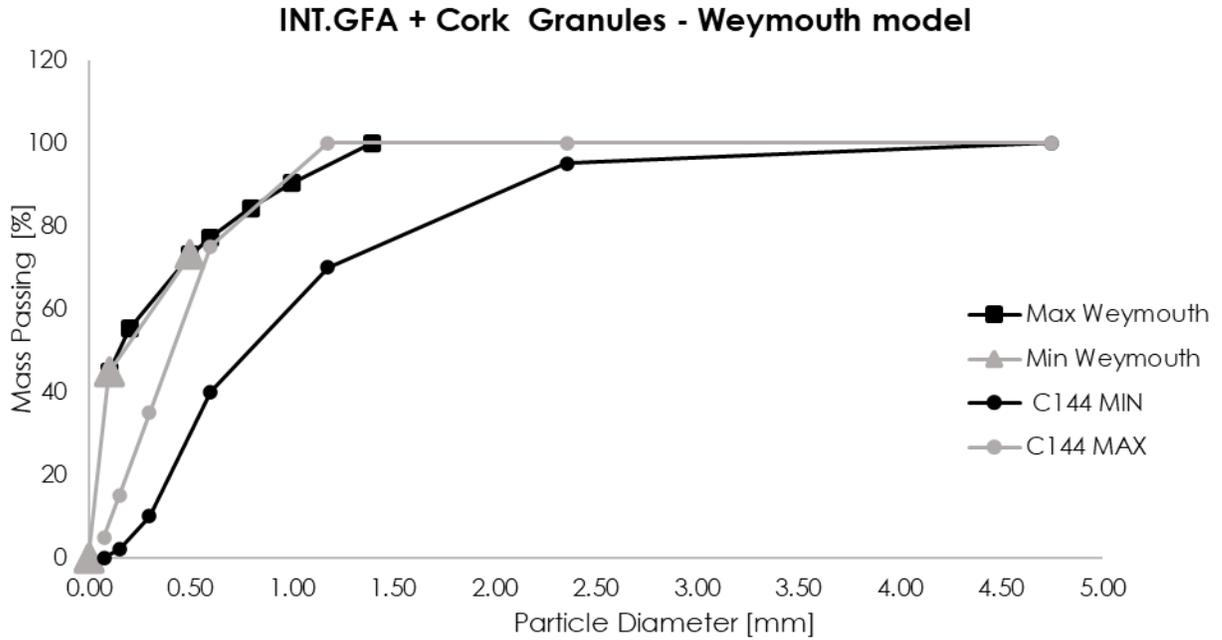


Fig. 8.2 Confronto tra curva di Weymouth e limiti imposti dall' ASTM C144 - 18.

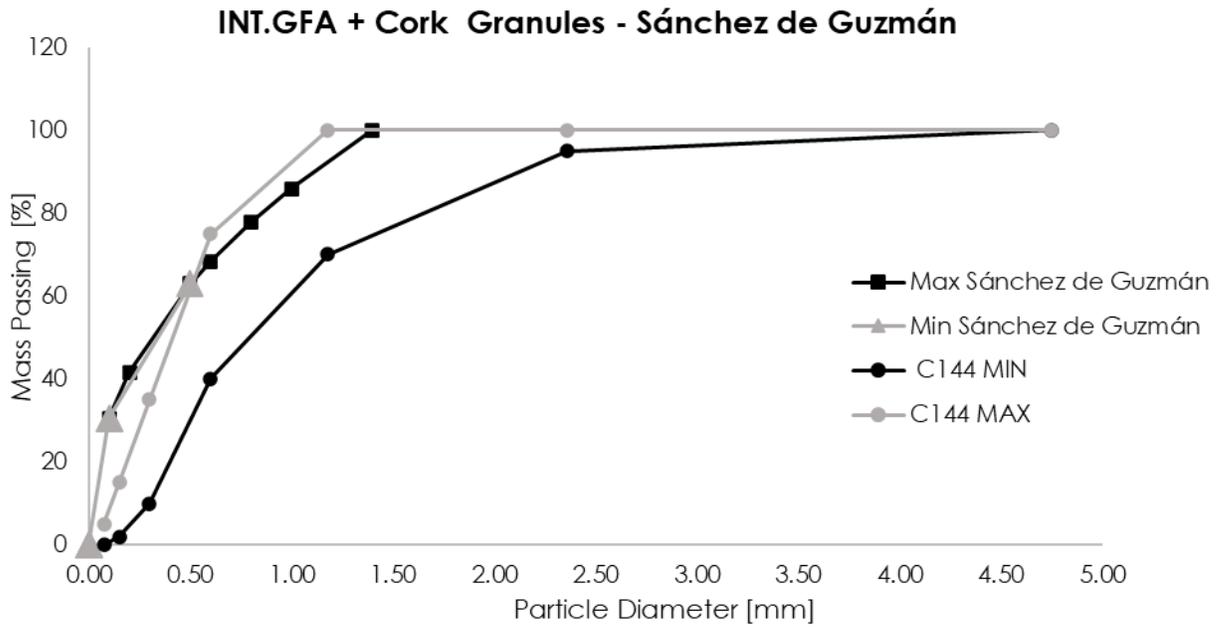


Fig. 8.3 Confronto tra curva di Sánchez de Guzmán e limiti imposti dall' ASTM C144 - 18.

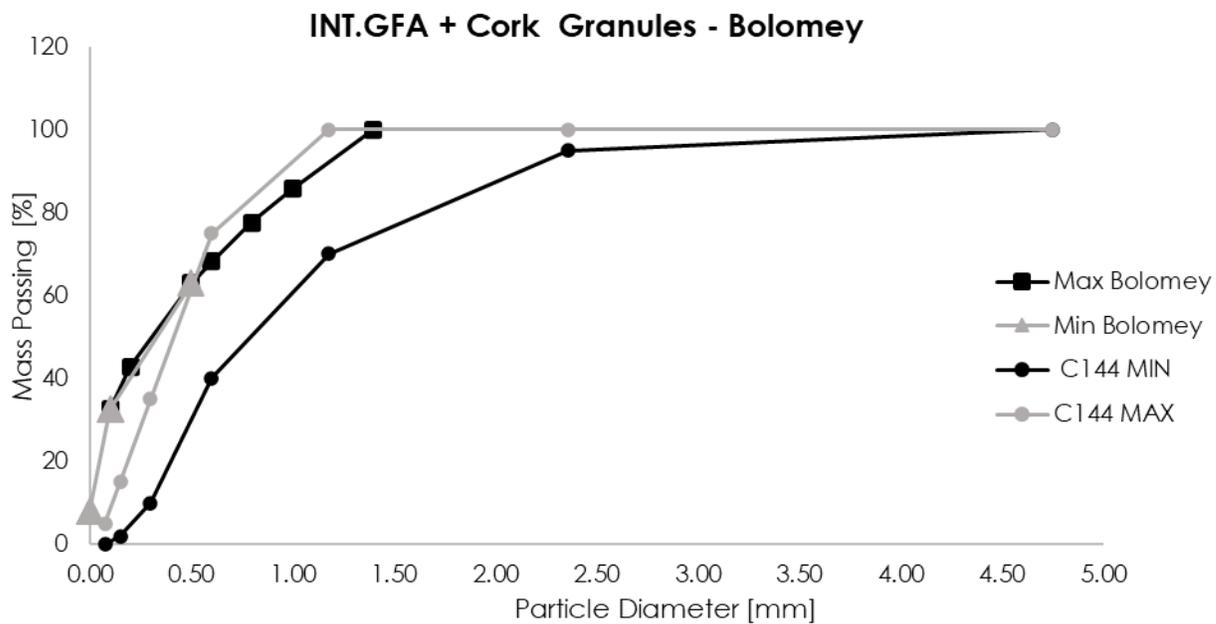


Fig. 8.4 Confronto tra curva di Bolomey e limiti imposti dall' ASTM C144 - 18.

9. Studio della segregazione mediante tomografia computerizzata

Con lo scopo di controllare la corretta progettazione della miscela, è necessario limitare i fenomeni di segregazione, vale a dire l'eventuale separazione dei diversi componenti costituenti la miscela.

Nel caso di INT.GFA con l'aggiunta del sughero in granuli, bisogna verificare che la miscela finale presenti un livello omogeneo della distribuzione degli aggregati.

A questo proposito, in letteratura vengono descritte diverse metodologie per valutare il livello di segregazione tra malte inorganiche con l'aggiunta di sughero in granuli. In [127] viene descritto il procedimento per la determinazione della segregazione mediante setaccio, come indicato dalle UNI EN 12350-11:2010 [128]. Questo metodo non è proponibile nel caso di INT.GFA, in quanto è un intonaco confezionato con aggregati di simile pigmentazione e intervallo granulometrico, caratteristiche che rendono impossibile l'identificazione del singolo componente. e non sarebbe perciò possibile diversificare gli aggregati presenti all'interno, caratterizzati da simile pigmentazione e uguale granulometria tra diversi aggregati, come descritto nel capitolo 8.

Studi recenti [129], [130] hanno analizzato questo fenomeno mediante microscopia elettronica SEM-EDS; il SEM è un microscopio a scansione ottica con cui è possibile ottenere informazioni di tipo morfologico sui materiali mediante analisi non distruttiva, qualitativa e semi-quantitativa.

In questo ambito di ricerca, tutti le sei tipologie di miscele sono state analizzate mediante un'analisi quantitativa tomografica computerizzata mediante Micro-CT scanner [131], una tecnica diagnostica non distruttiva e non invasiva capace di visualizzare in 3d la struttura interna degli oggetti analizzati.

La tomografia con raggi X è stata effettuata su sei campioni in materiale plastico cilindrici, (Fig. 9.1).

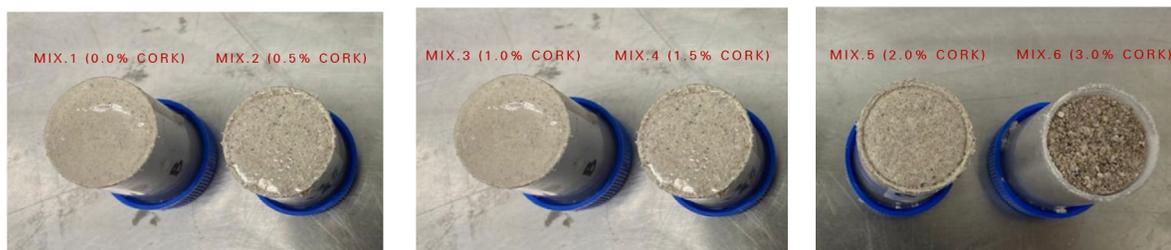


Fig. 9.1 Campioni delle miscele dopo il getto nelle casseforme cilindriche.

Per la preparazione dei provini, si sono seguite le direttive delle ASTM C305 – 20 [88]. Prima di iniziare con la miscelazione mediante il miscelatore elettronico [88], si è iniziato a miscelare a mano, in modo da avere una valutazione qualitativa sulla lavorabilità delle miscele. La matrice di controllo Mix.1 è stata quella più semplice da

lavorare, mentre, all'aumentare del sughero, si notava come diminuiva la proprietà di lavorabilità, facendo più fatica a miscelare manualmente.

Le miscele sono state poi gettate nelle casseforme cilindriche e poste su piastra vibrante per compattare al meglio il prodotto, evitando la formazione di vuoti d'aria all'interno della miscela.

Dopo 24 ore dal getto, le casseforme sono state rimosse dai provini, che sono rimasti a maturare per 28 g a temperatura ambiente.

Le analisi tomografiche computerizzate sono state effettuate mediante scanner micro-CT Bruker Skyscan 1273 ad alta risoluzione (sorgente di raggi X fino a 110 kV), da cui, mediante un numero infinite di proiezioni dell'oggetto, si sono ottenute le ricostruzioni tridimensionali delle strutture dei campioni analizzati.



Fig. 9.2 Macchinario di prova micro-CT e posizionamento del campione di prova.

Una volta che i campioni di prova sono stati scansionati, tramite elaborazione computerizzata mediante Bruker CT Analyzer, è stato possibile visualizzare il modello tridimensionale della microstruttura interna delle miscele[132].

Lo scanner segue la scala di grigi (grayscale), producendo immagini in bianco e nero, costituite da una gamma di grigi da 0 a 255 livelli, dove lo zero rappresenta il nero (minore attenuazione) e 255 rappresenta il bianco (maggiore attenuazione).

In Fig. 9.3 sono riportate le sezioni trasversali e longitudinali effettuate nella mezzera di ogni provino. Grazie a queste sezioni, è già possibile valutare qualitativamente lo stato di segregazione all'interno della miscela.

Ad esempio, confrontando Mix.1 e Mix.6, è evidente la diversità del tipo di miscela. I colori chiari rappresentano gli aggregati con densità maggiore, vale a dire il legante a base di calce idraulica naturale. I colori scuri, al contrario, sono gli elementi caratterizzati da basso peso specifico: in tutte le miscele, il nero rappresenta i vuoti d'aria che si sono presentati all'interno della miscela durante la fase di maturazione, mentre nei provini con l'aggiunta del sughero, rappresenta anche i granuli in sughero, caratterizzati, da un valore di densità molto ridotto, pari a 90 kg/m^3 .

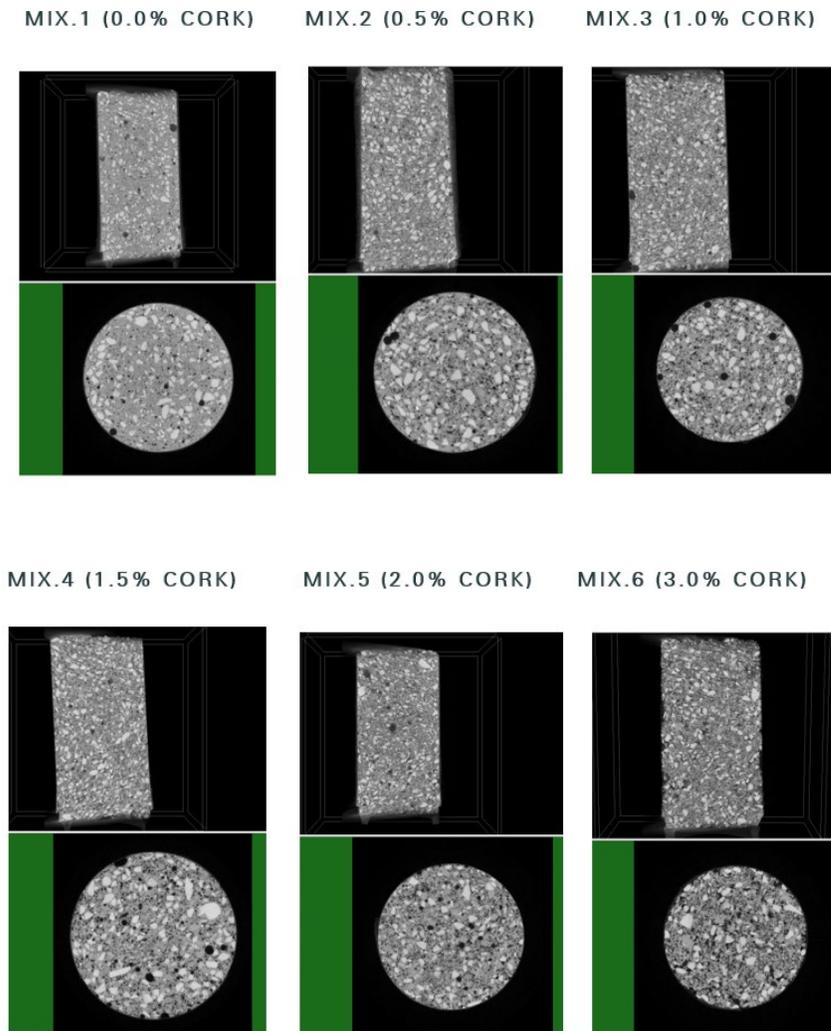


Fig. 9.3 Sezioni trasversali e longitudinali ottenute dal modello 3d dei campioni di prova.

Per distinguere i vuoti d'aria interstiziali con i granuli in sughero, quest'ultimo è stato osservato al microscopio. Mediante l'utilizzo del software opensource ImageJ (Image Processing and analysis in Java), è stata fatta un'analisi qualitativa (su circa ottanta granuli) per calcolare i valori dei diametri e di superficie dei granuli in sughero.



Fig. 9.4 Vista al microscopio con ingrandimento 50x dei granuli in sughero.

I risultati ottenuti sono rappresentati negli istogrammi in Fig. 9.5 e in Tab. 9-1, in cui si identifica la lunghezza media, minima e massima dei granuli in sughero analizzati, in modo da differenziarli dai vuoti d'aria, che appaiono sotto forma circolare, mentre il sughero ha una conformazione rettangolare o quadrata.

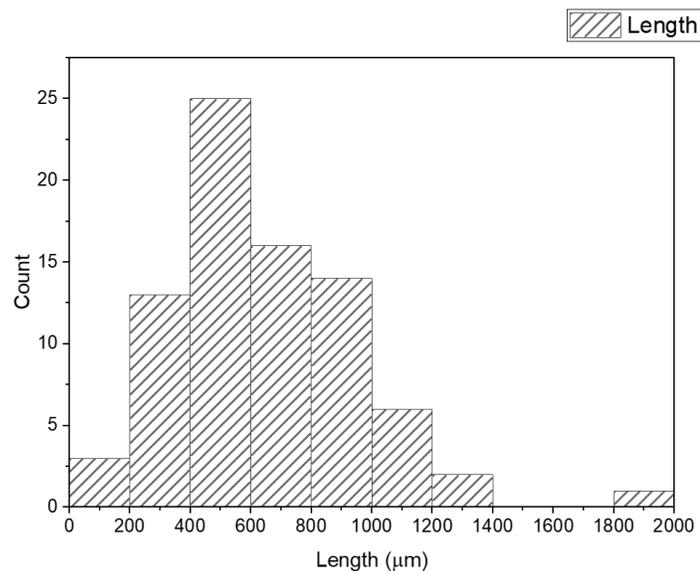


Fig. 9.5 Variazione delle lunghezze dei granuli in sughero osservati al microscopio.

	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
Length	80	639.69301	303.40876	51175.441	165.71	569.006	1802.943

Tab. 9-1 Statistiche descrittive degli 80 granuli in sughero analizzati

9.1. Analisi dei risultati ottenuti mediante tomografia computerizzata

Per analizzare le proprietà della miscela, si è sviluppato un “modello nel modello”, vale a dire un parallelepipedo rettangolo di volume pari a $15 \times 15 \times 45 \text{ mm}^3$ (Fig. 9.7), in modo da evitare probabili condizioni al contorno visualizzati dallo scanner durante la lettura del provino cilindrico. In Fig. 9.6 è possibile osservare le nuove superfici di dimensione 15×15 , estrapolate dalla sezione cilindrica di destra.

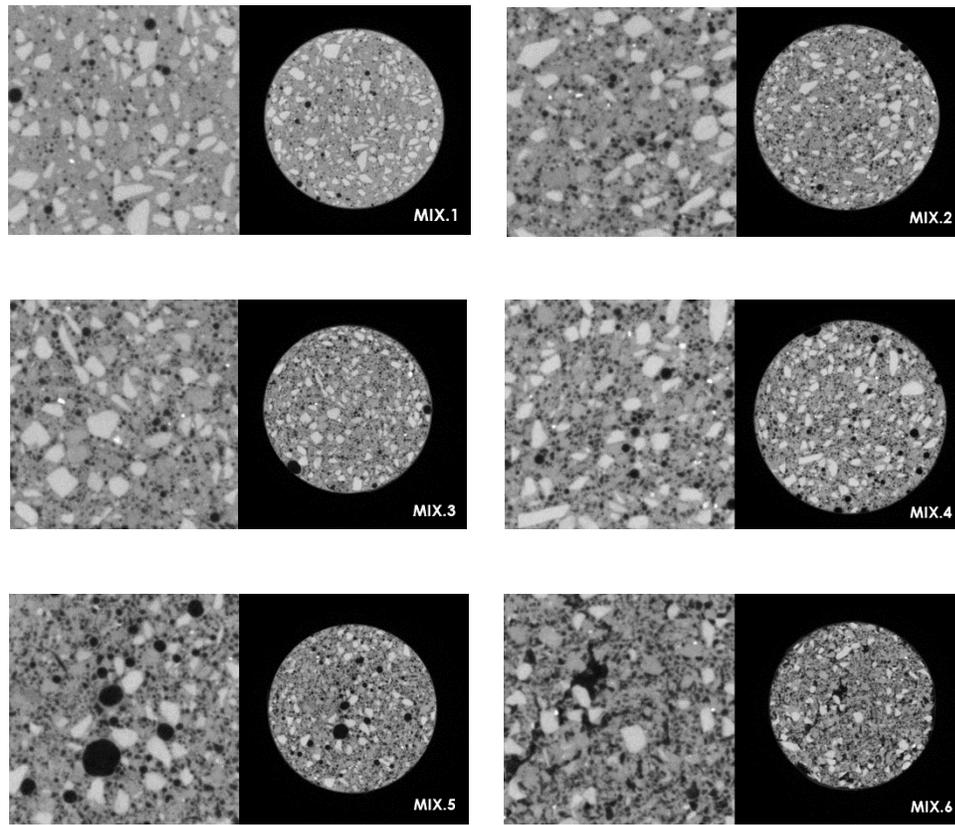


Fig. 9.6 Nuova configurazione quadrangolare, estrapolata dalla superficie circolare letta dallo scanner.

Di seguito, sono riportati gli screenshot dell'analisi relative a Mix.4, scelta come esempio perché, in termini di percentuali di granuli in sughero aggiunti, è la miscela intermedia tra le sei matrici analizzate.

Per comprendere la percentuale di sughero all'interno delle miscele in termini di densità e volume, il primo passo è stato la generazione di immagini segmentate mediante tecnica di thresholding (segmentazione a soglia).

La segmentazione delle immagini è avvenuta su ogni sezione trasversale di ogni singolo provino [133], selezionando, per ogni miscela, valori di soglia della scala di grigi con un limite da 0 a 90, come mostrato nel grafico in Fig. 9.8, caratterizzato da un

valore di luminosità (indicato sull'asse delle ascisse) compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco).

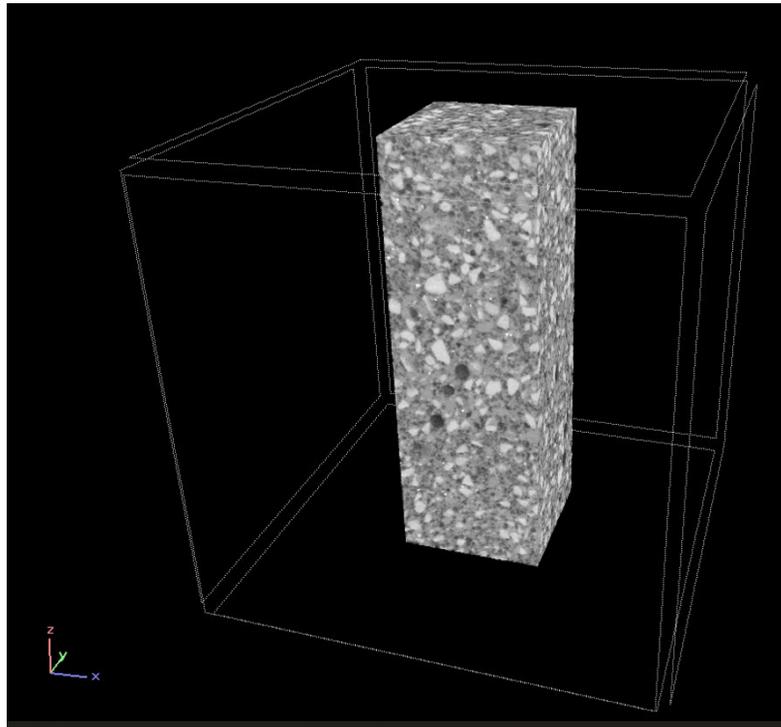


Fig. 9.7 Modello 3d di Mix.4 (1.5 cork) caratterizzato dalla presenza di vuoti d'aria e dei granuli in sughero.

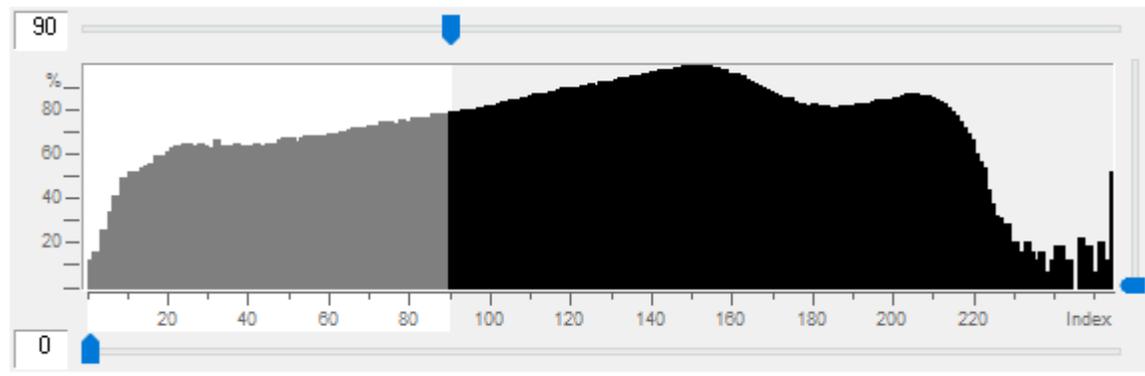


Fig. 9.8 Limite imposto per la creazione delle immagini segmentate sulla curva della scala di grigi.

In Fig. 9.9 è possibile confrontare l'immagine di una delle sezioni trasversali di Mix.4 con la relativa immagine segmentata. Il nero della sezione corrisponde al bianco

della relativa segmentazione, vale a dire che, mentre nell'immagine di sinistra i materiali a densità bassa sono rappresentati dal colore nero, per quanto riguarda le immagini segmentate, il bianco descrive i materiali a bassa densità, equivalenti ai vuoti interstiziali e al sughero in granuli.

