



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale dei Materiali

XV° CICLO NUOVA SERIE

Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica

**Malte ecosostenibili con proprietà funzionali
avanzate per l'efficienza energetica**

Relatore:

Prof. Ing. Valeria Corinaldesi

Candidato:

Isabella Magrini

INTRODUZIONE	5
1. STATO DELL'ARTE SUGLI INTONACI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA	9
2. STATO DELL'ARTE SUGLI INTONACI ECOSOSTENIBILI	37
3. SCOPO DEL LAVORO E PIANO SPERIMENTALE	64
3.1. ASPETTI INNOVATIVI SU INTONACI E RASANTI	64
3.2. PROVE TECNICHE	68
3.2.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)	68
3.2.1.1 <i>Riferimenti normativi</i>	70
3.2.1.2 <i>Strumentazione di misura</i>	70
3.2.1.3 <i>Metodologia di misura</i>	71
3.2.2 Determinazione pesi specifici	72
3.2.2.1 <i>Determinazione della massa volumica in mucchio</i>	72
3.2.2.2 <i>Riferimenti normativi</i>	72
3.2.2.3 <i>Strumentazione di misura</i>	72
3.2.2.4 <i>Metodologia di misura</i>	72
3.2.2.5 <i>Determinazione della massa volumica fresca</i>	73
3.2.3 Tavola a scosse	74
3.2.3.1 <i>Riferimenti normativi</i>	74
3.2.3.2 <i>Strumentazione di misura</i>	75
3.2.3.3 <i>Metodologia di misura</i>	76
3.2.4 Determinazione delle resistenze meccaniche a flessione e compressione	77
3.2.4.1 <i>Riferimenti normativi</i>	77
3.2.4.2 <i>Strumentazione e metodologia di misura</i>	77
3.2.5 Determinazione della conducibilità termica - Heat flow meter	78
3.2.5.1 <i>Riferimenti normativi</i>	79
3.2.5.2 <i>Strumentazione di misura</i>	79
3.2.5.3 <i>Metodologia di misura</i>	80
3.2.6 Porosimetria	81
3.2.6.1 <i>Riferimenti normativi</i>	83
3.2.6.2 <i>Strumentazione di misura</i>	83
3.2.6.3 <i>Metodologia di misura</i>	84
3.2.7 Tortuosità	86
3.2.8 Misura del coefficiente di fonoassorbimento (α) con tubo di impedenza	86
3.2.8.1 <i>Riferimenti normativi</i>	88
3.3.8.2 <i>Strumentazione di misura</i>	88
3.3.8.3 <i>Metodologia di misura</i>	89
3.3.8.4 <i>Inserimento dei campioni</i>	91
4. MATERIALI IMPIEGATI	93

4.1 INTRODUZIONE	93
4.2 MATERIALI TRADIZIONALI	93
4.2.1 Leganti	93
4.2.1.1 <i>Cemento</i>	94
4.2.1.2 <i>Calce idrata</i>	95
4.2.1.3 <i>Calce idraulica naturale NHL</i>	96
4.2.1.4 <i>Gesso</i>	96
4.2.2 Filler	97
4.2.2.1 <i>Perlite</i>	97
4.2.2.2 <i>Polvere di marmo</i>	99
4.2.2.3 <i>Calcere</i>	99
4.2.3 Aggregati	99
4.2.3.1 <i>Pomice</i>	100
4.2.3.2 <i>Sughero</i>	102
4.2.3.3 <i>Perlite</i>	103
4.2.3.4 <i>Vermiculite</i>	105
4.2.3.5 <i>Quarzo</i>	106
4.2.3.6 <i>Carbonato di calcio</i>	106
4.3 MATERIALI INNOVATIVI	107
4.3.1 Filler	107
4.3.1.1 <i>Caolino</i>	107
4.3.1.2 <i>Zeolite</i>	109
4.3.2 Aggregati	109
4.3.2.1 <i>Vetro espanso riciclato</i>	109
4.3.2.2 <i>Silice espansa con vetro riciclato</i>	111
4.3.2.3 <i>Gel di silice</i>	112
4.4 ADDITIVI	113
4.5 TABELLE RIASSUNTIVE MATERIALI	115
5. SPERIMENTAZIONE SU INTONACI AVANZATI	118
5.1 INTRODUZIONE	118
5.2 MIX DESIGN	119
5.3 LAVORABILITA'	138
5.3.1 Procedura di miscelazione (norma UNI EN 1015-3)	138
5.3.2 Lavorabilità della malta fresca: prova di spandimento	140
5.3.3 Discussione dei valori sperimentali	143
5.4 DETERMINAZIONE MASSA VOLUMICA FRESCA	144
5.4.1 Procedura (norma UNI EN 1015 -6)	144
5.4.2 Discussione dei valori sperimentali	147
5.5 PROVE MECCANICHE	148

5.5.1 Introduzione	148
5.5.2 Prova a flessione	149
5.5.3 Prova a compressione	150
5.5.4 Mix design: prima fase di sperimentazione	150
<i>5.5.4.1 Prova a flessione</i>	151
<i>5.5.4.2 Prova a compressione</i>	151
5.5.5 Ottimizzazione della prima fase di mix- design	151
<i>5.5.5.1 Prova a flessione</i>	152
<i>5.5.5.2 Prova a compressione</i>	153
<i>5.5.6 Discussione dei valori sperimentali</i>	154
5.6 HEAT FLOW METER	166
5.6.1 Discussione dei valori sperimentali	167
5.7 POROSIMETRIE	172
5.8 MISURA DEL COEFFICIENTE DI FONOASSORBIMENTO CON TUBO DI IMPEDENZA	173
5.8.1 Descrizione dei campioni di prova	173
5.8.2 Discussione dei valori sperimentali	197
6. SPERIMENTAZIONE SU RASANTI AVANZATI	200
6.1 INTRODUZIONE	200
6.2 MIX DESIGN	201
6.3 LAVORABILITA' DELLA MATRICE FRESCA: PROVA DI SPANDIMENTO	210
6.4 HEAT FLOW METER	214
6.4.1 Discussione dei valori sperimentali	218
7. CONCLUSIONI	220

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è assistito a una crescente consapevolezza verso l'importante ruolo che riveste l'ambiente e le risorse che esso fornisce. La presa di coscienza dei problemi, correlati al fatto che alcune risorse sono un bene non rinnovabile, nonché le difficoltà connesse all'inquinamento, allo sperpero e al degrado, ha suscitato nell'uomo la volontà di agire diversamente.

Oggi la mobilitazione per ridurre il consumo di energia è grande ed è concentrata su prevenzione degli sprechi e nel limitare gli impatti inquinanti nell'ambiente. Obiettivi questi condivisi dell'Unione Europea che ha stilato un resoconto secondo cui le possibilità di riduzione esistenti sono notevoli, in particolare nei settori ad elevato consumo di energia, quale è il settore dell'edilizia che rappresenta ad oggi il 40% del consumo totale.

La maggiore sensibilità nei confronti delle tematiche ambientali ha portato alla nascita e allo sviluppo di programmi di azione e politiche internazionali volte alla riduzione dei consumi di energia primaria e delle emissioni di anidride carbonica.

Il settore edilizio è certamente un settore strategico in cui intervenire, poiché è fortemente responsabile dei consumi di energia e delle emissioni di CO₂.

Favorendo il miglioramento dell'efficienza energetica, l'UE dà un contributo decisivo alla competitività, alla sicurezza degli approvvigionamenti e al rispetto degli impegni assunti nel quadro del protocollo di Kyoto sui cambiamenti climatici.

Per conseguire questi intenti è necessario coinvolgere i cittadini, i responsabili politici e gli operatori del mercato ed è doveroso introdurre norme di rendimento energetico e regole in materia di etichettatura, applicabili ai prodotti, ai servizi e alle infrastrutture.

Si è reso indispensabile attuare un atteggiamento più corretto in ogni fase della progettazione, della ristrutturazione e della nuova costruzione degli edifici, che tenga conto delle diverse esigenze (organizzative, distributive, economiche, estetiche), ma che sia in grado di coniugare diversi aspetti di biocompatibilità e sostenibilità edilizi.

Il comparto dell'Edilizia Sostenibile è dunque in rapida e costante evoluzione, e maggiormente attento all'uso sostenibile ed equilibrato dei materiali e delle risorse, con il fine ultimo di migliorare la qualità della vita dei cittadini, dare maggiore valore alle case, ridurre le emissioni e la dipendenza energetica, il passaggio ad una edilizia sostenibile non è più una scelta, ma una necessità.

L'attenzione, degli operatori del settore, si sta orientando verso una progettazione che tenga conto della biocompatibilità, della sostenibilità e di costruzioni ecologiche in riferimento alla vita utile del prodotto edilizio: dal reperimento delle materie prime ai processi produttivi dei materiali.

Si tratta, quindi, di una metodologia che ottimizza l'uso delle risorse e chiede nuove competenze a tutti i livelli della filiera, da qui l'urgenza di uno sviluppo rapido e costante delle aziende che trattano e producono materiali naturali che possano permettere la realizzazione di costruzioni a basso impatto ambientale.

L'aspetto che più ci preme considerare nel lavoro è, senza dubbio, quello che concerne l'involucro edilizio perché responsabile in larga parte della possibilità di ottenere risparmio energetico nell'ottica di una edilizia eco-compatibile.

Gli elementi che fanno parte dell'involucro dell'edificio, e hanno un impatto significativo sulla prestazione energetica dell'edificio stesso, devono anch'essi rispettare i requisiti minimi in materia di prestazione energetica quando sono rinnovati o sostituiti, in modo da raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi.

Il modo migliore per ottenere la massima efficienza energetica dell'involucro edilizio è quello di progettare e realizzare un edificio a partire da tre principi:

- nessuno spreco energetico;
- massimo sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili;
- ottimizzazione dell'uso di fonti energetiche non rinnovabili.

La massima efficienza energetica, come è ovvio, si ottiene quando viene posta come obiettivo prioritario fin dal progetto, in quanto in quella fase è possibile prendere in esame tutte le componenti che concorrono al miglior risultato: dalla fascia climatica al posizionamento, dai materiali da costruzione alla possibilità di utilizzo di fonti rinnovabili, dagli impianti di condizionamento fino al design dell'illuminazione interna.

L'involucro è la somma di tutte le superfici che entrano in contatto con l'ambiente esterno: le pareti, il tetto, le finestre. Costituisce, in pratica, la "pelle" dell'edificio, regolando i contatti e gli scambi di materia ed energia con l'esterno.

Tanto più l'involucro è adatto a isolare e a compensare le temperature tra interno e esterno, tanto più è energeticamente efficiente: in altre parole, fa risparmiare energia. Pur essendo

più facile ottenere risultati nelle nuove costruzioni, anche sugli edifici esistenti è possibile ottenere buoni livelli di risanamento energetico dell'involucro.

Quando parliamo di interventi di isolamento termico al fine di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, possiamo soffermarci sicuramente sull'intonaco isolante. L'intonaco isolante, o intonaco termo isolante permette di isolare con una sola operazione l'edificio creando una sorta di protezione. Si tratta di intonaco che superficialmente si comporta come qualsiasi tipo di rivestimento, a differenza del quale riesce a creare uno strato protettivo, salvaguardando l'edificio per esempio dagli agenti atmosferici.

Le malte sono conglomerati ottenuti dalla miscela di tre tipologie di elementi: un "legante" (come il cemento o la calce), l'acqua e un "inerte".

Per attribuire prestazioni isolanti alla miscela ottenuta, i produttori sostituiscono in tutto o in parte l'inerte classico (ad esempio sabbia o ghiaia) con aggregati leggeri o con l'aggiunta di additivi cellulari che creano bolle d'aria all'interno dell'impasto.

In modo più preciso la norma UNI EN 998-1 "Malte per intonaci interni ed esterni" definisce l'intonaco termoisolante come "malta a prestazione garantita con proprietà isolanti specifiche" e ne stabilisce le caratteristiche essenziali da riportare sulla marcatura CE.

La differenza tra un intonaco tradizionale e un intonaco isolante dipende dal suo valore di conduttività termica λ : secondo la UNI EN 998-1 infatti le malte termiche (indicate con la lettera T) rispetto alle altre devono garantire valori di λ inferiori a 0.1 W/mK (categoria T1) o inferiori a 0.2 W/mK (categoria T2).

Le malte di categoria T1 hanno quindi una più alta prestazione isolante, poiché al decrescere del valore della conduttività termica decresce anche il flusso di calore che attraversa l'elemento.

La ricerca di "leggerezza" nel prodotto non ha solo uno scopo di praticità della messa in opera, di preparazione in cantiere o di riduzione degli effetti statici sulla parete oggetto d'intervento. Nel caso degli intonaci isolanti, la ricerca di leggerezza serve per ottenere anche maggiori prestazioni isolanti: significa intrappolare una quantità fissa di molecole d'aria nella struttura del materiale (nelle bolle o negli aggregati leggeri) per ottenere una miscela termicamente più isolante. L'aria infatti se immobilizzata è uno dei materiali a basso costo più isolanti: si parla di una conduttività pari a circa 0.026 W/mK.

Una scelta motivata anche dal fatto che da alcuni anni, a livello internazionale, si sta sperimentando l'impiego, in alternativa ai materiali tradizionali, di aggregati provenienti da materiali di scarto, con conseguenti benefici economici ed ambientali. La crescente attenzione alle problematiche ambientali nel campo delle costruzioni civili, ha reso negli ultimi tempi sempre più difficoltoso il prelievo da cava degli inerti e quindi delle materie prime in generale; inoltre la gestione dei rifiuti solidi sta diventando uno dei principali problemi ambientali e interessa molte nazioni. Per poter fronteggiare questa problematica, è fondamentale un buon Life-Cycle Assessment dei materiali impiegati nelle costruzioni, nel pieno rispetto del concetto di sostenibilità dei materiali.

La ricerca portata avanti in questo studio parte dai principi sopra elencati per sviluppare malte per intonaci che riescano a garantire, caratteristiche idonee a quelle richieste ad un intonaco destinato a nuove opere o restauri, ovvero elevata permeabilità al vapore e bassa risalita capillare di umidità, includendo la possibilità di realizzare miscele che offrano una buona conducibilità termica, per sopperire ai problemi legati all'isolamento termico e quindi usufruire di tutti quei vantaggi che scaturiscono da un buon risparmio energetico.

Altro obiettivo del lavoro è quello di recuperare prodotti di scarto, derivanti dal riciclo del vetro, per riutilizzarli, in forma di inerte nel confezionamento delle miscele, adoperabili in seguito per nuovi interventi edilizi.

1. STATO DELL'ARTE SUGLI INTONACI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA

Isolare termicamente è il primo passo per ottenere edifici capaci di rispondere a requisiti e standard di efficienza energetica sempre più elevati. Più che in passato, oggi è estremamente necessario sfruttare al massimo la tecnica dell'isolamento termico dal freddo e dal caldo. Questa tecnologia è la sola che permette, in tempi brevi, di limitare i consumi di energia e quindi le emissioni inquinanti di CO₂, conferendo più valore alle costruzioni. Risparmiare energia riducendo il flusso termico costituisce il principale motivo per l'impiego dell'isolamento termico [1].

L'isolamento termico comporta anche la protezione e il benessere personale, la conservazione della temperatura di processo, il contenimento della variazione e delle fluttuazioni di temperatura, la prevenzione di fenomeni di condensazione, la protezione dal fuoco, dal congelamento e la riduzione di rumore e vibrazioni. Isolare termicamente un edificio significa promuovere nuovi sistemi che si distaccano dal tradizionale modo di pensare appartenente al campo edilizio: per questo motivo l'obiettivo fondamentale è l'innovazione. L'isolamento termico è tutela del clima, pertanto è necessario realizzare prodotti e soluzioni green, altamente performanti e sostenibili, per mezzo di tecnologie innovative orientate al servizio dell'uomo, al fine di migliorare il suo habitat; diffondendo nel mondo soluzioni dotate di alto contenuto tecnologico nel pieno rispetto delle generazioni future.

Gli intonaci termoisolanti rappresentano una delle possibili e valide soluzioni per affrontare il problema energetico delle costruzioni sia nuove che esistenti: sono prodotti versatili, adatti sia per interno che per esterno, che col passare degli anni hanno subito un processo di sviluppo tale da poter migliorare le prestazioni energetiche delle costruzioni, il tutto volto a migliorare la qualità della vita. Il desiderio di migliorare le prestazioni termiche degli edifici abbinato alla tutela del clima e della vita dell'uomo, ha portato alla sperimentazione di prodotti naturali a base di lana di pecora, fibre di cocco e lana di legno ecc.

Un intervento di isolamento termico realizzato con un intonaco isolante è sempre da preferire ad un sistema a secco, ovvero realizzato con pannelli in quanto, sfruttando l'applicazione in continuo senza i giunti che si verrebbero a creare tra un pannello e l'altro, si evita la formazione dei ponti termici e si riduce il margine di errore da parte

dell'applicatore, nonché si riducono anche i costi applicativi. Solitamente gli intonaci termoisolanti vengono applicati o su pareti nuove o su pareti esistenti già intonacate, la loro lavorabilità è molto simile a quelli tradizionali e a differenza dei pannelli possono essere utilizzati su pareti non perfettamente allineate, murature fuori piombo ma soprattutto superfici curve; pertanto, l'intonaco termoisolante può essere utilizzato per qualsiasi soluzione architettonica o di design.

Questi intonaci generalmente sono premiscelati e quindi pronti all'uso, necessitano solo di un preciso quantitativo di acqua e vengono formulati con inerti leggeri come il sughero, l'argilla, la perlite, la silice, le perle di polistirolo espanso, il vetro espanso, ecc.

Per ottenere un prodotto isolante innovativo e ad alte prestazioni, la densità della malta indurita deve avere un valore compreso tra 250 e 350 kg/m³, e deve avere le seguenti caratteristiche:

- Installazione facile e veloce;
- Applicazione a macchina;
- Applicazioni in diversi ambiti;
- Versatilità d'uso sia in interno che in esterno.

Sono prodotti altamente traspiranti e alleggeriti in grado di non appesantire la struttura, inoltre, possono essere applicati anche ad alto spessore e sono dotati di un basso coefficiente di permeabilità al vapore [2-3].

Le proprietà termiche di coibentazione degli edifici vengono anche conferite da materie prime leggere inserite in miscela, provenienti per la maggior parte da prodotti di riciclo, per questo motivo definite materie prime seconde. Numerosi studi descrivono come l'effetto di queste materie sotto forma di polvere o di inerte in opportuna curva granulometrica contribuiscono a questo fenomeno nel pieno rispetto della sostenibilità dei materiali [4 -5].

Una sperimentazione su intonaci alleggeriti che mette in primo piano la valorizzazione energetica degli edifici ma soprattutto il tema della sostenibilità ambientale, è stata quella dell'aver introdotto all'interno di una miscela dei rifiuti di plastica, nello specifico PET proveniente da bottiglie [6]. Inoltre, valorizzando sempre la sostenibilità ambientale è possibile trovare in letteratura studi su intonaci alleggeriti grazie all'impiego di rifiuti di poliuretano espanso macinati e inseriti in opportuna curva granulometrica; si ottiene così un risultato paragonabile a quello di intonaci termici con materiali tradizionali [7].

Ogni materiale da costruzione, che come materia prima può essere alla base di un intonaco o di un pannello isolante è dotato di una propria specifica capacità di isolare o meno nei confronti del calore: questa capacità è definita dalla conducibilità termica.