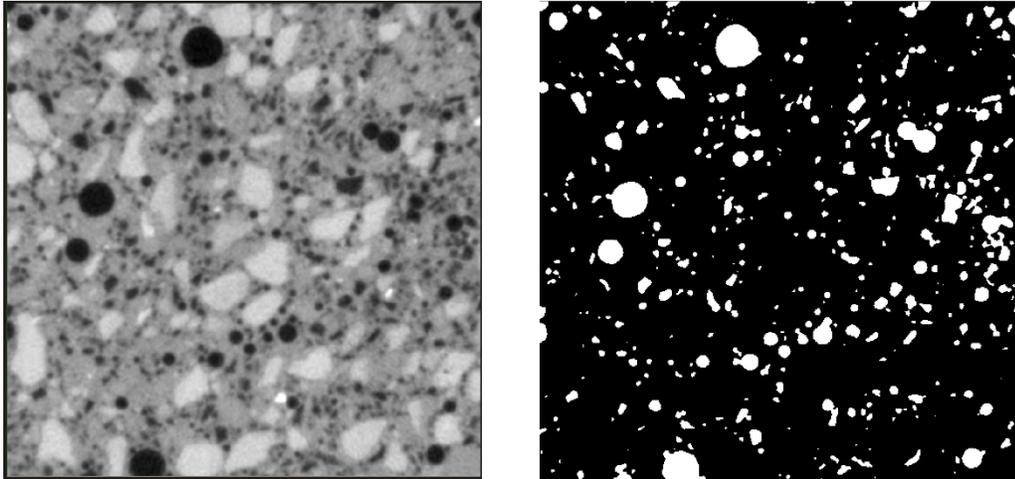


Fig. 9.9 Sezione trasversale di Mix.4(1.5%) e segmentazione dell'immagine ottenuta mediante thresholding.

Una volta definiti i parametri utili per la differenziazione della densità dei materiali, e quindi per identificare ogni singolo componente della miscela, è stato possibile generare il modello tridimensionale del solo sughero in granuli (Fig. 9.10).

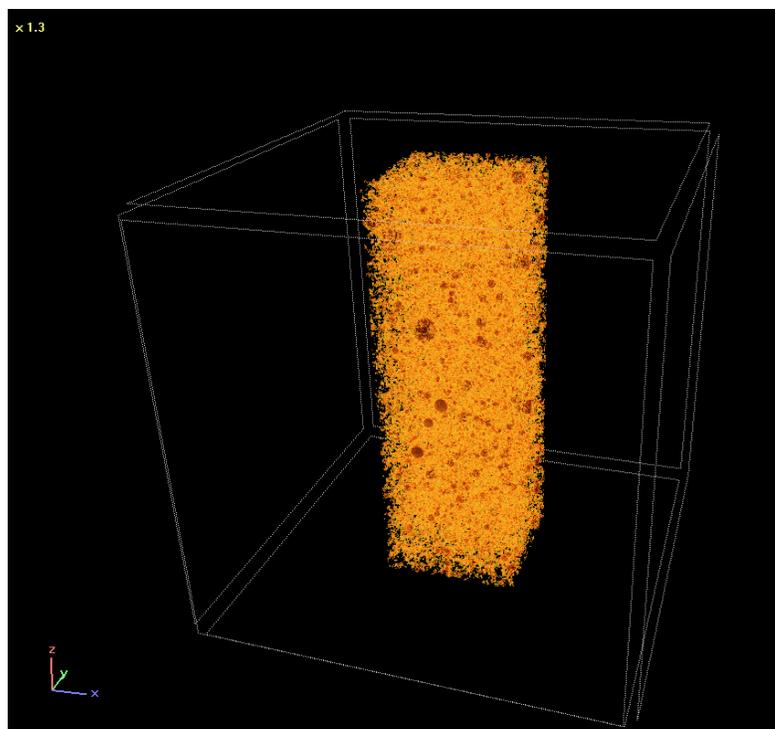


Fig. 9.10 Modello tridimensionale del sughero in granuli per la miscela Mix.4.

Al fine di ottenere dei risultati in termini di quantità di volume del sughero in granuli all'interno di ogni miscela, sono stati preparati due grafici, aventi sull'asse delle ordinate (Cross section index) il numero delle sezioni trasversali per ogni provino analizzato, e sulle ascisse (Greyscale mean) il valore di luminosità medio della scala di grigi e la relativa deviazione standard (Geayscale Sy.D.) dei valori (Fig. 9.1).

Nel grafico di sinistra in

Fig. 9.11, è chiaro notare che, all'aumentare del sughero in granuli all'interno della miscela, aumenta il valore di luminosità nella scala di grigi. La matrice di controllo Mix.1, ad esempio, presenta un andamento quasi costante, con valori di luminosità molto prossimi allo zero, perché caratterizzata dai vuoti d'aria interstiziale. La miscela Mix.6, al contrario, è descritta da una curva con andamento molto variabile che oscilla tra il 40 e il 65 di luminosità circa, descrivendo che ogni sezione ha una conformazione diversa, caratterizzata dalla presenza di più o meno sughero in granuli lungo tutta l'altezza del provino.

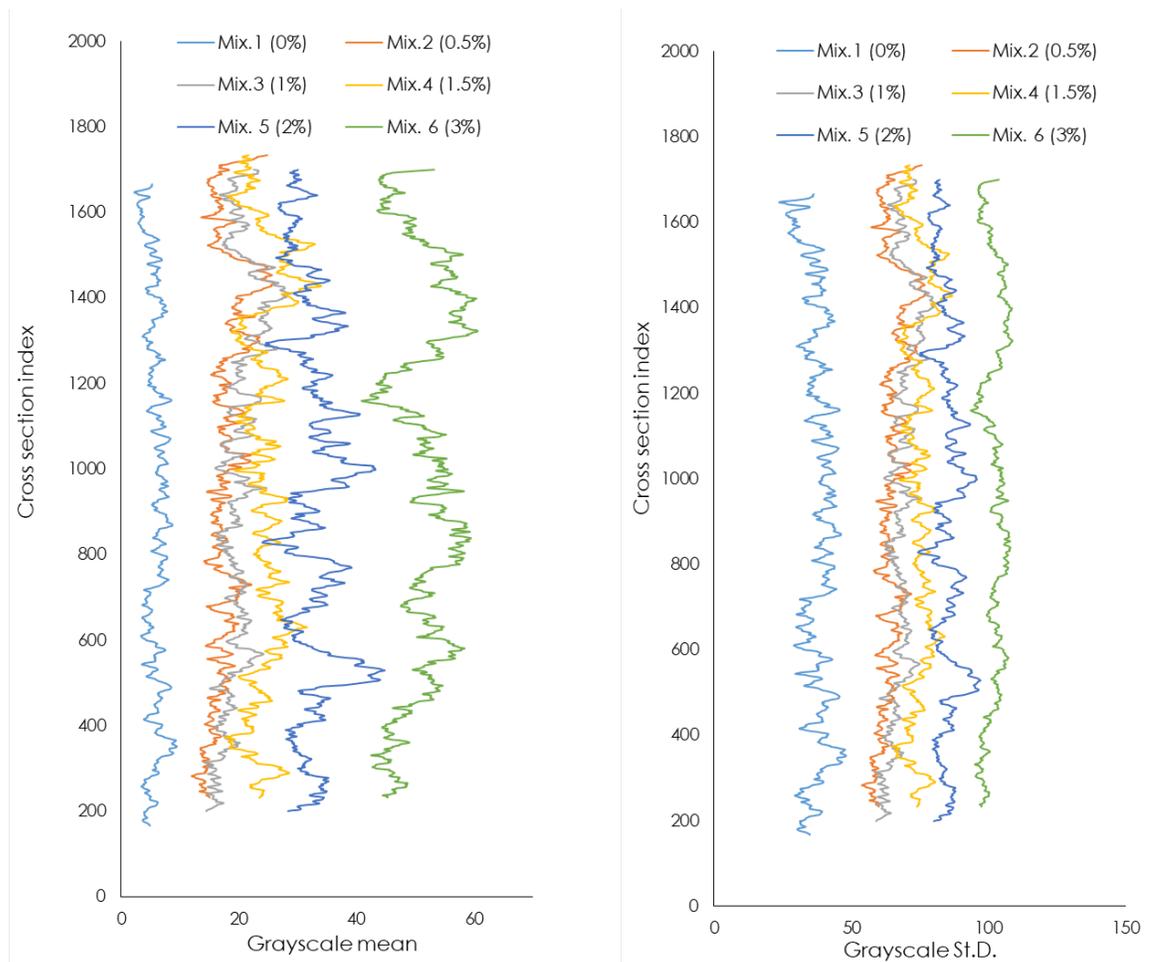


Fig. 9.11 Grafici relativi all'analisi delle immagini segmentate delle sezioni trasversali in termini di valori di luminosità medi della scala di grigi e in termini di valori di deviazione standard relativi alla scala di grigi.

Il grafico di destra in

Fig. 9.11 presenta i risultati in termini di deviazione standard della distribuzione del sughero all'interno di ogni matrice, mostrando un comportamento sufficientemente stabile per Mix.1 e molto variabile per Mix.6, caratterizzato dal valore di deviazione standard più elevato rispetto alle altre miscele.

In Tab. 9-2 sono riportati i risultati delle analisi tridimensionali, in termini di:

- Frazione di volume dei vuoti d'aria e del sughero.
- Frazione di volume del solo sughero.
- Superficie esterna del sughero, vale a dire la porzione a contatto con il preparato INT.GTA.

- Il rapporto tra la superficie esterna e il volume dei granuli in sughero.
- La distanza, in termini di superfici esterne, tra tutti i granuli in sughero presenti nelle miscele.

Campione	Frazione volume vuoti d'aria + sughero [%]	Frazione volume sughero [%]	Superficie esterna sughero [mm ²]	Superficie/Volume sughero [1/mm]	Distanza superficiale [mm]
Mix.1 (0.0% cork)	2.2	0.0	0.0	-	1.2
Mix.2 (0.5% cork)	6.8	4.6	10658.4	23.0	0.9
Mix.3 (1.0% cork)	7.7	5.4	11931.3	21.6	0.9
Mix.4 (1.5% cork)	9.4	7.2	13502.6	18.5	0.9
Mix.5 (2.0% cork)	12.6	10.4	18937.3	18.0	0.7
Mix.6 (3.0% cork)	20.2	18.0	30254.6	16.6	0.6

Tab. 9-2 Risultati ottenuti dall'analisi tridimensionale delle miscele esaminate.

Quest'ultima analisi è stata fondamentale per comprendere il contenuto di sughero, in termini di volume, presente all'interno della miscela.

Come si è visto in precedenza, in ogni immagine segmentata il bianco rappresenta gli aggregati caratterizzati da una bassa densità. Per la matrice di controllo Mix.1, a cui non è stato aggiunto il sughero in granuli, il bianco rappresenta i vuoti d'aria che si sono creati nella miscela, di cui è stato calcolato il volume mediante l'analisi tridimensionale. Conoscendo la quantità di volume dei vuoti d'aria presente in Mix.1, e ipotizzando che il volume dei vuoti sia equivalente in ogni provino, tale valore è stato sottratto ai volumi successivi, ottenendo in questo modo la quantità in volume del solo sughero in granuli.

La frazione di volume in percentuale del sughero, all'aumentare della quantità di sughero all'interno della miscela, aumenta gradualmente, fino a raggiungere una quantità di volume pari al 18% per Mix.6, vale a dire la miscela che contiene il 3% di sughero in peso rispetto a INT.GTA. Lo stesso vale per le superfici esterne dei granuli: all'aumentare delle particelle di sughero, aumenta la quantità della superficie esterna. Ad ogni modo, è interessante osservare che le quantità dei rapporti tra la superficie esterna e il volume dei granuli in sughero diminuisce all'aumentare del contenuto di sughero. Tale fenomeno può essere causato dalla distanza superficiale tra i granuli in sughero, che diminuisce drasticamente all'aumentare della percentuale sughero, mostrandosi praticamente illeggibile allo scanner, che legge tali granuli come un unico materiale, e la quantità di superficie si riduce di conseguenza.

In tabella sono riportate le percentuali del sughero in granuli all'interno delle miscele in termini di peso e volume, quest'ultimo caratterizzato da valori superiori, effetto dovuto alla ridotta densità del materiale.

Campione	INT.GTA [g]	Sughero in granuli [g]	Acqua d'impasto [ml]	Percentuale in peso	Percentuale in volume
Mix.1	100	0	21.24	0.0%	0.0%
Mix.2	100	0.5	21.24	0.5%	4.6%
Mix.3	100	1	21.24	1.0%	5.4%
Mix.4	100	1.5	21.24	1.5%	7.2%
Mix.5	100	2	21.24	2.0%	10.4%
Mix.6	100	3	21.24	3.0%	18.0%

Tab. 9-3 Confronto tra le percentuali in peso e le percentuali in volume del sughero all'interno delle miscele.

10. Determinazione della lavorabilità delle nuove matrici

L'analisi della lavorabilità delle malte, conosciuta come "flow test", è stata eseguita seguendo le procedure dell'ASTM C1437 – 20 [111], mentre il set-up di prova è stato preparato in accordo a quanto descritto nelle ASTM C230/C230M – 23 [119] e nelle UNI EN 12350-8:2019 [134].

Il flow test è l'equivalente delle prove slump di abbassamento del cono per il calcestruzzo [120], ed è una pratica specifica per determinare lo spandimento per le malte idrauliche, con lo scopo di valutare la fluidità e la capacità di riempimento del materiale.

Le miscele sono state preparate mediante miscelatore elettronico, seguendo la velocità e il tempo di miscela in accordo alle specifiche dettate dalla ASTM C305 – 20 [88]. Si tenga presente che si è deciso di lasciare invariata la quantità di acqua d'impasto per ogni miscela, con un rapporto acqua/calce pari a circa il 2%, come indicato dalla scheda tecnica del produttore.

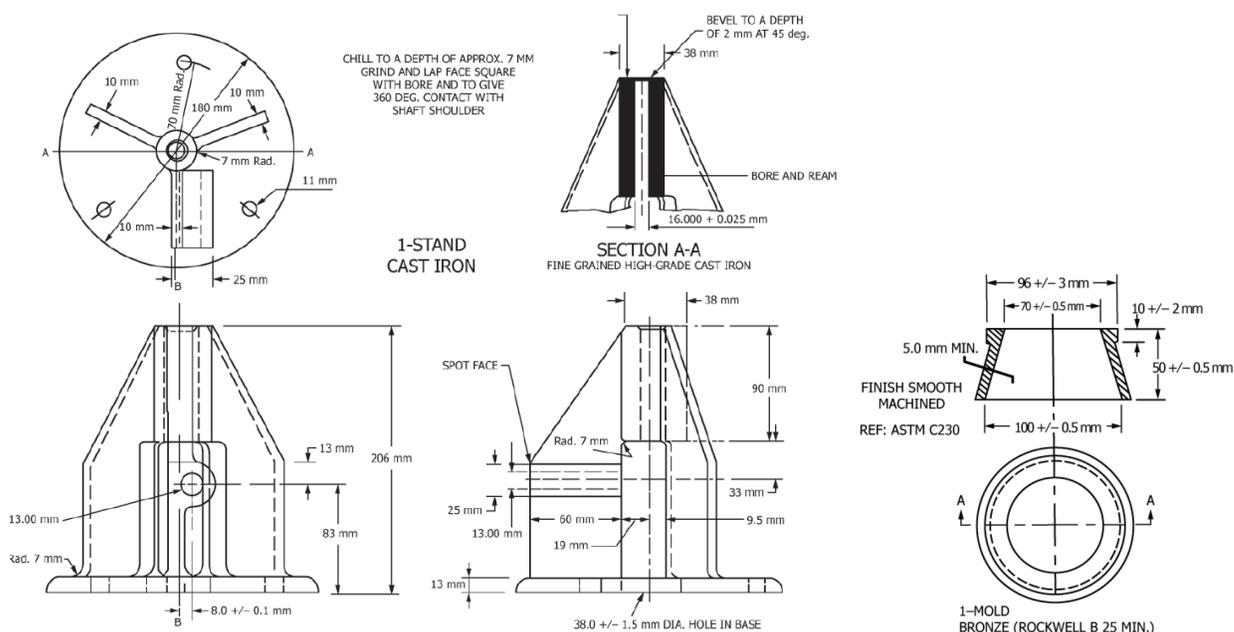


Fig. 10.1 Schema dell'apparato di prova per il flow test [119].

La prova è stata eseguita con un macchinario manuale che dispone di un piatto metallico appositamente preparato per la prova (Fig. 10.2), sul quale è appoggiato uno stampo di forma troncoconica all'interno del quale si getta l'impasto. Il macchinario presenta lateralmente una manovella che, una volta rimosso lo stampo, è stata scossa per venticinque volte per un totale di quindici secondi. In questo modo,

la forma della miscela cambia e aumenta il diametro, che è stato accuratamente misurato con calibro standard per le sei miscele analizzate (Fig. 10.3).

I risultati ottenuti dal flow test rappresentano la fluidità del materiale, espressa in percentuale rispetto al diametro

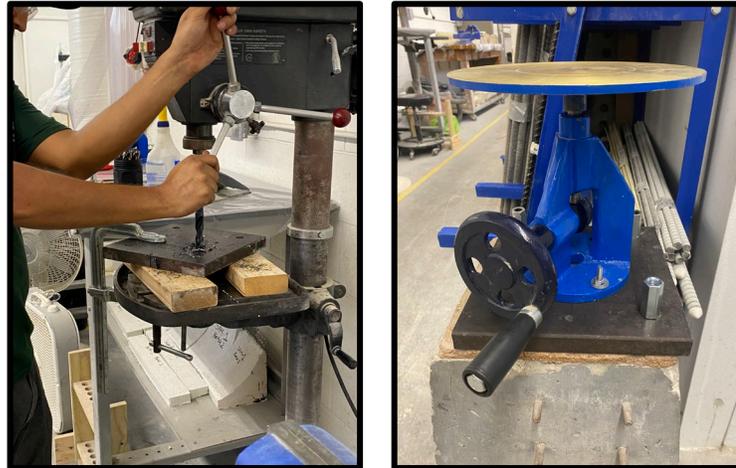


Fig. 10.2 Fase di preparazione del set-up di prova.



Fig. 10.3 Esecuzione del flow test per una delle miscele analizzate.

Il diametro iniziale misurato, vale a dire il diametro della base inferiore del cono cavo, è pari a 100 mm (Fig. 10.1). Una volta rimosso lo stampo, sono state misurati tre diametri per ogni miscela, come indicato dalle tre direttrici del piatto cilindrico della tavola a scosse, visibili in Fig. 10.3, e ne sono stati calcolati i valori medi

Il valore medio dei diametri misurati è stato poi sottratto al diametro iniziale (pari a 100 mm), ottenendo così il valore in percentuale di fluidità delle sei miscele.

In Tab. 10-1 sono indicati i valori dei diametri, nello specifico:

- Il diametro del cono cavo, pari a 100 mm.
- I valori dei tre diametri, ottenuti misurando le linee direttrici indicate sul piatto di prova [mm].
- Il valore medio dei tre diametri ottenuti, per ogni miscela [mm]
- In parametro A, equivalente alla media aritmetica dei tre diametri, meno il diametro iniziale [mm].
- Il valore di fluidità "flow", equivalente al valore del parametro A, espresso in percentuale rispetto al diametro iniziale.

Campione	Diam. iniziale [mm]	Diam. 1 [mm]	Diam. 2 [mm]	Diam. 3 [mm]	Diam. medio [mm]	A [mm]	FLOW [%]
Mix.1	100	194	194	193	194	94	94%
Mix.2	100	183	184	184	184	84	84%
Mix.3	100	178	177	177	178	78	78%
Mix.4	100	142	144	140	142	42	42%
Mix.5	100	136	136	138	137	37	37%
Mix.6	100	132	135	133	133	33	33%

Tab. 10-1 Valori dei diametri.

Dai risultati ottenuti si evince che, all'aumentare del sughero in granuli all'interno della miscela, diminuisce la lavorabilità del prodotto. La matrice di controllo Mix.1 presenta una percentuale di spandimento pari al 94%, valore che diminuisce progressivamente all'aumentare della quantità di sughero, raggiungendo un valore pari al 33%, quasi un terzo di quello di INT.GTA.

In accordo alle UNI EN 12350-2:2019 [120], la differenza del maggiore e del minor diametro, per ogni singola miscela, deve essere inferiore a 50 mm, in modo da essere caratterizzata dalla proprietà di fluidità. Per ogni miscela testata, questo valore è sempre rispettato. Inoltre, si è osservato che durante le prove non si sono mai verificati fenomeni di segregazione, osservabili se si presenta aggregato grossolano nell'area centrale del piatto cilindrico di prova.

11. Valutazione del coefficiente di assorbimento d'acqua capillare

Al fine di valutare le proprietà termoigrometriche delle nuove miscele, sono state effettuate le prove di assorbimento d'acqua per capillarità, seguendo la metodologia dettata nelle specifiche della normativa ASTM C1403 – 22a [67]. Tale metodo non distruttivo di prova permette di determinare il coefficiente d'assorbimento d'acqua per capillarità delle malte per muratura indurite.



Fig. 11.1 Casseforme utilizzate per la preparazione dei campioni.

In conformità delle ASTM, per ognuna delle miscele, mediante l'utilizzo di apposite casseforme, sono stati realizzati tre provini cubici di lato pari a 50 mm (Fig. 11.1), per un totale di diciotto provini. Una volta scasserati dopo circa 24 ore dal getto, i provini sono stati confezionati in apposite buste in plastica sigillate e si sono lasciati maturare a temperatura ambiente per un periodo pari a 28 giorni.



Fig. 11.2 Procedimento di maturazione dei provini e asciugatura in forno ventilato.

Terminato il tempo di maturazione, i provini sono stati rimossi dalle buste in plastica sigillate e sono stati pesati accuratamente su una bilancia da laboratorio con taratura classica. Una volta pesati, sono stati posti ad asciugare in un forno ventilato a una temperatura pari a 110 °C, per un periodo non inferiore alle 24 ore (Fig. 11.2)Fig. 11.1. Successivamente, i provini sono stati ripesati ogni due ore, fino al raggiungimento di una perdita di peso pari allo 0.2% rispetto al peso iniziale. Dopo un periodo pari a 26 ore, i provini hanno raggiunto lo 0.8% del peso iniziale e perciò sono stati rimossi dal forno.

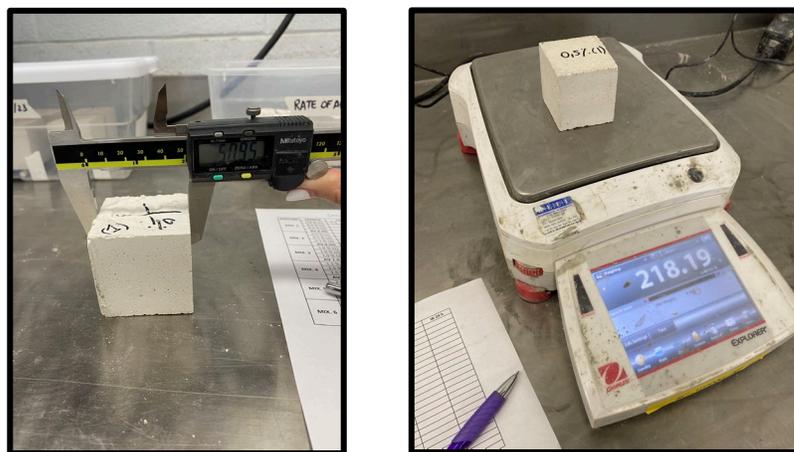


Fig. 11.3 Dimensionamento dei provini e registrazione dei pesi iniziali.

Campione	L1 [mm]	L2 [mm]	Area [mm ²]	Peso iniziale W0 [g]
Mix. 1 (1)	50.94	51.11	2603.54	222.37
Mix. 1 (2)	50.91	51.13	2603.03	221.99
Mix. 1 (3)	51.26	51.2	2624.51	220.7
Mix. 2 (1)	50.82	50.79	2581.15	218.24
Mix. 2 (2)	50.89	50.83	2586.74	217.7
Mix. 2 (3)	50.81	50.71	2576.58	220.55
Mix. 3 (1)	51.1	51.02	2607.12	213.24
Mix. 3 (2)	51.38	51.79	2660.97	215.84
Mix. 3 (3)	51.54	51.53	2655.86	217.44
Mix. 4 (1)	51.06	51.1	2609.17	202.27
Mix. 4 (2)	50.92	50.93	2593.36	199.35
Mix. 4 (3)	50.67	50.85	2576.57	200.73
Mix. 5 (1)	50.83	50.76	2580.13	198.05
Mix. 5 (2)	50.74	50.78	2576.58	196.95
Mix. 5 (3)	50.85	50.9	2588.27	196.01
Mix. 6 (1)	51.14	51.1	2613.25	173.29
Mix. 6 (2)	50.95	50.91	2593.86	176.31
Mix. 6 (3)	50.94	50.96	2595.90	173.28

Tab. 11-1 Valori delle dimensioni e dei pesi iniziali per ogni provino.

Una volta essiccati, sono state calcolate le aree delle facce dei provini da immergere in acqua (vale a dire le facce di getto) mediante misurazione accurata dello spessore L_1 e della profondità L_2 con calibro standard, registrando il peso iniziale di ogni provino. I risultati del dimensionamento sono riportati in Tab. 11-1. La fase successiva è stata caratterizzata dalla preparazione di opportune vasche in cui immergere i provini, come indicato nello schema in Fig. 11.4.

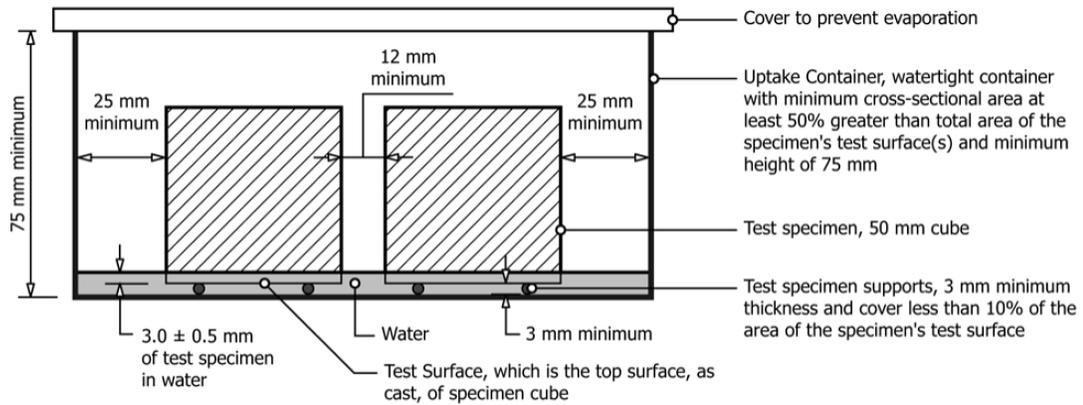


FIG. 1 Specimen Configuration During Testing

Fig. 11.4 Schema del set-up di prova per la valutazione dell'assorbimento d'acqua capillare [67].

I provini sono stati posti in un contenitore prismatico, di altezza pari a 75 mm e, una volta appoggiati a delle barre di vetro di diametro pari a 6mm appositamente preparate per la prova, sono stati immersi in circa 1 cm di acqua. Tutti i test sono stati eseguiti a una temperatura ambiente pari a 24°C.