La conducibilità termica definita come λ è una misura della capacità di un materiale di condurre calore. Gli aggregati leggeri introdotti in miscela riducono la densità totale del prodotto andando a diminuire di conseguenza la conducibilità termica, studi dimostrano la potenzialità e la durabilità degli intonaci termici a base gesso nelle applicazioni come intonaco interno sui muri e soffitto, grazie all'impiego di aggregati alleggeriti come i granuli di sughero. Oltre alla bassa conducibilità, questi materiali hanno dimostrato un'ottima capacità per il controllo passivo dell'umidità relativa e un buon comportamento se sottoposti a cicli di invecchiamento accelerato per valutare la durabilità del prodotto nel tempo. Come riferimento normativo gli intonaci in generale sono regolati dallo standard UNI EN 998-1 [8], ma le caratteristiche degli intonaci a base gesso possono essere definite nell'ambito dello standard EN 13279 [9], dove viene assegnata una classe per gli intonaci termici e vengono stabiliti precisi requisiti applicabili. Sottoposti ai test di conducibilità termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia, permeabilità al vapore e valutazione della proprietà di assorbimento igroscopico, i campioni di intonaco a base gesso e sughero hanno presentato migliori prestazioni rispetto all'intonaco base gesso tradizionale (Tab 1.1; Fig 1.1).

Tab 1.1 Risultati ottenuti nei test.

Property	Gypsum+Cork (G+C)	Current Gypsum Plaster (GP) [11]
Thermal conductivity, λ (W/(m.°C))	0.11	0.25
Diffusion resistance factor (dry cup), μ	9.5	10.3
Diffusion resistance factor (wet cup), μ	4.8	6.9

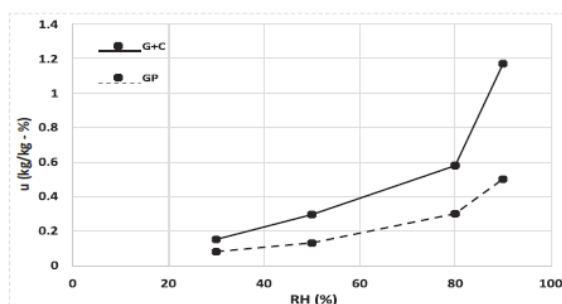


Fig 1.1 Assorbimento isotermico.

L'inserimento del sughero nella matrice a base gesso ha apportato un alleggerimento sulla densità del prodotto da 1100 a 600 kg/mc, a cui corrisponde una riduzione della conducibilità termica da 0.25 a 0.11, oltre ad un incremento della igroscopicità del materiale; la simulazione igrotermica ha dimostrato che l'impiego di questi intonaci apporta benefici sulla riduzione del consumo energetico [10 -11].

Un valore elevato di conducibilità termica indica che il materiale è un buon conduttore di calore, mentre un basso valore di conducibilità termica indica che il materiale è un cattivo conduttore di calore ovvero è un isolante:

- Materiale isolante $\lambda \leq 0,065$ W/mK;
- Materiale debolmente isolante $0,065$ W/mK $< \lambda < 0,090$ W/mK;
- Materiale non isolante $\lambda > 0,090$ W/mK.

Un efficace isolamento termico degli edifici deve garantire il raggiungimento di una corretta temperatura dell'aria, dei muri, dei soffitti e dei pavimenti.

In primo luogo, l'isolamento termico di un edificio comporta una notevole riduzione di costi energetici per il riscaldamento e il raffreddamento, garantendo pertanto un aumento del valore dell'immobile grazie ai parametri di efficienza energetica raggiunti: questo concetto è valido non solo per gli edifici nuova realizzazione, ma anche per quelli storici [12 -13]. Alcuni studi permettono di evidenziare come le prestazioni termo igrometriche delle pareti interne degli edifici possono essere notevolmente migliorate mediante l'impiego di intonaci a base di calce e canapa [14-15].

Dai risultati di una ricerca condotta sugli eart plaster, cioè una miscela di argilla inerti fini e fibre di origine naturale e vegetale, se additivati con orzo, paglia e mais, queste aggiunte di materiale vegetale vanno ad incidere fornendo buoni risultati sulla densità finale del prodotto e quindi sulla conducibilità termica, la permeabilità al vapore e anche sulla capacità deumidificante. L'inserimento di fibre naturali negli elementi costruttivi è una pratica usuale sia nelle tecniche tradizionali che in quelle contemporanee. Gli effetti positivi delle fibre sulle proprietà meccaniche di miscele con argilla sono già stati dimostrati in altre ricerche scientifiche. Al contrario gli effetti sulle proprietà idrologiche e termiche sono meno noti ma molto importanti per la conoscenza della massa termica e per il controllo passivo dell'umidità negli edifici. Lo studio approfondisce i parametri di

conducibilità termica e diffusività, come permeabilità al vapore e moisture buffering (capacità del materiale a controllare l'umidità ambientale cedendola e rilasciandola all'occorrenza) di blocchi in terra compressa e intonaci che incorporano fibre naturali. I materiali vegetali scelti sono stati la paglia d'orzo e i gambi di mais, utilizzati insieme ai materiali in argilla in percentuale di 1% e 2% (Fig.1.2 - 1.3).

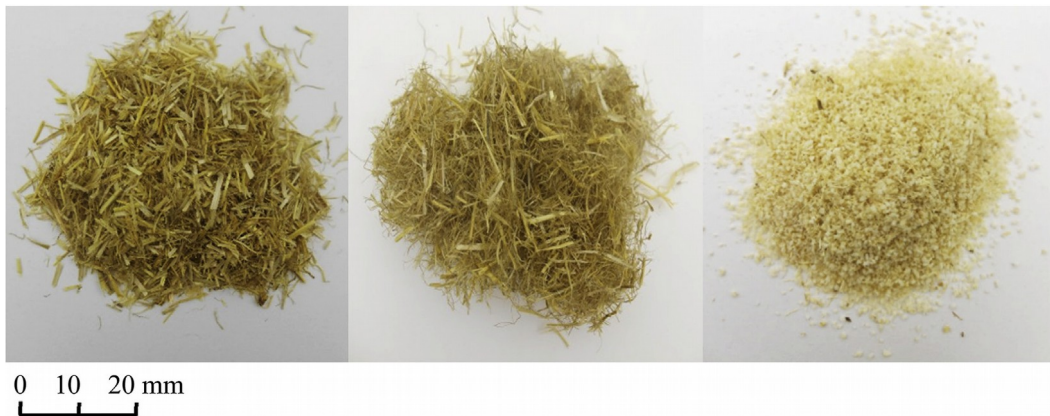


Fig.1.2 Da sinistra: paglia d'orzo (2 mm), lana d'orzo contenente fibre più lunghe, midollo di mais in granuli (1 mm).

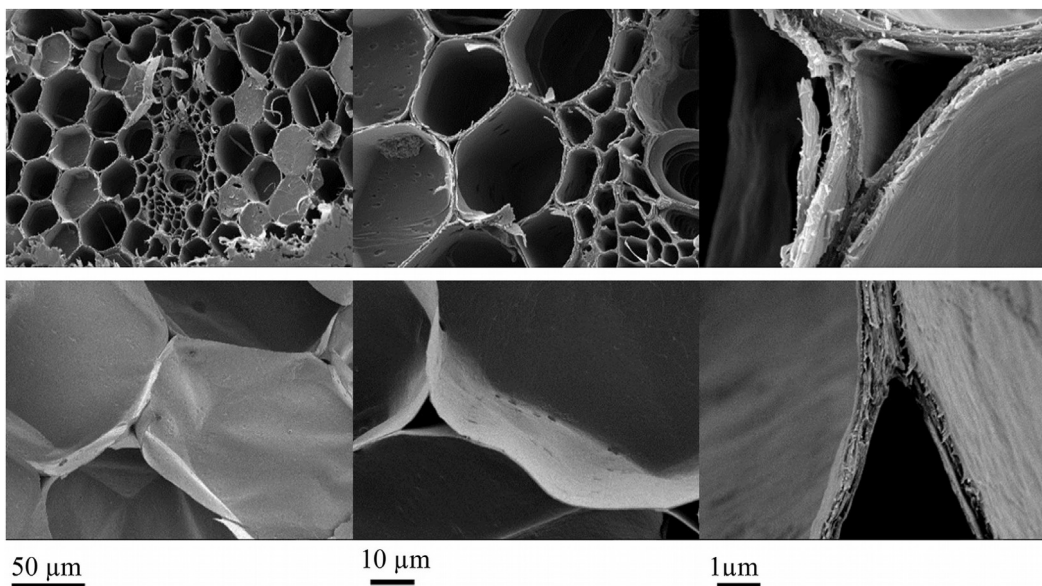


Fig 2.3 Immagini SEM: paglia d'orzo (in alto) e midollo di mais (in basso).

I risultati mostrano che le fibre vegetali hanno un grande impatto sulle proprietà termiche ma molto limitato su quelle idrologiche. Precedenti ricerche hanno dimostrato che elementi costruttivi in terra hanno un più elevato potere deumidificante rispetto ai comuni materiali

e questa ricerca dimostra come queste proprietà possono essere raggiunte per specifiche applicazioni. L'aggiunta di fibre naturali (dalle pannocchie, alla paglia) ha numerosi vantaggi: riduce la formazione di cavillature (aspetto importante per gli intonaci), incrementa la resistenza a compressione e migliora la conducibilità termica. Altri studi riportano una relazione tra l'aggiunta di fibre e il controllo del contenuto di umidità e le proprietà dinamiche deumidificanti, le quali dipendono sicuramente dalla tipologia di fibre impiegate (Fig. 1.4).

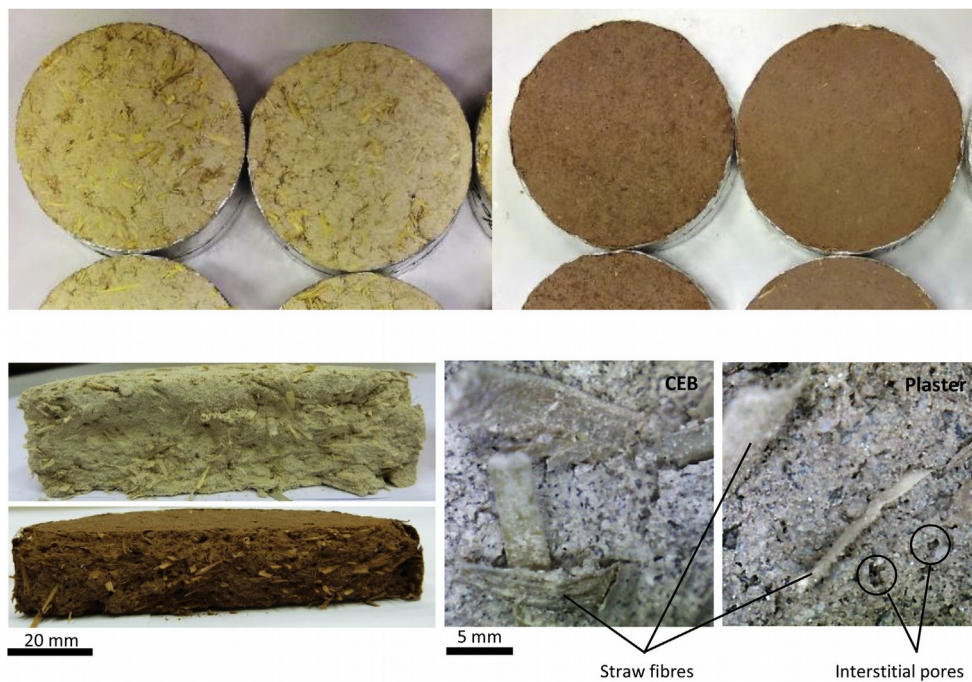


Fig 1.4. Realizzazione e analisi dei campioni.

Il Nordtest Project [16] ha introdotto il parametro di Moisture Buffer Value (MBV) come la quantità di vapore acqueo trasportata da un materiale durante un certo periodo di tempo, dopo una variazione controllata di umidità relativa su una faccia del campione esaminato. L'MBV è incluso nella norma internazionale ISO 24353 [17].

Lo studio esamina i seguenti materiali:

- Blocchi in terra con % di fibre di orzo
- Intonaci in terra con lana di orzo e gambi di mais in granuli.

Lo scopo è quello di conoscere come le varie proprietà studiate (densità, conducibilità termica, permeabilità al vapore e MBV) interagiscono tra loro a seconda della tipologia di materiali vegetali impiegati, tipologia di terra e metodologia di produzione. I risultati

ottenuti evidenziano che l'aggiunta di materiali vegetali ha una grande influenza sulla densità e sulla conducibilità termica più che sulla permeabilità al vapore e sulla capacità di moisture buffering. Le variazioni sono state rilevate in particolare per i dosaggi al 2% del gambo di mais: riduzione del 78% del λ , riduzione del 48% della densità e un moderato miglioramento del μ e della capacità di moisture buffering. Un trend simile è stato evidenziato tra i blocchi di terra compressi (CEB) e gli intonaci (Fig. 1.5 – 1.6).

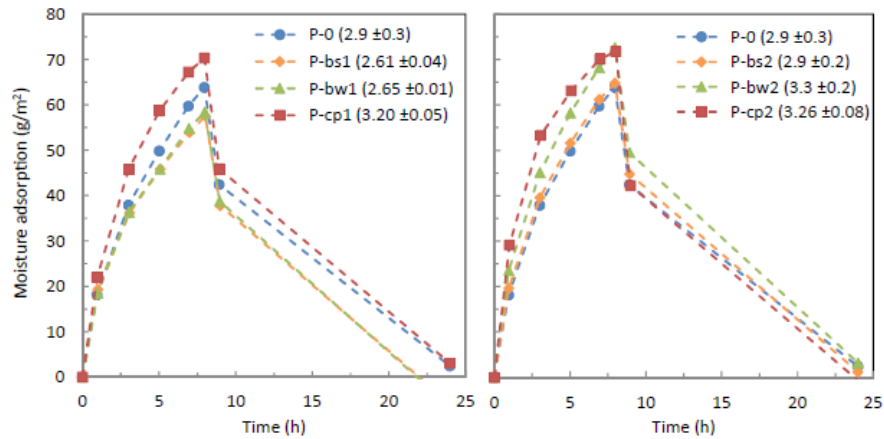


Fig. 1.5 Moisture buffering per earth plasters.

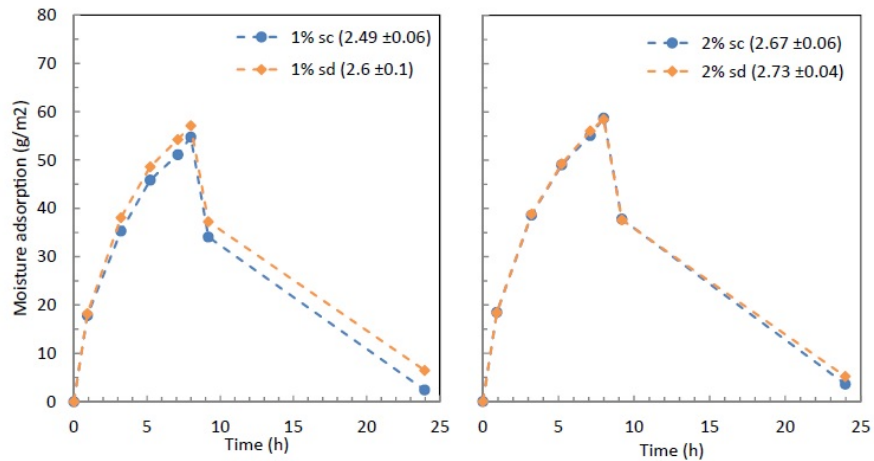


Fig 1.6 Moisture buffering CEB.

L'impiego di intonaci a base argilla con l'aggiunta di materiali vegetali altamente porosi come il gambo del mais, potrebbe essere impiegato laddove occorre assorbire elevati carichi di umidità per brevi periodi di tempo indicati in ore come ad esempio per i bagni [18-19].

Anche malte a base argilla con fibre di avena e fibre di lana, dimostrando una piccola influenza delle fibre nel comportamento di assorbimento e desorbimento dell'umidità [20]. Un altro studio è stato condotto introducendo negli intonaci di terra tre differenti fibre: trucioli di legno, paglia di grano e paglia di orzo. Quest'ultima ha mostrato una grande influenza sul controllo del contenuto di umidità in particolare per umidità relative tra i 40% e 80% [21].

L'impiego di lana di Typha (Giunco) e scaglie di Typha e Phragmites (cannuccia di palude), all'interno di intonaci in argilla ha dimostrato buone performance per livelli di U.R. dal 50% all'80% dopo 12 ore di esposizione. La cinetica dell'assorbimento dell'umidità dipende anche dal tipo di fibre:

- La lana di giunco assorbe maggiormente umidità dopo 1 ora ma dopo 12 ore il comportamento diventa simile ai normali materiali;
- Mentre le scaglie di giunco hanno un basso assorbimento dopo 1 ora ma elevato dopo 12 ore [22].

Questi intonaci, agiscono come regolatore di umidità nella stanza, tale fenomeno prende il nome di Humidity Buffering: l'intonaco assorbe e rilascia il vapore acqueo nell'aria circostante, contribuendo a migliorare in modo significativo l'ambiente in cui viviamo.

Il concetto di igroscopicità è strettamente legato all'isolamento termico, in quanto si intende la capacità di un materiale di assorbire rapidamente le molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante. L'utilizzo di materiali igroscopici nell'isolamento in interno permette di limitare la quantità di umidità relativa presente nell'ambiente, la quale verrà assorbita e rapidamente rilasciata dallo strato isolante, anche grazie alle porosità che ne favoriscono la diffusione.

Questa caratteristica è legata alla struttura porosa dei materiali, caratterizzata dalla presenza di micro e macro cavernosità collegate tra di loro. La capacità igroscopica consente di assorbire rapidamente l'umidità, evitando che questa permanga nell'ambiente o si trasformi in condensa. La combinazione di traspirabilità e capacità igroscopica permette quindi di contribuire attivamente al controllo dell'umidità ed alla salubrità degli ambienti, rendendola la soluzione ideale per qualsiasi intervento di isolamento termico interno.

L'isolamento termico previene le problematiche legate alla presenza di umidità di condensa, evita la formazione di muffe e macchie scure. Questi effetti si possono verificare se la superficie interna delle pareti è troppo fredda, per evitare questo spiacevole

inconveniente è opportuno posizionare tutto l'isolamento sulla superficie esterna della parete; ciò evita variazioni di temperatura tra le diverse zone, mantenendo caldo in modo uniforme tutto l'involucro dell'edificio.

Un edificio correttamente isolato disperde meno calore, pertanto necessita di un minor quantitativo di combustibile per il riscaldamento, riducendo sia costi relativi al riscaldamento e le immissioni inquinanti, ma soprattutto diminuendo l'apporto di CO₂ nell'ambiente [23].

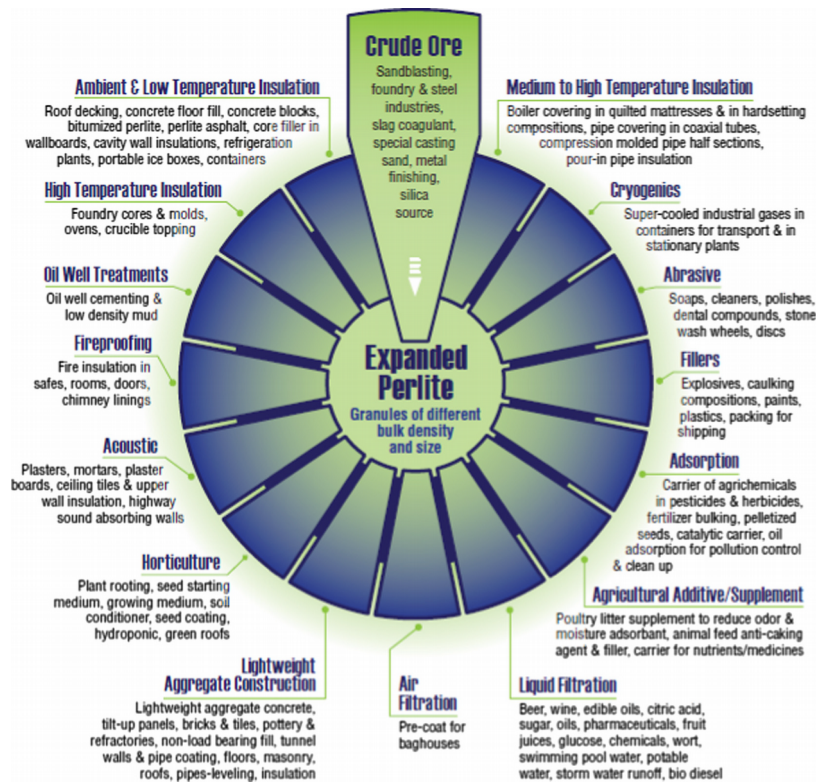
La classificazione ANIT (Associazione Nazionale Isolanti Termici) divide i materiali isolanti in tre categorie in base alla struttura del materiale [24] (Tab. 1.2).

Tab. 1.2 Materiali isolanti – classificazione ANIT.

Fibrosi	Naturali	Organici	Fibra di cocco, fibra di legno, fibra di canapa, lana di legno, lana di pecora, fibra cellulosa
		Inorganici	Fibra di amianto
	Sintetici	Organici	Fibra di poliestere
		Inorganici	Fibra di vetro, fibra di roccia, fibra di ceramica
Cellulari	Naturali	Organici	Sughero
		Inorganici	
	Sintetici	Organici	Eps, xps, pur, pir, pht, resine fenoliche, PNT, elastomeri espansi
		Inorganici	Vetro cellulare
Porosi	Naturali	Organici	
		Inorganici	Pomice, argilla espansa, vermiculite, perlite
	Sintetici	Organici	
		Inorganici	Calcio silicato, cemento cellulare

Tra i tanti materiali isolanti menzionati nella tabella è di significativa importanza citare la perlite. Nel campo delle costruzioni la perlite espansa è stata impiegata come aggregato nei tradizionali materiali cementizi o come base per geopolimeri. La perlite, di origine vulcanica, fornisce alle malte da intonaco, ottime proprietà termiche, acustiche e resistenza al fuoco, inoltre, la loro struttura porosa contribuisce ad alleggerire la densità del materiale in cui viene incluso, proprio perché le particelle hanno un basso peso specifico. Gli studi citati sugli effetti della perlite sul fenomeno del ritiro delle malte e dei cementi evidenziano un nuovo argomento di indagine per studi futuri. Lo stato dell'arte evidenzia attualmente un'azione di riduzione del ritiro autogeno e nel ritiro in fase di stagionatura nei casi in cui la perlite sia stata sostituita come aggregato. L'introduzione della perlite nelle malte in

sostituzione dell'aggregato comporta un incremento di assorbimento di acqua, di porosità e di capillarità, ciò è dovuto alla sua microstruttura caratterizzata da porosità aperte (che creano canali collegati) e porosità chiuse (pori isolati e chiusi). L'incremento di assorbimento di acqua, è l'unico parametro negativo che può avere effetti sulla durabilità dei materiali. Per questo motivo occorre proteggere e rivestire il prodotto finito. La bassa conducibilità della perlite espansa è uno dei fattori che influenza la conducibilità termica del materiale composito, l'inclusione di perlite espansa nella matrice incrementa la porosità totale, la conducibilità termica diminuisce all'aumentare della percentuale di porosità, poiché l'aria presente nei pori fa da ottimo isolante termico; è bene menzionare che gli intonaci con questo inerte offrono una resistenza alla trasmissione del calore 4-6 volte maggiore di quelli tradizionali. Grazie alle numerose porosità aperte e interconnesse che formano una cavità di risonanza, è possibile concludere che la perlite incrementa notevolmente l'assorbimento del suono. La perlite di rifiuto attivata con idrossido di sodio è stata utilizzata per produrre un mix di geopolimeri ma vari studi, hanno dimostrato una bassa resistenza a compressione; buoni risultati a compressione si sono ottenuti utilizzando il silicato di sodio come attivatore e con stagionatura a temperatura ambiente, l'idrossido di sodio fa perdere l'80% della resistenza iniziale. Il silicato di sodio permette una migliore resistenza al fuoco rispetto a l'idrossido di sodio, ma quest'ultimo è maggiormente resistente al solfato di sodio rispetto al primo; la perlite come filler per la realizzazione di geopolimeri è un campo di ricerca ancora aperto. L'uso della perlite in polvere insieme ad altri leganti come Carboxymethyl cellulose (CMC) o matrici polimeriche contenenti phenol-formaldehyde resins può portare alla produzione di prodotti con bassa densità, bassa conducibilità termica, resistenze basse e un alto assorbimento acustico, ma l'utilizzo della polvere di perlite espansa con questi leganti deve ancora essere approfondito [25].



Fino ad ora in letteratura è possibile trovare numerose ricerche riguardanti lo studio di intonaci termici ma un aspetto interessante è quello degli effetti dell'invecchiamento accelerato sul comportamento termico e meccanico dei materiali. Lo studio analizzato prende in considerazione il comportamento di un intonaco a base gesso con paglia e nello specifico sono stati studiati due intonaci, il primo realizzato con paglia di frumento e il secondo con paglia di orzo, entrambi sottoposti a cicli di gelo e disgelo per capire inoltre le dinamiche di danneggiamento dei materiali.



Fig 1.7 Particolare del campione realizzato.

I campioni (Fig.1.7) sottoposti a varie condizioni di stagionatura e poi testati a cicli di gelo-disgelo mostrano che gli effetti sulle proprietà termiche e meccaniche sono minimi. L'uso di fibre, all'interno di matrici fragili, da sempre ha dimostrato di incrementare le proprietà meccaniche, pertanto sono state impiegate fibre naturali provenienti da residui agricoli e quindi con una minor richiesta di energia produttiva; queste fibre per loro natura porose, contribuiscono ad incrementare le proprietà termiche.

La paglia di scarto ha un basso costo e un'alta porosità e il suo impiego è aumentato recentemente nell'ambito del restauro storico, grazie ai nuovi additivi che aumentano le sue performance termiche e acustiche e alla notevole resistenza al fuoco.

Le miscele (Tab. 1.3) sono state sottoposte a cicli di asciutto-bagnato e gelo-disgelo, una volta individuati i mix che mostrano il miglior compromesso tra termicità e resistenza meccanica, è stato scelto un solo composito da testare con cicli di invecchiamento accelerato. Dopo l'invecchiamento accelerato, è stata eseguita una caratterizzazione meccanica e termica per evidenziare l'effetto del cambio di temperatura/umidità sulle proprietà del materiale isolante proposto.

Tab. 1.3 Proprietà termiche e meccaniche delle miscele.

	W/B = 1.1 S/B = 0.2	W/B = 1.1 S/B = 0.3	W/B = 1.1 S/B = 0.4	W/B = 1.6 S/B = 0.6
Density	0.456	0.363	0.255	0.184
Young's Modulus [MPa]	6.917	9.170	2.702	0.184
Compressive strength [MPa]	0.071	0.071	0.025	0.004
Thermal conductivity [W/mK]	0.086	0.083	0.064	0.058

I campioni sono stati esposti a un ciclo con temperature da -10 a 40°C in una camera climatica, e la durabilità dell'intonaco è stata valutata attraverso test termici e di resistenza meccanica a compressione alla fine di 5, 20 e 40 cicli, il materiale composito più resistente è stato quello formato da fibre di grano: WP.

Il composito BP con orzo, mostra una maggiore vulnerabilità ai cicli di invecchiamento in quanto assorbe maggiore umidità poiché maggiormente microporoso. Durante i cicli di gelo l'acqua cristallizzata deteriora le fibre che fanno perdere di resistenza meccanica al materiale. Dopo 3 o 6 mesi, l'intonaco a base grano ha mostrato una chiara resistenza: non si è deteriorato con condizioni ambientali costanti, a differenza del materiale BP (Fig 1.8 -1.9).

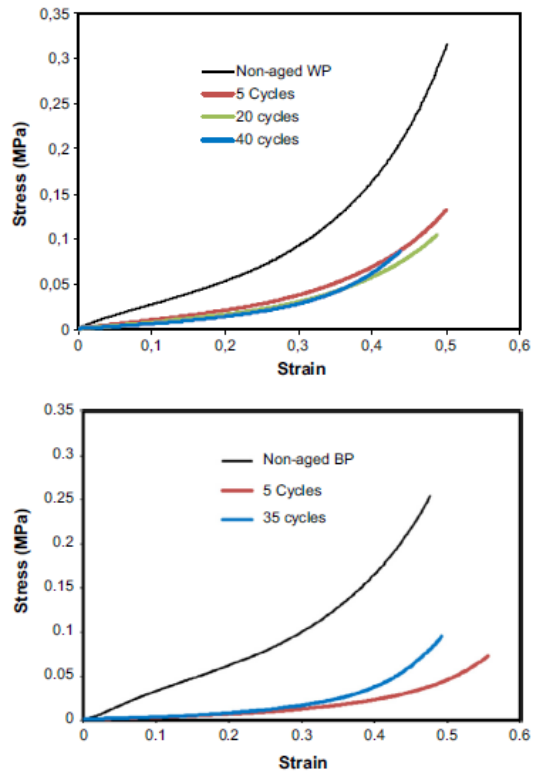


Fig 1.8 Curva sforzo deformazione per cicli di drying-wetting.

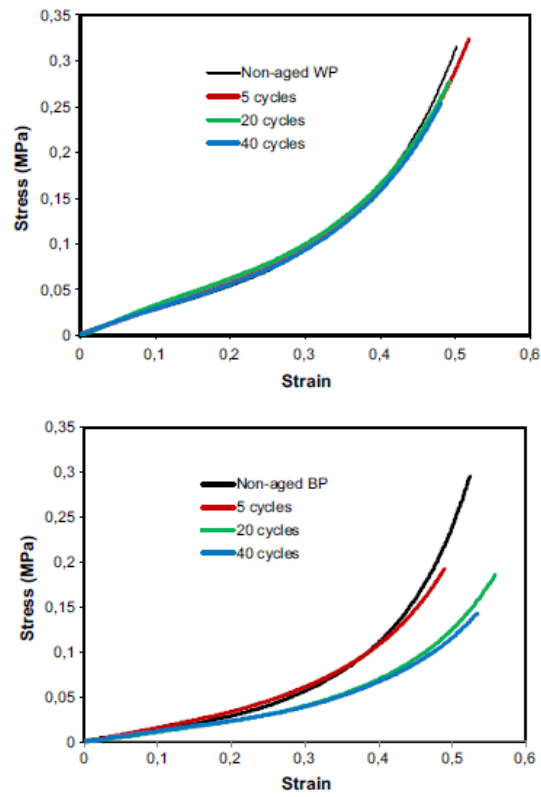


Fig. 1.9 Comportamento a compressione dopo cicli di gelo e disgelo.

In conclusione il materiale che ha evidenziato il miglior comportamento alle varie condizioni di stagionature è stato il WP; mentre in condizioni non invecchiate il materiale migliore è stato il BP, poiché è maggiormente sensibile all'assorbimento di umidità a causa della sua natura porosa. Da questo studio si evince che la durabilità dei materiali analizzati, richiede ulteriori studi riguardanti i diversi processi di invecchiamento, ma soprattutto sul trattamento delle fibre di orzo per ridurre l'assorbimento di umidità [26].

Il concetto di miniaturizzazione è alla base del progresso tecnologico da almeno cinquant'anni. Negli anni sessanta si utilizzava il suffisso "mini" che in confronto a "maxi" significava una riduzione di dimensioni dal metro a quelle del centimetro, e successivamente si affermò la contrapposizione macro-micro, ovvero la riduzione dalle dimensioni visibili a quelle invisibili a occhio nudo (un micrometro, o micron, è pari a un millesimo di millimetro). Al giorno d'oggi lo stretto legame con la miniaturizzazione è il nanometro (pari ad un milionesimo di millimetro), un limite estremo mediante il quale viene concepita la realtà. Attualmente, la continua ricerca di miniaturizzazione consente di capire che le dimensioni nanometriche non sono solamente un risparmio di materiali, ma anche che la materia alle dimensioni <nano> (sub-100nm) acquista proprietà diverse da quelle su scala macroscopica. Questa scoperta è stata consentita mediante l'impiego di strumentazioni sofisticate che permettono di osservare e di manipolare la nano-dimensione. Le prospettive rivoluzionarie associate alle nanotecnologie derivano dal fatto che, come detto in precedenza, a questi livelli di dimensioni, comportamenti e caratteristiche della materia cambiano drasticamente; per questo le nanotecnologie rappresentano un modo radicalmente nuovo di produrre per ottenere materiali, strutture e dispositivi con proprietà notevolmente migliorate o del tutto nuove.

Le nanotecnologie coinvolgono un ampio panorama applicativo, ma il settore dell'edilizia legato all'energetica ambientale, è l'ambito dove possono trovare spazio interessanti applicazioni nanotecnologiche in particolare nell'ambito della conversione e generazione di energia.

Attualmente in letteratura scientifica è possibile trovare numerosi studi riguardanti l'utilizzo di materiali isolanti, ma allo stato attuale le nanotecnologie propongono isolanti più efficienti e prestazionali. Le loro prestazioni sono tre volte superiori rispetto agli

isolanti convenzionali comunemente utilizzati in edilizia; sono caratterizzati da uno spessore minore, provenienti da risorse rinnovabili e a bassa tossicità.

I nanoisolanti è possibile trovarli sotto forma di aerogel, di pannelli isolanti a vuoto (VIP, Vacuum Insulation Panels) [27] che contengono aerogel o PCM (materiali a cambiamento di fase) .

La ricerca sempre maggiore di sistemi costruttivi votati al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, spinge sempre di più i produttori di intonaci all'introduzione di inerti isolanti naturali o di sintesi all'interno dei materiali, consentendo di sviluppare intonaci coibentanti. L'intonaco così come i pannelli vengono visti come elementi attivi per il controllo termico invernale ed estivo, e ciò è consentito attraverso la ricerca e sviluppo di formulazioni con aggregati vegetali, PCM ed aerogel.

In evidenza su tutti gli aspetti, è l'aerogel, una sostanza allo stato solido scoperta nei primi del 900, simile al gel nella quale la componente liquida viene sostituita da gas, come risultato finale si ottiene una schiuma solida con diverse proprietà, la più importante delle quali è l'efficacia nell'isolare [28].

È la sostanza solida meno densa conosciuta, la più leggera per metro cubo, formata dal 99,8% di aria e dal 0,2% di diossido di silicio (silice), principale componente del vetro; chiamato fumo ghiacciato, fumo solido o blu in quanto trasparente, al tatto risulta essere simile alla gomma-piuma. Tale prodotto, è mille volte meno denso del vetro e tre volte più pesante dell'aria, sopporta altissime temperature, con una conducibilità dell'ordine di 0,017-0,042 W/mK è un ottimo isolante termico. L'aerogel, essendo costituito essenzialmente da aria è considerato come il solido più leggero in natura (Fig. 1.10).



Fig. 1.10 Aerogel.

Per quanto riguarda la caratteristica di trasmettere suono e calore, è molto simile ai gas, motivo per il quale i valori di propagazione di suono e calore sono molto bassi. E' un inibitore convettivo in quanto l'aria non può circolare all'interno del reticolo. Possiamo avere differenti tipologie di aerogel, quello di silice per sua natura è un buon isolante per la conduzione di calore in virtù del fatto che la silice è uno scarso conduttore, d'altra parte un aerogel metallico avrà minori proprietà isolanti. L'aerogel di carbonio nei confronti dell'irraggiamento termico è un buon isolante, in quanto il carbonio assorbendo luce infrarossa è responsabile del trasferimento di calore, l'aerogel con le maggiori proprietà isolanti è quello di silice addizionato di carbonio. Il campo di applicazione dell'aerogel di silice è ancora limitato, per il suo prezzo elevato, ma numerosi studi confermano le sue evidenti proprietà termiche. Una ricerca ha messo in evidenza, l'impiego di particelle di aerogel, in sostituzione della sabbia all'interno di una miscela (Fig.1.11), durante la sperimentazione nella fase di realizzazione dei provini, alcuni campioni sono stati realizzati con granuli di aerogel trattati con un silano per migliorare il legame delle particelle all'interno della matrice realizzata, mentre in altri campioni presi in considerazione l'aerogel non ha subito modifiche (Tab 1.4 – 1.5).

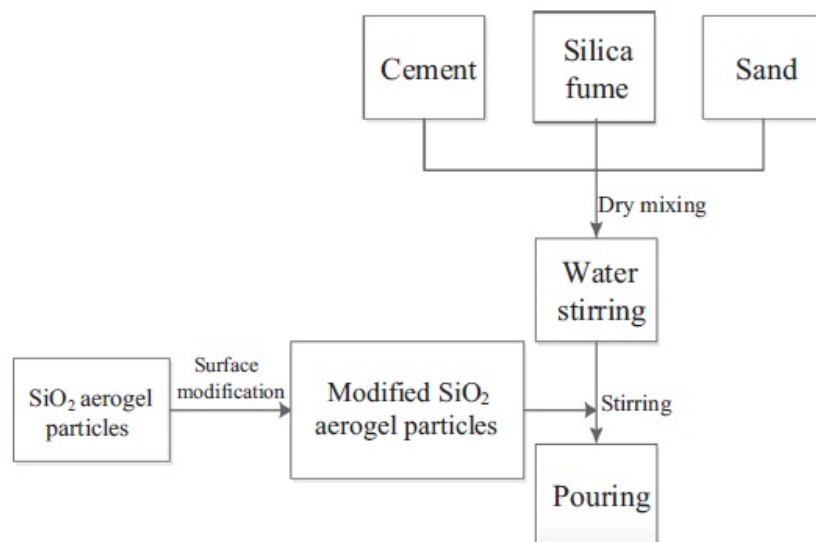


Fig. 1.11 Preparazione della malta a base aerogel.

Tab. 1.4 Mix di malte con aerogel non modificato.

Mix proportion of SiO₂ aerogel mortar (40 mm × 40 mm × 160 mm) (g).

Sample No.	Mix proportion							
	Cement/g	Silica fume/g	Water/g	Water reducing agent/g	Sand fraction		Aerogel fraction	
					Sand/g	Sand/ml	Aerogel/ml	Aerogel/(vol.%)
1	900	100	380	10	3000	1800	0	0
2	900	100	380	10	2700	1620	180	10
3	900	100	380	10	2400	1440	360	20
4	900	100	380	10	2100	1260	540	30
5	900	100	380	10	1800	1080	720	40
6	900	100	380	10	1500	900	900	50
7	900	100	380	10	1200	720	1080	60

Silica fume is the mass ratio of cement; Water reducing agent is the mass ratio of gelled material; Aerogel is the volume ratio of the replaced sand; The rest is the mass ratio.

Tab. 1.5 Mix di malte con aerogel modificato.

Mix proportion of modified SiO₂ aerogel mortar (300 mm × 300 mm × 30 mm) (g).

Sample No.	Mix proportion							
	Cement/g	Silica fume/g	Water/g	Water reducing agent/g	Sand/g	Fiber/%	Air-entraining agent/%	Powder/%
1	3600	400	1520	40	4800	0.1	0.05	0.5
2	3600	400	1520	40	4800	0.1	0.1	1
3	3600	400	1520	40	4800	0.1	0.15	1.5
4	3600	400	1520	40	4800	0.2	0.05	1
5	3600	400	1520	40	4800	0.2	0.1	1.5
6	3600	400	1520	40	4800	0.2	0.15	0.5
7	3600	400	1520	40	4800	0.3	0.05	1.5
8	3600	400	1520	40	4800	0.3	0.1	0.5
9	3600	400	1520	40	4800	0.3	0.15	1

The dosage of polypropylene fiber, air-entraining agent (AEA) and redispersible latex powder are the mass ratio of gelled material.

Dalle analisi svolte è possibile dire che le particelle di aerogel modificate sono più stabili e incorporate all'interno della matrice, le particelle non modificate al contrario sono sparse all'interno della malta (Fig. 1.12).

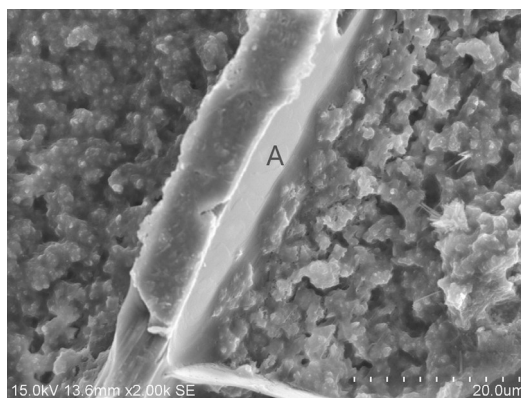


Fig. 1.12 Analisi al SEM.