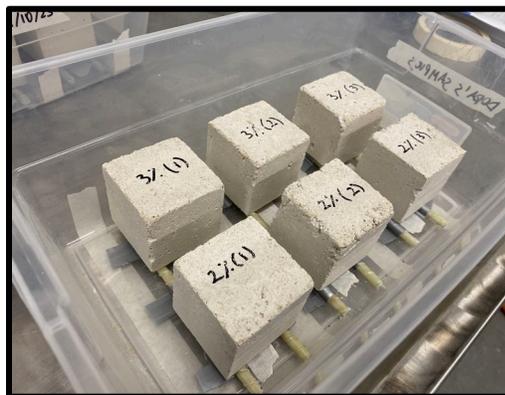


Fig. 11.5 Set up di prova preparato per la valutazione dell'assorbimento di acqua capillare.

I campioni di prova sono stati rimossi dal contenitore a intervalli differenti dal momento della prima immersione, rispettivamente dopo 15 minuti, un'ora, quattro ore e dopo 24 ore. a seguito di ogni intervallo, i provini sono stati accuratamente asciugati, quindi pesati e reimmersi, fino all'ultimo intervallo.

In Tab. 11-2 sono riportati i valori dei pesi dei provini durante gli intervalli di tempo analizzati.

Campione	L1 [mm]	L2 [mm]	Area [mm ²]	Peso W0 [g]	Peso W15min [g]	Peso W1h [g]	PesoW4h [g]	Peso W24h [g]
Mix. 1 (1)	50.94	51.11	2603.54	222.4	230.6	235.1	243.3	257.5
Mix. 1 (2)	50.91	51.13	2603.03	222	230.4	234.7	242.7	256.7
Mix. 1 (3)	51.26	51.2	2624.51	220.7	228.7	232.8	240.9	254.7
Mix. 2 (1)	50.82	50.79	2581.15	218.2	225.5	229.1	236	252.6
Mix. 2 (2)	50.89	50.83	2586.74	217.7	224.7	228	234.7	251.3
Mix. 2 (3)	50.81	50.71	2576.58	220.5	227.9	231.2	237.5	254.4
Mix. 3 (1)	51.1	51.02	2607.12	213.2	220.4	223.4	229.3	246.9
Mix. 3 (2)	51.38	51.79	2660.97	215.8	222.5	225.3	231.1	249.7
Mix. 3 (3)	51.54	51.53	2655.86	217.4	224.2	227.1	233	250.7
Mix. 4 (1)	51.06	51.1	2609.17	202.3	208.5	210.8	215.2	229.8
Mix. 4 (2)	50.92	50.93	2593.36	199.3	205.2	207.5	211.9	226.2
Mix. 4 (3)	50.67	50.85	2576.57	200.7	204.2	208.8	213.2	228
Mix. 5 (1)	50.83	50.76	2580.13	198	204	205.8	209.3	221.7
Mix. 5 (2)	50.74	50.78	2576.58	196.9	202.7	204.7	208.5	220.9
Mix. 5 (3)	50.85	50.9	2588.27	196	202.1	203.8	207.8	220.4
Mix. 6 (1)	51.14	51.1	2613.25	173.3	182.3	184.5	188.4	201.5
Mix. 6 (2)	50.95	50.91	2593.86	176.3	185.2	187.5	191.5	204.94
Mix. 6 (3)	50.94	50.96	2595.9	173.3	182.2	184.4	188.38	201.15

Tab. 11-2 Valore dei pesi dei campioni registrati durante il test di assorbimento capillare.

Una volta terminata la procedura di prova, l'assorbimento d'acqua capillare A_s per ogni intervallo di tempo, misurato in g/100cm², si è calcolato mediante l'Equazione 14, in cui:

$$A_s = 10000 \times (W_T - W_0) / (L_1 \times L_2)$$

Equazione 14 [67]

- W_T è il peso di ogni provino all'intervallo [g].
- W_0 è il peso iniziale del provino [g].
- L_1 e L_2 sono le dimensioni di spessore e profondità della superficie dei provini sommersa in acqua [mm].

In Tab. 11-3 sono indicati i valori medi di assorbimento d'acqua capillare, calcolati mediante l' Equazione 14 e misurati in kg/m².

Campione	As W ₀ [Kg/m ²]	As W _{15min} [Kg/m ²]	As W _{1h} [Kg/m ²]	As W _{4h} [Kg/m ²]	As W _{24h} [Kg/m ²]
Mix. 1	0.00	3.14	4.79	7.89	13.26
Mix. 2	0.00	2.80	4.12	6.69	13.16
Mix. 3	0.00	2.61	3.71	5.93	12.73
Mix. 4	0.00	2.00	3.19	4.88	10.50
Mix. 5	0.00	2.31	3.02	4.48	9.31
Mix. 6	0.00	3.43	4.29	5.82	10.85

Tab. 11-3 Valori medi di assorbimento capillare delle sei miscele analizzate.

Confrontando le equazioni dettate dalla normativa ASTM C1403 – 22a [67] con quelle della UNI EN 1015-18:2004 [68], è stato possibile definire le curve medie di assorbimento d'acqua capillare in funzione del tempo [min^{1/2}].

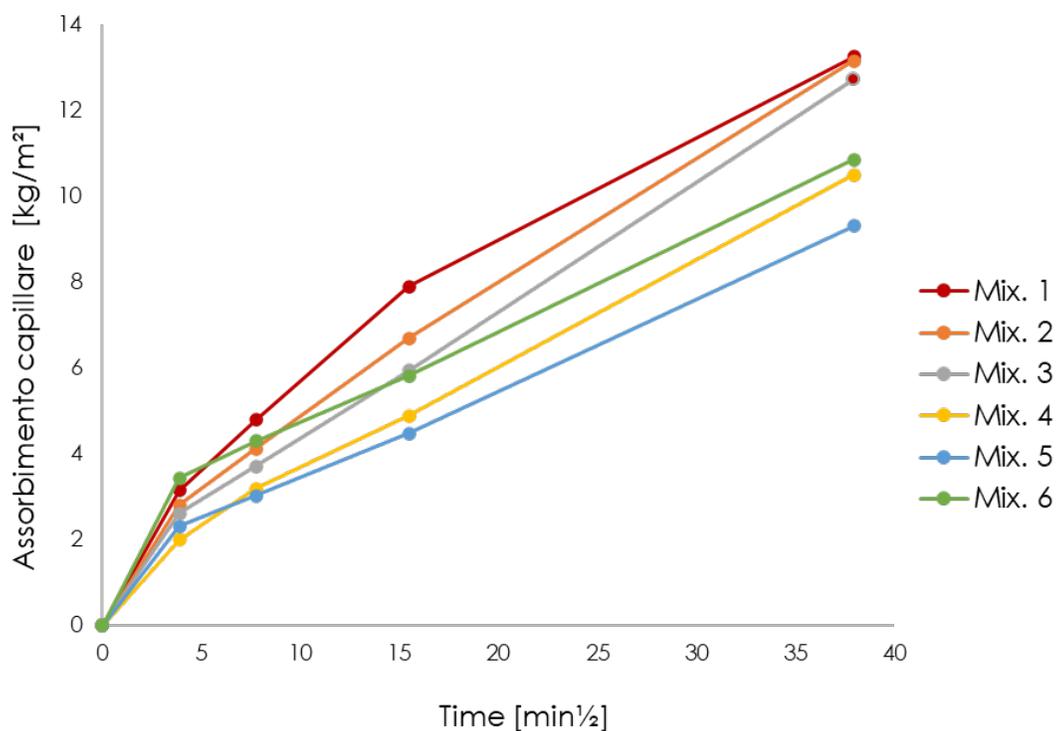


Fig. 11.6 Curva di assorbimento capillare..

Infine, in modo da assicurarsi che la classificazione delle nuove matrici sia conforme a quella richiesta dalla normativa UNI EN 998-1:2016 [31], è stato calcolato il coefficiente di assorbimento per capillarità, definito come la pendenza delle curve d'assorbimento capillare ottenute $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{min}^{1/2})]$ [68]

Coefficiente di assorbimento capillare					
Mix.1 (0% cork)	Mix.2 (0.5% cork)	Mix.3 (1.0% cork)	Mix.4 (1.5% cork)	Mix.5 (2.0% cork)	Mix.6 (3.0% cork)
0.57	0.51	0.47	0.38	0.38	0.53

Tab. 11-4 Valori dei coefficienti di assorbimento capillare, ottenuti calcolando la pendenza delle curve di assorbimento per capillarità.

Dai calcoli effettuati, è stato dimostrato che il coefficiente di capillarità rientra nella categoria W_c1 delle UNI EN 998-1:2016 [31] soltanto per le miscele Mix.3 e Mix.4, che hanno presentato un coefficiente di capillarità pari a $0.38 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{min}^{1/2})$ caratteristica che rende le miscele analizzate ideali dal punto di vista igrometrico. Si osserva, inoltre, che la matrice di controllo Mix.1 è caratterizzata da un coefficiente di assorbimento d'acqua pari a $0.57 \text{ m}^2\text{min}^{1/2}$, quasi il doppio da quanto dichiarato dalla scheda tecnica del produttore.

Assorbimento d'acqua per capillarità	$W_c 0$	Non specificato
	$W_c 1$	$C \leq 0,40 \text{ kg} / (\text{m}^2 \times \text{min}^{0,5})$
	$W_c 2$	$C \leq 0,20 \text{ kg} / (\text{m}^2 \times \text{min}^{0,5})$

Tab. 11-5 Classificazione delle proprietà delle malte indurite: assorbimento d'acqua per capillarità secondo il prospetto 1 delle UNI EN 998-1 [31].

12. Prove di resistenza a compressione delle matrici

Le prove di resistenza a compressione sono state svolte sui diciotto provini sottoposti al test di assorbimento d'acqua capillare (tre per ogni miscela), in accordo alla normativa ASTM C109/C109M-21 [62], con un incremento di carico pari a 100 N/s, fino al raggiungimento della rottura del provino.

Per le prove di compressione è stata utilizzata la macchina a doppia colonna Instron Modello 33R496, calibrata proprio pochi mesi prima dell'avviamento delle prove. Durante il test, si sono monitorate le proprietà delle miscele in termini di carico di compressione sottoposto al provino [mm], resistenza alla compressione [N/mm²], deformazione [%] e modulo elastico [N/mm²]. Una volta eseguiti i test, i risultati di output sono stati configurati mediante il software applicato alla macchina di prova (Fig. 12.1).



Fig. 12.1 Fase esecutiva delle prove di compressione.

Il calcolo della resistenza di adesione si calcola mediante la formula:

$$f_m = P/A$$

Equazione 15

In cui

- P è il carico massimo del campione di prova [N]
- A è l'area su cui è applicato il carico P [mm]

12.1. Analisi dei risultati delle prove di compressione

Per ogni prova vengono riportate le foto, i grafici- stress strain (con i valori di resistenza a compressione [N/mm²] sulle ordinate e i valori di deformazione sulle ascisse) e le tabelle con i risultati ottenuti. I provini che sono stati sottoposti a test di compressione sono indicati con il codice Mix.1- Mix. 6 (1- 3), ad indicare i tre test di compressione eseguiti sui due monconi dello stesso campione di prova.

Nello specifico, in ogni tabella viene indicato:

- Il codice del provino testato.
- L'area della superficie di carico A [mm²].
- Il valore del carico massimo raggiunto durante la prova P [N].
- La deformazione $\epsilon_{m \max}$, corrispondente alla massima tensione di compressione raggiunta.
- Il valore massimo di tensione a compressione f_m [N/mm²].
- Il valore del modulo elastico E_c [N/mm²] per ogni matrice, calcolato tra il 30% e il 60% del massimo valore di resistenza a compressione raggiunto [91].

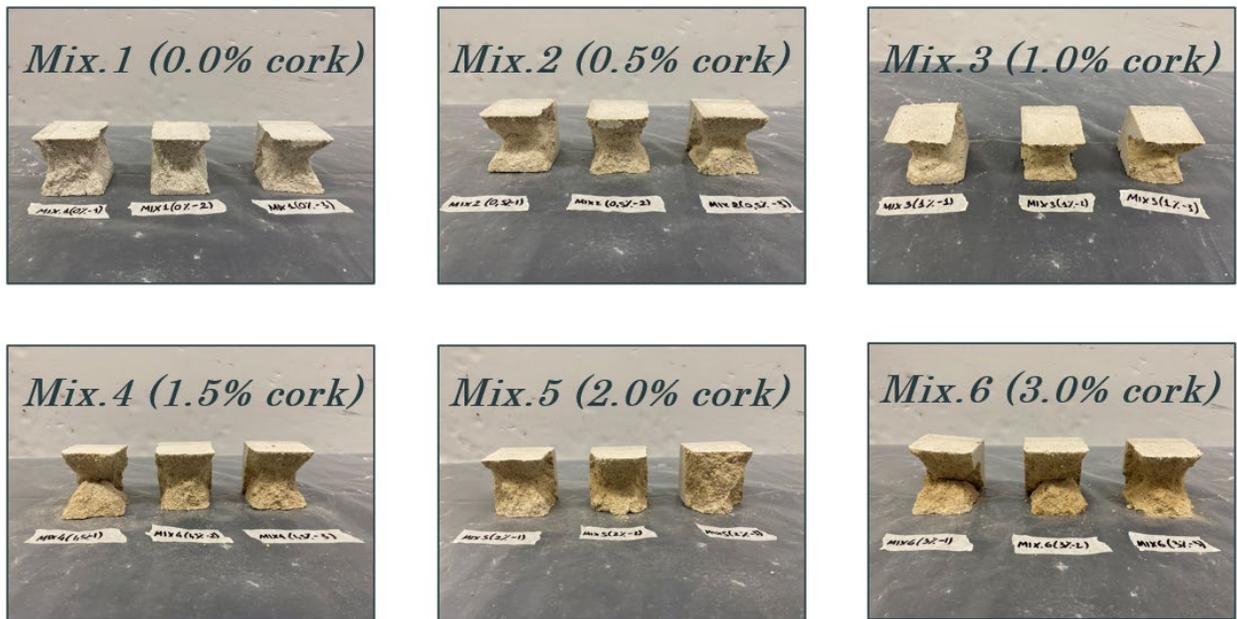


Fig. 12.2 Tipologia di rottura dei provini dopo i test a compressione.

Per tutte le prove, il valore medio di resistenza a compressione ottenuto su ogni provino non è mai inferiore a $1,50 \text{ N/mm}^2$, limite stabilito nella prima fase della ricerca (paragrafo 1.3), in accordo alle specifiche della normativa UNI EN 998-1:2016 [31].

Come atteso, all'aumentare della percentuale di sughero presente nella miscela, il valore medio di resistenza a compressione diminuisce progressivamente, effetto dovuto alla diminuzione graduale di densità.

Inoltre, si è osservato che il valore di resistenza a compressione medio ottenuto dai test di resistenza a compressione su Mix.1 è pari a $5,10 \text{ N/mm}^2$, di tre volte inferiore al valore della scheda tecnica del produttore, dichiarato pari a 15 N/mm^2 .

In Fig. 12.2 sono ben visibili le tipologie di rottura di ogni provino sottoposto a test di compressione, avvenuta per espulsione a trazione delle parti laterali, assumendo la caratteristica forma a clessidra. Le rotture più critiche si sono verificate in un provino di Mix.4 e in due provini di Mix.6. Per tutti e tre i casi, i provini si sono spezzati nella zona baricentrica del campione, riducendosi in due monconi di dimensione pressoché identica.

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.1



Fig. 12.3 Campioni di Mix.01 sottoposti a test di compressione.

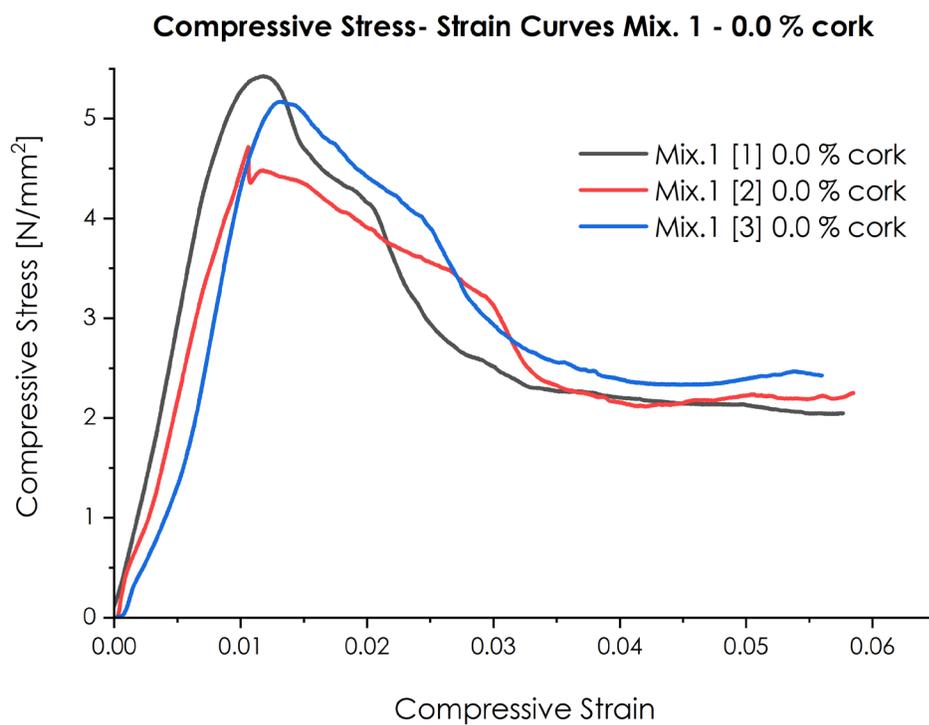


Fig. 12.4 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.1.

Campione	A [mm ²]	P [N]	ϵ_m max [-]	f _m [N/mm ²]	E _m [N/mm ²]
Mix.1 [1] (0.0% cork)	2500.00	13565.75	0.012	5.43	459.86
Mix.1 [2] (0.0% cork)	2500.00	11792.63	0.011	4.72	445.00
Mix.1 [3] (0.0% cork)	2500.00	12926.28	0.013	5.17	390.82
Valore medio		12761.55	0.01	5.10	431.89
Deviazione standard		897.97	0.00	0.36	36.34
Coefficiente di variazione		0.07	0.11	0.07	0.08

Tab. 12-1 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.1.

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.2



Fig. 12.5 Campioni di Mix.02 sottoposti a test di compressione.

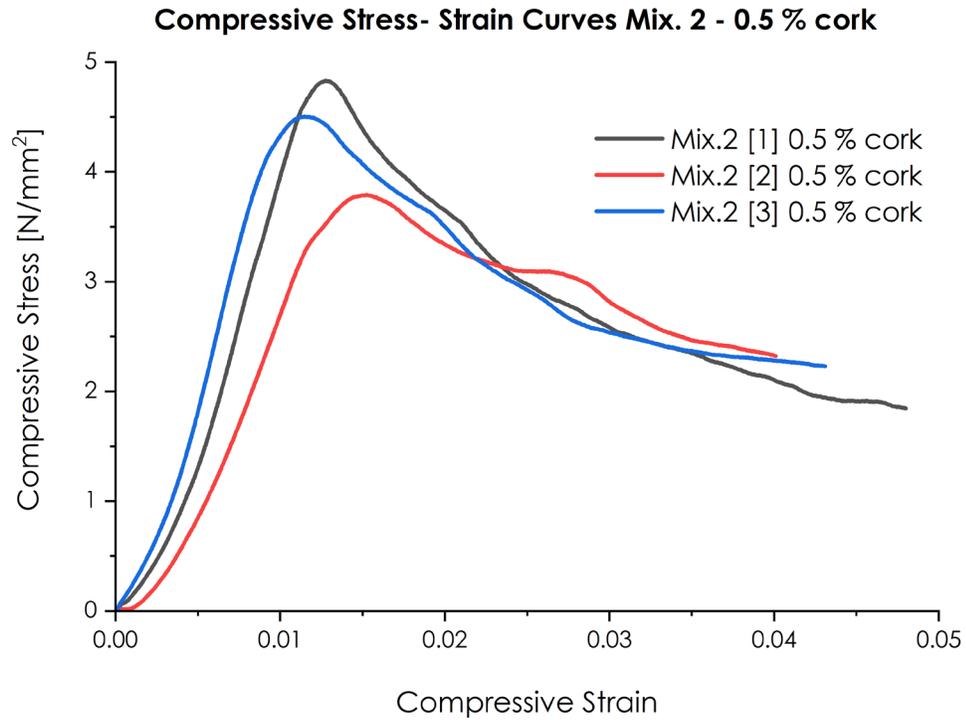


Fig. 12.6 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.2.

Campione	A [mm ²]	P [N]	$\epsilon_m \max$ [-]	f_m [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]
Mix.2 [1] (0.5 % cork)	2500.00	12078.53	0.013	4.83	378.34
Mix.2 [2] (0.5 % cork)	2500.00	9477.93	0.015	3.79	248.93
Mix.2 [3] (0.5 % cork)	2500.00	11260.30	0.012	4.50	391.66
Valore medio		10938.92	0.01	4.38	339.64
Deviazione standard		1329.75	0.00	0.53	78.84
Coefficiente di variazione		0.12	0.14	0.12	0.23

Tab. 12-2 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.2..

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.3



Fig. 12.7 Campioni di Mix.3 sottoposti a test di compressione.

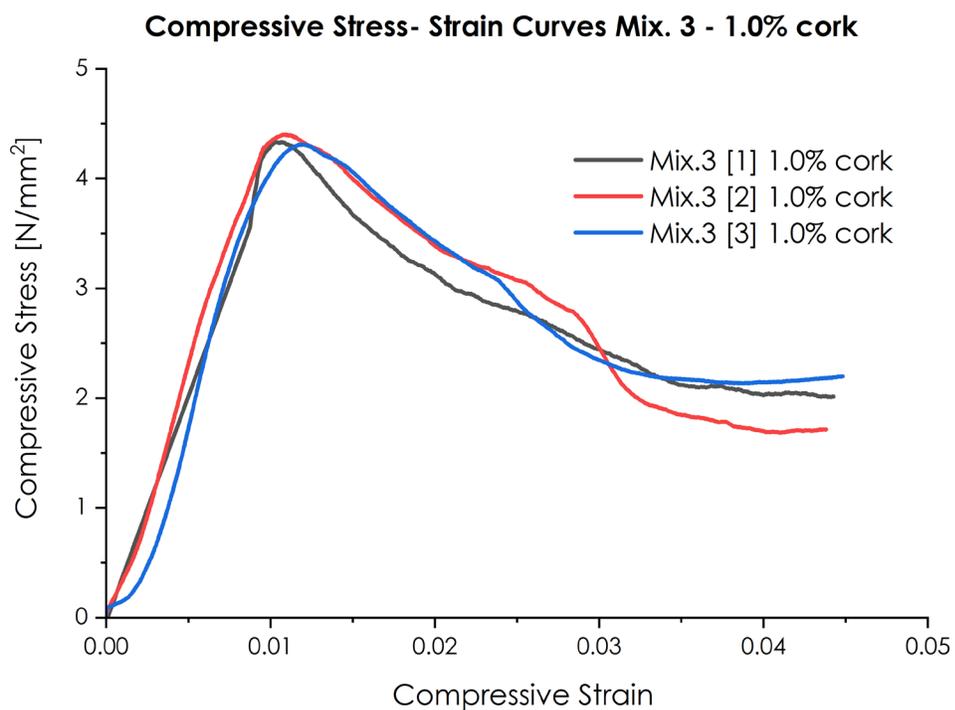


Fig. 12.8 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.3.

Campione	A [mm ²]	P [N]	$\epsilon_{m \max}$ [-]	f_m [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]
Mix.3 [1] (1.0 % cork)	2500.00	10835.95	0.011	4.33	406.60
Mix.3 [2] (1.0 % cork)	2500.00	11006.35	0.011	4.40	402.79
Mix.3 [3] (1.0 % cork)	2500.00	10775.93	0.012	4.31	361.31
Valore medio		10872.74	0.01	4.35	390.23
Deviazione standard		119.54	0.00	0.05	25.13
Coefficiente di variazione		0.01	0.06	0.01	0.06

Tab. 12-3 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.3.

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.4



Fig. 12.9 Campioni di Mix.4 sottoposti a test di compressione.

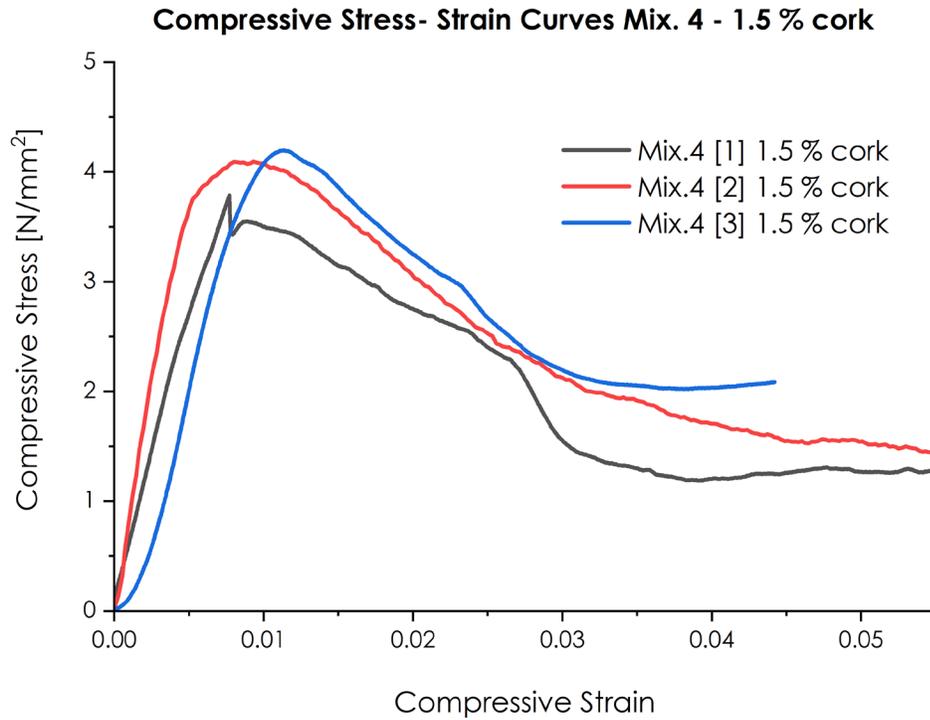


Fig. 12.10 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.4.

Campione	A [mm ²]	P [N]	$\epsilon_m \max$ [-]	f_m [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]
Mix.4 [1] (1.5 % cork)	2500.00	9467.63	0.008	3.79	490.55
Mix.4 [2] (1.5 % cork)	2500.00	10235.83	0.009	4.09	439.31
Mix.4 [3] (1.5 % cork)	2500.00	10490.15	0.011	4.20	370.68
Valore medio		10064.53	0.01	4.03	433.51
Deviazione standard		532.35	0.00	0.21	60.15
Coefficiente di variazione		0.05	0.19	0.05	0.14

Tab. 12-4 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.4.

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.6



Fig. 12.11 Campioni di Mix.5 sottoposti a test di compressione.

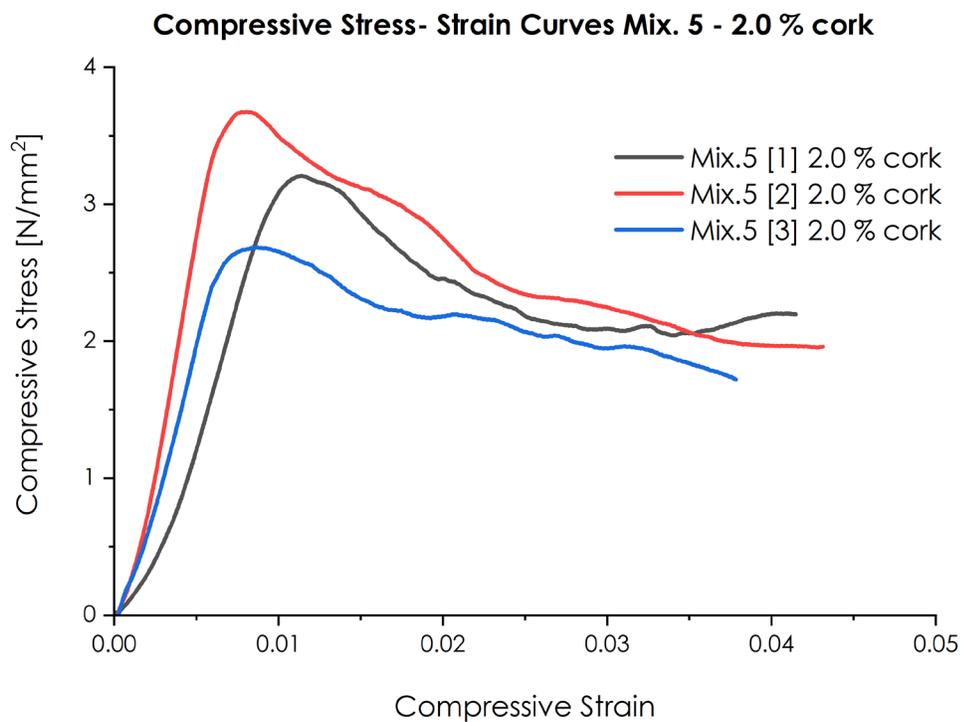


Fig. 12.12 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.5.

Campione	A [mm ²]	P [N]	ϵ_m max [-]	f _m [N/mm ²]	E _m [N/mm ²]
Mix.5 [1] (2.0 % cork)	2500.00	8017.83	0.011	3.21	280.59
Mix.5 [2] (2.0 % cork)	2500.00	9184.75	0.008	3.67	457.52
Mix.5 [3] (2.0 % cork)	2500.00	6713.08	0.009	2.69	311.15
Valore medio		7971.88	0.01	3.19	349.75
Deviazione standard		1236.48	0.00	0.49	94.57
Coefficiente di variazione		0.16	0.19	0.16	0.27

Tab. 12-5 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.5.

Risultati sperimentali di resistenza a compressione Mix.6



Fig. 12.13 Campioni di Mix.6 sottoposti a test di compressione.

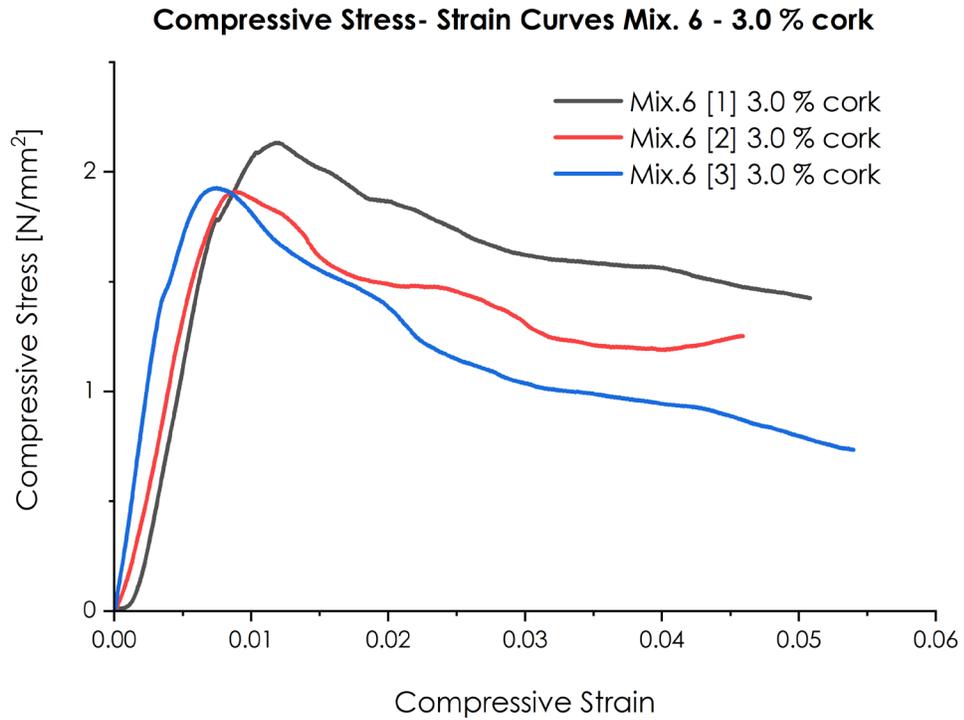


Fig. 12.14 Sovrapposizione dei grafici stress-strain derivati dalle prove di compressione su Mix.6.

Campione	A [mm ²]	P [N]	$\epsilon_m \max$ [-]	f_m [N/mm ²]	E_m [N/mm ²]
Mix.6 [1] (3.0 % cork)	2500.00	5334.63	0.012	2.13	177.82
Mix.6 [2] (3.0 % cork)	2500.00	4774.93	0.009	1.91	213.88
Mix.6 [3] (3.0 % cork)	2500.00	4817.30	0.007	1.93	257.95
Valore medio		4975.62	0.01	1.99	216.55
Deviazione standard		311.63	0.00	0.12	40.13
Coefficiente di variazione		0.06	0.24	0.06	0.19

Tab. 12-6 Risultati sperimentali di resistenza a compressione di Mix.6.

13. Prove di adesione mediante prove di adesione pull-off

La norma ASTM C1583/C1583M-20 [102] specifica le procedure per la valutazione delle prestazioni del materiale composito a matrice inorganica rinforzato con fibre tramite prove di adesione pull-off. Queste prove vengono utilizzate per misurare la resistenza dell'adesione tra il materiale composito e la superficie di muratura o di altro substrato a cui è applicato il rinforzo.

Il metodo di prova di adesione pull-off è stato eseguito su due tipi di superfici: mattoni in tufo e mattoni in laterizio, già presenti presso il laboratorio Structures and Materials Center presso l'University of Miami. Prima dell'applicazione del composito FRLM, i mattoni sono stati lavati con un'idropulitrice per rimuovere tutte le impurità, consentendo così il loro riutilizzo per questo test. Tale pratica non solo ha contribuito all'efficienza nell'uso delle risorse, ma ha anche rappresentato un'azione sostenibile, evitando la necessità di acquistare ulteriori materiali e riducendo al contempo gli sprechi associati al loro smaltimento.

Si sono effettuati sei test di adesione pull-off per ogni miscela, per un totale di trentasei test per ogni tipologia di mattone. Nello specifico, sono stati preparati e rinforzati sei provini di mattoni in tufo e diciotto mattoni in laterizio, seguendo gli schemi di

Fig. 13.1 e Fig. 13.3 , rispettando i dimensionamenti imposti dalle ASTM C1583/C1583M-20 [102].

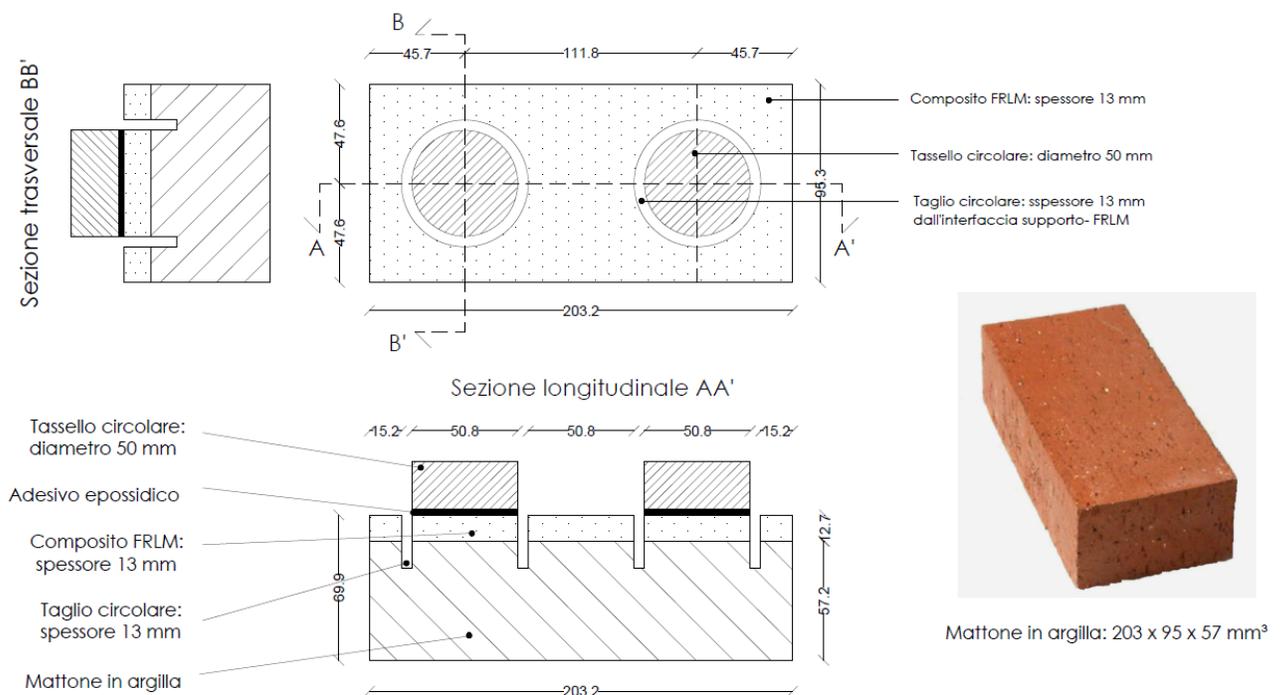


Fig. 13.1 Schema di setup dei provini di mattoni in laterizio da sottoporre a prove di adesione pull-off (dimensioni in mm).

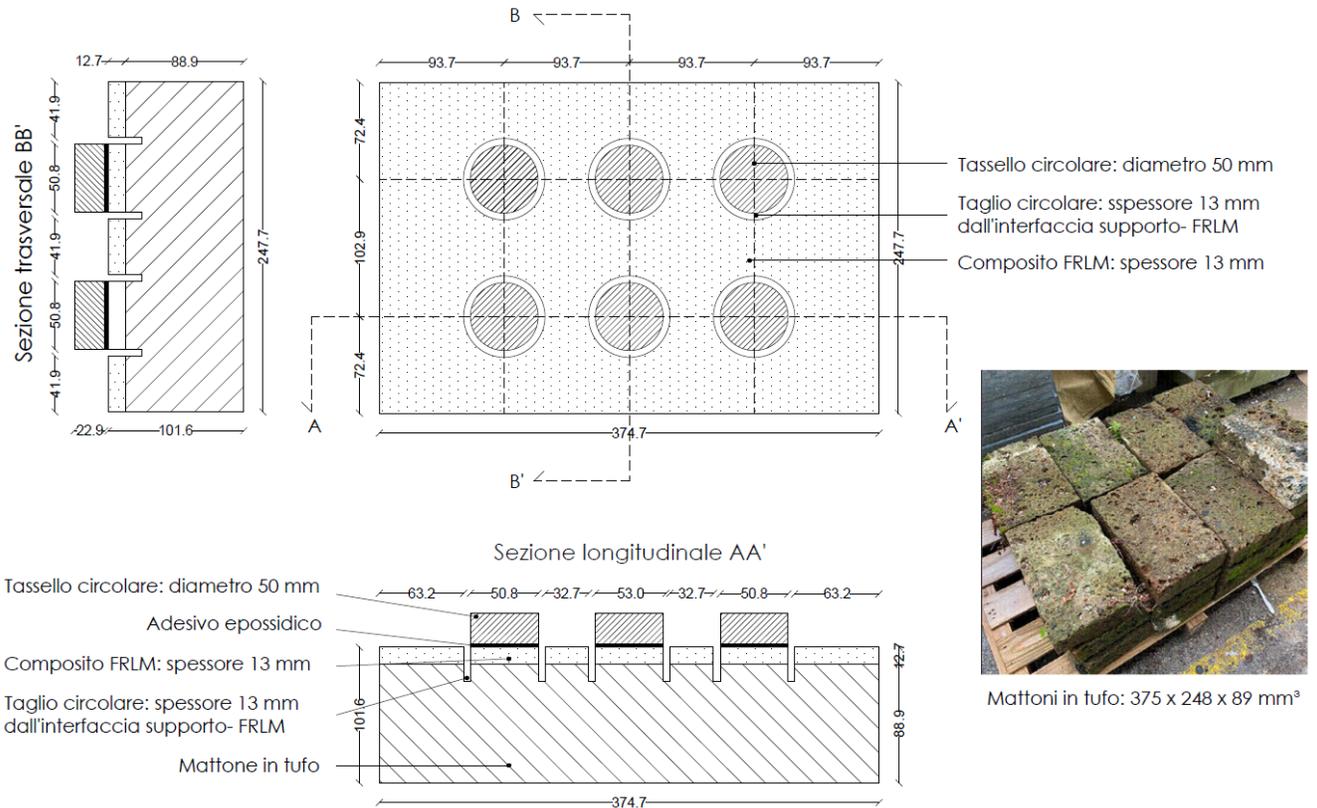


Fig. 13.2 Schema di setup dei provini di mattini in tufo da sottoporre a prove di adesione pull-off (dimensioni in mm).

Le miscele sono state preparate mediante apposito miscelatore automatico programmabile, seguendo la velocità e il tempo di miscela in accordo alle specifiche dettate dalla ASTM C305 – 20 [88].

Prima dell'applicazione del composito FRLM, su ogni mattone è stata preparata una cassaforma costruita con l'utilizzo di barre in acciaio di spessore pari a 12.7 mm (0.5 inches) caratterizzate dalla presenza di due guide (Fig. 13.3), ciascuna con uno spessore di 6.35 mm (0,25 inches).

Una volta umidificata manualmente con acqua la superficie superiore dei mattoni, è stato applicato il primo strato di matrice, con uno spessore pari a 6.35 mm (0.25 inch).

Dopo l'applicazione del primo strato di composito, è stata applicata la rete di rinforzo in fibra di basalto (Fig. 13.4), precedentemente tagliata in modo da essere annegata con precisione all'interno matrice. Successivamente, è stato applicato l'ultimo strato di intonaco termico, con uno spessore pari a 6.35 mm (0.25 inch).

Particolare attenzione è stata posta nell'applicazione del secondo e ultimo strato, per favorire la planarità della superficie che sarà a contatto con i dischi in acciaio da incollare sui provini.



Fig. 13.3 Preparazione delle casseforme sui mattoni in laterizio e in tufo.



Fig. 13.4 Applicazione della rete di basalto sul primo strato di intonaco termico del mattone in laterizio e del mattone in tufo.

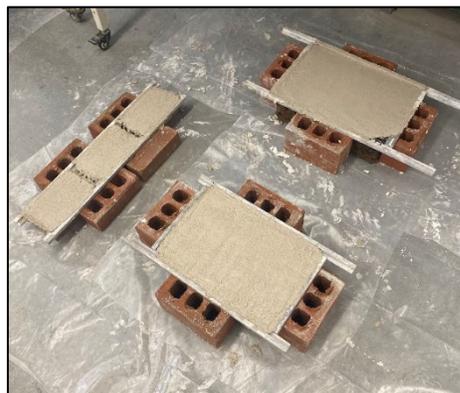


Fig. 13.5 Ultima fase di applicazione del composto dui mattoni di tufo e di laterizio

I provini sono stati lasciati rinforzati dalle casseforme in acciaio, rimosse dopo 24 ore con l'utilizzo di attrezzi specifici, in modo da evitare il danneggiamento del composito. Terminata la fase di preparazione, tutti i provini sono stati lasciati maturare per 28 giorni in condizioni umide a temperatura compresa tra i 18°C e i 22°C. in locale climatizzato.

Trascorso il tempo di maturazione, le zone di prova sono state incise con l'utilizzo di una carotatrice con bordo in corona diamantata e con diametro pari a 50.8 mm (Fig. 13.6). Dopo le incisioni, su ogni provino, i tasselli circolari in acciaio (di diametro pari a 50 mm) sono stati incollati mediante un adesivo in resina epossidica bio-componente ad indurimento rapido sulle aree ottenute mediante la foratura (

Fig. 13.7) e sono stati lasciati asciugare per un periodo di 24 ore.



Fig. 13.6 Fase di taglio dei mattoni in laterizio e in tufo mediante carotatrice con bordo in corona diamantata.



Fig. 13.7 Applicazione dell'adesivo epossidico bio-componente sui campioni.

13.1. Analisi dei risultati delle prove di adesione pull-off

Le prove sono state condotte in conformità con gli standard internazionali ASTM D4541-22 [135] e UNI EN ISO 4624 [136].

Tutti i test di adesione pull-off sono stati effettuati mediante macchinario manuale con pompa idraulica a controllo elettronico (Fig. 13.8), capace di applicare automaticamente una pressione di trazione regolare e continua. Il macchinario di prova include un cavo USB, a cui è stato connesso un PC che ha permesso di visualizzare e controllare l'andamento di ogni test in tempo reale.

Il carico è stato applicato a una velocità costante di trazione pari a 0.3 MPa/s, e come valore di pressione si è impostato come limite massimo 3,8 MPa.

Il macchinario è stato applicato concentricamente al tassello in acciaio; quindi, perpendicolarmente al supporto forato e fissato in modo tale che la sua posizione rimanga costante durante tutto il corso della prova.



Fig. 13.8 Tester portatile di adesione a strappo utilizzato per le prove di pull-off [102].

La determinazione della tipologia di rottura di una prova di adesione pull-off è un parametro fondamentale. Mediante valutazione visiva qualitativa, si determina il tipo di rottura in base agli schemi indicati nelle ASTM C1583/C1583M – 20[102], di cui:

- (a) Rottura per mancanza di adesione nel substrato rinforzato.
- (b) Rottura per mancata adesione tra il rinforzo e il supporto rinforzato.
- (c) Rottura per mancata adesione nel rinforzo.

- (d) Rottura per mancata adesione tra lo strato adesivo e il rinforzo.

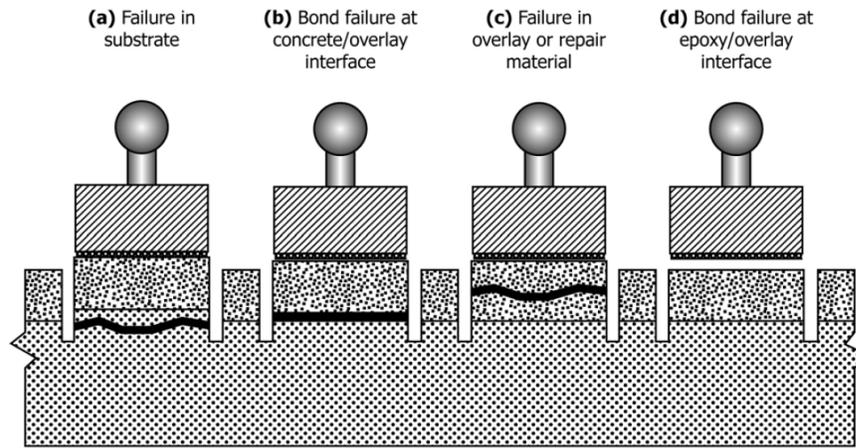


Fig. 13.9 Schemi di tipologia di rottura in accordo alle ASTM C1583/C1583M – 20.

La normativa europea UNI EN 1542 [137] inserisce un'ulteriore tipologia di rottura (e), vale a dire:

- (e) Rottura per mancanza di adesione tra lo strato adesivo e il tassello in acciaio.

Il calcolo della resistenza di adesione si calcola mediante la formula:

$$f_h = F_h/A$$

Equazione 16

In cui

- F_h è il carico di rottura del campione di prova [N].
- A è l'area su cui è applicato il carico F_h [mm].

Si tenga presente che il provino in laterizio Mix.3 L (5-6) è stato danneggiato durante le fasi di spostamento dei provini (Fig. 13.14). Per questo motivo, le prove effettuate su Mix.3 presentano soltanto quattro risultati, anziché sei.

Le prove effettuate sui mattoni in laterizio rinforzati, hanno presentato cinque rotture di tipo (b) per i campioni Mix.1-L, dimostrando che la matrice di controllo Mix.1 con lo 0% di sughero aggiunto è quella caratterizzata dalla resistenza di adesione più bassa, pari a 0.59 N/mm^2 . Mix.6-L ha presentato un valore di resistenza di adesione medio pari a 0.71 N/mm^2 , con tipologie di rottura di tipo (c) per tutte e sei i test. In particolare, nei provini Mix.6-L (1) e Mix.6-L (6) la rottura è avvenuta tra il secondo strato di rinforzo e la fibra di basalto, senza la rimozione della fibra, situazione avvenuta invece per Mix.6-L (2), (3), (4) e (5). La resistenza maggiore di adesione è stata ottenuta mediante i test effettuati su Mix.2-L, con valore medio pari a 0.99 N/mm^2 . Mix.4-L (2), in particolare, è il provino con la maggiore resistenza di adesione (1.43 N/mm^2), caratterizzato da una rottura di tipo (c) senza rimozione della fibra di basalto. In generale, i test effettuati sul laterizio hanno riportato una dispersione dei risultati molto elevata per tutti i provini, avvenuta per la diversità della rugosità superficiale di ogni mattone, parametro analizzato nel seguente capitolo 14. La matrice di controllo Mix.1, caratterizzata da una resistenza di adesione pari a 0.59 N/mm^2 , ha presentato un valore differente dalla scheda tecnica, in cui la resistenza di adesione su laterizio viene indicata con un valore maggiore di 1 N/mm^2 .

Riguardo ai risultati ottenuti dalle prove di adesione pull-off effettuate sui mattoni in tufo, la maggior parte dei campioni è caratterizzata dalla rottura di tipo (a), dimostrando che questa tipologia di muratura sembra essere il supporto ideale per le miscele analizzate. In particolare, tutti i sei test effettuati su Mix.1-T e su Mix.4 T hanno presentato rotture di tipo (a). In questo caso, si è riscontrata un'anomalia dei risultati, in quanto la resistenza di adesione media maggiore si è verificata su Mix.4-T (0.59 N/mm^2), mentre quella più bassa si è presentata per Mix.1, pari a $0,39 \text{ N/mm}^2$. Tale condizione è stata causata dalla differente porosità dei mattoni in tufo, proprietà intrinseca nella natura del materiale.

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove di adesione pull-off eseguiti sui mattoni in laterizio e sui mattoni in tufo. Per ogni test effettuato sono riportate le foto dei provini dopo la rottura, i grafici tensione- tempo, con i valori di resistenza a trazione sulle ordinate [N/mm^2] e il tempo in secondi [s] sulle ascisse e le tabelle con i valori ottenuti, in cui i tratti verticali si riferiscono alla perdita di carico una volta raggiunto il carico di picco.

Nello specifico, in tabella sono indicati i parametri di:

- Resistenza di adesione del campione di prova f_h [N/mm^2].
- Diametro medio del campione di prova D [mm].
- Carico di rottura F_h [N].
- Tipologia di rottura di ciascun campione.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.1-L



Fig. 13.10 Campioni di Mix.1- L sottoposti a test di adesione pull-off.

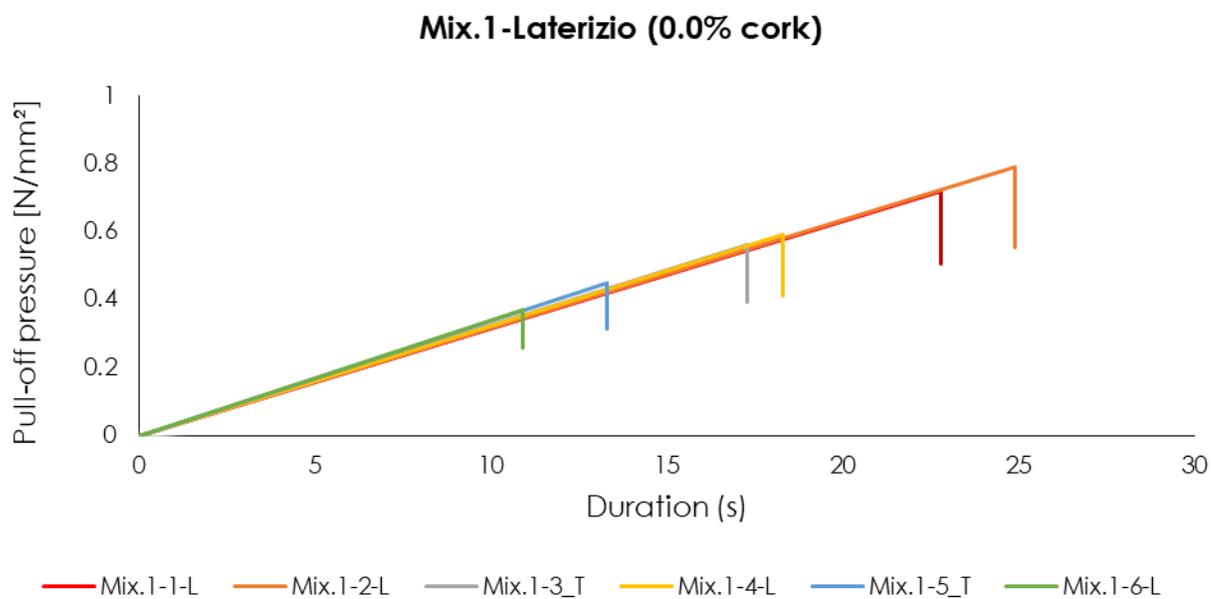


Fig. 13.11 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.1-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.1-L (1)	50.00	1471.88	0.75	(b)
Mix.1-L (2)	50.00	1550.38	0.79	(c)
Mix.1-L (3)	50.00	1099.00	0.56	(b)
Mix.1-L (4)	50.00	1157.88	0.59	(b)
Mix.1-L (5)	50.00	883.13	0.45	(b)
Mix.1-L (6)	50.00	726.13	0.37	(b)
Valore medio		1148.06	0.59	
Deviazione standard		321.69	0.16	
Coefficiente di variazione		0.28	0.28	

Tab. 13-1 Risultati prove di prove di adesione su Mix.1-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.2-L



Fig. 13.12 Campioni di Mix.2- L sottoposti a test di adesione pull-off.