L'immagine mostra una sezione di incollaggio di un singola particella di aerogel con la malta, questo indica l'effettivo legame tra le particelle di aerogel modificato e quindi la dimostrazione di una miscelazione omogenea e stabile. L'aerogel ha una densità minore dell'acqua e quindi il suo utilizzo abbassa inevitabilmente la densità totale di una

malta andando a rimpiazzare la sabbia, lo studio conferma che un incremento del volume di aerogel comporta un decremento delle prestazioni meccaniche; l'aggiunta di un 60% in volume di aerogel comporta un notevole diminuzione della conducibilità termica (Fig. 1.13 – 1.14 – 1.15).

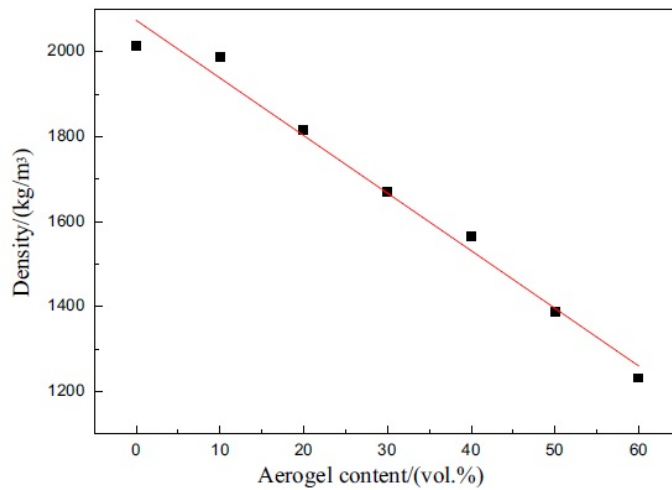


Fig. 1.13 *Densità della malta.*

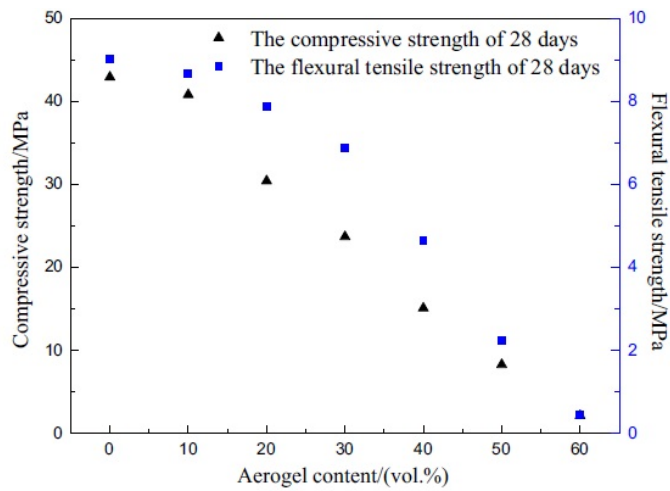


Fig. 1.14 *Proprietà meccaniche.*

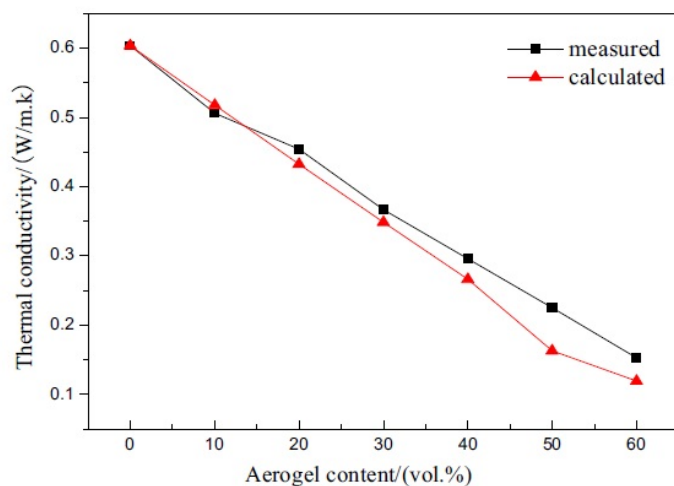


Fig. 1.15 Conducibilità termica.

Il ritiro autogeno è un fenomeno legato alla pasta cementizia, lo studio mostra anche un legame stretto e direttamente proporzionale tra il ritiro e l'incremento del contenuto di aerogel; la fluidità del malta aumenta con l'incremento di un aerante, mentre la conducibilità termica diminuisce. Al miglioramento delle performance termiche corrisponde un peggioramento di quelle meccaniche, la scelta di inserire delle fibre in polipropilene aiuta a raggiungere buoni livelli di resistenza meccanica. Sostituendo alla sabbia il 60% in volume di aerogel, si ottiene un decremento della densità, una sufficiente resistenza meccanica (2.15 MPa) e una conducibilità termica di 0,1524 W/mK. Con l'ottimizzazione del mix introducendo fibre (0,2%), aerante (0,05%) e resina in polvere (1%), la conducibilità termica decresce fino a 0,0859 W/mK [29].

L'aerogel di silice è la tipologia più comune e quella più utilizzata, una delle sue principali caratteristiche è quella di assorbire le radiazioni infrarosse. In questo modo è possibile ottenere materiali che lasciano entrare la luce solare all'interno delle costruzioni assicurando però l'isolamento termico, può essere anche impiegato come intonaco per la ristrutturazione di edifici già esistenti andando a intervenire sulle prestazioni termiche e acustiche [30].

Uno studio indaga sulle potenzialità degli intonaci a base aerogel impiegati per il rifacimento di facciate di edifici storici, valutando in sito misure sulla temperatura, umidità e flusso termico tra le varie stratigrafie degli elementi costruttivi analizzati prima e dopo l'applicazione dell'intonaco; le misure ottenute intendono offrire una comparazione sul comportamento termico della superficie trattata. Inoltre, dopo aver monitorato le

condizioni ambientali esterne e quelle dell'ambiente interno, l'obiettivo finale è stato quello di monitorare a lungo termine l'intervento eseguito.

Sulla facciata, sono state individuate e poi studiate 4 partizioni, la ricerca è iniziata prima con il monitoraggio dello stato di fatto composto da: intonaco a base gesso in interno, muratura, intonaco di calce e cemento in calce-cemento esterno; il monitoraggio sull'esistente è stato condotto per 5 mesi. Successivamente è stato applicato l'intonaco base aerogel con 4 differenti finiture per studiare gli effetti della permeabilità al vapore delle differenti superfici, prima dell'applicazione delle finiture, sono stati posizionati ulteriori sensori sulla superficie dell'intonaco a base aerogel e poi coperti con la finitura di 1 mm circa (Tab. 1.6 – 1.7).

Tab. 1.6 Confronto del valore di trasmittanza prima e dopo l'intervento di ristrutturazione.

Prior to retrofit	U_{AM} [W/m ² K]	U_{ID} [W/m ² K]
Wall partition F1	0.97	1.12
Wall partition F2	1.04	1.12
Wall partition F3	0.98	1.12
Wall partition F4	0.97	1.12
Post retrofit		
Wall partition F1	0.78	0.44
Wall partition F2	0.58	0.44
Wall partition F3	0.71	0.44
Wall partition F4	0.60	0.44

Tab. 1.7 Caratteristiche dei materiali utilizzati per il calcolo della trasmittanza.

Material	<i>Thickness</i> [mm]	λ [W/mK]
Original internal plaster	15	0.20
Original hollow-brick wall	250	0.40
Original external plaster	20	0.80
Aerogel-containing F222 plaster	40	0.029

Un aspetto importante è che le misurazioni post intervento per raggiungere dei valori stazionari e attendibili devono attendere la completa maturazione e asciugatura degli strati applicati, per questo motivo lo studio ha mostrato comunque la necessità di ulteriori

misurazioni per raggiungere lo stato stazionario dovuto alla completa asciugatura materiali applicati.

Altro aspetto studiato è la verifica di un miglioramento delle condizioni di comfort interno (differenza tra la temperatura interna e quella della superficie interna del muro), prima dell'intervento la differenza era di circa 4°C, dopo l'intervento meno di 1°C per 3 partizioni su 4; a causa delle condizioni stazionarie ancora non raggiunte, lo studio dovrà continuare il monitoraggio per almeno un altro anno. Un' un altro parametro studiato attraverso l'osservazione di eventuali fessurazioni, è stata la conferma dell'intervento senza rete di rinforzo [31-32].

Per natura gli aerogel sono idrofili, ma grazie alcuni trattamenti chimici possono essere resi idrofobi, questo trattamento nasce in virtù del fatto che se assorbono umidità possono andare incontro a modificazioni strutturali, come la contrazione e fino ad arrivare al deterioramento, ma rendendoli idrofobi è possibile prevenire questa degradazione. La principale difficoltà nell'impiego risiede nella sua natura, è particolarmente fragile e difficilmente "fruibile" allo stato primitivo: una volta ottenuto un cubo di aerogel, la sua estrema fragilità non lo rende né lavorabile né tanto meno utilizzabile per qualsiasi applicazione che richieda la benché minima manipolazione, da non trascurare l'aspetto negativo del suo costo elevato. Per questo motivo, per poter utilizzare al meglio le straordinarie caratteristiche termiche del prodotto, è stato brevettato un sistema per poter "intrappolare" l'aerogel all'interno di una struttura fibrosa [33].

Restando nell'ambito dei nanoisolanti, ma uscendo dal concetto di intonaco, degni di essere menzionati per il loro potere isolante sono i VIP (Vacuum Insulation Panels), pannelli isolanti sottovuoto, costituiti da un involucro ermetico in alluminio che chiude e sigilla una schiuma di acido silicico, senza aria. Sono tra i materiali più performanti allo stato attuale con una conducibilità termica di 0,003-0,005 W/mk. Il loro potere isolante è maggiore di cinque-dieci volte rispetto a quello dei materiali termoisolanti comunemente utilizzati in edilizia [34].

I PCM (Phase Change Materials) sono materiali accumulatori di calore latente, che mediante il fenomeno della transizione di fase assorbono i flussi energetici entranti, immagazzinando grandi quantità di energia e mantengono costante la propria temperatura. Sono solidi a temperatura ambiente, ma se la temperatura sale oltre una certa soglia (che

varia a seconda del materiale) subiscono il processo di liquefazione accumulando calore (latente di liquefazione) sottraendolo all'ambiente. Pertanto, quando accade al contrario che la temperatura scende, il materiale si solidifica e rilascia calore (latente di solidificazione).

Di origine naturale o artificiale hanno temperatura relativa al punto di fusione molto vicina a quella di comfort termico ottimale per questo motivo vengono usati in edilizia con lo scopo di ottenere il risparmio energetico (Fig.1.16).



Fig. 1.16 PCM.

Risultati positivi si sono visti nella sperimentazione di pannelli sia in cartongesso che in legno, intonaci, sistemi di facciata vetrati o in plexiglas, isolanti termici, impianti di riscaldamento e di raffrescamento passivo, collettori solari e scambiatori di calore.

Comunemente in edilizia le capsule di PCM vengono miscelate con materiali porosi quali cemento e gesso o inseriti in contenitori rigidi e flessibili in plastica o metallo, con cui possono essere poi realizzate le pareti degli edifici. Studi dimostrano l'effetto dell'aggiunta di PCM in microcapsule in un intonaco, in base ai risultati ottenuti si può affermare che la capacità di accumulo termico dell'intonaco è molto accresciuta. Quando la temperatura ambientale aumenta abbastanza da raggiungere la transizione di temperatura solida-liquida, il materiale a cambiamento di fase PCM cambia stato da solido a liquido con un comportamento endotermico (calore latente), limitando così il flusso di calore verso l'interno dell'edificio. Al contrario, quando la temperatura ambientale diminuisce, il PCM, che si trova nello stato liquido, può raggiungere la temperatura di transizione solido-liquida (temperatura di scioglimento) e passare allo stato solido rilasciando energia (processo

esotermico). Tale comportamento ritarda la tendenza al raffreddamento all'interno dell'edificio. I PCM possono essere integrati nei materiali edili in tre modi: incorporazione diretta, impregnazione o incapsulazione.

Recentemente, sono stati condotti alcuni studi riguardanti l'incorporazione dei PCM microincapsulati in differenti materiali edili, come ad esempio intonaci, malte cementizie, pareti o pavimenti in calcestruzzo. Questi studi ambiscono a valutare il potenziale dell'integrazione di un materiale a cambio di fase in pareti e/o involucri edilizi, al fine di aumentare la sua inerzia termica per migliorare le prestazioni energetiche; a questo scopo, è importante sviluppare un modello matematico per riprodurre il comportamento termico. Sono state eseguite misurazioni con il guarded hot plate method, misurando le variazioni di temperatura e flusso di calore durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento del campione.

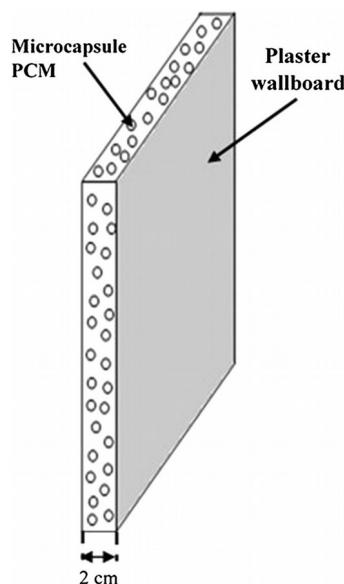


Fig. 1.17 Realizzazione campione.

Intonaco miscelato con paraffina microincapsulata, il composto è stato costantemente miscelato a elevata velocità fino a quando il materiale a cambiamento di fase microincapsulato si è diffuso in maniera omogenea nell'intonaco (Fig. 1.17). Nella tabella, si evidenziano le proprietà termofisiche dei campioni realizzati con la variazione in percentuale di PCM, confrontate con le proprietà termiche ottenute con una tradizionale malta, un intonaco e polistirene (Tab. 1.8).

Tab. 1.8 Proprietà termofisiche dei materiali

Material	Plaster-PCM				Mortar	Plaster	Polystyrene
	90/10	85/15	80/20	70/30			
Thermal conductivity solid	0.266	0.178	0.113	0.0937	0.63	0.301	0.035
Thermal conductivity liquid	0.236	0.142	0.099	0.082	-	-	-
Heat capacity solid	915	1048	1157	1432	970	835	1392
Heat capacity liquid	725	773	977	885	-	-	-
Latent heat	11,265	14,417	21,611	25,284	-	-	-
Densities	1213	1122	1066	991	2000	1292	31

In sintesi è possibile dire che la trasmissione di calore si è rivelata più ridotta nel caso di intonaco - pannello con materiale a cambiamento di fase (PCM), paragonato a un classico materiale edilizio (malte ed intonaci). [35].

Questi prodotti, rappresentano una soluzione tecnologica innovativa nella progettazione di edifici, in quanto realizzano un valido sistema per regolare le variazioni giornaliere della temperatura ambiente riducendo i picchi di temperatura interna, e quindi i consumi energetici che servono alla climatizzazione ambientale.

Un PCM per poter essere utilizzato in edilizia dovrebbe possedere tali caratteristiche:

- Temperatura di fusione attorno ai 25 °C;
- Elevato calore di transizione di fase (liquefazione/solidificazione);
- Basso prezzo;
- Non essere tossico, corrosivo o igroscopico;
- Essere disponibile sul mercato in tali quantità da poter essere incorporato nei normali materiali edilizi [36].

Attualmente i PCM più sperimentati in edilizia e sul mercato, sono i composti organici paraffinici e idrocarburi ottenibili come sottoprodotti della raffinazione del petrolio o per polimerizzazione (a temperatura ambiente hanno una consistenza simile a quella della cera), e alcuni inorganici come sali idrati. I sistemi di contenimento utilizzati sono il macro e micro incapsulamento e l'immersione in matrici porose. E' stato sviluppato uno speciale intonaco caricato con una piccola quantità di microcapsule contenenti una paraffina il cui cambiamento di fase avviene ad una temperatura compresa tra 23° e 26°; tale intonaco è dotato di una capacità termica 5 volte superiore di normale intonaco per unità di superficie [37 - 38 - 39]. Il vantaggio principale legato dell'impiego di questi materiali è quello di consentire il comfort termico ottimale sia in inverno che in estate, grazie al mantenimento della temperatura vicina a quella di fusione, compresa circa tra i 18 e i 25 gradi. Purtroppo, però ci sono anche alcuni inconvenienti che, per il momento, limitano la loro

diffusione. Tali materiali risultano essere molto infiammabili, per cui il loro impiego viene limitato solo a piccole porzioni di componenti. La loro stabilità nel tempo viene garantita per circa 20 anni e i costi sono molto elevati [40].

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Urge-Vorsatz, L.F. Cabeza, S. Serrano, C. Barreneche, K. Petrichenko, *Heating and cooling energy trends and drivers in buildings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41 (2015), 85–98.
- [2] S.Barbero, M. Dutto, C. Ferrua, A. Perenoa, *Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison*, Energy and Buildings, 77 (2014), 40–47.
- [3] A.M. Papadopoulos, *State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments*, Energy and Buildings, 37 (2005) 77–86.
- [4] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón, *Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties*, Construction and Building Materials, 34 (2012), 179–185.
- [5] Abdel Monem Mohamed Soltan, Wolf-Achim Kahl, Fawzia Abd EL-Raouf, Baher Abdel-Hamid El-Kaliouby, Mohamed Abdel-Kader Serry, Noha Ali Abdel-Kader, *Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay*, Journal of Cleaner Production, 117 (2016), 139 -149.
- [6] V. Corinaldesi, J. Donnini, A. Nardinocchi, *Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building*, Construction and Building Materials, 94 (2015), 337–345.
- [7] S. Gutierrez-Gonzalez, J. Gadea, A. Rodriguez, C. Junco, V. Calderon, *Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes*, Construction and Building Materials, 28 (2012), 653–658.
- [8] EN 998-1: *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*
- [9] EN 13279: *Gypsum binders and gypsum plasters - Part 2: Test methods*

- [10] Joana Maiaa, Nuno M. M. Ramosa, Vasco P. De Freitas, Ângela Sousab, *Laboratory tests and potential of thermal insulation plasters*, Energy Procedia, 78 (2015), 2724 – 2729.
- [11] Niyazi Ugur Kockal, *Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars*, Construction and Building Materials, 124 (2016), 816–825.
- [12] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, J.L.Vivancos, *Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61(2016),70–85.
- [13] L.Bianco, V. Serra, S. Fantuccia, M. Dutto, M. Massolino, *Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results*, Energy and Buildings, 95 (2015), 86–91.
- [14] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin, *Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters*, Building and Environment, 96 (2016), 206-216.
- [15] E.Latif, S.Tucker, M. Anca Ciupala, D. Chitral Wijeyesekera, D. Newport, *Hygric Properties of hemp bio-insulations with differing compositions*, Construction and Building Materials, 66 (2014), 702–711.
- [16] C. Rode, R. Peuhkuri, K.K. Hansen, B. Time, K. Svennberg, J. Arfvidsson, et al., *Nordest project on moisture buffer value of materials*, in: AIVC Conf. Energy Perform. Regul., Brussels, 21e23 Sept, 2005.
- [17] ISO 24353: *Hygrothermal performance of building materials and products -Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation*.
- [18] M. Palumbo, F. McGregor, A. Heath, P. Walker, *The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plaster*, Building and Environment, 105 (2016), 245-252.
- [19] T. Ashour, H. Wieland, H. Georg, F.J. Bockisch, W. Wue, *The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings*, Materials and Design, 31 (2010), 4676–4685.
- [20] J. Lima, P. Faria, *Eco-efficient earthen plasters. The influence of the addition of natural fibers*, (2013) 1-10.