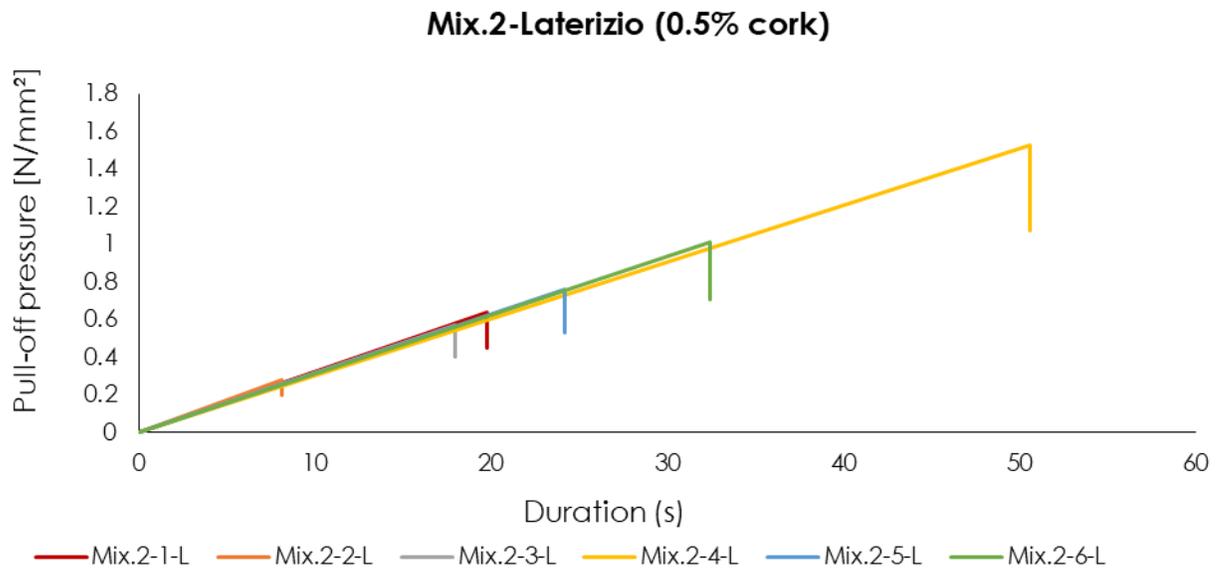


Fig. 13.13 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.2-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.2-L (1)	50.00	1256.00	0.64	(b)
Mix.2-L (2)	50.00	549.50	0.28	(b)
Mix.2-L (3)	50.00	1118.63	0.57	(b/c)
Mix.2-L (4)	50.00	2806.38	1.43	(c)
Mix.2-L (5)	50.00	1491.50	0.76	(b)
Mix.2-L (6)	50.00	1982.13	1.01	(c)
Valore medio		1534.02	0.78	
Deviazione standard		779.82	0.40	
Coefficiente di variazione		0.51	0.51	

Tab. 13-2 Risultati prove di prove di adesione su Mix.2-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.3-L



Fig. 13.14 Campioni di Mix.3- L sottoposti a test di adesione pull-off.

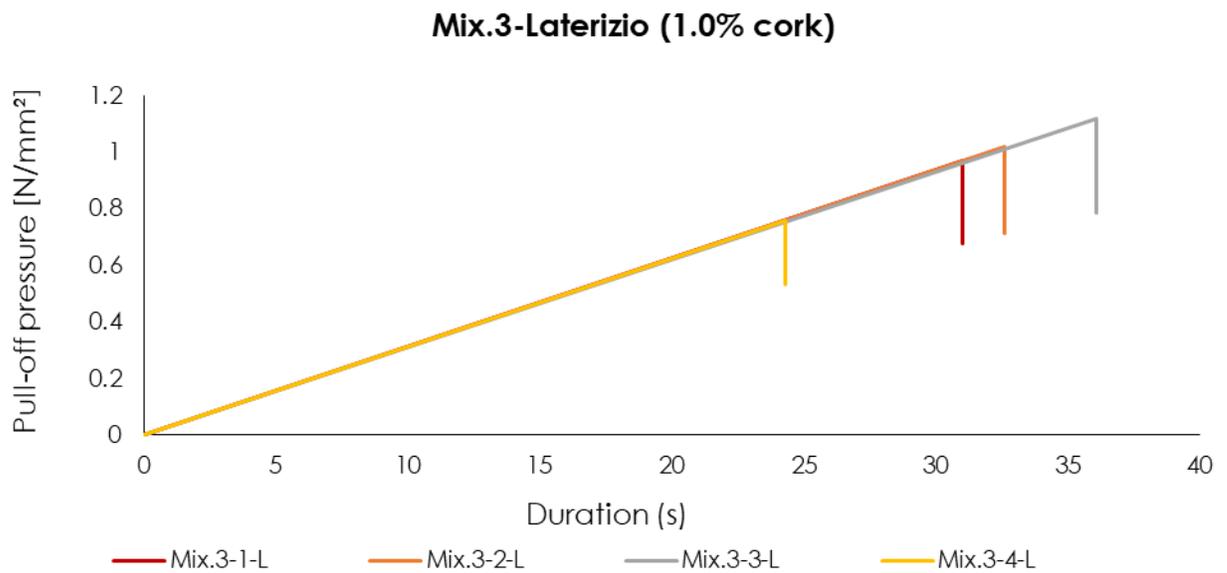


Fig. 13.15 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.3-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.3-L (1)	50.00	1903.63	0.97	(b/c)
Mix.3-L (2)	50.00	2001.75	1.02	(c)
Mix.3-L (3)	50.00	2374.63	1.21	(c)
Mix.3-L (4)	50.00	1491.50	0.76	(c)
Mix.3-L (5)	50.00	-	-	(-)
Mix.3-L (6)	50.00	-	-	(-)
Valore medio		1942.88	0.99	
Deviazione standard		362.93	0.18	
Coefficiente di variazione		0.19	0.19	

Tab. 13-3 Risultati prove di prove di adesione su Mix.3-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.4-L



Fig. 13.16 Campioni di Mix.4- L sottoposti a test di adesione pull-off.

Mix.4-Laterizio (1.5% cork)

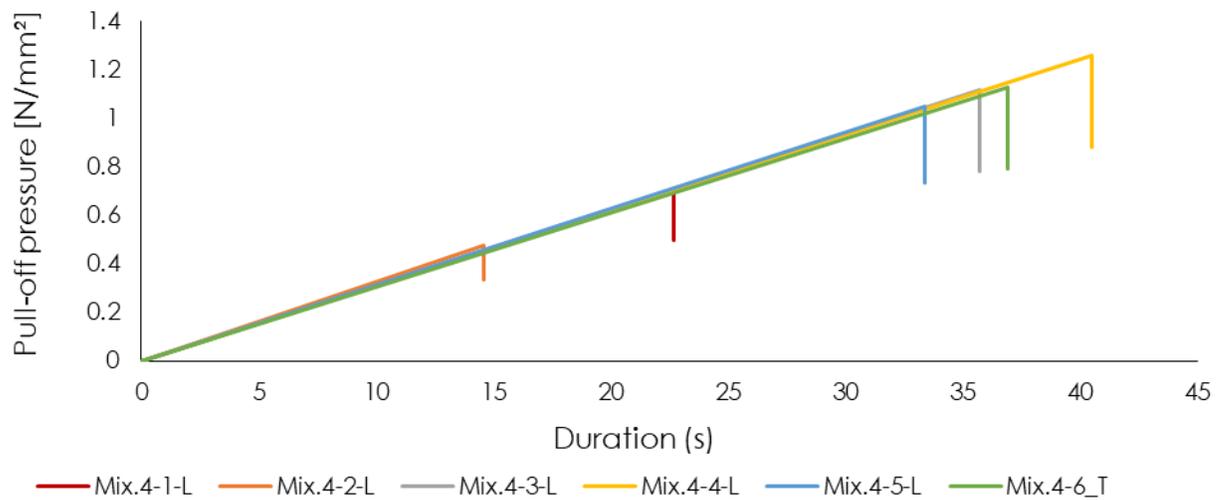


Fig. 13.17 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.4-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.4-L (1)	50.00	1393.38	0.71	(b/c)
Mix.4-L (2)	50.00	942.00	0.48	(b/c)
Mix.4-L (3)	50.00	2198.00	1.12	(b/c)
Mix.4-L (4)	50.00	2472.75	1.26	(c)
Mix.4-L (5)	50.00	2060.63	1.05	(b/c)
Mix.4-L (6)	50.00	2217.63	1.13	(c)
Valore medio		1880.73	0.96	
Deviazione standard		585.79	0.30	
Coefficiente di variazione		0.31	0.31	

Tab. 13-4 Risultati prove di adesione su Mix.4-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.5-L



Fig. 13.18 Campioni di Mix.5- L sottoposti a test di adesione pull-off.

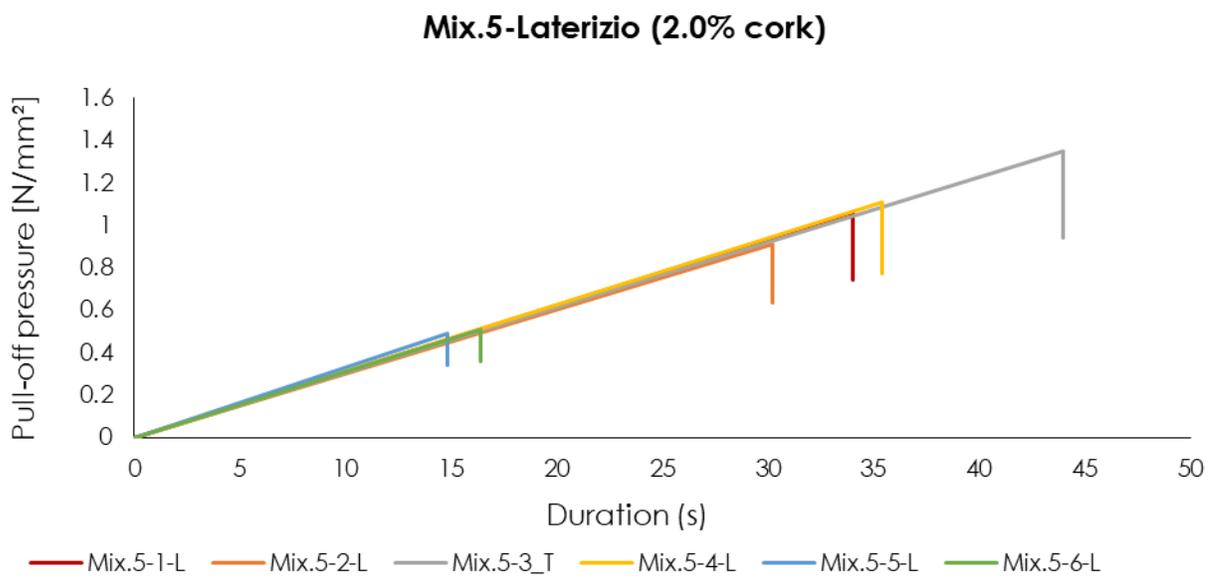


Fig. 13.19 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.5-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.5-L (1)	50.00	2080.25	1.06	(c/d)
Mix.5-L (2)	50.00	178.59	0.09	(c)
Mix.5-L (3)	50.00	2649.38	1.35	(c)
Mix.5-L (4)	50.00	2178.38	1.11	(c)
Mix.5-L (5)	50.00	961.63	0.49	(c)
Mix.5-L (6)	50.00	1000.88	0.51	(c)
Valore medio		1508.18	0.77	
Deviazione standard		938.37	0.48	
Coefficiente di variazione		0.62	0.62	

Tab. 13-5 Risultati prove di prove di adesione su Mix.5-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.6-L



Fig. 13.20 Campioni di Mix.6- L sottoposti a test di adesione pull-off.

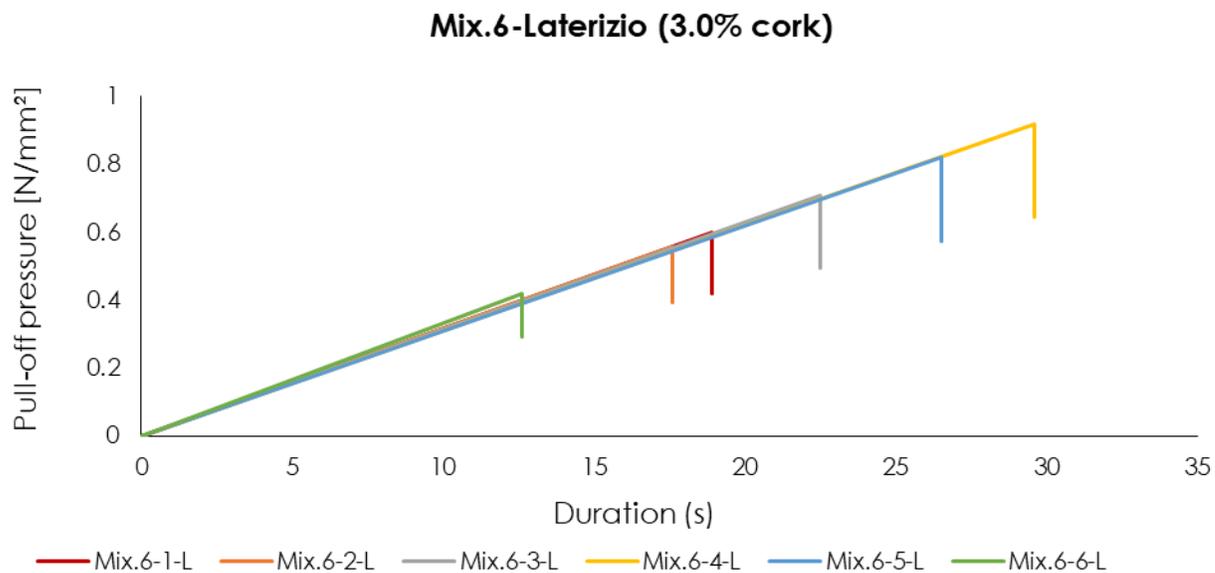


Fig. 13.21 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.6-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.6-L (1)	50.00	1216.75	0.62	(c)
Mix.6-L (2)	50.00	1177.50	0.60	(c)
Mix.6-L (3)	50.00	1099.00	0.56	(c)
Mix.6-L (4)	50.00	1393.38	0.71	(c)
Mix.6-L (5)	50.00	1805.50	0.92	(c)
Mix.6-L (6)	50.00	1609.25	0.82	(c)
Valore medio		1383.56	0.71	
Deviazione standard		275.80	0.14	
Coefficiente di variazione		0.20	0.20	

Tab. 13-6 Risultati prove di prove di adesione su Mix.6-L.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.1-T

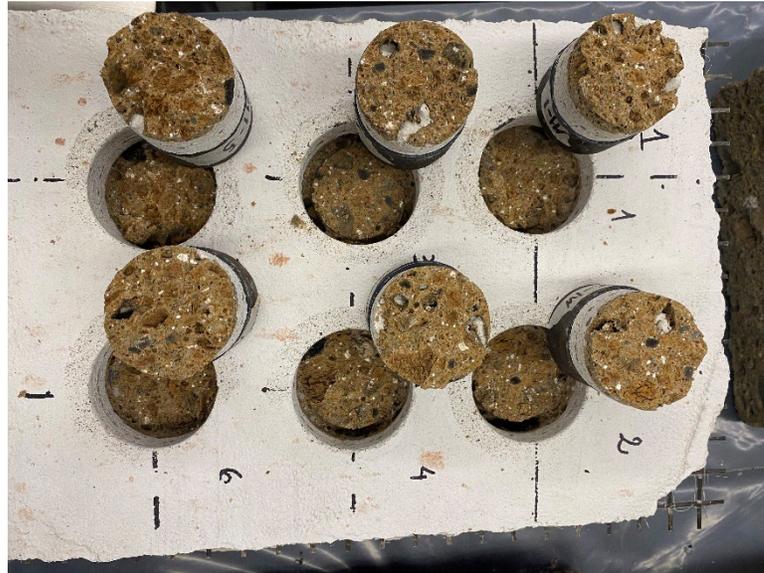


Fig. 13.22 Campioni di Mix.1-T sottoposti a test di adesione pull-off.

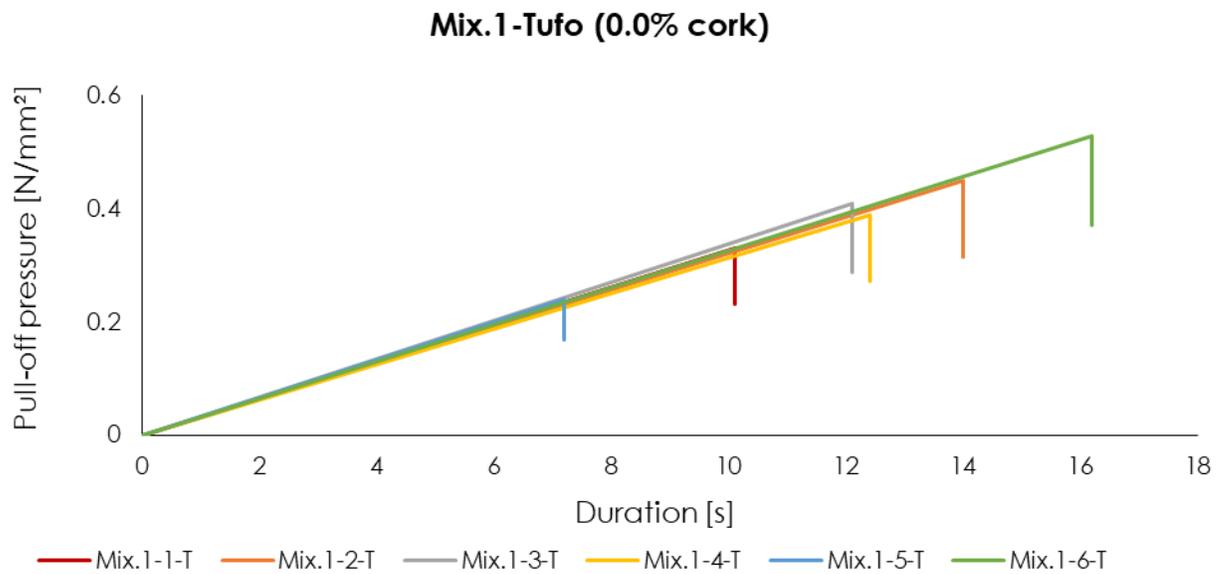


Fig. 13.23 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.1-T.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.1-T (1)	50.00	647.63	0.33	(a)
Mix.1-T (2)	50.00	883.13	0.45	(a)
Mix.1-T (3)	50.00	804.63	0.41	(a)
Mix.1-T (4)	50.00	765.38	0.39	(a)
Mix.1-T (5)	50.00	471.00	0.24	(a)
Mix.1-T (6)	50.00	1040.13	0.53	(a)
Valore medio		768.65	0.39	
Deviazione standard		195.63	0.10	
Coefficiente di variazione		0.25	0.25	

Tab. 13-7 Risultati prove di prove di adesione su Mix.1-T.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.2-T



Fig. 13.24 Campioni di Mix.2- T sottoposti a test di adesione pull-off.

Mix.2-Tufo (0.5% cork)

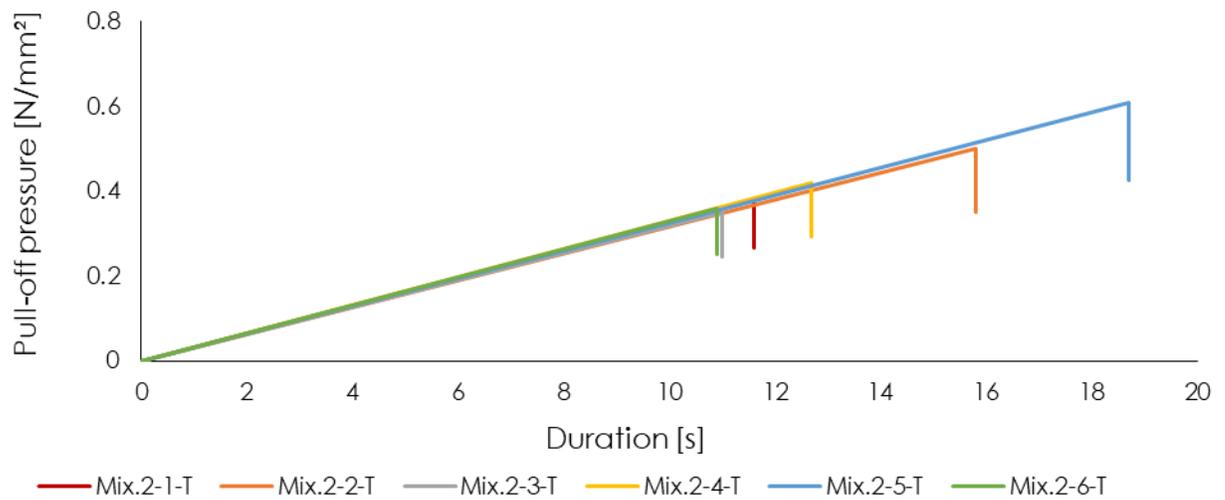


Fig. 13.25 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.2-T.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.2-T (1)	50.00	745.75	0.38	(a/b)
Mix.2-T (2)	50.00	981.25	0.50	(a/b)
Mix.2-T (3)	50.00	686.88	0.35	(a/b)
Mix.2-T (4)	50.00	824.25	0.42	(a/b)
Mix.2-T (5)	50.00	1197.13	0.61	(a/b)
Mix.2-T (6)	50.00	706.50	0.36	(a/b)
Valore medio		856.96	0.44	
Deviazione standard		198.07	0.10	
Coefficiente di variazione		0.23	0.23	

Tab. 13-8 Risultati prove di prove di adesione su Mix.2-T.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.3-T



Fig. 13.26 Campioni di Mix.3-T sottoposti a test di adesione pull-off.

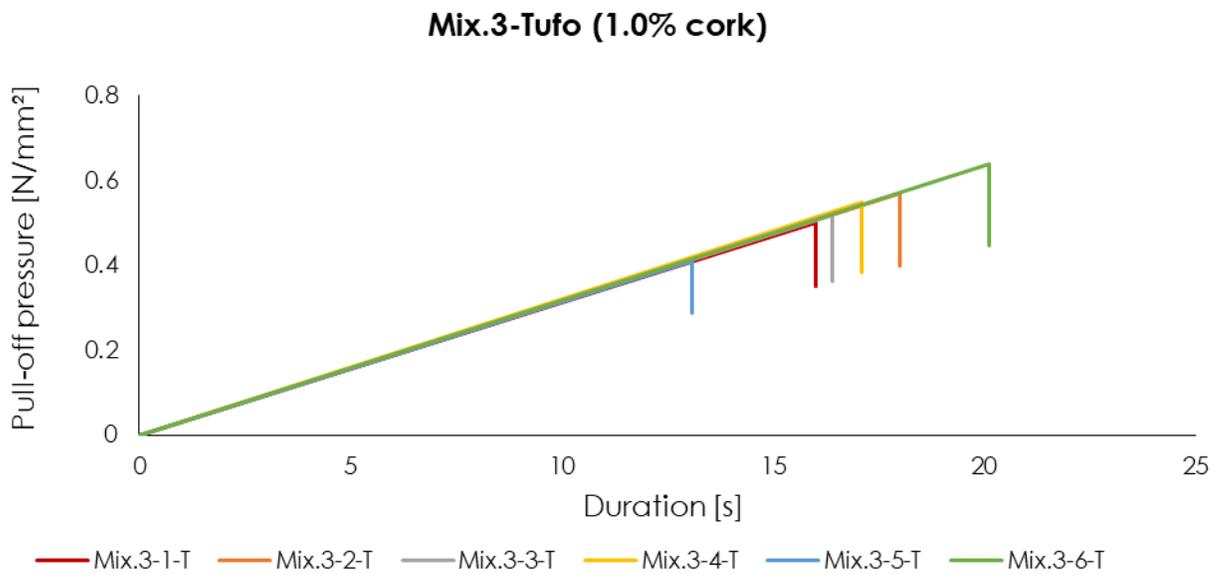


Fig. 13.27 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.3-T.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.3-T (1)	50.00	981.25	0.50	(a)
Mix.3-T (2)	50.00	1118.63	0.57	(a)
Mix.3-T (3)	50.00	1020.50	0.52	(a/b)
Mix.3-T (4)	50.00	1079.38	0.55	(a)
Mix.3-T (5)	50.00	-	0.41	(a)
Mix.3-T (6)	50.00	-	0.64	(a/b)
Valore medio		1049.94	0.53	
Deviazione standard		61.02	0.08	
Coefficiente di variazione		0.06	0.14	

Tab. 13-9 Risultati prove di prove di adesione su Mix.3-T.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.4-T

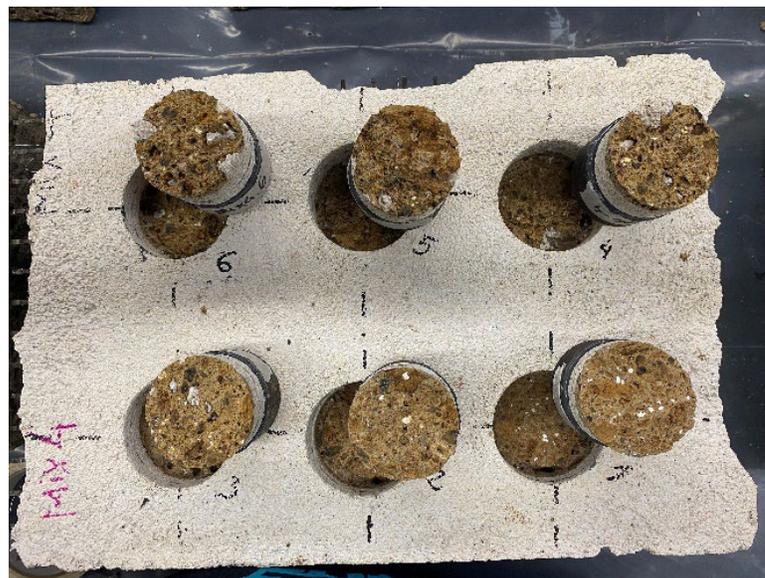


Fig. 13.28 Campioni di Mix.4- T sottoposti a test di adesione pull-off.