- [21] T. Ashour, H. Georg, W. Wu, *An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings*, Appl. Therm. Eng. 31 (2011) 293-303.
- [22] M. Maddison, T. Mairing, K. Kirsimäe, Ü. Mander, *The humidity buffer capacity of clay sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands*, Build. Environ. 44 (2009) 1864-1868.
- [23] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra, M. Dutto, *An integrated design approach to the development of a vegetal-based thermal plaster for the energy retrofit of buildings*, Energy and Buildings, 124 (2016), 46–59.
- [24] ANIT, Vol. 1 *I materiali isolanti*, S. Mammi, A. Panziera, 2005.
- [25] Alaa M. Rashad, *A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer*, Construction and Building Materials, 121 (2016), 338–353.
- [26] N. Belayachi, D. Hoxha, M. Slaimia, *Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation*, Construction and Building Materials, 125 (2016), 912–918.
- [27] M. Alam, H. Singh, S. Brunner, C. Naziris, *Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core*, Energy and Buildings, 69 (2014), 442–450.
- [28] S.S. Kistler, *Coherent expanded aerogels and jellies*, Nature, 127 (1931), 741.
- [29] Z. Liu, Y. Ding, F. Wang, Z. Deng, *Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel*, Construction and Building Materials, 122 (2016), 548–555.
- [30] R. Baetens, B. Jelle, A. Gustavsen, *Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review*, Energy and Buildings, 43 (2011), 761–769.
- [31] K. Ghazi Wakilia, Th. Stahlb, E. Heiduc, M. Schusc, R. Vonbanka, U. Pontc, C. Sustrc, D. Wolosiuk, A. Mahdavic, *High performance aerogel containing plaster for historic buildings with structured façades*, Energy Procedia, 78 (2015), 949 – 954.
- [32] Jingduo Fenga, Duyen Leb, Son T. Nguyenb, Victor Tan Chin Niena, Daniel Jewelle, Hai M. Duonga, *Silica–cellulose hybrid aerogels for thermal and acoustic insulation applications*, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 506 (2016), 298–305.

- [33] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, *Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review*, Energy and Buildings, 43 (2010), 761–769.
- [34] E. Osterman, V.V. Tyagi, V. Butala, N.A. Rahim, U. Stritih, *Review of PCM based cooling technologies for buildings*, Energy and Buildings, 49 (2012), 37–49.
- [35] M. Lachhe, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S. B. Nasrallah, *Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation*, Applied Thermal Engineering, 111 (2017), 49–59.
- [36] M. Karkri, M. Lachheb, F. Albouchi, S. Nasrallah, I. Krupa, *Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings*, Energy and Buildings, 88 (2015), 183–192.
- [37] M. Karkria, M. Lachheb, Z. Nógellová, B. Boh, B. Sumiga, M.A. AlMaadeed, A. Fethi, I. Krupa, *Thermal properties of phase-change materials based on high-density polyethylene filled with micro-encapsulated paraffin wax for thermal energy storage*, Energy and Buildings, 88 (2015), 144–152.
- [38] M. Kheradmand, M. Azenha, J. Aguiar, João Castro-Gomes, *Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings*, Energy, 94 (2016), 250–261.
- [39] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, J.J. Roux, *A review on phase change materials integrated in building walls*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011), 379–391.
- [40] Hussein Akeiber, Payam Nejat, Muhd Zaimi Abd.Majid, Mazlan A.Wahid, FatemehJomehzadeh, Iman Zeynali Famileh, John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes, Sheikh Ahmad Zaki, *A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60 (2016), 1470–1497.

2. STATO DELL'ARTE SUGLI INTONACI ECOSOSTENIBILI

Quando si parla di sostenibilità legata all'edilizia, è necessario mettere in evidenza due concetti strettamente correlati tra loro. Da un lato, se la costruzione e la gestione di un edificio comportano un'analisi dell'impatto ambientale nella sua totalità, dall'altro è possibile analizzare più dettagliatamente i singoli componenti e quindi ogni materiale impiegato. Attualmente i protocolli disponibili valutano la sostenibilità di un edificio nella sua interezza, pertanto, per questo motivo non valutano dettagliatamente, e quindi trascurano gli effetti che i singoli materiali impiegati in edilizia provocano sull'impatto ambientale.

Valutare la sostenibilità di un prodotto, nella fattispecie di un intonaco, è un concetto complesso e non scontato, che va rapportato a tutte le combinazioni di fattori che interagiscono tra il prodotto e l'ambiente che lo circonda durante tutto il suo ciclo di vita, dalle materie prime al prodotto finito fino alla sua completa dismissione. Al fine di valutare in maniera univoca l'impatto che un intonaco ha sull'ambiente è necessario stabilire dei criteri di valutazione o una soglia di valori da rispettare.

Legata allo sviluppo sostenibile, tra le molteplici definizioni, la più significativa è la seguente: "Per sostenibilità si intende la capacità dell'umanità di rispondere alle esigenze del presente senza pregiudicare la capacità delle future generazioni di rispondere alle loro necessità". - Our Common Future, The World Commission on Environment & Development, 1987.

L'edilizia è uno dei settori con maggior impatto ambientale, per questo motivo condividere e diffondere questo principio significa diffondere negli esseri umani la consapevolezza di opportunità e non di rinunce legate ad un nuovo stile di vita.

Ottimizzare le risorse, come ad esempio, privilegiare la scelta di materie prime naturali e riciclabili per gli intonaci, consente una notevole diminuzione di sprechi e conseguentemente la riduzione di danni economici e ambientali, mettendo così a disposizione tali risorse per le future generazioni.

Secondo la norma ISO 15392 è possibile dividere la sostenibilità in tre principali ambiti: ambientale, economico e sociale:

- Dimensione Economica: capacità di generare reddito e lavoro. La sostenibilità economica viene valutata attraverso parametri che permettono di governare al meglio i vari aspetti di riduzione dei costi che vanno a sommarsi per creare il costo complessivo durante l'intero ciclo di vita dell'edificio;
- Dimensione Ambientale: capacità di mantenere qualità e riproducibilità delle risorse naturali. La sostenibilità ambientale viene valutata attraverso parametri che permettono di governare al meglio i vari aspetti di riduzione dei consumi e degli impatti ambientali;
- Dimensione Sociale: capacità di garantire condizioni di benessere e qualità della vita, equamente distribuite per classi e genere. La sostenibilità sociale e la qualità prestazionale vengono ulteriormente suddivise in requisiti più specifici che permettono di governare al meglio i parametri che caratterizzano il comfort e il benessere dell'utente [1].

Investire nell'edilizia sostenibile con singoli prodotti ecosostenibili è necessario al fine di:

- ridurre l'impatto ambientale causato dal settore edilizio riguardo in particolare ai consumi energetici, di acqua potabile, produzione di rifiuti anche con riferimento al ciclo di vita dei materiali e degli edifici;
- fornire una certificazione ambientale che renda visibile la qualità dell'edificio differenziandolo sul mercato immobiliare;
- stimolare la domanda di edifici sostenibili;
- incrementare la consapevolezza di proprietari, affittuari, progettisti e operatori immobiliari dei benefici di un edificio con elevate prestazioni ambientali.

La certificazione di sostenibilità ambientale è lo strumento che consente di dichiarare le prestazioni e gli impatti ambientali di un edificio sul territorio, includendo i consumi di energia che quell'edificio ha, non va confusa pertanto con la certificazione energetica [2].

Con l'avvento della green economy, è possibile osservare che al mondo esistono numerosi criteri e sistemi di valutazione legati alla certificazione della sostenibilità. Esistono due approcci valutativi della sostenibilità di un edificio: il metodo qualitativo a punteggio e quantitativo. Il primo metodo, si basa su requisiti definiti a cui corrispondono specifici pesi e punteggi la cui somma globale indica il livello di sostenibilità energetica e ambientale dell'edificio. Il secondo metodo, più dettagliato, che fa riferimento all'analisi LCA (Life Cycle Assessment) e valuta l'energia inglobata dal fabbricato durante l'intero arco di vita. Si tratta quindi di un bilancio ambientale rigoroso dell'intero processo edilizio compresa la

gestione e la fine vita dell'edificio. Protocolli volontari diffusi nel mondo come l'americano LEED, l'inglese BREEAM o il giapponese CASBEE rientrano tutti nel sistema valutativo a punteggio. In evidenza la certificazione LEED che riconosce le prestazioni degli edifici in settori chiave, come il risparmio idrico e energetico, il miglioramento della qualità ecologica degli ambienti interni, la riduzione delle emissioni, i materiali e le risorse impiegati e la progettazione del sito. Il LEED è il più importante sistema di valutazione delle prestazioni energetiche ed ambientali degli edifici, applicato a qualsiasi tipo di edificio, sia commerciale che residenziale, che comprende tutto il ciclo di vita dell'edificio stesso, dalla progettazione alla costruzione.

L'industria delle costruzioni, da studi europei, incide ampiamente sul totale delle materie prime utilizzate; pertanto i processi di estrazione, lavorazione, trasporto e installazione di materiali consumano ingenti quantità di acqua e di energia per questo motivo il concetto di riciclo e del riutilizzo dei materiali alla fine del ciclo di vita è il pilastro dell'edilizia sostenibile. Il metodo LCA (valutazione del ciclo di vita), definito dalle norme ISO 14040 e ISO 14044, è uno strumento in grado di valutare quali materiali sono più idonei per l'edilizia sostenibile mediante un'analisi che confronta l'impatto ambientale dei materiali utilizzati nelle costruzioni, mettendo in evidenza i fabbisogni di energia primaria (fasi di produzione, uso e smaltimento di un prodotto), impatto sul riscaldamento globale (kg equivalenti di CO₂) e la domanda di acqua necessaria per i processi di fabbricazione e di costruzione [3-4].

La valutazione del ciclo di vita, LCA (Life Cycle Assessment), è una procedura che permette di valutare i carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, individuando e quantificando i consumi di materia ed energia e le emissioni nell'ambiente.

La metodologia si basa su un approccio "integrale" secondo cui il prodotto è analizzato in ogni fase della sua vita, dall'estrazione e trasformazione delle materie prime, attraverso la produzione, il trasporto e l'utilizzo, fino al riciclo o alla dismissione e allo smaltimento. "Dalla culla alla tomba" è l'espressione più usata e rappresentativa dell'approccio LCA. E' un valido strumento di ricerca e sviluppo in quanto consente all'azienda produttrice di un materiale di individuare le fasi in cui si concentrano maggiormente le criticità ambientali di quel processo e quindi in quale fase poter intervenire per migliorare ed economizzare la produzione. Lo studio LCA di un materiale ha una funzione di supporto nei processi decisionali relativi a investimenti, sviluppo e confronto tra diversi prodotti,

pianificazione gestionale. Per tutti questi motivi precedentemente argomentati, nel campo scientifico sono stati condotti innumerevoli studi che hanno avuto come obiettivo quello di esaminare nuove possibilità nel settore dei materiali innovativi ecosostenibili.

L'idea di ridurre notevolmente l'impatto ambientale, ha contribuito allo studio e alla realizzazione di sperimentazioni su malte da intonaco che promuovono la sostituzione di materiali isolanti sintetici come il poliuretano e il polistirolo rigido, con materiali isolanti naturali o riciclati come sughero, fibra di legno e lana di pecora e fibre vegetali. Va sottolineato che la produzione di poliuretano richiede elevati consumi di energia primaria e acqua, mentre la lana di pecora emetterebbe il 98% in meno di CO₂, se venisse incenerita alla fine del suo ciclo di vita [5]. La lana di vetro, pur non essendo un isolante naturale, viene però prodotta dal riciclo delle bottiglie di vetro, mediante consumi energetici modesti, ed è eventualmente riutilizzabile. Pertanto materiali come acciaio, alluminio, poliuretano, rame, vetro e PVC devono essere riciclati e riutilizzati ove possibile per ridurre l'estrazione di materie prime [6 – 7] (Fig. 2.1 – 2.2).

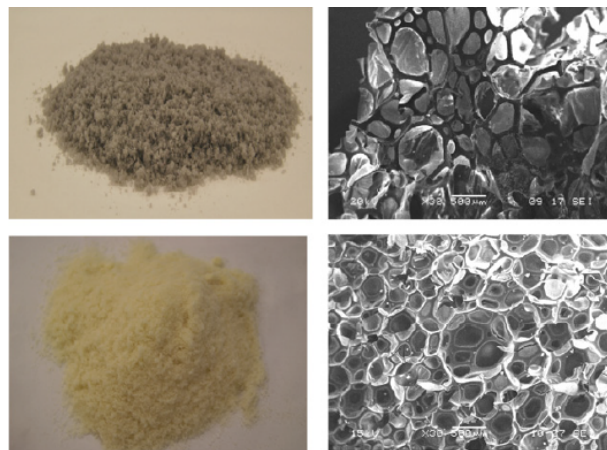


Fig. 2.1 Rifiuti di schiuma poliuretanicca – SEM.

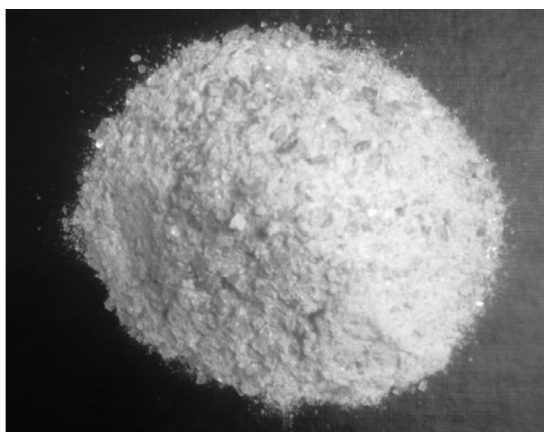


Fig. 2.2 Vetro riciclato proveniente da rifiuti.

In letteratura precedenti studi hanno previsto l'introduzione di materiali polimerici all'interno di matrici di intonaco con aggregati leggeri, ad esempio intonaci o gesso alleggeriti con sughero naturale (scarto in forma granulare) o il sughero artificiale (polistirene pre-espanso in sfere) o miscele di gesso alleggerito con materiale plastico espanso in granuli. L'impiego del poliuretano all'interno di malte alleggerite è un impiego recente, gli scarti delle schiume polimeriche sono stati introdotte all'interno di miscele di intonaci con lo scopo di ottenere materiali alleggeriti attraverso il riutilizzo di materiale di scarto che altrimenti avrebbe un elevato costo di smaltimento come rifiuto. Questi studi, vogliono dimostrare la compatibilità della schiuma poliuretanic di scarto all'interno di intonaci per la realizzazione di un nuovo materiale, ad uso industriale, con proprietà termiche isolanti (Tab. 2.1).

Nello studio preso in analisi, sono state utilizzate due differenti tipologie di scarto del poliuretano:

- scarto dell'industria automobilistica;
- scarto delle costruzioni per l'isolamento termico.

Tab. 2.1 Campioni analizzati.

Series no.	Sample	Volume ratio (PFW/plaster)	w/(p + PFW)	Setting time (min)	Density at 7 days-wet specimens (kg/m ³)	Density at 7 days-dry specimens (kg/m ³)	Water retention (%)
Reference	Y0	0/1	0.40	10.3	1713	1477	16.0
Series I	Y0.5G	0.5/1	0.46	13.0	1620	1323	20.1
	Y1G	1/1	0.57	18.0	1493	1140	23.9
	Y2G	2/1	0.94	28.0	1272	795	32.3
	Y3G	3/1	1.36	39.0	1135	590	36.9
	Y4G	4/1	1.70	42.0	1030	516	34.9
Series II	Y0.5W	0.5/1	0.52	10.0	1583	1258	22.0
	Y1W	1/1	0.60	12.0	1483	1114	25.0
	Y2W	2/1	0.82	21.0	1335	879	30.9
	Y3W	3/1	1.15	32.0	1181	674	34.3
	Y4W	4/1	1.45	32.5	1073	535	36.4

La caratterizzazione degli intonaci alleggeriti è stata condotta stabilendo i seguenti parametri:

- è stata fissata una consistenza uguale per tutte le miscele in accordo alla EN 13279-2 [8], utilizzando il metodo della tavola a scosse e fissando un diametro di circa 165+/-5 mm come riferimento per una buona lavorabilità per tutte le miscele;
- sono stati analizzati il tempo di presa con il metodo di Vicat;
- densità allo stato fresco e indurito;
- resistenze meccaniche a 7 e 28 gg;
- adesione a materiali ceramici;
- analisi al SEM per studiare la microstruttura dei materiali e il loro comportamento;
- prova di durezza (Shore C Hardness);
- proprietà termiche (EN 12667) [9].

Dalla campagna di prove è emerso che maggiore è l'inserimento in volume di poliuretano, maggiore è la richiesta d'acqua per mantenere una buona lavorabilità, questo a causa dell'elevata porosità del poliuretano. Infatti si è registrata un'elevata capacità di ritenzione d'acqua nei campioni con il maggiore quantitativo di poliuretano. Inoltre, è stato verificato che l'aumentare di porzioni di poliuretano riduce la densità del materiale, il tutto provocato da due fattori: incremento del rapporto acqua/miscela e elevata porosità del poliuretano.

In generale le prestazioni meccaniche dipendono dalla densità del materiale e dalla granulometria: polimeri di granulometria fine mostrano maggiore resistenza meccanica, ma in questa sperimentazione, non sono state riscontrate differenze importanti in funzione della granulometria tra le diverse tipologie di poliuretano impiegate. E' interessante analizzare come la forza di aderenza diminuisce proporzionalmente alla percentuale di schiuma poliuretana (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Adesione, perdita di adesione e durezza dei campioni.

Series no.	Sample	Adhesion (kg/cm ²)	Loss of adhesion (%)	Hardness (Shore C)
Reference	Y0	4.6	0	93
Series I	Y0.5G	4.1	10.9	89
	Y1G	2.5	45.3	77
	Y2G	1.6	65.2	32
	Y3G	1.3	71.7	14
	Y4G	0.6	87.0	10
Series II	Y0.5W	4.5	2.2	89
	Y1W	3.7	19.6	81
	Y2W	2.0	56.5	40
	Y3W	1.6	65.2	26
	Y4W	1.2	73.9	12

La forza di adesione decresce all'aumentare del poliuretano incluso. Oltre al valore occorre analizzare il tipo di frattura, in tutti i campioni la rottura è di tipo coesivo, quindi l'adesione tra l'intonaco e il supporto è idonea, e la rottura avviene nell'interfaccia del materiale stesso tra l'intonaco e il poliuretano (Fig. 2.3). Questo fatto, può essere spiegato dalla crescente domanda di acqua richiesta all'aumentare della percentuale di polimero, che induce ad una maggiore porosità e una minore omogeneità nella malta, abbassando così la coesione tra l'intonaco e il poliuretano.



Fig. 2.3 Esempio di rottura coesiva.

Analizzando le matrici al SEM è stato osservato che vi è una buona interfaccia di adesione tra il legante e i granuli di poliuretano, il poliuretano con le sue porosità, viene inglobato all'interno del legante formando un prodotto finale coeso, stabile meccanicamente, senza reazioni chimiche sull'interfaccia (Fig. 2.4 – 2.5).

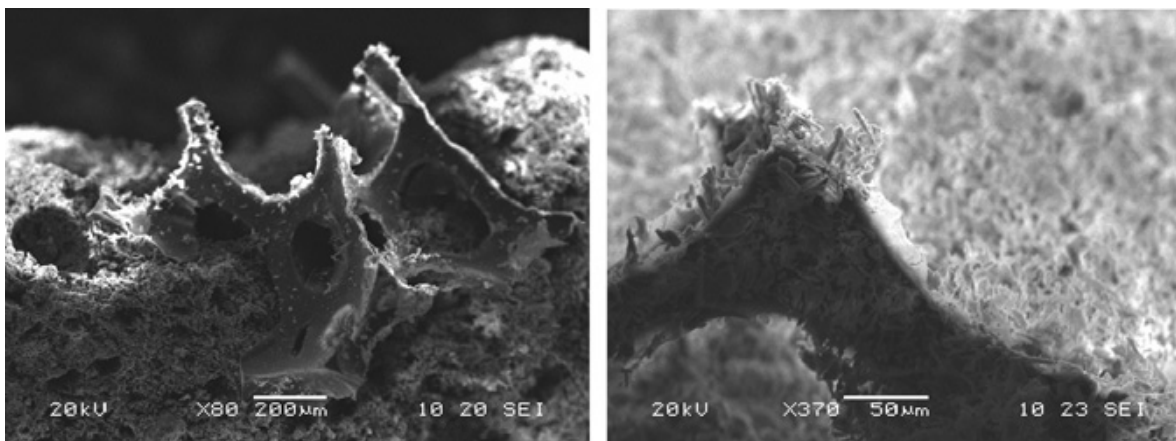


Fig. 2.4 – 2.5 SEM dell'interfaccia intonaco-poliuretano.