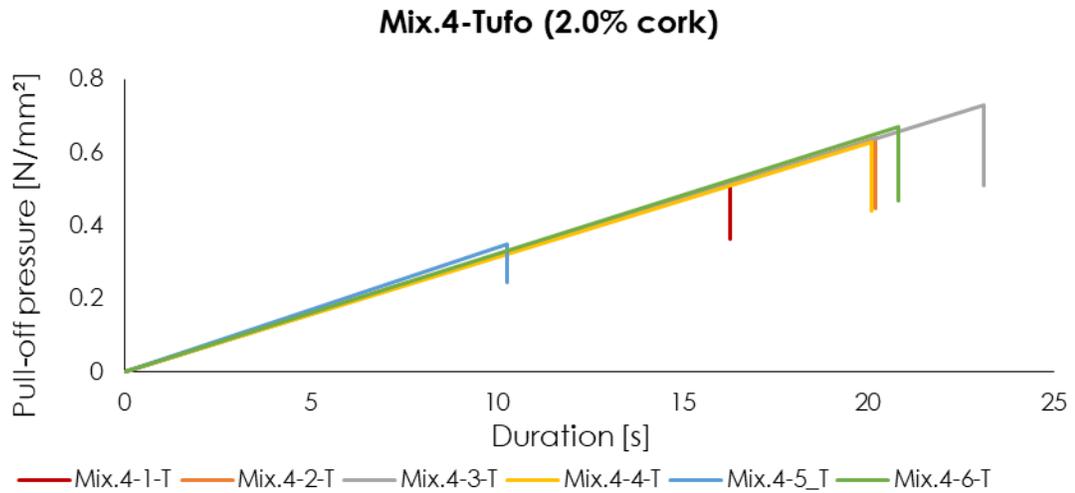


Fig. 13.29 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.4-T.

Mix.4-T (1)	50.00	1020.50	0.52	(a)
Mix.4-T (2)	50.00	1256.00	0.64	(a)
Mix.4-T (3)	50.00	1432.63	0.73	(a)
Mix.4-T (4)	50.00	1236.38	0.63	(a)
Mix.4-T (5)	50.00	686.88	0.35	(a)
Mix.4-T (6)	50.00	1314.88	0.67	(a)
Valore medio		1157.88	0.59	
Deviazione standard		267.07	0.14	
Coefficiente di variazione		0.23	0.23	

Tab. 13-10 Risultati prove di prove di adesione su Mix.4-T

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.5-T



Fig. 13.30 Campioni di Mix.5-T sottoposti a test di adesione pull-off.

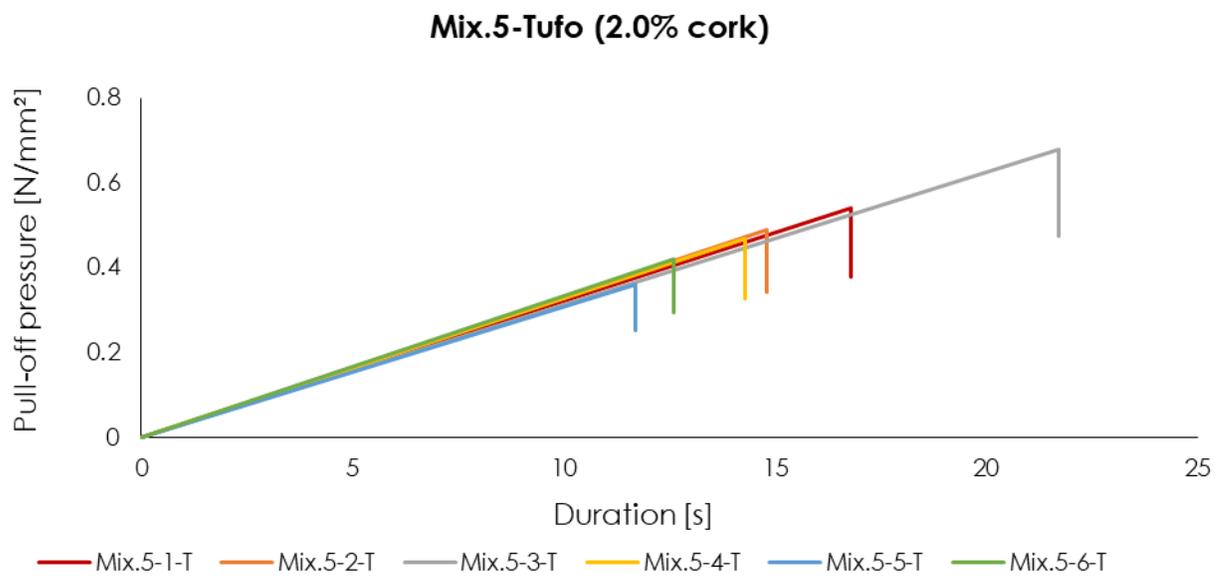


Fig. 13.31 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.5-T.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.5-T (1)	50.00	1059.75	0.54	(a/b)
Mix.5-T (2)	50.00	961.63	0.49	(a/b)
Mix.5-T (3)	50.00	1334.50	0.68	(a/b)
Mix.5-T (4)	50.00	922.38	0.47	(a/b)
Mix.5TL (5)	50.00	706.50	0.36	(a/b)
Mix.5-T (6)	50.00	824.25	0.42	(a/b)
Valore medio		968.17	0.49	
Deviazione standard		216.29	0.11	
Coefficiente di variazione		0.22	0.22	

Tab. 13-11 Risultati prove di prove di adesione su Mix.5-T.

Risultati sperimentali di resistenza di adesione su laterizio Mix.6-T



Fig. 13.32 Campioni di Mix.6-T sottoposti a test di adesione pull-off.

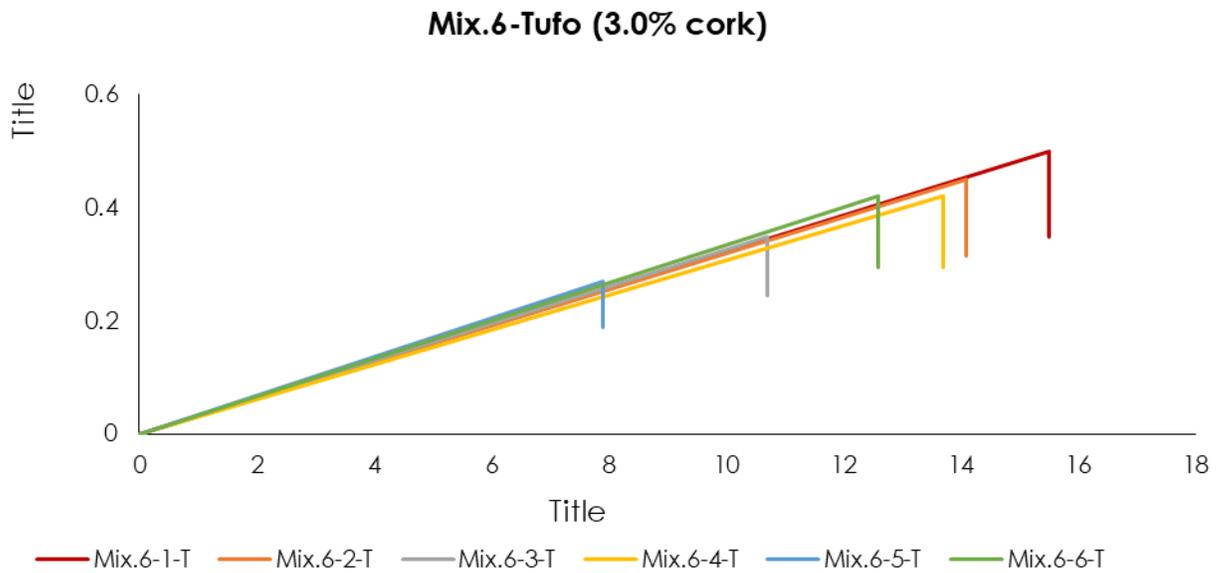


Fig. 13.33 Sovrapposizione dei grafici tempo – tensione derivati dalle prove di adesione su Mix.6-L.

Campione	D [mm]	Ph [N]	fh [N/mm ²]	Tipo di rottura
Mix.6-T (1)	50.00	961.63	0.49	(b)
Mix.6-T (2)	50.00	981.25	0.50	(a)
Mix.6-T (3)	50.00	883.13	0.45	(a)
Mix.6-T (4)	50.00	686.88	0.35	(a/b)
Mix.6-T (5)	50.00	824.25	0.42	(a/b)
Mix.6-T (6)	50.00	529.88	0.27	(a/b)
Valore medio		811.17	0.41	
Deviazione standard		174.06	0.09	
Coefficiente di variazione		0.21	0.21	

Tab. 13-12 Risultati prove di prove di adesione su Mix.6-T.

14. Misurazione della rugosità superficiale dei mattoni in laterizio

Dai valori di resistenza di adesione ottenuti mediante le prove di pull-off sui mattoni rinforzati, si è osservata una forte dispersione tra i risultati ottenuti (paragrafo 13.1), fattore dipeso dalla diversità della rugosità superficiale dei supporti in laterizio.

Si nota, intatti, che i mattoni con una superficie più ruvida hanno mostrato un miglior comportamento in termini di adesione rispetto a quelli caratterizzati da una superficie più liscia.

Un'analisi approfondita è stata successivamente svolta per comprendere il significato dei termini "ruvido" e "liscio", misurando i parametri di rugosità superficiale delle due tipologie di mattoni. In questi termini, la misura della rugosità superficiale è stata effettuata su due tipi di superfici in laterizio utilizzate per le prove di pull-off: una più liscia e una più ruvida, selezione avvenuta in modo piuttosto qualitativo, osservando il mattone al microscopio e valutando le superfici più differenti tra di loro

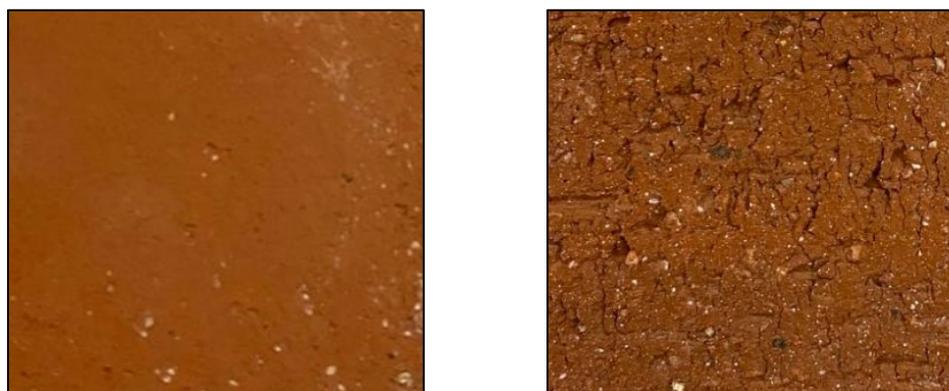
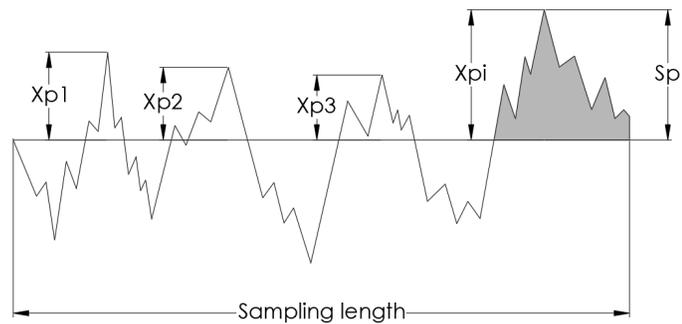


Fig. 14.1 Superficie liscia e superficie ruvida osservate al microscopio.

Per la misurazione della rugosità superficiale si è utilizzato un profilometro ottico (di non contatto), come indicato nelle UNI EN ISO 25178-605 [138]. Il profilometro è uno strumento di analisi non distruttivo che utilizza una tecnologia confocale cromatica a luce bianca capace di caratterizzare ogni tipologia di superficie. Si basa sulla scansione per punti della superficie illuminata, misurando la distanza di ogni punto dal riferimento cartesiano precedentemente impostato. Tale strumento dispone del software Professional 3D, che ha consentito la ricostruzione con elevata precisione e l'analisi rapida dei risultati, in accordo a quanto riportato dalle UNI EN ISO 25178-2 [112].

Per la valutazione della rugosità superficiale si sono seguite le specifiche indicate nello standard europeo UNI EN ISO 25178-2 [112], in cui definiscono i parametri di superficie e i rispettivi metodi di calcolo, nello specifico:

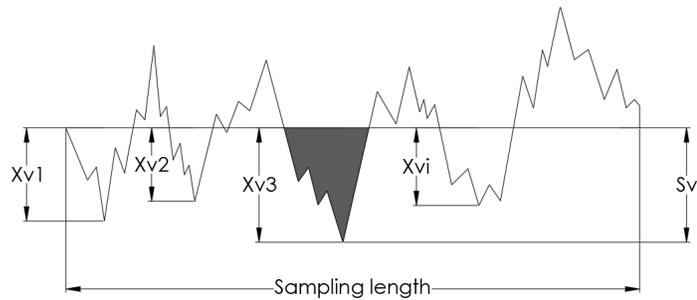
- S_p [mm] rappresenta l'altezza massima di picco del profilo.



$$S_p = \max (X_{(z)})$$

Fig. 14.2 Schema rappresentativo dell'altezza massima del picco del profilo S_p .

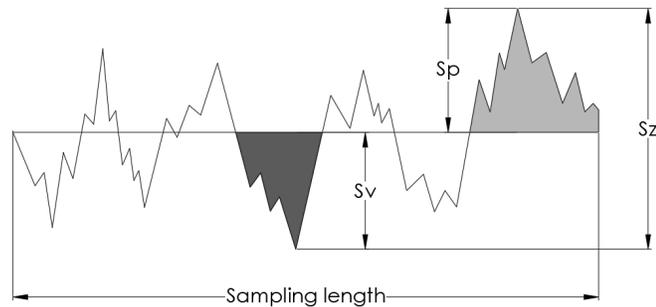
- S_v [mm] è la profondità massima della valle del profilo e rappresenta l'altezza del picco di un profilo nell'ambito della lunghezza di campionamento



$$S_v = \min (X_{(z)})$$

Fig. 14.3 Schema rappresentativo della profondità massima della valle del profilo S_v .

- S_z [mm] è l'altezza massima del profilo, che rappresenta la somma dell'altezza massima di picco e la profondità massima a valle del profilo



$$S_z = S_p + S_v$$

Fig. 14.4 Schema rappresentativo dell'altezza massima del profilo S_z .

- S_a [mm] è la rugosità superficiale media, che rappresenta la media aritmetica dell'ordinata $Z(x)$ e si definisce mediante l' $S_a = \frac{1}{l} \int_0^l |X(z)| dz$
- Equazione 17 [112]:

$$S_a = \frac{1}{l} \int_0^l |X(z)| dz$$

Equazione 17

In cui l rappresenta la lunghezza di valutazione del provino analizzato.

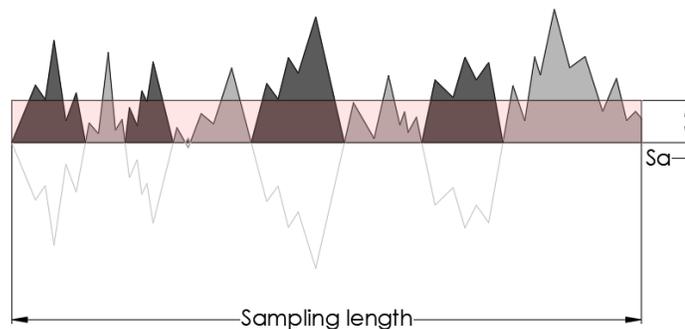


Fig. 14.5 Schema rappresentativo della rugosità superficiale media del profilo S_a .

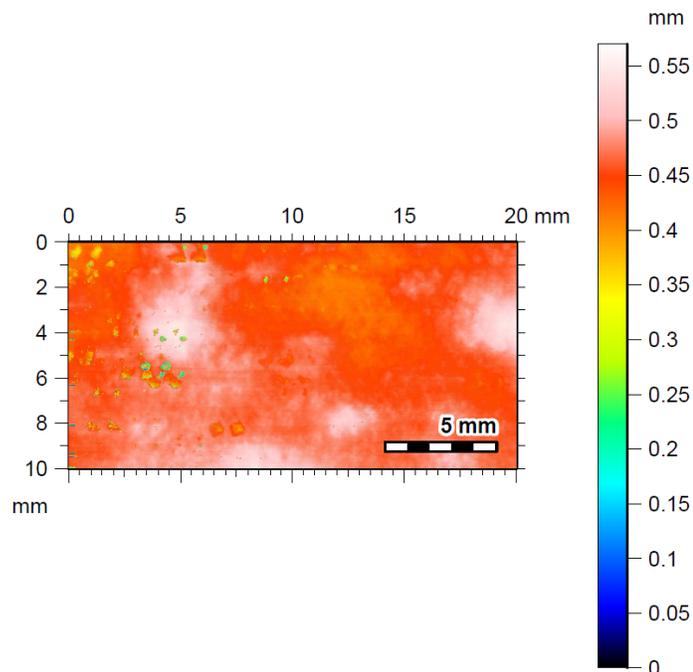


Fig. 14.6 Scala di valori della superficie liscia ottenuta mediante analisi con Professional 3D.

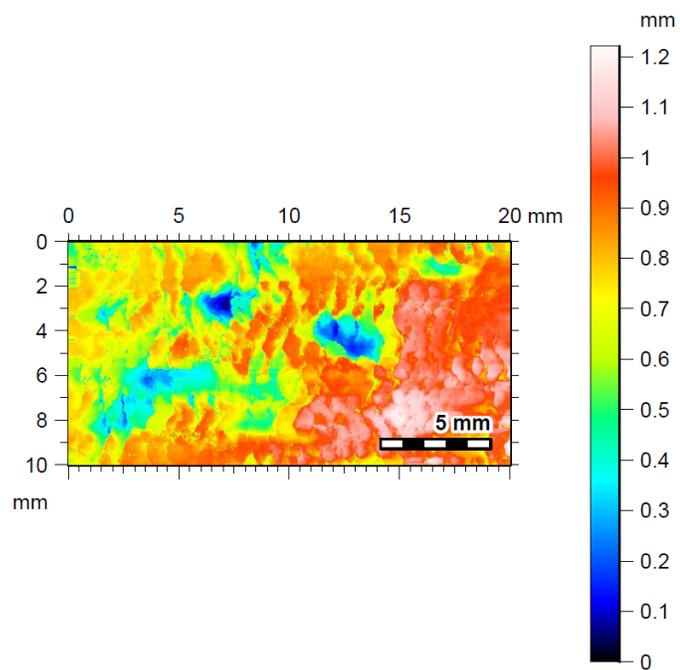


Fig. 14.7 Scala di valori della superficie ruvida ottenuta mediante analisi con Professional 3D.

Di seguito, si riportano i risultati delle analisi effettuate per entrambe le tipologie di mattone, confrontando i valori dei risultati tra il mattone con superficie liscia e il

mattone con superficie ruvida. Tutte le analisi sono state svolte in accordo alle due normative UNI EN ISO descritte in precedenza ([112], [138]).

Le due immagini

Fig. 14.6 e Fig. 14.7 mostrano, rispettivamente, l'analisi del profilometro ottico effettuata sulla superficie liscia e quella ruvida. La scala di colore indica l'altezza [mm] di ogni porzione della superficie. Dai modelli tridimensionali generati dal software Professional 3D, si nota subito che la superficie liscia (Fig. 14.8) presenta dei valori pressoché costanti, mentre la superficie ruvida (Fig. 14.9) mostra un profilo molto variabile, con picchi di minimo pari a zero e picchi massimo pari a circa 1.2 mm.

In accordo alle UNI EN ISO 25178 [112], in Tab. 14-1 sono riportati i risultati ottenuti in termini di altezza massima del picco del profilo S_p , profondità massima della valle del profilo S_v , altezza massima del profilo S_z e rugosità superficiale media S_a .

In particolare, osserviamo la differenza tra l'altezza massima del profilo S_z : il mattone con superficie liscia ha una S_z pari a 0.570 mm, costante per tutto il provino analizzato (Fig. 14.8). Il mattone con superficie ruvida, invece, presenta un'altezza massima del profilo pari a 1.22 mm, evidenziando la presenza di "rumori di misura" o graffi presenti sulla superficie.

La differenza tra valori di rugosità superficiale media S_a della superficie liscia e ruvida, inoltre, permette di comprendere i picchi di massimo e minimo presenti nella superficie. Con l'aumentare di S_a , l'andamento dei picchi si presenta più acuto (Fig. 14.9), mentre con la diminuzione del valore, l'andamento dei picchi è ottuso e costante (Fig. 14.8).

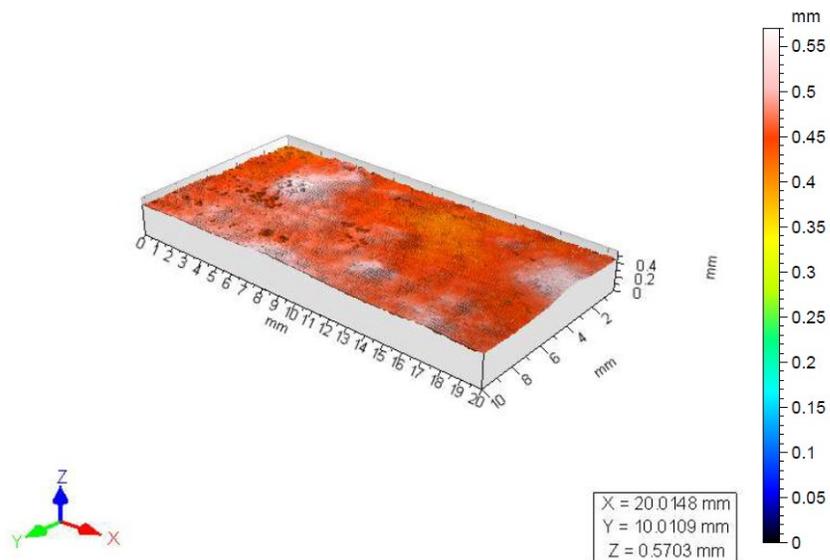


Fig. 14.8 Vista 3D della superficie liscia generata dal software Professional 3D.

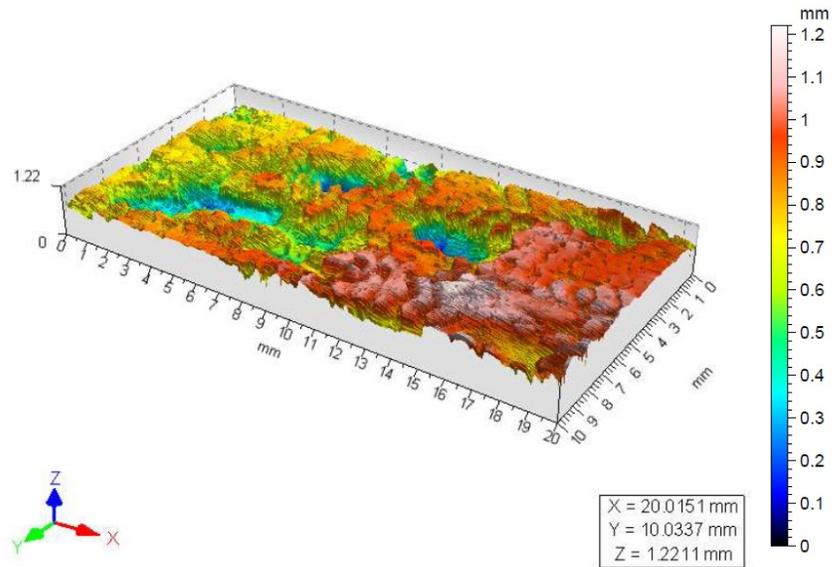


Fig. 14.9 Vista 3D della superficie ruvida generata dal software Professional 3D.

Parametri di rugosità superficiale calcolati secondo le UNI EN ISO 25178-2

Mattone con superficie liscia		
S_p [mm]	0.109	Altezza massima del picco del profilo
S_v [mm]	0.461	Profondità massima della valle del profilo
S_z [mm]	0.570	Altezza massima del profilo
S_a [mm]	0.021	Rugosità superficiale media
Mattone con superficie ruvida		
S_p [mm]	0.451	Altezza massima del picco del profilo
S_v [mm]	0.771	Profondità massima della valle del profilo
S_z [mm]	1.221	Altezza massima del profilo
S_a [mm]	0.163	Rugosità superficiale media

Tab. 14-1 Parametri di rugosità superficiale calcolati secondo le UNI EN ISO 25178-2 [112] del mattone con superficie liscia e del mattone con superficie ruvida.

I grafici rappresentati in Fig. 14.10 e in Fig. 14.11 raffigurano, rispettivamente, i risultati ottenuti dall'analisi del profilometro ottico della superficie liscia e ruvida dei mattoni in laterizio, ricavati dalla mappa del profilo superficiale dei campioni.

In termini di andamento del profilo longitudinale, è interessante osservare che il mattone a superficie ruvida presenta uno spiccato livello di irregolarità lungo la distribuzione superficiale, mentre il grafico del mattone a superficie liscia è definito da una tendenza quasi costante, tranne che per alcuni vuoti anomali presenti in prossimità della parte iniziale del provino.

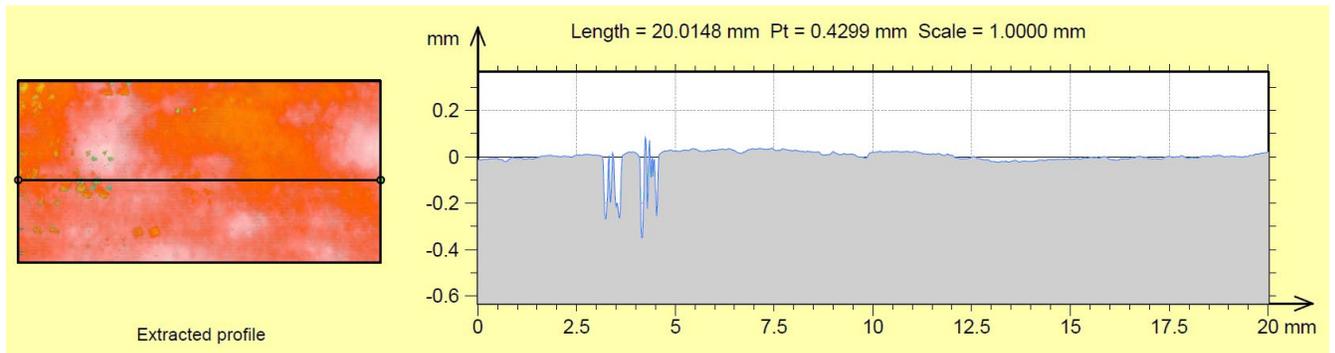


Fig. 14.10 Sezione longitudinale del mattone in laterizio a superficie liscia.



Fig. 14.11 Sezione longitudinale del mattone in laterizio a superficie solida.

Attraverso la ricostruzione ad elevata precisione ottenuta mediante profilometro ottico, è stato possibile raccogliere informazioni sulle dimensioni spaziali e sulla configurazione della struttura interna dei campioni analizzati, in particolare, analizzando la diversa finitura della superficie dei supporti in laterizio utilizzati per il test di pull-off. A questo proposito, in seguito si riportano le tabelle con i valori ottenuti dai test di pull-off sui mattoni in laterizio, in cui vengono indicati i valori di:

- Carico di rottura F_h [N]
- Resistenza di adesione del campione di prova f_h [N/mm²]
- Tipologia di superficie di ciascun supporto in laterizio, indicando con la lettera "R" la superficie ruvida e con la lettera "S" la superficie liscia.