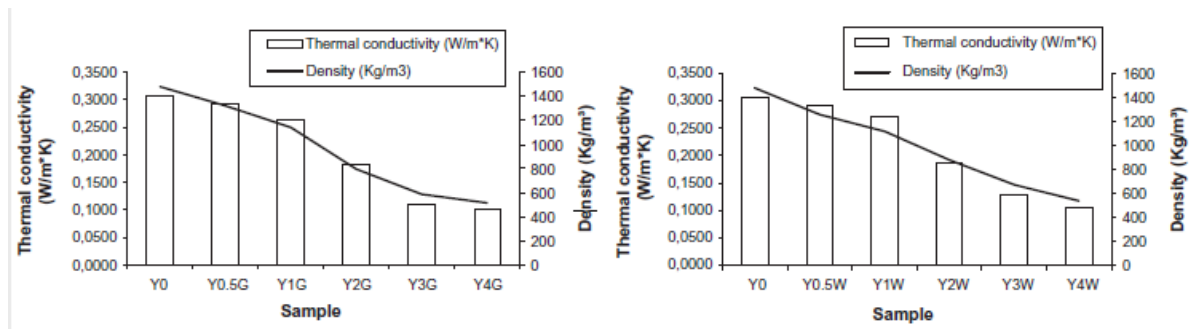


Fig. 2.6 Conducibilità termica vs. densità per entrambe le serie.

Dalle prove di conducibilità termica (Fig. 2.3; Tab. 2.3), i risultati indicano che il comportamento termico del materiale è accettabile, e non vi è alcun motivo, in linea di principio, per non usare questi intonaci di riciclo. I dati analizzati dimostrano una relazione tra il parametro della conducibilità termica, la quantità di poliuretano incluso nell'intonaco e la densità, aumentando la quantità di poliuretano si hanno effetti positivi sulla conducibilità termica.

Tale fenomeno è riconducibile alla struttura cellulare chiusa che la schiuma di poliuretano crea all'interno della matrice, i pori contengono aria, quindi per questo motivo si ottiene con una conducibilità termica inferiore agli altri componenti.

Tab. 2.3 Densità a 7 giorni e conducibilità termica.

Sample	Dry density at 7 days (kg/m³)	Thermal conductivity (W/m² K)
Plasterwork with perlites	-	0.1800
Plasterwork	-	0.3000
Concrete with lightweight fines	-	0.3300
Y0	1477	0.3057
Y0.5G	1323	0.2931
Y1G	1140	0.2626
Y2G	795	0.1828
Y3G	590	0.1105
Y4G	516	0.1014
Y0.5W	1258	0.3160
Y1W	1114	0.2701
Y2W	879	0.1861
Y3W	674	0.1285
Y4W	535	0.1039

Da un'analisi generale dei risultati ottenuti dall'utilizzo delle due schiume poliuretaniche di scarto differenti, emerge che la tipologia derivante dall'industria delle costruzioni è la più performante, questo è dovuto alla dimensione granulometrica più fine, che comporta un

incremento della superficie specifica di contatto con l'acqua, riducendo l'attrito tra le particelle e conducendo a migliori performance [5].

Nel precedente capitolo, si è parlato anche di intonaci realizzati con l'uso di fibre naturali provenienti da residui agricoli e quindi con una minor richiesta di energia produttiva, tali fibre, porose per natura, contribuiscono ad incrementare le proprietà termiche (Fig. 2.7). Grazie al suo bassissimo costo, ma anche alla non indifferente porosità, la paglia di scarto ha aumentato di gran lunga il suo impiego anche nell'ambito del restauro storico, grazie inoltre a nuovi additivi che aumentano le sue performance termiche e acustiche e alla notevole resistenza al fuoco [10].

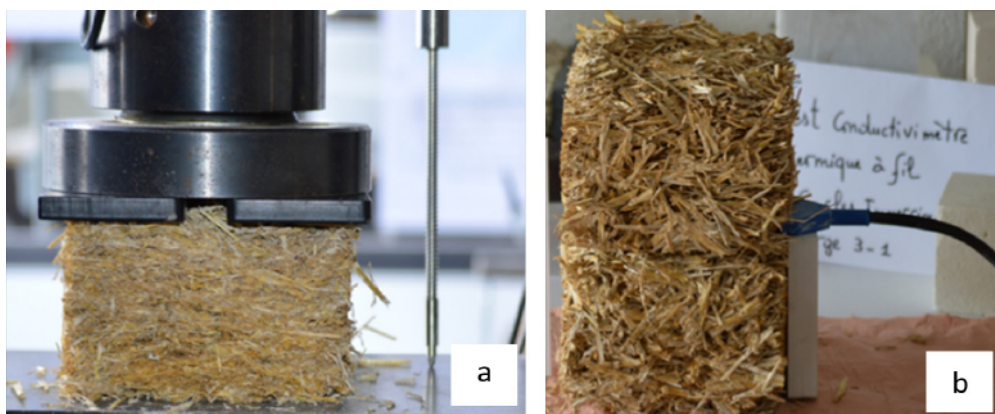


Fig. 2.7 Prova di compressione meccanica (a); prova di conducibilità termica (b).

Il settore dell'edilizia sostenibile è in rapida evoluzione e in costante ascesa, per questo il passaggio ad una tale edilizia grazie all'impiego di prodotti sostenibili sta diventando una necessità e non più una scelta, con lo scopo finale di diminuire il consumo di energia, dare maggior valore alle case, migliorare la qualità della vita, ridurre le emissioni e la dipendenza energetica del nostro paese. Infatti particolare attenzione viene mostrata nei riguardi della progettazione, ricercando la biocompatibilità dei materiali e il rispetto di normative tecniche restrittive. A livello nazionale e internazionale, si sta sperimentando, in alternativa ai materiali tradizionali, l'impiego di aggregati provenienti da materiali di scarto, con conseguenti benefici economici ed ambientali. La crescente attenzione alle problematiche ambientali nel campo delle costruzioni civili, ha reso negli ultimi periodi sempre più difficoltoso il prelievo da cava degli inerti e quindi delle materie prime in generale. Inoltre la gestione dei rifiuti solidi sta diventando uno dei principali problemi

ambientali che interessa molte nazioni. Da alcuni anni le sperimentazioni hanno coinvolto, in alternativa ai materiali tradizionali, l'impiego di detriti provenienti dalle demolizioni dei manufatti edilizi, l'utilizzo, previo adeguato trattamento, di tali scarti nel campo dell'ingegneria civile, può far conseguire benefici economici ed ambientali in relazione alla minore necessità del loro trasporto a rifiuto, del minore impegno di spazi da destinare alle discariche autorizzate, e del notevole risparmio di materiali di cava tradizionali. Tra gli ostacoli che si oppongono ad una diffusione delle tecniche del riciclaggio, permane la lentezza delle Amministrazioni a recepire le innovazioni tecniche ed a modificare i capitoli, ormai datati, nei quali si preferisce fare riferimento all'impiego esclusivo degli usuali materiali collaudati da una lunga tradizione. Nel caso dei materiali di scarto edilizio, se provenienti da idonei impianti di frantumazione, trattamento ed omogeneizzazione, le caratteristiche prestazionali sono per molti aspetti di gran lunga superiori a quelle dei migliori misti naturali ed i campi d'impiego abbracciano quasi tutti quelli dei materiali sciolti da costruzione.

È importante sottolineare che sotto la denominazione di inerti di riciclo in edilizia, sono da comprendere tutti i materiali di rifiuto o scarto prodotti nei processi di realizzazione, di eliminazione e di trasformazione di opere nel campo dell'edilizia e delle opere civili. Per essere convenientemente avviato al reimpiego, il materiale deve essere sottoposto ad un "trattamento", cioè una serie di operazioni che possono essere sinteticamente intese come processi successivi di selezione, frantumazione, deferrizzazione, asportazione di materiali leggeri, e omogeneizzazione del prodotto finale. Per il materiale opportunamente trattato, si può pensare ad una molteplicità di utilizzi nell'ambito delle costruzioni in terra in genere, delle costruzioni stradali, ferroviarie ed aeroportuali, delle costruzioni civili (magroni e calcestruzzi armati o non), della prefabbricazione (elementi strutturali e di arredo stradale od ambientale) contemplando tutti i gradi di passaggio dagli aggregati non legati, ai misti legati, ai calcestruzzi ed ai conglomerati bituminosi. Queste nuove applicazioni hanno aperto la strada a sempre più innovative sperimentazioni nel campo dei materiali edilizi, cercando di coniugare le esigenze ambientali con quelle economico-produttive. Già da alcuni anni i materiali di scarto vengono impiegati come aggregati nel calcestruzzo ma soprattutto nelle malte da intonaco; nel tempo è cresciuto il bisogno di utilizzare questi materiali di scarto per produrne prodotti per l'ingegneria delle costruzioni, ciò è giustificato dal fatto che la gestione dei rifiuti solidi sta diventando uno dei principali

problemi ambientali e interessa molte nazioni, come è confermato da alcuni dati messi in evidenza da importanti riviste scientifiche del settore. Diversi materiali recuperabili dai rifiuti solidi quali, ad esempio, le materie plastiche, il vetro, la cellulosa, il legno, ecc., sono dotati di estrema versatilità e/o peso contenuto, durabilità, resistenza agli attacchi chimici, eccellenti proprietà di isolamento termico ed elettrico. Tali proprietà possono essere utilmente sfruttate per costruire nuovi materiali compositi innovativi ed eco-sostenibili. Uno sviluppo sostenibile delle costruzioni prevede l'uso razionale delle risorse naturali, conseguito anche attraverso l'impiego di sottoprodotti industriali e materiali di scarto, che comporta un minor impatto ambientale conseguente alla ridotta esigenza sia di attività estrattiva sia di aree per discarica. Le malte da intonaco costituiscono una possibile soluzione di tali problemi ambientali per la loro capacità di incorporare scarti solidi di diversa provenienza mantenendo un accettabile e talora addirittura migliore livello qualitativo.

Solo negli Stati Uniti ogni anno vengono prodotti 5 miliardi di tonnellate di rifiuti solidi, di questi circa 270 milioni sono pneumatici dismessi e circa altri 13,5 miliardi di kg sono plastica. Approssimativamente solo l'America e l'Europa producono 600 milioni di rifiuti solidi tutti provenienti da pneumatici dismessi.

Da questi dati si evince che è di vitale importanza trovare una soluzione per il corretto smaltimento di questi rifiuti, sia da un punto di vista ecologico sia da quello economico. Le possibili strade da percorrere sono essenzialmente rappresentate dai tre seguenti procedimenti: stoccaggio in siti adeguati, distruzione tramite incenerimento e riciclaggio per la produzione di nuovi materiali.

La prima alternativa, lo stoccaggio, non è più una soluzione accettabile, soprattutto nel caso dei pneumatici usati, poiché oltre a rappresentare una minaccia ambientale sono anche una fonte pericolosa di incendi e di malattie, essendo luogo di rifugio per animali e insetti. Inoltre lo stoccaggio dei rifiuti solidi comporta la ricerca e l'allestimento di siti adeguati, i quali però vanno diminuendo velocemente.

Il secondo procedimento riguarda l'incenerimento dei pneumatici di scarto per produrre vapore e quindi energia, ma questo metodo produce grandi quantità di fumi e d'inquinamento, perciò in alcuni paesi è stato proibito dalla legge. La migliore strada da percorrere è sicuramente quella del riciclaggio dei materiali solidi di scarto, i quali in questo modo possono essere riutilizzati per produrre nuovi materiali e prodotti.

Per quanto riguarda il riciclaggio delle gomme, sono stati intrapresi diversi studi il cui scopo è investigare le proprietà di nuovi materiali creati utilizzando questi scarti e trovarne il migliore campo di applicazione, dall'industria alle costruzioni.

Originariamente la gomma era un materiale naturale ottenuto dalla lavorazione del succo di alberi tropicali. Al giorno d'oggi, la gomma naturale è stata quasi interamente sostituita da composti sintetici ottenuti da materie prime petrolchimiche, attraverso la polimerizzazione o la copolimerizzazione di determinati monomeri. Pur essendo diverse nella composizione, le gomme sintetiche (elastomeri) presentano un comportamento elastico analogo a quello della gomma naturale. Sono inoltre materiali molto resistenti e, riferendoci particolarmente alla gomma dei pneumatici, sono progettati per avere la maggiore durata possibile (per questo stesso motivo, gli elastomeri possiedono anche un'elevata resistenza all'azione dei microrganismi, che impiegano più di un secolo prima di riuscire a distruggerli). Esistono vari tipi di gomme sintetiche, ognuna particolare per caratteristiche e impieghi, come ad esempio l'SBR (stirene-butadiene), ricavato in larga parte dai pneumatici dimessi. La gomma riciclata pre-consumo deriva principalmente dagli scarti dell'industria calzaturiera (SBR impiegato nella realizzazione delle soles). La maggior parte del post-consumo viene invece ottenuto dal recupero dei pneumatici usati (SBR), vecchie guarnizioni di infissi o di elettrodomestici, cruscotti e paraurti, tubi flessibili o da pavimentazioni e rivestimenti temporanei dimessi [11].

Con questo nuovo approccio, nasce l'esigenza di studiare e utilizzare in edilizia materiali da costruzione come gli intonaci ecosostenibili, in letteratura scientifica l'impiego nelle costruzioni di polveri e granulati di gomma provenienti da pneumatici di scarto, ha il vantaggio di trasferire agli intonaci le proprietà di elasticità, bassa densità e stabilità chimica proprie della gomma.

In generale allo stato attuale le ricerche fin qui svolte sull'impiego della gomma di scarto hanno evidenziato:

- l'influenza sulla lavorabilità delle miscele fresche e sul comportamento meccanico allo stato indurito [12-13];
- l'influenza sul comportamento elastico [14];
- lo studio delle proprietà termiche e di comportamento al fuoco [15-16];
- comportamento al fuoco [17];
- la stabilità chimica dei cls gommati [18].

Non esistono molte informazioni in letteratura scientifica sull'uso di inerti in gomma riciclata in matrici per intonaci. Gli studi sono stati condotti sull'introduzione di una sola dimensione di granulo di gomma aggiunta a malte, intonaci e cementi, questa aggiunta solitamente ha comportato una riduzione delle esistenze ma un incremento delle performance termiche e acustiche.

Lo studio preso in analisi, ha trattato l'aggiunta di gomma in piccole % e con 3 differenti granulometrie, è stato preso un intonaco di riferimento al quale è stata inserita la gomma al posto del tradizionale inerte; è stata evidenziata l'influenza della gomma in varie % e per 3 differenti granulometrie (0–0.6 mm, 0.5–2.5 mm e 2.5–4.0 mm), i risultati hanno mostrato un decremento delle resistenze meccaniche ma un miglioramento del modulo elastico. Per analizzare l'influenza delle proporzioni, la percentuale di gomma in peso è stata modificata in funzione della quantità di gesso nella miscela tradizionale nei valori di 30%, 40%, 50% e 60% (Fig. 2.8; Tab. 2.4).



Fig. 2.8 Sezione di campioni classificati in funzione della % in peso e granulometria della gomma.

Tab. 2.4 Denominazione dei campioni in funzione delle proporzioni di gomma e granulometria.

Designation	Water (g)	Plaster (g)	Rubber (g)	Water/plaster ratio weight (w/p)	Rubber particle size (mm)
R1	580	1000	0	0.58	
C-30-0.6	530	700	300	0.53	
C-40-0.6	600	600	400	0.60	0.0-0.6
C-50-0.6	670	500	500	0.67	
C-60-0.6	770	400	600	0.77	
C-30-2.5	450	700	300	0.45	
C-40-2.5	490	600	400	0.49	0.5-2.5
C-50-2.5	570	500	500	0.57	
C-60-2.5	690	400	600	0.69	
C-30-4.0	500	700	300	0.50	
C-40-4.0	560	600	400	0.56	2.5-4.0
C-50-4.0	570	500	500	0.57	

I campioni sono stati sottoposti a diverse prove al fine di analizzare:

- densità;
- durezza;
- flessione/compressione;
- conducibilità termica.

Per quanto riguarda la durezza è stato osservato che:

- all'aumentare della % di gomma c'è una riduzione di questo parametro, e questo accade per tutte le granulometrie di gomma impiegate;
- la riduzione della densità si ha in corrispondenza della granulometria più fina (0-0,6 mm) e di conseguenza si ottiene il valore più basso di durezza;
- densità e durezza sono correlati al rapporto acqua/intonaco utilizzato;
- i campioni corrispondenti alle particelle di dimensioni più piccole mostrano valori di durezza più alti perché queste particelle di gomma sono rivestite con uno strato più spesso di intonaco (Tab. 2.5).

Tab. 2.5 Valori di densità e durezza C shore.

Particle size gradation	% Rubber (weight)	% Rubber (volume)	Name	w/p ratio	Density (kg/m ³)	Shore C hardness
	0	0	R1	0.58	1222.3	90.7
0.0-0.6	30	40.7	C-30-0.6	0.53	1032.4	69.2
	40	51.6	C-40-0.6	0.60	901.6	51.0
	50	61.5	C-50-0.6	0.67	771.5	29.2
	60	70.6	C-60-0.6	0.77	653.9	13.9
0.5-2.5	30	38.4	C-30-2.5	0.45	1140.2	78.5
	40	49.2	C-40-2.5	0.49	1021.5	60.4
	50	59.3	C-50-2.5	0.57	891.0	41.4
	60	68.6	C-60-2.5	0.69	758.2	25.0
2.5-4.0	30	39.7	C-30-4.0	0.50	1076.9	78.7
	40	50.6	C-40-4.0	0.56	960.9	54.3
	50	60.6	C-50-4.0	0.57	893.4	52.3

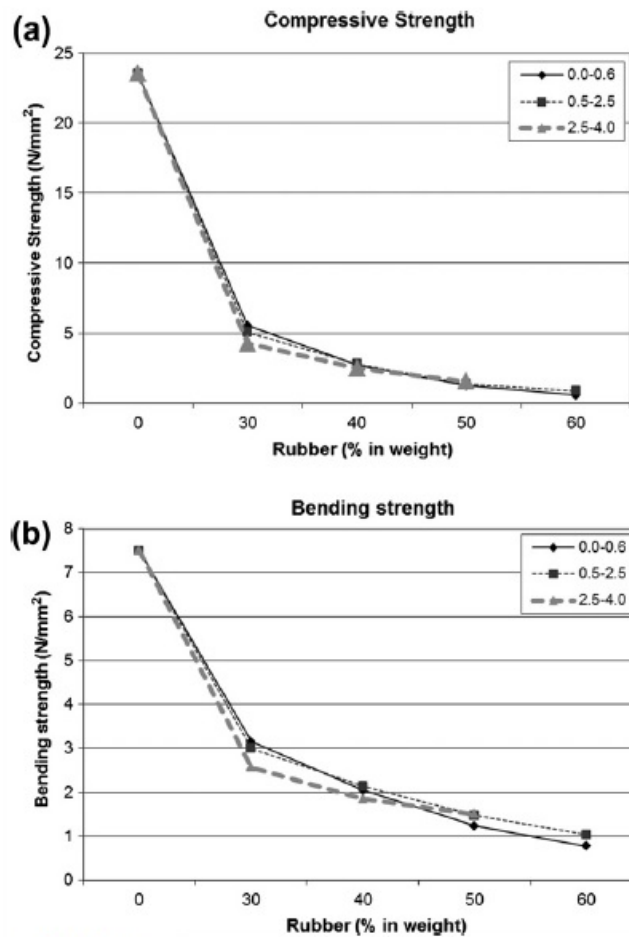


Fig. 2.9 Resistenza a compressione e flessione.

L'aggiunta di gomma provoca un decremento della resistenza a compressione, andamento fortemente correlato all'incremento della quantità % di gomma indipendentemente dalle dimensioni. La resistenza a flessione diminuisce in maniera meno significativa rispetto alla compressione ma sempre in proporzione all'aumento di % della gomma e delle dimensioni, la soglia accettabile è fino a un 30% di gomma. La frattura nei campioni che includono gomma non presenta separazione ma evidenzia un maggior grado di tenacità della miscela (effetto positivo della gomma).

Nei grafici delle resistenze meccaniche si nota una diminuzione della pendenza della curva in corrispondenza dell'incremento della granulometria della gomma, una riduzione della resistenza è evidente per i campioni che includono gomma fine e all'aumento della % della gomma stessa (Fig. 2.9 – 2.10).

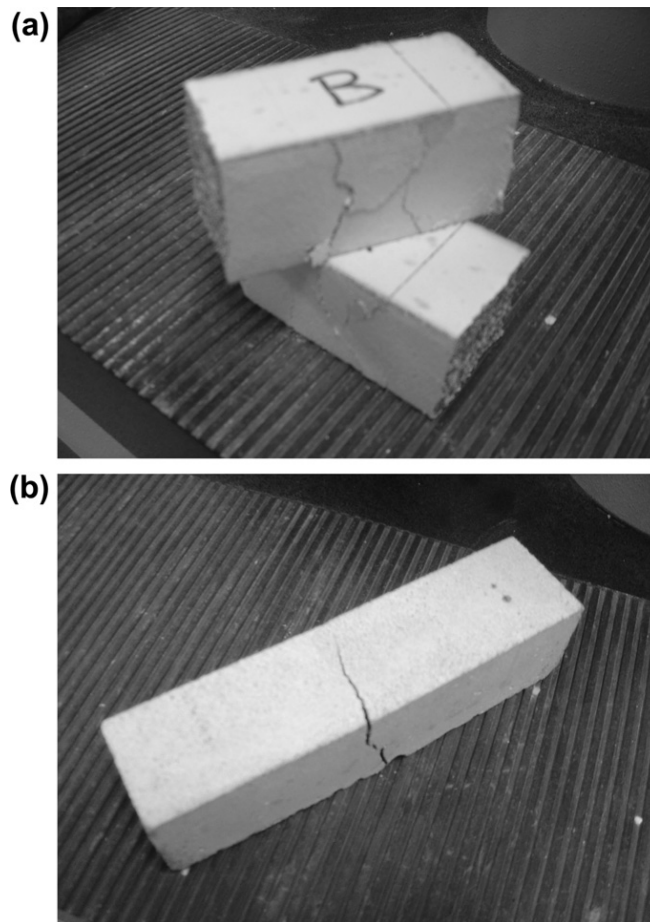


Fig. 2.10 Campioni C-30-0.6 prova a flessione e compressione.

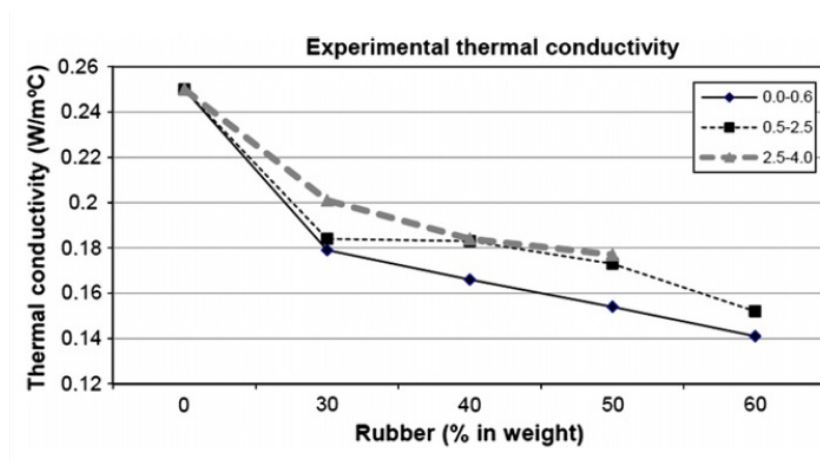


Fig. 2.11 Conducibilità termica in funzione della % di granulometria della gomma.

Per quanto riguarda le proprietà termiche dei materiali studiati, sono stati osservati i seguenti fenomeni:

- un decremento in corrispondenza della granulometria della gomma fine (0-0,6 mm);
- una correlazione tra conducibilità termica e granulometria probabilmente dovuta alla variazione della rugosità del campione, che dipende della % di gomma aggiunta e della sua dimensione (Fig. 2.11).

I migliori risultati acustici sono stati ottenuti per i pannelli di intonaco ($s = 2$ cm) contenenti il granulato più fine. lo studio è stato condotto ad una sola frequenza: 1000 Hz, la capacità di entrare in vibrazione e di dissipare energia (acustica) è maggiore per le particelle di gomma più piccole (Tab. 2.6).

Tab. 2.6 Impact noise, sound pressure in receptor space.

Impact noise		
Plaster board: $e = 2-3$ cm		
Starting in vacuum of 32, 33, 34 dB		
Sound level meter SC-2C Level Meter CESVA, LAF chosen option		
Name	Smooth face towards emitter mean per thickness (dB)	Rough face towards emitter mean per thickness (dB)
2-R	107.21	100.83
3-R	99.9	102.76
2-C-30-0.6-1	81.92	81.06
3-C-30-0.6-1	86.58	79.48
2-C-40-0.6-1	89.33	80.13
3-C-40-0.6-1	80.32	81.05
2-C-50-0.6-1	83.71	82.76
3-C-50-0.6-1	84.51	87.98
2-C-60-0.6-1	84.23	78.30
3-C-60-0.6-1	85.78	82.72
2-C-30-2.5-1	81.44	90.35
3-C-30-2.5-1	90.6	92.50
2-C-40-2.5-1	80.13	80.75
3-C-40-2.5-1	86.39	90.63
2-C-50-2.5-1	92.58	89.02
3-C-50-2.5-1	84.58	80.63
2-C-60-2.5-1	84.45	85.43
3-C-60-2.5-1	90.08	88.00
2-C-30-4.0-1	90.25	87.28
3-C-30-4.0-1	92.72	90.15
2-C-40-4.0-1	85.07	81.85
3-C-40-4.0-1	89.75	90.63
2-C-50-4.0-1	78.93	82.37
3-C-50-4.0-1	81.43	84.18

La capacità di isolamento agli urti è migliore a tutti i dosaggi di gomma utilizzando la granulometria più fine, i risultati invece non mostrano una chiara correlazione con la % di gomma [19]. Un altro materiale diventato parte integrante ed inseparabile della nostra vita è la plastica. L'ammontare del consumo annuale di plastiche sta crescendo stabilmente, la sua bassa densità, forza, design versatile, capacità di fabbricazione, durata, leggerezza e

bassi costi di produzione sono i fattori primari della sua fenomenale crescita. Le plastiche vengono comunemente usate per confezionamenti, applicazioni automobilistiche e industriali, sistemi di approvvigionamento medico, impiantistica artificiale, altre applicazioni mediche, desalinizzazione dell'acqua, conservazione del suolo, prevenzione dell'inondazioni, conservazione e distribuzione alimentare, uso casalingo, materiali di comunicazione, sistemi di sicurezza e altri usi. Con il suo largo e variegato uso, le plastiche contribuiscono ad incrementare il volume del flusso di rifiuti solidi; i rifiuti plastici raccolti dal flusso di rifiuti solidi sono una miscela assortita e contaminata di plastiche. Questo fa sì che l'identificazione, segregazione e purificazione dei vari tipi di plastiche risulti molto complesso. All'interno del flusso di rifiuti plastici, il polietilene ne costituisce la maggior frazione, seguito dal PET [20 – 21]. Uno studio, seppur non recente, mette in evidenza che il consumo mondiale annuale di materiale plastico è incrementato da circa 5 milioni di tonnellate nel 1950 a circa 100 milioni di tonnellate nel 2001. La tabella presenta l'ammontare del consumo di rifiuti plastici generati in Inghilterra, USA ed Ovest Europa. In Inghilterra, un totale approssimativo di 4,7 milioni di tonnellate di prodotti plastici fu usato in vari settori economici nel 2001 (Tab. 2.7 – 2.8) [22].

Tab. 2.7 Consumo dei rifiuti plastici.

	Quantity (million tons)	Reference
Plastic consumption in UK in 2001	4.7	www.wasteonline.org.uk (2001)
Plastic waste in UK in 2001	3.0	www.wasteonline.org.uk (2001)
Plastic consumption in Western Europe in 2004	43.5	APME (2004)
Plastic consumption in USA in 2003	26.7	EPA (2003)
Plastic waste in USA in 2003	11.0	EPA (2003)

Tab. 2.8 Tipi e quantità di plastiche nei rifiuti solidi urbani negli USA (2000).

Type of plastic	Quantity (1000 tons)
Polyethylene terephthalate (PET)	1700
High density polyethylene (HDPE)	4120
Low density polyethylene (LDPE)	5010
Polypropylene (PP)	2580
Polystyrene (PS)	1990
Other	3130

La quantità di consumo plastico annuale in tutto il mondo sta aumentando vertiginosamente. Le sue funzioni dalle caratteristiche versatili, la sua flessibilità unica, la sua lavorabilità unita alla longevità sono le principali ragioni del suo aumento astronomico (Tab. 2.9).

Tab. 2.9 Usi della plastica e delle plastiche riciclate.

Name of plastic	Description	Some uses for virgin plastic	Some uses for plastic made from recycled waste plastic
Polyethylene terephthalate (PET)	Clear tough plastic, may be used as a fiber	Soft drink and mineral water bottles, filling for sleeping bags and pillows, textile fibers	Soft drink bottles, (multi-layer) detergent bottles, clear film for packaging, carpet fibers, fleecy jackets
High density polyethylene (HDPE)	Very common plastic, usually white or coloured	Crinkly shopping bags, freezer bags, milk and cream bottles, bottles for shampoo and cleaners, milk crates	Compost bins, detergent bottles, crates, mobile rubbish bins, agricultural pipes, pallets, kerbside recycling crates
Unplasticised polyvinyl chloride (UPVC)	Hard rigid plastic, may be clear	Clear cordial and juice bottles, blister packs, plumbing pipes and fittings	Detergent bottles, tiles, plumbing pipe fittings
Plasticized polyvinyl chloride (PPVC)	Flexible, clear, elastic plastic	Garden hose, shoe soles, blood bags and tubing	Hose inner core, industrial flooring
Low density polyethylene (LDPE)	Soft, flexible plastic	Lids of ice-cream containers, garbage bags, garbage bins, black plastic sheet	Film for builders, industry, packaging and plant nurseries, bags
Polypropylene (PP)	Hard, but flexible plastic – many uses	Ice-cream containers, potato crisp bags, drinking straws, hinged lunch boxes	Compost bins, kerbside recycling crates, worm factories
Polystyrene (PS)	Rigid, brittle plastic. May be clear, glossy	Yoghurt containers, plastic cutlery, imitation crystal “glassware”	Clothes pegs, coat hangers, office accessories, spools, rulers, video/CD boxes
Expanded polystyrene (EPS)	Foamed, lightweight, energy absorbing, thermal insulation	Hot drink cups, takeaway food containers, meat trays, packaging	

L'aumento nell'uso della plastica è dovuto alle sue caratteristiche vantaggiose, le quali includono:

- estrema versatilità e adattamento su misura nell'incontro di specifici requisiti tecnici;
- leggerezza rispetto ai materiali concorrenti, riducono il consumo di carburante durante il trasporto;
- caratteristiche d'igiene e di sicurezza nel confezionamento dei cibi;
- durabilità e longevità;
- resistenza a prodotti chimici, acqua e urti;
- eccellenti proprietà isolanti termiche ed elettriche;
- minore competitività nei costi di produzione;
- abilità unica nel combinarsi con altri materiali quali fogli d'alluminio, carta e adesivi;
- caratteristiche estetiche avanzate;

- materiale di scelta: fabbisogno umano e plastiche sono inseparabili;
- caratteristiche, materiali e sistemi intelligenti.

La produzione di plastica sviluppa inoltre l'uso di potenziali composti chimici, i quali sono aggiunti come stabilizzanti o coloranti. Molti di questi non hanno un'immediata valutazione sui rischi ambientali e il loro impatto sulla salute umana e sull'ambiente sono attualmente incerti.

Uno di questi è il ftalato, il quale viene impiegato nella produzione di PVC. Il PVC è stato usato in passato nella produzione di giocattoli per bambini ed è stato dimostrato che possono rilasciare ftalato quando essi vengono a contatto con la saliva. La valutazione del rischio sugli effetti del ftalato sull'ambiente è attualmente in via di elaborazione. Lo smaltimento dei prodotti plastici contribuisce significativamente all'impatto ambientale. In quanto molte plastiche sono non biodegradabili, impiegano molto tempo nello smaltirsi, all'incirca centinaia di anni, sebbene nessuno lo sappia per certo, poiché prima non esisteva la plastica. Come molti e altri prodotti plastici, in particolare plastiche per confezionamento, vengono smaltite al più presto dopo il loro acquisto, e lo spazio della discarica impiegato dai rifiuti plastici è in preoccupante crescita. Le applicazioni nell'uso della plastica sono ampie. Alcuni oggetti di plastica quali confezionamenti per cibi diventano rifiuti in poco tempo dopo l'acquisto. Altri oggetti di plastica si prestano ad essere riutilizzati più volte. La plastica utilizzata, preferibilmente, viene riciclata in quanto essa consuma un minor ammontare di energia e risorse. I confezionamenti plastici multiuso a lunga durata sono diventati molto diffusi recentemente, sostituendo alternative meno durature e ad uso singolo, riducendo così la produzione di rifiuti (Fig. 2.12). In aggiunta alla riduzione dell'ammontare della richiesta di smaltimento dei rifiuti plastici, la plastica riciclata può avere molti altri vantaggi:

- risparmio di carburanti fossili non rinnovabili – la plastica impiega l'8% della produzione totale di olio (combustibile), il 4% nella conservazione alimentare e il 4% nella produzione.
- riduzione dei consumi energetici;
- riduzione dell'aumento di rifiuti solidi destinati alle discariche;
- riduzione di emissioni di anidride carbonica, nitrogenoxide e solfuro di diossido [23].

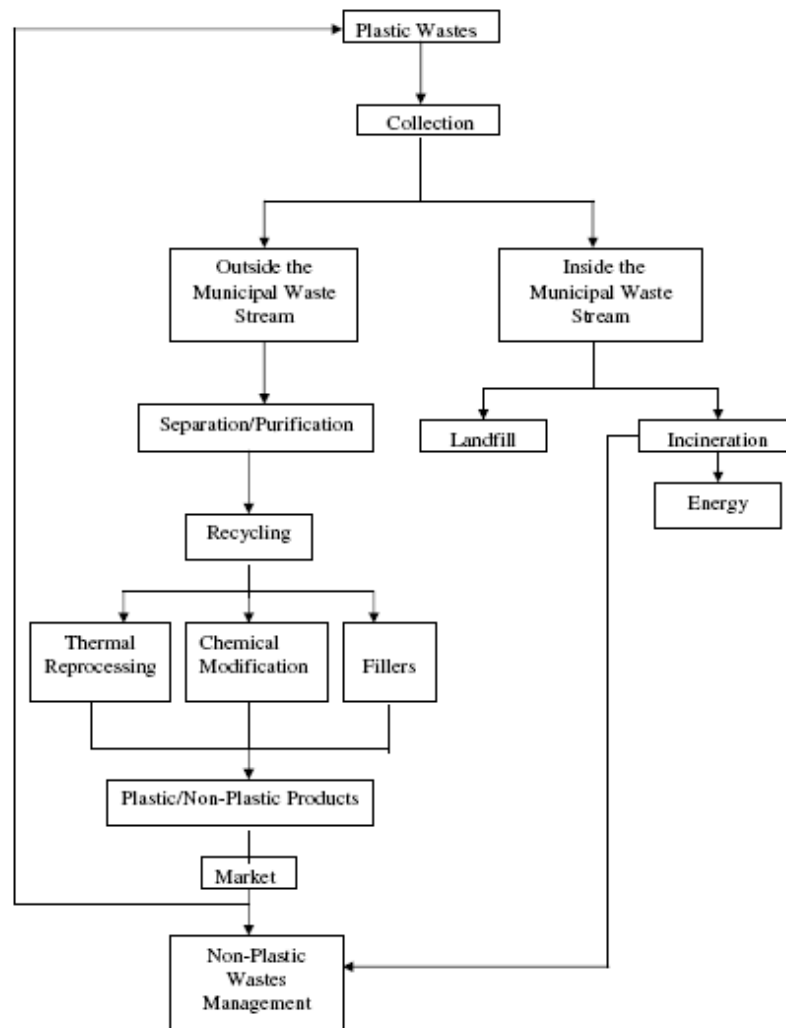


Fig. 2.12 Processo della gestione dei rifiuti plastici.

Un vantaggioso riutilizzo è quello della plastica, identificata con la sigla PET, proveniente dalle comuni bottiglie. La plastica PET può essere modificata chimicamente per produrre una resina poliestere insatura, la quale viene miscelata insieme ad aggregati inorganici per ottenere un materiale conosciuto come calcestruzzo di polimero: PC. Allo stato attuale, molti sforzi si stanno compiendo verso il riciclaggio dei materiali di scarto quali le gomme e la plastica grazie all'interessamento dei governi, delle industrie e della popolazione stessa, sempre più sensibile ai problemi ambientali. Alcune aziende trattano il PET di scarto riducendolo in granulati o fiocchi che poi possono essere reimpiegati in altri modi;

l'uso del PET in compositi cementizi può dare benefici nello smaltimento dei rifiuti e ridurre il danno ambientale proveniente dall'utilizzo di aggregati naturali [24].

Uno studio mette in evidenza come scopo della ricerca, la produzione di malte per intonaci alleggeriti utilizzando aggregati in PET provenienti dallo scarto dei rifiuti urbani, come bottiglie e imballaggi (Fig. 2.13). Questo tipologia di plastica è ormai ampiamente diffusa in tutto il mondo ma rimane ancora molto bassa la percentuale di materiale che viene riciclata a fine utilizzo dei prodotti in PET, per questo motivo è importante trovare nuovi campi di riciclaggio per questi rifiuti. La ricerca ha incluso inoltre l'utilizzo dei GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) di scarto come filler, questo prodotto è uno scarto dell'industria navale e presenta numerose problematiche per il suo corretto smaltimento, in precedenza alcune ricerche hanno già indicato il loro possibile impiego nel confezionamento di intonaci leggeri con proprietà termiche [25 -26 -27].

Lo studio comprende inoltre l'impiego degli scarti provenienti dalla lavorazione del legno , in particolare della polvere di legno. Dal momento che il legno solitamente subisce trattamenti e verniciature, non è indicato per l'incenerimento, per questo motivo trovare nuovi impieghi per questo materiale di scarto è estremamente importante per l'ambiente (Fig. 2.14).



Fig. 2.13. PET Rifiuti.

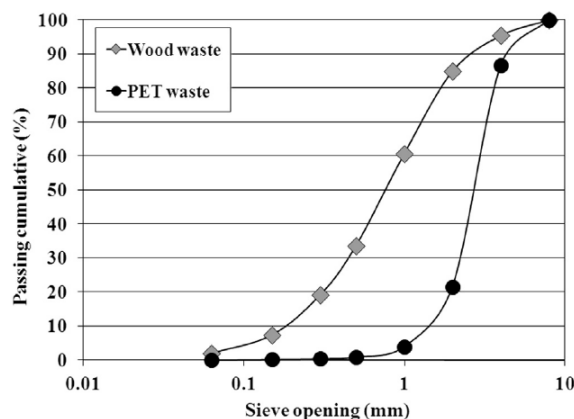


Fig. 2.14 Curve di distribuzione granulometrica di rifiuti PET e rifiuti di legno.