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.1-L (1)	1471.88	0.75	R
Mix.1-L (2)	1550.38	0.79	R
Mix.1-L (3)	1099.00	0.56	R
Mix.1-L (4)	1157.88	0.59	R
Mix.1-L (5)	883.13	0.45	S
Mix.1-L (6)	726.13	0.37	S
Valore medio	1148.06	0.59	
Deviazione standard	321.69	0.16	
Coefficiente di variazione	0.28	0.28	

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.2-L (1)	1256.00	0.64	R
Mix.2-L (2)	549.50	0.28	L
Mix.2-L (3)	1118.63	0.57	R
Mix.2-L (4)	2806.38	1.43	R
Mix.2-L (5)	1491.50	0.76	R
Mix.2-L (6)	1982.13	1.01	R
Valore medio	1534.02	0.78	
Deviazione standard	779.82	0.40	
Coefficiente di variazione	0.51	0.51	

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.3-L (1)	1903.63	0.97	R
Mix.3-L (2)	2001.75	1.02	L
Mix.3-L (3)	2374.63	1.21	R
Mix.3-L (4)	1491.50	0.76	R
Mix.3-L (5)	-	-	-
Mix.3-L (6)	-	-	-
Valore medio	1942.88	0.99	
Deviazione standard	362.93	0.18	
Coefficiente di variazione	0.19	0.19	

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.4-L (1)	1393.38	0.71	R
Mix.4-L (2)	942.00	0.48	L
Mix.4-L (3)	2198.00	1.12	R
Mix.4-L (4)	2472.75	1.26	R
Mix.4-L (5)	2060.63	1.05	R
Mix.4-L (6)	2217.63	1.13	R
Valore medio	1880.73	0.96	
Deviazione standard	585.79	0.30	
Coefficiente di variazione	0.31	0.31	

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.5-L (1)	2080.25	1.06	R
Mix.5-L (2)	178.59	0.09	L
Mix.5-L (3)	2649.38	1.35	R
Mix.5-L (4)	2178.38	1.11	R
Mix.5-L (5)	961.63	0.49	L
Mix.5-L (6)	1000.88	0.51	R
Valore medio	1508.18	0.77	
Deviazione standard	938.37	0.48	
Coefficiente di variazione	0.62	0.62	

Campione	Ph [N]	f_h [N/mm ²]	Tipologia di superficie
Mix.6-L (1)	1216.75	0.62	R
Mix.6-L (2)	1177.50	0.60	R
Mix.6-L (3)	1099.00	0.56	R
Mix.6-L (4)	1393.38	0.71	R
Mix.6-L (5)	1805.50	0.92	R
Mix.6-L (6)	1609.25	0.82	R
Valore medio	1383.56	0.71	
Deviazione standard	275.80	0.14	
Coefficiente di variazione	0.20	0.20	

Tab. 14-2 Risultati dei test di pull-off sui mattoni in laterizio rinforzati dal composito FRLM, con riferimento alla tipologia di rugosità superficiale del supporto

Dai risultati in tabella, si evince che i mattoni in laterizio con superficie liscia hanno presentato valori di tensione di adesione più bassi rispetto a quelli a superficie ruvida, caratterizzati da una rugosità superficiale S_d pari a 0,163 mm, otto volte superiore rispetto a quelli a superficie liscia, pari a 0.21 mm (Tab. 14-1).

Inoltre, tutti i test effettuati su mattoni a superficie liscia hanno riportato valori di tensione di adesione sempre inferiore a 0.50 N/mm², evidenziando come il materiale composito FRLM progettato ha un comportamento migliore quando applicato su materiali a superficie ruvida, come si è osservato con i supporti in tufo, la maggior parte dei quali è stata caratterizzata da una tipologia di tipo a (Fig. 13.9), vale a dire per mancanza di adesione nel substrato rinforzato.

Infine, è possibile confermare che tali considerazioni pongono le basi per la definizione generale di una relazione tra la rugosità della superficie del supporto con la resistenza di adesione del composito applicato, che sembra decrementare quando il supporto da rinforzare è caratterizzato da una superficie liscia.

15. Conclusioni

Il presente lavoro di ricerca si è concentrato sull'esplorazione e lo sviluppo di soluzioni innovative per la riqualificazione integrata sismica ed energetica del patrimonio edilizio in muratura esistente, attraverso l'interazione sinergica dei settori disciplinari dell'ingegneria civile, dell'architettura, dell'ingegneria dei materiali e della tecnologia dell'architettura.

Il quadro metodologico multidisciplinare adottato è stato fondamentale per formulare proposte innovative che rispettino i principi di sostenibilità ambientale ed economica, mirando a contribuire alla conoscenza scientifica nel campo dei materiali compositi e a promuovere soluzioni innovative nel settore del recupero di edifici esistenti in muratura.

La partecipazione a progetti quali MIRACLE (Sistemi di rinforzo a matrice cementizia a basso impatto ambientale per la riduzione della vulnerabilità sismica e l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici storici), PRIN2022 (Unified approach for improving structural and thermal response of masonry buildings with optimized sustainable composite materials—ASThRO-Co) e la collaborazione con il dipartimento di Civil and Architectural Engineering presso l'University of Miami hanno arricchito significativamente il percorso di ricerca, consentendo un approfondimento delle tecnologie innovative e delle metodologie sperimentali, con il contributo di esperti provenienti da diverse aree, lavorando insieme per sviluppare e analizzare nuove soluzioni tecnologiche.

Il principale obiettivo della ricerca è stato quello di progettare una soluzione integrata per riqualificazioni ad alta efficienza energetica e resistenza meccanica, mediante l'utilizzo di materiali green e soluzioni tecnologiche avanzate a basso impatto ambientale. L'approccio adottato ha consentito di individuare un materiale composito innovativo, accoppiato con aggregati provenienti da risorse rinnovabili e smaltibili a fine vita, capace di migliorare le prestazioni igrometriche e la risposta sismica del patrimonio edilizio in muratura.

Il lavoro svolto ha evidenziato l'importanza di un approccio olistico alla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, che tenga conto sia delle esigenze strutturali che energetiche, senza trascurare l'aspetto ambientale e sociale. La ricerca di materiali compositi innovativi e sostenibili, costituiti da matrici inorganiche a base di calce idraulica naturale, additivate con aggregati naturali e rinforzate con fibre di basalto, rappresenta un passo significativo verso la realizzazione di interventi di restauro capaci di coniugare tradizione e innovazione, conservazione e sostenibilità.

La ricerca si articola in tre fasi distinte, ognuna delle quali contribuisce in modo significativo allo sviluppo del nuovo materiale fibrorinforzato FRLM (Fiber Reinforced Lime Matrix) da progettare.

La prima e la seconda parte si concentrano sulle sperimentazioni condotte presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi di Firenze, mentre la terza parte affronta le fasi successive svolte presso lo Structures and

Materials Laboratory dell'University of Miami. Questa divisione geografica ha permesso di esplorare le specificità di ciascun contesto, integrando prospettive diverse e garantendo la coerenza metodologica tra le diverse parti del lavoro di ricerca.

L'adozione di codici normativi internazionali specifici, inoltre, ha contribuito a garantire la validità e la comparabilità dei risultati ottenuti.

Analisi e risultati della prima fase di ricerca

La fase iniziale della ricerca si concentra sulla valutazione delle proprietà igrometriche e meccaniche dei materiali costituenti il materiale composito FRLM da progettare.

Il primo passo è stato quello di identificare un'ampia selezione di intonaci termici presenti sul mercato internazionale, idonei a soddisfare determinati requisiti prestazionali e normativi per la creazione della matrice dei compositi FRLM, selezionandoli in base a specifici valori riportati dalla scheda tecnica dei produttori. Questo processo è stato articolato in step distinti, mirati a garantire una selezione accurata e obiettiva dei materiali più adatti, nello specifico:

- Identificazione degli intonaci termici commerciali aventi come legante naturale la calce idraulica naturale NHL.
- Prodotti con proprietà di resistenza a compressione, conducibilità termica e capillarità conformi alla UNI EN 998-1:2016 [31].
- Valutazione dell'intervallo granulometrico delle miscele [47] e specifiche di qualità, come classe di resistenza al fuoco [48], spessori massimi e minimi di applicazione, contenuto di materiale naturale, riciclato o riciclabile [46].

Su più di un centinaio di prodotti esaminati, soltanto undici hanno soddisfatto tutte le proprietà analizzate durante la fase decisionale, identificati con i codici alfanumerici INT.01-INT.11.

Mediante le simulazioni termoigrometriche dinamiche condotte con il software WUFI Pro® 6.0, conformemente alle normative UNI EN 15026:2023 [72] e UNI CEN ISO/TR 52016-2:2018 016 [73], è stato analizzato l'impatto delle undici tipologie di intonaci termici su tre diverse soluzioni di chiusura verticale in muratura, considerate in tre contesti climatici distinti: Milano, Firenze e Palermo. Attraverso un'analisi dettagliata dei parametri chiave come conducibilità termica, permeabilità al vapore e risposte igrometriche, questo studio ha fornito informazioni utili per la selezione ottimale delle soluzioni tecniche da adottare. Tra le diverse soluzioni considerate, su tutte le tipologie di muratura analizzate e in tutti i contesti geografici, è emerso che l'intonaco termico

INT.06 ha mostrato le migliori prestazioni dal punto di vista igrometrico, seguito da INT.01 e INT.05.

Gli undici intonaci termici sono stati poi sottoposti a prove di resistenza a flessione e compressione, secondo le specifiche della normativa UNI EN 1015-11 [61]. In termini di resistenza a compressione, gli intonaci che hanno presentato le migliori performance sono INT.01, INT.06 e INT.10, evidenziando valori medi di resistenza alla compressione superiori a quanto indicato dalle specifiche tecniche, rispettivamente 2.41 N/mm², 2.49 N/mm² e 1.86 N/mm².

Successivamente, la rete in fibra di basalto, che consiste nel rinforzo del composito FRLM, è stata sottoposta a prove di trazione diretta, in accordo con la normativa ASTM D3039/D3039M [74]. Le prove sono state effettuate su quattro tipologie di campione differenti, nello specifico costituiti da uno, due, tre e quattro multi-filamenti longitudinali, registrando una tensione di trazione media pari a 815.40 N/mm², valore molto prossimo a quanto riportato dalla scheda tecnica del produttore.

Analisi e risultati della seconda fase di ricerca

La seconda fase si focalizza sull'analisi delle proprietà meccaniche del materiale fibrorinforzato FRLM, con particolare attenzione a:

- Resistenza a trazione [N/mm²] del composito FRLM, valutata mediante prove di trazione diretta [74].
- Resistenza di adesione a taglio [N/mm²] del composito applicato su supporto in laterizio, valutata mediante prove di adesione single shear test.
- Tensione tangenziale [N/mm²], ottenuta dalle prove di compressione diagonale di pannelli rinforzati con il composito FRLM [75].

Per la valutazione della resistenza a trazione del materiale composito, sono state eseguite prove di trazione diretta su un totale di diciotto provini, in particolare sei coupon con INT.01, sei coupon con INT.05 e sei coupon con INT.06, rinforzati con la rete in fibra di basalto. La scelta di questi tre intonaci è dovuta ai risultati ottenuti nella prima fase del lavoro. In particolare, INT.05, nonostante abbia presentato valori di resistenza a compressione inferiori ai limiti imposti, è un prodotto che contiene all'interno della miscela il sughero in granuli, materiale che, se additivato a malte NHL, presenta ottimi risultati in termini di miglioramento delle proprietà termiche e delle capacità igrometriche in generale, senza ridurre drasticamente i valori di resistenza meccanica [113], [114], [115], [116].

Dai risultati ottenuti dalle prove di trazione diretta, si è osservata la compatibilità degli esiti delle prove effettuate sui compositi FRLM realizzati con le matrici INT01 e INT05

in cui la tensione massima e la deformazione corrispondente assumono valori di poco differenti, nello specifico 338 N/mm² e 332 N/mm². Contrariamente, il comportamento stress-strain registrato durante la fase di carico costante, ha presentato valori molto maggiori per il primo composito rispetto al composito realizzato con INT.05. Il fibrorinforzato realizzato con la matrice INT06, invece, ha mostrato capacità di raggiungere carichi maggiori sia in fase di picco che in fase di mantenimento del carico, con una resistenza media alla trazione pari a 387 N/mm².

Successivamente, sono state effettuate le prove di adesione a taglio (single shear test) del materiale FRCM su supporti in laterizio. Tali prove consentono di valutare l'efficacia dell'adesione tra il materiale di rinforzo e la superficie della muratura, proprietà fondamentale per garantire che il composito FRLM possa trasferire efficacemente gli sforzi di trazione alla muratura esistente e migliorarne resistenza e durabilità complessive.

Le prove di single shear test sono state effettuate su tre provini per tutti i tre compositi sottoposti a test di trazione diretta, caratterizzati da due lunghezze di ancoraggio differenti, rispettivamente pari a 100 mm e 220 mm.

I provini realizzati con INT.05 hanno presentato un comportamento fragile in termini di comparsa delle lesioni, caratterizzati da risultati in termini di tensione di adesione a taglio non compatibili con quelli raggiunti da INT.01 e INT.06, caratterizzati da valori medi di tensione massima pari a, rispettivamente, 209 N/mm² e 238 N/mm². Inoltre, durante il test, il provino rinforzato con il composito con matrice INT.06, ha mostrato una maggiore coerenza nei risultati e una minore tendenza a cedimenti o distacchi rispetto agli altri due campioni.

Di seguito sono state effettuate prove di single shear test su provini costituiti da colonnine in mattoni di laterizio con giunti di malta, rinforzati con i compositi realizzati con INT.01 e INT.06, registrando un valore di tensione di adesione quasi uguale, pari a circa 670 N/mm², più di tre volte superiore rispetto a quelli ottenute dalle prove di single shear test sui singoli elementi in laterizio rinforzati.

Successivamente, si è proceduto con le prove di compressione diagonale, in accordo alle ASTM E519/E519M – 22 [75], eseguite su sette pannelli in muratura di dimensione 445 x 445 x 120 mm³, costituiti da un pannello non rinforzato, tre pannelli rinforzati con INT.06 da un solo lato e tre pannelli con rinforzo applicato su entrambi i lati. La scelta di utilizzare INT.06 è dipesa dalla sua eccellente performance igrometrica, come dimostrato dalle simulazioni termoigrometriche dinamiche e dalla sua migliore resistenza meccanica e di adesione a taglio riscontrata nelle prove precedenti.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle prove di compressione diagonale, emerge un significativo aumento della resistenza di picco in relazione alla quantità di rinforzo applicato. Il pannello murario non rinforzato ha evidenziato una tensione tangenziale massima di 0.57 N/mm², mostrando un comportamento fragile sia in trazione che in compressione. Nei provini rinforzati su un solo lato, la tensione massima aumenta, raggiungendo circa 0.85 N/mm² per due pannelli, mentre un provino registra una tensione di picco di 1.26 N/mm². Le prove eseguite sui pannelli rinforzati su entrambi i

lati hanno riportato risultati nettamente superiori, con valori di 1.64 N/mm² per un pannello e 1.46 N/mm² per gli altri due. Gli andamenti delle curve stress-strain sono simili sia in trazione che in compressione, evidenziando un comportamento bilanciato grazie al rinforzo presente su entrambe le facce dei pannelli.

In definitiva, l'introduzione del rinforzo FRLM ha mostrato un effetto positivo sulla muratura, come evidenziato dai risultati delle prove di compressione diagonale. L'aumento della resistenza di picco nei pannelli rinforzati, rispetto a quelli non rinforzati, indica un miglioramento significativo delle prestazioni strutturali. In particolare, i pannelli rinforzati su entrambi i lati hanno registrato i valori più elevati di resistenza, suggerendo che la presenza del rinforzo su entrambe le facce abbia contribuito a distribuire uniformemente gli sforzi attraverso la struttura.

Analisi e risultati della terza fase di ricerca

La terza parte della ricerca, svolta presso l'University of Miami, si concentra sullo studio del mix design per la creazione di una matrice ideale per il materiale composito FRLM destinato al rinforzo degli edifici in muratura esistenti. Questo lavoro è stato guidato da un processo sistematico di ricerca, test in laboratorio e procedure di prova mirate ad analizzare e ottimizzare le proprietà del materiale, fornendo una chiara comprensione delle proprietà e del comportamento delle miscele sviluppate.

Inizialmente, è stato selezionato un intonaco termico già esistente sul mercato internazionale, indicato come INT.GFA, il quale, se rinforzato con fibre di basalto, presenta ottime caratteristiche meccaniche e di adesione quando applicato su pareti in muratura.

Successivamente, si è proceduto con la selezione di un aggregato naturale, sostenibile, riciclato e riciclabile da aggiungere a INT.GFA al fine di migliorarne le proprietà igrometriche e di isolamento termico: il sughero in granuli è emerso come il miglior aggregato per ottimizzare le proprietà termiche della miscela.

Dopo la definizione del tipo di aggregato da utilizzare, è stata condotta un'analisi della granulometria della miscela, con particolare attenzione alla curva granulometrica definita dalle normative ASTM C144-18 [47], fase fondamentale per verificare la fattibilità del progetto e garantire la coerenza dei risultati.

In seguito, sono state sviluppate sei diverse miscele, caratterizzate da diverse percentuali di sughero aggiunto a INT.GFA, al fine di valutarne le proprietà igrometriche e la lavorabilità. Tutte le miscele sono state sottoposte a rigorose analisi e test, tra cui "flow test" [111] per valutare la lavorabilità, prove di assorbimento d'acqua per capillarità [67], [68] e prove di resistenza a compressione [62].

Infine, sono stati condotti test di adesione pull-off [135] per valutare la resistenza dell'adesione tra il fibrorinforzato FRLM e il supporto in muratura su cui è stato applicato il composito. I risultati hanno evidenziato un comportamento differenziato a seconda del tipo di superficie di supporto, con un'adesione più critica sui mattoni in laterizio

rispetto ai mattoni in tufo. Inoltre, è importante notare che i mattoni in laterizio erano composti da due tipologie di superfici differenti, il che ha generato una significativa variazione nei risultati delle prove di adesione. Tale osservazione è stata supportata dalle misurazioni di rugosità superficiale effettuate tramite un profilometro ottico [138], che hanno evidenziato una maggiore rugosità superficiale nei mattoni con adesione migliore. Inoltre, è emerso che il materiale composito ha ottenuto migliori risultati di adesione su superfici più ruvide, come nel caso dei supporti in tufo, rispetto a quelli a superficie liscia. Queste conclusioni suggeriscono l'importanza della rugosità della superficie del supporto nella determinazione della resistenza di adesione del materiale composito.

Prospettiva futura della ricerca e approfondimenti successivi

Ulteriori analisi potrebbero contribuire a consolidare e ampliare le conoscenze acquisite dalla ricerca, fornendo una base solida per l'implementazione pratica delle soluzioni proposte nel settore della riqualificazione integrata sismica ed energetica del patrimonio edilizio in muratura.

Una possibile direzione di studio potrebbe includere la misurazione della conducibilità termica delle matrici utilizzate nel materiale composito, sia quelle analizzate nella prima parte, sia quella sviluppata. Questo consentirebbe di valutare l'efficacia dell'isolamento termico offerto dal nuovo materiale composito e di confrontarlo con le soluzioni esistenti sul mercato.

Inoltre, sarebbe opportuno ripetere le prove meccaniche di resistenza utilizzando la nuova matrice sviluppata, al fine di confermare l'efficacia del materiale composito FRLM quanto applicato su muratura. Questo potrebbe includere prove di trazione, prove di adesione shear test e compressione diagonale, garantendo che il nuovo materiale soddisfi i requisiti prestazionali richiesti per le applicazioni strutturali.

Considerando la diversità dei materiali di supporto presenti nelle strutture in muratura esistenti, sarebbe vantaggioso condurre prove diagonali a compressione su muretti in tufo rinforzati con il nuovo materiale composito, consentendo di valutare le prestazioni del materiale in contesti realistici e diversificati, fornendo una comprensione più completa della sua idoneità per applicazioni pratiche.

Ulteriori ricerche potrebbero anche concentrarsi sull'analisi dell'invecchiamento e della durabilità del materiale composito nel tempo, esaminando il suo comportamento sotto l'esposizione agli agenti atmosferici e le variazioni ambientali. Tale pratica potrebbe aiutare a identificare eventuali degradi nel tempo e a sviluppare strategie per migliorare la durabilità e la resistenza nel lungo termine.

Infine, un'analisi del ciclo di vita del nuovo materiale composito potrebbe essere condotta per valutare l'impatto ambientale complessivo delle soluzioni proposte, con relative valutazioni delle emissioni di gas serra, dell'uso delle risorse e dell'impatto

sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita del materiale, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, all'installazione, all'uso e allo smaltimento.

L'integrazione di queste ulteriori analisi nella ricerca potrebbe contribuire a consolidare e ampliare le conoscenze acquisite, fornendo una base solida per l'implementazione pratica delle soluzioni proposte nel settore della riqualificazione integrata sismica ed energetica del patrimonio edilizio in muratura.

Possibili sviluppi futuri

Attraverso l'analisi approfondita dei processi sperimentali e dei risultati ottenuti, è emersa una visione chiara delle potenzialità e delle limitazioni delle soluzioni proposte.

La discussione critica dei risultati ha fornito una comprensione approfondita delle prestazioni dei materiali e delle tecniche analizzate, contribuendo a delineare le prospettive future di ricerca nel campo della riqualificazione integrata del patrimonio edilizio in muratura esistente, offrendo spunti innovativi e prospettive di sviluppo per la realizzazione di interventi sostenibili.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, potrebbero essere esplorati approcci innovativi nella progettazione e nell'applicazione dei materiali compositi per la riqualificazione degli edifici in muratura esistente. Un'area di ricerca promettente potrebbe concentrarsi sull'integrazione di tecnologie avanzate, come l'intelligenza artificiale e il machine learning, per ottimizzare il processo decisionale nel selezionare i materiali e progettare soluzioni su misura per specifici contesti edilizi.

Un altro ambito di ricerca cruciale potrebbe riguardare l'approfondimento dell'integrazione di tecnologie emergenti, come la stampa 3D e i materiali biocompatibili, per la realizzazione di componenti strutturali altamente personalizzati e adattabili alle specifiche esigenze degli edifici storici. Questa innovazione potrebbe consentire interventi di restauro altamente mirati e minimamente invasivi, preservando al massimo l'autenticità e l'integrità degli edifici storici.

Inoltre, l'applicazione di sensori intelligenti e sistemi di monitoraggio avanzati potrebbe rivoluzionare il modo in cui vengono valutate le condizioni strutturali e igrometriche degli edifici storici, al fine di una gestione ottimizzata dei processi di manutenzione e intervento.

L'analisi del ciclo di vita dei materiali e delle soluzioni proposte potrebbe diventare un elemento chiave nella valutazione dell'impatto ambientale complessivo delle operazioni di riqualificazione.

Inoltre, sarebbe importante promuovere una maggiore collaborazione interdisciplinare tra professionisti dell'edilizia, ricercatori e stakeholder del settore al fine di favorire lo sviluppo e l'adozione di soluzioni innovative e sostenibili per il miglioramento del patrimonio edilizio esistente.

L'istituzione di reti di collaborazione internazionale e piattaforme di scambio di conoscenze potrebbe favorire lo scambio di esperienze e migliori pratiche tra esperti del settore provenienti da diverse parti del mondo. Tale sinergia potrebbe accelerare l'innovazione e promuovere una maggiore standardizzazione delle pratiche nel settore della riqualificazione del patrimonio edilizio storico, contribuendo così a preservare e valorizzare il ricco tessuto culturale delle nostre città e comunità.

Infine, la promozione di una maggiore educazione e consapevolezza pubblica sull'importanza della conservazione del patrimonio edilizio esistente potrebbe essere un elemento chiave per il successo di futuri progetti di riqualificazione integrata. Campagne di sensibilizzazione e programmi educativi potrebbero coinvolgere attivamente la comunità locale nel processo decisionale e incentivare un maggiore sostegno e partecipazione alla conservazione del patrimonio culturale.

Publicazioni e disseminazioni relative alla Tesi di Dottorato

Durante il percorso di ricerca dottorale, sono state condotte attività accademiche e di disseminazione a livello nazionale e internazionale, con l'obiettivo di diffondere i risultati ottenuti e contribuire all'avanzamento della conoscenza nel settore di studio. Tali attività di disseminazione, insieme alle pubblicazioni menzionate e ai prossimi lavori, costituiscono un contributo significativo al progresso della ricerca nel campo di studio e testimoniano il costante impegno nella condivisione e nell'avanzamento della conoscenza accademica.

Di seguito sono elencati i lavori pubblicati, oltre alle partecipazioni ai congressi e altre iniziative di diffusione pertinenti.

Publicazioni

- Pugliese, D.; Alecci, V.; Romano, R.; Stipo, G.; De Stefano, M.; Nanni, A. Innovative and Sustainable Composite Material for the Seismic and Energetic Upgrade of Historic Masonry Buildings. *Fibers* 2023, 11, 76. <https://doi.org/10.3390/fib11090076>.
- Pugliese D.; Alecci V.; Galassi S.; Marra A.M.; De Stefano M. Seismic and energetic renovation of existing masonry buildings by innovative FRLM composite materials. PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIFE-CYCLE CIVIL ENGINEERING (IALCCE 2023), 2-6 JULY 2023, POLITECNICO DI MILANO, MILAN, ITALY - Life-Cycle of Structures and

Infrastructure Systems - Biondini & Frangopol (Eds) Jun 27, 2023.<https://doi.org/10.1201/9781003323020>.

- Alecci V.; De Stefano M.; Galassi S.; Luciano R.; Pugliese D.; Stipo G. Influence of Different Mortar Matrices on the Effectiveness of FRCM Composites for Confining Masonry Columns. *Journal of Testing and Evaluation* 2022, 52, 2. 10.<https://doi.org/10.1520/JTE20220323>.
- Alecci V.; De Stefano M.; Galassi S.; Marra A.M.; Pugliese D. Seismic and energetic historical buildings renovation by innovative fiber reinforced composite materials, *The New Boundaries of Structural Concrete 2022 | ACI Italy Chapter | IMREADY Srl* Sep 9, 2022. ISBN: 9788898720231.
- Alecci, V.; De Stefano, M.; Marra, A.M.; Pittau, F.; Pugliese, D.; Romano, R.; Stipo, G. A New Compatible and Sustainable FRLM Composite for the Seismic and Energetic Upgrade of Historic Buildings. In *Proceedings of the NMP 2022: New Metropolitan Perspectives, Reggio Calabria, Italy, 24-26 May 2022*. ISBN 978-303106824-9.
- Pugliese D.; De Stefano M.; Alecci. V; Romano. R.; Marra A. M.; Stipo G.; Donato A.; Pittau F. A new compatible and sustainable composite material for the seismic and energetic upgrade of the existing masonry building heritage, 2002, *Compositi Magazine*, <https://www.compositimagazine.it/wp-content/uploads/2022/07/Dispensa-progetti-Concorso-Assocompositi-2022.pdf>.
- Romano. R.; Alecci. V.; Donato. A.; Palumbo E.; Pisciotta C.; Pugliese D.; Marra A. M.; Stipo G. INNOVATIVE AND ECO-COMPATIBLE MATERIALS FOR THE REGENERATION OF THE HISTORICAL BUILDINGS LOCATED IN THE MED AREA, *CEES 2021 - International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability, Coimbra, Portugal, Itecons, Oct 14, 2021*, <https://flore.unifi.it/retrieve/handle/2158/1245219/615198/ID73.pdf>.

Partecipazioni ai Congressi

- Presentazione orale alla Conferenza "The New Boundaries of Structural Concrete 2022- ACI Italy Chapter", Lecce, 2022.
- Presentazione orale alla Conferenza "New Metropolitan Perspective International Symposium 5th edition", Reggio Calabria, 2022.
- Presentazione orale al "Assemblea dei soci Assocompositi", Milano, 2022.
- Presentazione orale alla Conferenza "Documento Monumento DIDA Research WEEK 2021", Department of Architecture DIDA, Firenze, 2021.
- Presentazione orale alla Conferenza "International Conference on Construction, Energy, Environment and Sustainability Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção", Coimbra, Portugal, 2021.
- Poster presentation al Congresso "14NAMC | 14th North American Masonry Conference", Omaha, NE, USA, 2023.
- Poster presentation al Congresso "ACI Concrete Convention", Boston, MA, USA, 2023.

Premi e riconoscimenti

- 1° premio idee per nuove applicazioni ASSOCOMPOSITI 2022 con il progetto intitolato "Progettazione di un materiale composito ecosostenibile per la riduzione della vulnerabilità sismica e la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio storico in muratura" ", Milano, 2022.

16. Bibliografia

- [1] A. de Falco, L. Giresini, and M. Sassu, "Temporary preventive seismic reinforcements on historic churches: Numerical modeling of san frediano in pisa," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 1393–1396. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.1393.
- [2] V. Alecci, A. G. Ayala, M. De Stefano, A. M. Marra, R. Nudo, and G. Stipo, "Influence of the masonry wall thickness on the outcomes of double flat-jack test: Experimental and numerical investigation," *Constr Build Mater*, vol. 285, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122912.
- [3] F. V Karantoni, F. Lyrantzaki, M. N. Fardis, F. Karantoni, F. Lyrantzaki, and G. Tsionis, "Seismic Fragility Functions of Stone Masonry Buildings," 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/284448129>
- [4] G. Litti, S. Khoshdel, A. Audenaert, and J. Braet, "Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings," *Energy Build*, vol. 105, pp. 393–411, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.049.
- [5] D. A. Pohoryles, D. A. Bournas, F. Da Porto, A. Caprino, G. Santarsiero, and T. Triantafyllou, "Integrated seismic and energy retrofitting of existing buildings: A state-of-the-art review," *Journal of Building Engineering*, vol. 61. Elsevier Ltd, Dec. 01, 2022. doi: 10.1016/j.job.2022.105274.
- [6] F. Mistretta, F. Stochino, and M. Sassu, "Structural and thermal retrofitting of masonry walls: An integrated cost-analysis approach for the Italian context," *Build Environ*, vol. 155, no. March, pp. 127–136, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.033.
- [7] B. Manganelli, M. Mastroberti, and M. Vona, "Evaluation of Benefits for Integrated Seismic and Energy Retrofitting for the Existing Buildings," C. (eds) *New Metropolitan Perspectives. ISHT 2018. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer*, vol. 101, 2018.
- [8] D. Foti, F. Ruggiero, M. F. Sabbà, and M. Lerna, "A dissipating frames for seismic retrofitting and building energy-efficiency," *Infrastructures (Basel)*, vol. 5, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES5090074.
- [9] D. A. Bournas, "Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept," *Compos B Eng*, vol. 148, pp. 166–179, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.04.002.
- [10] L. Estevan, F. J. Baeza, D. Bru, and S. Ivorra, "Stone masonry confinement with FRP and FRCM composites," *Constr Build Mater*, vol. 237, p. 117612, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117612.
- [11] J. Donnini, F. De Caso y Basalo, V. Corinaldesi, G. Lancioni, and A. Nanni, "Fabric-reinforced cementitious matrix behavior at high-temperature: Experimental and numerical results," *Compos B Eng*, vol. 108, pp. 108–121, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.10.004.

- [12] K. Al-Lami, T. D'Antino, and P. Colombi, "Study of the Bond Capacity of FRCM- and SRG-Masonry Joints," *CivilEng*, vol. 2, no. 1, pp. 68–86, Mar. 2021, doi: 10.3390/civileng2010005.
- [13] J. Donnini, S. Spagnuolo, and V. Corinaldesi, "A comparison between the use of FRP, FRCM and HPM for concrete confinement," *Compos B Eng*, vol. 160, pp. 586–594, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.111.
- [14] A. Cascardi, F. Micelli, and M. A. Aiello, "FRCM-confined masonry columns: experimental investigation on the effect of the inorganic matrix properties," *Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 811–825, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.020.
- [15] A. Prota, G. Marcari, G. Fabbrocino, G. Manfredi, and C. Aldea, "Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix-Grid Composites," 2006, doi: 10.1061/ASCE1090-0268200610:3223.
- [16] L. Ascione, G. Mancusi, and A. D'Aponte, "Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM): A new Italian guideline under development," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2015, pp. 3–10. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.624.3.
- [17] ACI 549.6R-20, "Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures," *ACI Committee 549*, 2020.
- [18] CNR-DT 215/2018 Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, "NATIONAL RESEARCH COUNCIL ADVISORY COMMITTEE ON TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR CONSTRUCTION Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix Systems for Strengthening Existing Structures," 2020.
- [19] V. Alecci, M. De Stefano, S. Galassi, R. Luciano, D. Pugliese, and G. Stipo, "Influence of Different Mortar Matrices on the Effectiveness of FRCM Composites for Confining Masonry Columns," *J Test Eval*, vol. 51, no. 2, Nov. 2022, doi: 10.1520/JTE20220323.
- [20] C. D'Ambra, G. P. Lignola, and A. Prota, "Simple method to evaluate FRCM strengthening effects on in-plane shear capacity of masonry walls," *Constr Build Mater*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121125.
- [21] C. D'Ambra, G. P. Lignola, and A. Prota, "Simple method to evaluate FRCM strengthening effects on in-plane shear capacity of masonry walls," *Constr Build Mater*, vol. 268, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121125.
- [22] M. Harajli; H. Elkhatib, and J. T. San-Jose, "Static and Cyclic Out-of-Plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System," *ASCE Library*, 2010, doi: 10.1061/ASCEMT.1943-5533.0000128.
- [23] P. Meriggi, G. de Felice, and S. De Santis, "Design of the out-of-plane strengthening of masonry walls with fabric reinforced cementitious matrix composites," *Constr Build Mater*, vol. 240, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117946.

- [24] G. Ferrara, B. Coppola, L. Di Maio, L. Incarnato, and E. Martinelli, "Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: experimental tests under different environmental exposures," *Compos B Eng*, vol. 168, pp. 511–523, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.062.
- [25] G. Giacomini, "Materiali di rinforzo innovativi nella ricostruzione post-sismica delle murature aquilane," 2015. [Online]. Available: www.davinson.it
- [26] V. Alecci, M. De Stefano, F. Focacci, R. Luciano, L. Rovero, and G. Stipo, "Strengthening masonry arches with lime-based mortar composite," *Buildings*, vol. 7, no. 2, pp. 1–11, 2017, doi: 10.3390/buildings7020049.
- [27] G. Mantegazza, "RETROFITTING CONCRETE AND MASONRY BUILDING: FRCM (FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX) A NEW EMERGING TECHNOLOGY," *in proceedings*, 2006, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210876190>
- [28] ICOMOS, "Principles for the Preservation and Conservation/Restoration of Wall Paintings ICOMOS PRINCIPLES FOR THE PRESERVATION AND CONSERVATION/RESTORATION OF WALL PAINTINGS Introduction and Definition," 2003.
- [29] R. Demirboğa, "Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar," *Energy Build*, vol. 35, no. 2, pp. 189–192, 2003, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00052-X.
- [30] O. Hurtado-Figueroa, E. J. Vega-Vanegas, and J. A. Cárdenas-Gutiérrez, "Mechanical strength of experimental mortars for plastering with partial addition of fly ash and hydrated lime," *J Phys Conf Ser*, vol. 1386, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012071.
- [31] UNI EN 998-1:2016, "Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni," 2016.
- [32] M. Pavlíková *et al.*, "Mechanical and hygric properties of lime plasters modified by biomass fly ash," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 379, no. 1, pp. 967–972, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.07.002.
- [33] M. Pavlíková, R. Pernicová, and Z. Pavlík, "Thermophysical properties of hydrophobised lime plaster - Experimental analysis of moisture effect," *AIP Conf Proc*, vol. 1752, 2016, doi: 10.1063/1.4955253.
- [34] R. Černý, A. Kunca, V. Tydlitát, J. Drchalová, and P. Rovnaníková, "Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters," *Constr Build Mater*, vol. 20, no. 10, pp. 849–857, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.07.002.
- [35] M. Čáchová, D. Koňáková, E. Vejmelková, M. Vyšvařil, and P. Bayer, "Hygric and mechanical parameters of ternary binder based plasters lightweighted by expanded perlite," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 379, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/379/1/012004.
- [36] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra, and M. Dutto, "Development of vegetal based thermal plasters with low environmental impact: Optimization process through an integrated approach," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Nov. 2015, pp. 967–972. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.034.

- [37] J. Fořt, M. Čáchová, E. Vejmelková, and R. Černý, "Mechanical and hygric properties of lime plasters modified by biomass fly ash," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 365, no. 3, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/365/3/032059.
- [38] L. Napolano, C. Menna, D. Asprone, A. Prota, and G. Manfredi, "LCA-based study on structural retrofit options for masonry buildings," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, no. 1, pp. 23–35, Jan. 2015, doi: 10.1007/s11367-014-0807-1.
- [39] G. Savoja, "Experimentation of composites materials reinforced with vegetable fibres for the construction sector," *TECHNE*, vol. 16, pp. 317–324, 2018, doi: 10.13128/Techne-22986.
- [40] EUROPEAN COMMISSION, "A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy," *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK*, 2018.
- [41] EUROPEAN COMMISSION, "A new Circular Economy Action Plan," *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*, [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>
- [42] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, "Aggregati leggeri. EN 13055-3: 2016," 2016.
- [43] M. Monaco, M. Aurilio, A. Tafuro, and M. Guadagnuolo, "Sustainable mortars for application in the cultural heritage field," *Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1–17, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14030598.
- [44] D. Pugliese *et al.*, "A new compatible and sustainable composite material for the seismic and energetic upgrade of the existing masonry building heritage," *Compositi Magazine*, 2022.
- [45] D. Pugliese, V. Alecci, S. Galassi, A. M. Marra, and M. De Stefano, "Seismic and energetic renovation of existing masonry buildings by innovative FRLM composite materials," in *PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIFE-CYCLE CIVIL ENGINEERING (IALCCE 2023)*, Biondini & Frangopol (Eds), Ed., Milan, 2023.
- [46] UNI EN ISO 14021:2021, "Etichette e dichiarazioni ambientali - Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II)," 2021.
- [47] ASTM C144 – 18, "Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar," 2018, doi: 10.1520/C0144-18.
- [48] UNI EN 13501-1:2019, "Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco," 2019.
- [49] UNI EN 459-1:2015, "Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità," 2015.

- [50] D. V. Bompá and A. Y. Elghazouli, "Mechanical properties of hydraulic lime mortars and fired clay bricks subjected to dry-wet cycles," *Constr Build Mater*, vol. 303, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124458.
- [51] M. Angiolilli, A. Gregori, M. Pathirage, and G. Cusatis, "Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) for strengthening historical stone masonry structures: Experiments and computations," *Eng Struct*, vol. 224, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111102.
- [52] D. Barnat-Hunek, P. Smarzewski, and S. Fic, "MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF HEMP-LIME COMPOSITES," 2015.
- [53] H. A. S. Aljewifi and A. Mohamed, "Experimental Study on Addition Palm Date Fibers as Reinforcement in Gypsum Mortar," *Albahit journal of applied sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 31–37, 2021.
- [54] A. Jerónimo, C. Soares, B. Aguiar, and N. Lima, "Hydraulic lime mortars incorporating micro cork granules with antifungal properties," *Constr Build Mater*, vol. 255, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119368.
- [55] S. Sair, B. Mandili, M. Taqi, and A. El Bouari, "Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation," *Composites Communications*, vol. 16, pp. 20–24, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.coco.2019.08.010.
- [56] M. Martins, L. Nunes, and F. Branco, "Plastering and Rendering Mortars Incorporating Regranulated of Expanded Cork to Improve Durability."
- [57] R. M. Novais, L. Senff, J. Carvalheiras, A. M. Lacasta, I. R. Cantalapiedra, and J. A. Labrincha, "Simple and effective route to tailor the thermal, acoustic and hygrothermal properties of cork-containing waste derived inorganic polymer composites," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102501.
- [58] A. Moreira, J. António, and A. Tadeu, "Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization," *Cem Concr Compos*, vol. 49, pp. 1–8, May 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012.
- [59] T. Ramos, A. M. Matos, and J. Sousa-Coutinho, "Strength and durability of mortar using cork waste ash as cement replacement," *Materials Research*, vol. 17, no. 4, pp. 893–907, Jul. 2014, doi: 10.1590/S1516-14392014005000092.
- [60] D. Barnat-Hunek, M. K. Widomski, M. Szafraniec, and G. Łagód, "Impact of different binders on the roughness, adhesion strength, and other properties of mortars with expanded cork," *Materials*, vol. 11, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/ma11030364.
- [61] UNI EN 1015-11:2019, "Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar," 2019.
- [62] ASTM C109/C109M-21, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens) 1," 2021, doi: 10.1520/C0109_C0109M-21.
- [63] S. Columbu, M. Usai, C. Rispoli, and D. Fancello, "Lime and Cement Plasters from 20th Century Buildings: Raw Materials and Relations between Mineralogical–

- Petrographic Characteristics and Chemical–Physical Compatibility with the Limestone Substrate,” *Minerals*, vol. 12, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/min12020226.
- [64] UNI EN 998-1:2016, “Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar,” 2016.
- [65] UNI EN 1015-10:2007, “Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 10: Determinazione della massa volumica apparente della malta indurita essiccata” 2017.
- [66] R. M. Novais *et al.*, “Multifunctional cork – alkali-activated fly ash composites: A sustainable material to enhance buildings’ energy and acoustic performance,” *Energy Build*, vol. 210, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109739.
- [67] ASTM C1403 – 22a, “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars,” 2022, doi: 10.1520/C1403-22A.
- [68] UNI EN 1015-18:2004, “Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità della malta indurita” 2004.
- [69] ASTM D7928 – 21, “Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis,” 2021, doi: 10.1520/D7928-21E01.
- [70] ASTM D6913/D6913M – 17, “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis,” 2017, doi: 10.1520/D6913_D6913M-17.
- [71] UNI EN 1015-19, “Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 19: Determinazione della permeabilità al vapore d’acqua delle malte da intonaco indurite,” 2008.
- [72] UNI EN 15026:2023, “Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation,” 2008.
- [73] UNI CEN ISO/TR 52016-2:2018, “Prestazioni energetiche degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 2: Spiegazione e giustificazione della ISO 52016-1 e della ISO 52017-1,” 2018.
- [74] ASTM D3039/D3039M, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” 2017, doi: 10.1520/D3039_D3039M-17.
- [75] ASTM E519/E519M – 22, “Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages” 2022.
- [76] DIN EN 15026:2007-07, “Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation; German version EN 15026:2007,” 2007.
- [77] DIN 4108-3:2018-10, “Thermal protection and energy economy in buildings - Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions - Requirements, calculation methods and directions for planning and construction,” 2018.
- [78] UNI/TR 11552:2014, “Opaque envelope components of buildings - Thermo-physical parameters,” 2014.
- [79] UNI EN ISO 6946:2018, “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo,” 2018.

- [80] UNI EN ISO 13788:2013, "Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo," 2013.
- [81] "WUFI ® Pro 6 Manual WUFI ® Pro 6 Manual 2 PREAMBLE WUFI ® Pro 6 Manual 3 Content," 2019. [Online]. Available: <https://wufi.de/en/service/downloads/>
- [82] V. Cascione, P. Stefanazzi, E. Marra, and D. Zirkelbach, "Valutazione igrotermica di soluzioni tecniche d'isolamento dell'involucro edilizio per il recupero energetico in Italia per mezzo di simulazioni dinamiche," 2015.
- [83] C. Pisciotta, R. Romano, and A. Donato, "Valutazione delle proprietà termoigrometriche di intonaci di ultima generazione mediante simulazioni dinamiche per la riqualificazione energetica di edifici storici," 2020.
- [84] G. Russomando, R. Romano, A. Donato, and P. Gallo, "Valutazione degli effetti di termintonaci su edifici storici vincolati mediante simulazioni energetiche dinamiche," 2021.
- [85] UNI EN ISO 7730, "Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale" 2008.
- [86] M. Casini, "Building performance simulation tools," in *Construction 4.0*, Elsevier, 2022, pp. 221–262. doi: 10.1016/b978-0-12-821797-9.00004-0.
- [87] D. Pugliese, V. Alecci, R. Romano, G. Stipo, M. De Stefano, and A. Nanni, "Innovative and Sustainable Composite Material for the Seismic and Energetic Upgrade of Historic Masonry Buildings †," *Fibers*, vol. 11, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/fib11090076.
- [88] ASTM C305 – 20, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency," 2020, doi: 10.1520/C0305-20.
- [89] G. Stipo, L. Rovero, and U. Tonietti, "Analisi del comportamento meccanico dei materiali compositi a matrice cementizia nel rinforzo delle strutture murarie," 2013.
- [90] V. Alecci, M. De Stefano, S. Galassi, A. M. Marra, and D. Pugliese, "Seismic and energetic historical buildings renovation by innovative fiber reinforced composite materials," in *The New Boundaries of Structural Concrete 2022 | ACI Italy Chapter*, IMREADY Srl, Ed., Lecce, 2022.
- [91] A. Costigan, S. Pavía, and O. Kinnane, "An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry under compression," *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 283–294, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.job.2015.10.001.
- [92] D. Pugliese, M. De Stefano, A. Bove, and V. Alecci, "Stima del modulo elastico della muratura mediante la prova con martinetti piatti: valutazioni sperimentali e numeriche," 2019.
- [93] ASTM E83 – 23, "Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems 1," 2023, doi: 10.1520/E0083-23.
- [94] S. Barducci, V. Alecci, L. Rovero, and M. De Stefano, "Il comportamento di adesione dei compositi FRMC: indagini sperimentali e modelli analitici," 2017.
- [95] E. Morelli, G. Stipo, D. Pugliese, and V. Alecci, "Valutazione delle proprietà di adesione di compositivi innovativi a matrice termica."

- [96] AC308, "Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRMC) and steel reinforced grout (SRG) composite systems," *ICC-ES*, 2022.
- [97] F. G. Carozzi, G. Milani, and C. Poggi, "Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures," *Compos Struct*, vol. 107, pp. 711–725, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.08.026.
- [98] M. Ekenel, F. De Caso Y Basalo, and A. Nanni, "Acceptance Criteria for Concrete and Masonry Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel Reinforced Grout (SRG) Composites."
- [99] ASTM C78/C78M – 22, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)," 2022.
- [100] V. Alecci *et al.*, "Experimental investigation on masonry arches strengthened with PBO-FRCM composite," *Compos B Eng*, vol. 100, pp. 228–239, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.05.063.
- [101] V. Alecci *et al.*, "Reliability of different test setups and influence of mortar mixture on the fabric-reinforced cementitious matrix-to-brick bond response," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 49, no. 6. ASTM International, Nov. 01, 2021. doi: 10.1520/JTE20200656.
- [102] ASTM C1583/C1583M – 20, "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)," 2020, doi: 10.1520/C1583_C1583M-20.
- [103] A. Kalali and M. Z. Kabir, "Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests," *Eng Struct*, vol. 39, pp. 24–37, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.01.018.
- [104] S. Casacci, C. Gentilini, A. Di Tommaso, and D. V. Oliveira, "Shear strengthening of masonry wall panels resorting to structural repointing and FRCM composites," *Constr Build Mater*, vol. 206, pp. 19–34, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.044.
- [105] M. R. Valluzzi, D. Tinazzi, and C. Modena, "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates," 2002.
- [106] F. Longo, A. Cascardi, P. Lassandro, and M. A. Aiello, "Energy and seismic drawbacks of masonry: a unified retrofitting solution," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 6, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41024-021-00121-6.
- [107] C. L. Knox, D. Dizhur, and J. M. Ingham, "Experimental study on scale effects in clay brick masonry prisms and wall panels investigating compression and shear related properties," *Constr Build Mater*, vol. 163, pp. 706–713, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.149.
- [108] J. H. Yu and J. H. Park, "Compressive and diagonal tension strengths of masonry prisms strengthened with amorphous steel fiber-reinforced mortar overlay,"

- Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/app11135974.
- [109] V. Alecci, M. Fagone, T. Rotunno, and M. De Stefano, "Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar," *Constr Build Mater*, vol. 40, pp. 1038–1045, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.107.
- [110] ASTM C144 – 18, "Designation: C144 – 18 Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar 1," 2018, doi: 10.1520/C0144-18.
- [111] ASTM C1437 – 20, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," 2020, doi: 10.1520/C1437.
- [112] UNI EN ISO 25178-2, "Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Tessitura/stato della superficie: metodo areale - Parte 2: Termini, definizioni e parametri di tessitura/stato della superficie" 2022.
- [113] A. Brás, M. Leal, and P. Faria, "Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance," *Constr Build Mater*, vol. 49, pp. 315–327, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.006.
- [114] A. Moreira, J. António, and A. Tadeu, "Lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization," *Cem Concr Compos*, vol. 49, pp. 1–8, May 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.012.
- [115] A. Borges, I. Flores-Colen, and J. de Brito, "Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay," *Constr Build Mater*, vol. 191, pp. 535–543, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.043.
- [116] R. M. Novais *et al.*, "Multifunctional cork – alkali-activated fly ash composites: A sustainable material to enhance buildings' energy and acoustic performance," *Energy Build*, vol. 210, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109739.
- [117] A. M. Matos, S. Nunes, and J. Sousa-Coutinho, "Cork waste in cement based materials," *Mater Des*, vol. 85, pp. 230–239, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.082.
- [118] B. Malchiodi, R. Marchetti, L. Barbieri, and P. Pozzi, "Recovery of Cork Manufacturing Waste within Mortar and Polyurethane: Feasibility of Use and Physical, Mechanical, Thermal Insulating Properties of the Final Green Composite Construction Materials," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12083844.
- [119] ASTM C230/C230M – 23, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement," 2023, doi: 10.1520/C0230_C0230M-23.
- [120] UNI EN 12350-2:2019, "Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 2: Prova di abbassamento al cono," 2019.
- [121] D. Barnat-Hunek, M. K. Widomski, M. Szafraniec, and G. Łagód, "Impact of different binders on the roughness, adhesion strength, and other properties of mortars with expanded cork," *Materials*, vol. 11, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/ma11030364.
- [122] A. Jerónimo, C. Soares, B. Aguiar, and N. Lima, "Hydraulic lime mortars incorporating micro cork granules with antifungal properties," *Constr Build Mater*, vol. 255, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119368.

- [123] M. Colleparidi, S. Colleparidi, and Troli Roberto, *Il nuovo calcestruzzo*, 3rd ed. 2022.
- [124] M. J. P.- Cervantes *et al.*, "Mathematical Model of Fine Aggregate Granulometry Complying with ASTM C33," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 07, no. 04, pp. 36–42, Apr. 2017, doi: 10.9790/3021-0704013642.
- [125] ASTM C144 - 18, "Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar 1," 2018, doi: 10.1520/C0144-18.
- [126] S. K. Sebsadji, "Determining concrete properties for different optimized combined concrete mixtures: Novel mathematical approach," *Powder Technol*, vol. 409, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2022.117756.
- [127] A. M. Matos, S. Nunes, and J. Sousa-Coutinho, "Cork waste in cement based materials," *Mater Des*, vol. 85, pp. 230–239, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.082.
- [128] UNI EN 12350-11:2010, "Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 11: Calcestruzzo autocompattante - Prova di segregazione mediante setaccio," 2010.
- [129] R. M. Novais, L. Senff, J. Carvalheiras, A. M. Lacasta, I. R. Cantalapiedra, and J. A. Labrincha, "Simple and effective route to tailor the thermal, acoustic and hygrothermal properties of cork-containing waste derived inorganic polymer composites," *Journal of Building Engineering*, vol. 42, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102501.
- [130] A. K. Tedjditi, F. Ghomari, O. Taleb, R. Belarbi, and R. Tarik Bouhraoua, "Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete," *Constr Build Mater*, vol. 265, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120734.
- [131] S. Y. Chung, J. S. Kim, D. Stephan, and T. S. Han, "Overview of the use of micro-computed tomography (micro-CT) to investigate the relation between the material characteristics and properties of cement-based materials," *Construction and Building Materials*, vol. 229. Elsevier Ltd, Dec. 30, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116843.
- [132] R. Travincas, M. F. C. Pereira, I. Torres, A. Maurício, D. Silveira, and I. Flores-Colen, "X-ray microtomography applied to mortars: Review of microstructural visualization and parameterization," *Micron*, vol. 164. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2023. doi: 10.1016/j.micron.2022.103375.
- [133] F. Rezaei, H. Izadi, H. Memarian, and M. Baniassadi, "The effectiveness of different thresholding techniques in segmenting micro CT images of porous carbonates to estimate porosity," *J Pet Sci Eng*, vol. 177, pp. 518–527, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.063.
- [134] UNI EN 12350-8:2019, "Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 8: Calcestruzzo autocompattante - Prova di spandimento e del tempo di spandimento," 2019.
- [135] ASTM D4541-22, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," 2022.
- [136] UNI EN ISO 4624, "Test di trazione (pull-off test) per adesione" 2023.
- [137] UNI EN 1542, "Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Misurazione dell'aderenza per trazione diretta" 2000.

[138] UNI EN ISO 25178-605, "Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) - Tessitura/stato della superficie - Parte 605: Caratteristiche nominali di strumenti senza contatto (tastatore a messa a fuoco automatica per singolo punto)," 2014.