Sono state realizzate una combinazione di 15 di malte compresa una malta di riferimento a base cemento, le materie prima sopra citate sono state combinate tra loro in differenti proporzioni e altra materia prima di scarto impiegata è stato il fumo di silice; al fine di migliorare le miscele dal punto di vista ecologico ma anche in termini di leggerezza e termicità, oltre che aprire una strada per impieghi nel ripristino della muratura e restauro storico, come ultima ottimizzazione il cemento è stato sostituito totalmente da una combinazione di calce e calce idraulica,

L'introduzione di aggregati di scarto diminuisce la resistenza meccanica delle malte, in particolare per le malte con solo materie prime di scarto si raggiunge un valore minimo di $R_c=2\text{MPa}$ $R_f=1\text{MPa}$, così come per le malte con sola matrice calce.

Gli aggregati riducono però la densità e di conseguenza si sono ottenuti buoni valori di conducibilità termica, le miscele con la maggiore quantità di aggregati di scarto e con matrice a base calce hanno mostrato ottimi valori di permeabilità grazie alla presenza di macroporosità [28].

Oltre ai vantaggi finora descritti, l'impiego di scarti industriali come materiale inerte nella preparazione delle miscele consente di realizzare malte da intonaco alleggerite. Il termine alleggerite sta ad indicare che i prodotti ottenuti sono caratterizzati da un valore di massa volumica più basso rispetto ai prodotti tradizionali, mantenendo però resistenze caratteristiche accettabili. La riduzione della massa volumica, nella maggioranza dei casi, è dovuta alla presenza di pori che migliorano il materiale dal punto di vista della leggerezza e dell'isolamento sia termico che acustico, per questo motivo il concetto ecostenibilità di è strettamente legato a quello di efficienza energetica. Come precedentemente descritto nel

primo capitolo, le proprietà termiche di coibentazione degli edifici, vengono conferite da materie prime leggere (Lightweight Aggregate), definite materie prime seconde in quanto provenienti per la maggior parte da prodotti di riciclo o legati al fattore LCA; l'effetto di questi materiali sotto forma di polvere o di inerte in opportuna curva granulometrica, conferisce, nel pieno rispetto della sostenibilità dei materiali, le proprietà termiche al prodotto finito [29-30] (Tab. 2.10 – 2.11). In questo contesto, un ottimo esempio di lightweight aggregate, è la perlite, una roccia vulcanica effusiva molto porosa; per la sua lavorazione come aggregato alleggerito, è richiesta solo una piccola quantità di energia. L'estrazione avviene vicino alla superficie, la materia prima viene lavata, setacciata, frantumata, suddivisa e classificata, inoltre l'acqua utilizzata per il processo di lavaggio per ridurre ulteriori sprechi è trattata in un circuito chiuso e reintrodotta nel sistema idrico [31].

Tab. 2.10 Descrizione dei campioni.

Plaster name	Description
Thermointonaco	Natural hydraulic lime (NHL), Portland cement, EPS, additives
Thermocalce	NHL, Portland cement, expanded perlite, additives
Cork_001	NHL, granular corncob, expanded perlite, zeolite, additives
Bioart cork	NHL, wheat straw granulated, cork granulated from bottle caps, cellulose flakes
VGT_001	NHL, zeolite, Expanded vermiculite, expanded perlite, corncob granulated
VGT0_14	NHL, Portland cement, cement sulfoalluminato (S-AL), expanded perlite, corncob granulated, wheat straw granulated

Tab. 2.11 Risultati della prova guarded heat flow meter.

Sample name	ρ (kg/m^3)	d (mm)	$\lambda_{40^\circ C}$ (W/mK)	λ_{25} (W/mK)	λ_{10} (W/mK)
Thermointonaco (EPS)	278	104	0.089	0.087	0.085
Thermocalce (PRL)	361	103	0.153	0.147	0.143
Cork_001	508	101	0.109	0.103	0.100
Bioart Cork_M18	459	102	0.125	0.114	0.106
VGT_001	496	100	0.105	0.100	0.098
VGT_014	400	52	0.088	0.086	0.083

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO 15392: Sustainability in building construction - General principles.
- [2] ANIT - Linee guida per la progettazione con i protocolli di sostenibilità Leed e Itaca, Gennaio 2013.
- [3] ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- [4] ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- [5] S. Gutierrez-Gonzalez, J. Gadea, A. Rodriguez, C. Junco, V. Calderon, *Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes*, Construction and Building Materials, 28 (2012), 653–658.
- [6] C. Carbonaro, S. Tedesco, F. Thiebat, S. Fantucci, V. Serra, M. Dutto, *Development of vegetal based thermal plasters with low environmental impact: optimization process through an integrated approach*, Energy Procedia, 78 (2015), 967 – 972.
- [7] N. Belayachi, D. Hoxha, M. Slaimia, *Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation*, Construction and Building Materials, 125 (2016), 912–918.
- [8] UNI EN 13279 *Leganti e intonaci a base di gesso - Parte 2: Metodi di prova*
- [9] UNI EN 12667 *Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica*
- [10] Luminita Monica Molnar, Daniela Lucia Manea, Claudiu Aciu, Elena Jumate, *Innovative plastering mortars based on recycled waste glass*, Procedia Technology, Volume 19, 2015, Pages 299-306 .
- [11] Architetto Adriano Magliocco “Il riciclo: La gomma” informazioni e dati provenienti dal sito www.matrec.it e fonte rapporto ARGO - Fise Assoambiente informazioni e dati provenienti dal sito www.isolgomma.it
- [12] Topçu IB, Bilir T. *Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self compacting concrete*, Mater Des 2009, 30 (8), 3056–65.
- [13] Segre N, Joekes I. *Use of tire rubber particles as addition to cement paste*, Cem Concr Res 2000, 30 (9), 1421–5.

- [14] Uygunođlu T, Topçu IB. *The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars*. Constr Build Mater 2010, 24 (7), 1141–50.
- [15] Meshgin P, Xi Y, Li Y. *Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar*, Constr Build Mater 2012, 28 (1), 713–21.
- [16] Turgut P, Yesilata B. *Investigation of thermo-mechanical behaviors of scrap rubber added mortar plate and bricks. [Atık lasti_k katkili harç plak ve briketlerin termo-mekanik davranislarinin arastirilmesi]*, J Faculty Eng Arch Gazi University 2009, 24 (4), 651–8.
- [17] Hernández-Olivares F, Barluenga G. *Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete*, Cem Concr Res 2004, 34 (1), 109–17.
- [18] Topçu IB, Bilir T. *Analysis of Rubberized Concrete as a Three Phase Composite Material*. J Compos Mater 2009, 43 (11), 1251–63.
- [19] S. Herrero, P. Mayor , F. Hernández-Olivares, *Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars*, Materials and Design, 47 (2013), 633–642.
- [20] O.Y. Marzouk, R.M. Dheilly, M. Queneudec, *Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites*, Waste Manage, 27 (2007), 310–318.
- [21] M. Frigione, *Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete*, Waste Manage. 30 (2010) 1101–1106.
- [22] Rafat Siddique, Jamal Khatib, Inderpreet Kaur “*Use of recycled plastic in concrete: a review*”, pp 1835-1852, “Science Direct” 2007.
- [23] European Parliament, *Directive 2004/12/EC on packaging and packaging waste Statement by the Council, the Commission and the European Parliament*, 2004.
- [24] K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, W. Prince, *Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates*, Waste Manage, 30 (2010), 2312–2320.
- [25] D. García, I. Vegas, I. Cacho, *Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete*, Constr. Build. Mater, 64 (2014), 293–300.
- [26] V. Corinaldesi, *Influence of lightweight aggregates and GRP by-product powders on the properties of self-compacting concretes*, Adv. Mater. Res. 548 (2012) 215–220.
- [27] Corinaldesi V, Moriconi G. *Lightweight self-leveling mortars for sustainable and energy efficient building*. In: H.C. Uzoegbo, W.S. Schmidt (Eds.), *Proc.s of the Int. Conf.*

on “*Advances in Cement and Concrete Technology in Africa*”, Germany: BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, 2013, pp. 655–662.

[28] V. Corinaldesi, J. Donnini, A. Nardinocchi, *Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building*, Construction and Building Materials 94 (2015) 337–345.

[29] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón, *Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties*, Construction and Building Materials, 34 (2012), 179–185.

[30] Abdel Monem Mohamed Soltan, Wolf-Achim Kahl, Fawzia Abd EL-Raouf, Baher Abdel-Hamid El-Kaliouby, Mohamed Abdel-Kader Serry, Noha Ali Abdel-Kader, *Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay*, Journal of Cleaner Production, 117 (2016), 139 -149.

[31] Alaa M. Rashad, *A synopsis about perlite as building material – A best practice guide for Civil Engineer*, Construction and Building Materials, 121 (2016), 338–353.

3. SCOPO DEL LAVORO E PIANO SPERIMENTALE

3.1. ASPETTI INNOVATIVI SU INTONACI E RASANTI

Questo lavoro ha lo scopo di contribuire ad approfondire lo stato dell'arte sugli intonaci energy efficient mediante una campagna di prove sperimentali che vuole mettere in relazione la scelta di materiali ecosostenibili con le prestazioni funzionali ottenute. L'obiettivo è quello di fornire nuovi elementi per condurre il settore delle costruzioni verso una scelta consapevole dei materiali. La formulazione di intonaci termoisolanti in grado di agire in maniera positiva sulla riduzione dei consumi energetici è lo scopo che ci si è preposti in questa ricerca. Un'azione che deve essere messa in campo per risolvere le attuali problematiche legate all'efficienza energetica dei materiali da costruzione.

In particolare, le tematiche relative al possibile riciclo e riutilizzo dei materiali all'interno del ciclo edilizio, sono una frontiera da esplorare e la ricerca è stata indirizzata sull'impiego di materie prime seconde. Lo studio svolto è stato orientato alla ricerca di materiali che apportino vantaggi dal punto di vista dell'isolamento termico, isolamento acustico, equilibrio igrotermico degli ambienti per un maggiore comfort abitativo. La sperimentazione è stata condotta sostituendo all'interno delle miscele di riferimento, i materiali di riciclo, al fine di studiarne le proprietà e gli effetti sulle proprietà funzionali desiderate. Nel dettaglio sono state studiate alcune proprietà funzionali delle miscele, allo stato fresco ed indurito, per cercare una correlazione tra la struttura porosa, la conducibilità termica e le resistenze meccaniche. Sulla base delle osservazioni fatte, si sono ottenute buone performance termiche e di resistenze meccaniche per intonaci contenenti aggregati in pomice, silice espansa e vetro espanso di riciclo. Si è dimostrato che l'impiego del vetro espanso riciclato, in sostituzione parziale a materie prime vergini come la pomice e la silice espansa, conferisce una resistenza a compressione migliore rispetto alla miscela con sola pomice, e parallelamente si è ottenuto un incremento del potere isolante nell'ottica di coniugare efficientamento energetico e intonaci eco-friendly.

La campagna di prove eseguita sugli intonaci avanzati è quindi stata improntata sulla ricerca di una correlazione tra alcune proprietà ritenute funzionali quali: porosità della matrice, conducibilità termica e resistenze meccaniche. Inoltre si è studiata la variazione di queste caratteristiche in funzione dell'introduzione di materiali ecosostenibili e provenienti da materie prime seconde: silice espansa e vetro riciclato espanso, che sono stati comparati

con aggregati più tradizionali come la sabbia di quarzo, filler carbonatici e pomice. Anche nel caso di materie prime tradizionali è fondamentale un buon Life-Cycle Assessment, nel pieno rispetto del concetto di sostenibilità dei materiali e per poter fronteggiare la problematica dell'aumento dei rifiuti in campo edilizio e non solo.

Pertanto, la scelta consapevole di materiali da impiegare nella ricerca è stata fondamentale: pomice con estrazione e lavorazione a basso impatto ambientale, silice espansa composta principalmente da silice amorfa e una percentuale di vetro riciclato, vetro post-consumo espanso.

Le prove condotte sulle miscele confezionate hanno permesso di studiare la correlazione tra le principali proprietà degli intonaci e i materiali selezionati. I parametri determinati sono serviti a caratterizzare i mix realizzati dal punto di vista della micro e macro porosità delle matrici, conducibilità termica e resistenza meccanica e a dimostrarne un collegamento. L'introduzione del vetro espanso post-consumo ha apportato miglioramenti per l'ottimizzazione di intonaci energy efficient e allo stesso tempo ecofriendly.

Le proprietà funzionali analizzate in questa ricerca hanno compreso:

- analisi al SEM delle materie prime di riferimento;
- determinazione dei pesi specifici;
- determinazione della reologia delle miscele (tavola a scosse);
- determinazione delle resistenze meccaniche;
- porosimetria a mercurio: determinazione della struttura micro e macroporosa delle miscele;
- determinazione della conducibilità termica.

Dalla determinazione e dall'analisi dei parametri sopraelencati è emerso un incoraggiante punto di partenza per la realizzazione di intonaci sempre più avanzati e allo stesso tempo ecofriendly. L'introduzione di materiale post-consumo, vetro espanso, all'interno di una miscela tradizionale a base pomice ha apportato effetti benefici su molteplici aspetti. I risultati che sono stati ottenuti indicano la possibilità per nuove strade di ricerca nell'utilizzo di materiali leggeri e termici ma con buone prestazioni meccaniche.

I dati di porosità ottenuti con il metodo della porosimetria a mercurio, hanno fornito spunti di riflessione che potrebbero indirizzare la ricerca verso la messa a punto di prodotti innovativi con un'elevata porosità totale ma resistenti alle sollecitazioni esterne. Inoltre gli ottimi valori di conducibilità termica che sono stati conseguiti indicano nuove possibili evoluzioni nell'ambito di intonaci energy efficient ed ecofriendly sempre più avanzati.

Successivamente, visti gli incoraggianti risultati che sono stati raggiunti nelle prove di determinazione della porosità totale accessibile delle miscele progettate, unitamente alle caratteristiche coibenti che queste hanno evidenziato, la sperimentazione è passata ad analizzare in maniera più approfondita la correlazione tra porosità, conducibilità termica e fonoassorbimento per la messa a punto di intonaci termoacustici.

La seconda fase del progetto di ricerca ha riguardato la progettazione di nuove miscele da sviluppare e caratterizzare dal punto di vista termoisolante e di assorbimento del suono. La fase di mix design è stata guidata attraverso l'individuazione di "prove faro" che potessero indirizzare verso la scelta dei materiali e dei compounds più adeguati al fine di raggiungere elevate performance di assorbimento acustico. Lo screening delle miscele è stato effettuato in base all'analisi dei dati ottenuti dalle prove di conducibilità termica e di porosimetria. Dalla combinazione di questi due aspetti funzionali, sono stati portati avanti gli intonaci più performanti per i quali è stata eseguita la misura del coefficiente di fonoassorbimento (α) con tubo di impedenza.

In generale, quando si parla di intonaco, si fa riferimento un rivestimento minerale, che svolge nei confronti degli edifici una funzione sia decorativa che protettiva. Applicato con uno spessore variabile, variando da pochi millimetri ad alcuni centimetri, nasce con lo scopo di livellare e uniformare le superfici murarie. Il suo costo limitato, la facilità di posa e di preparazione, hanno consentito la sua rapida diffusione nel mondo dell'edilizia.

L'intonaco, inoltre, deve assolvere fondamentalmente a tre funzioni:

- protezione delle strutture sulle quali viene applicato;
- traspirabilità delle murature;
- finitura regolare ed esteticamente accettabile;

Gli intonaci possono essere distinti in base al legante usato:

- intonaco a base di calce, dove il legante è la calce (calce idrata o calce idraulica, in forma di polvere o grassello);
- intonaco calce – cemento, dove il legante è una miscela di calce idrata e cemento portland, con prevalenza di calce;
- intonaco cemento – calce, dove il legante è una miscela di calce idrata e cemento portland, con prevalenza di cemento;
- intonaco a base di gesso, dove il legante è esclusivamente gesso;
- intonaco a base di argilla, dove l'unico legante è l'argilla.

All'interno di una corretta stratigrafia degli elementi costruttivi di una parete, si colloca il rasante che rappresenta un ulteriore strato, applicato sull'intonaco indurito, che ha il compito di livellare le irregolarità del supporto. Generalmente è composto da calce idrata, sabbie e additivi specifici. Le funzioni del rasante sono quelle di proteggere, livellare e abbellire la superficie.

Per definizione, la rasatura è uno strato di preparazione per la successiva decorazione che fa da ponte intermedio con il sottofondo; per adempiere a tale compito, il rasante dovrà presentare un modulo elastico inferiore a quello del supporto (ma superiore a quello dell'eventuale finitura).

Infine, se il supporto ha caratteristiche specifiche, viene richiesto al rasante una determinata traspirabilità, la quale potrà essere minore dello strato di finitura ma dovrà essere maggiore del supporto per non influenzare le proprietà del supporto stesso.

Ne consegue che le caratteristiche di un rasante devono essere studiate in correlazione a quelle dell'intonaco, in modo tale che gli aspetti funzionali dell'uno non influiscano negativamente sull'altro e viceversa.

Per questi motivi, la ricerca ha interessato parallelamente agli intonaci, anche lo sviluppo di rasanti avanzati che devono garantire il mantenimento delle proprietà funzionali determinate e analizzate in questa ricerca.

La campagna sperimentale ha perciò coinvolto alla stessa maniera sia gli intonaci, sia i rasanti, stabilendo un piano prove similare per entrambi i due prodotti. Inoltre, anche per i rasanti, attraverso lo studio fatto precedentemente sugli intonaci, sono state individuate le

materie prime più idonee, tra leganti, aggregati e additivi. Nella fase formulativa dei rasanti, è stato applicato lo stesso principio degli intonaci: sostituire alle materie prime tradizionali, altri materiali con contenuti innovativi ed analizzarne gli effetti attraverso i risultati ottenuti con una serie di prove mirate a stabilire le proprietà funzionali già fissate per gli intonaci.

A differenza di quest'ultimi, scarsi o quasi del tutto nulli sono gli studi in ambito scientifico e la letteratura non è così estesa. La presente ricerca ha come scopo quello di iniziare a colmare il vuoto bibliografico relativo ai rasanti avanzati, i quali rivestono un'importanza uguale o addirittura maggiore rispetto agli intonaci, poiché ne sono il necessario complemento all'interno di una stratigrafia costruttiva e hanno la funzione di proteggere e preservare lo strato sottostante. Da queste considerazioni, risulta evidente che la scelta e la posa in opera di un rasante con le giuste caratteristiche fisico-tecniche, è indispensabile per il funzionamento globale dell'involucro edilizio, rappresentando un tassello costruttivo non di poco conto.

Un rasante si può considerare “avanzato” se prende in considerazione tutti quegli elementi di energy efficiency e di sustainability già introdotti per gli intonaci.

Come precedentemente elencato, per caratterizzare sia gli intonaci che i rasanti, sono state scelte alcune tipologie di prove per studiare e determinarne le principali proprietà funzionali, prove che di seguito sono riportate in maniera descrittiva.

3.2. PROVE TECNICHE

3.2.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

La microscopia elettronica è una tecnica che permette l'osservazione di campioni con ingrandimenti e risoluzione 1000 volte superiore alla microscopia ottica ordinaria. Il microscopio elettrico a scansione (Fig. 3.1), è un tipo di microscopio elettronico che non sfrutta i fotoni della luce come la microscopia ottica, ma un fascio di elettroni primari focalizzati che colpiscono il campione. Il fascio primario non è fisso, ma viene fatto scandire: viene cioè pilotato in sequenza, punto dopo punto, riga dopo riga, su una piccola zona rettangolare del campione. Nell'interazione tra il fascio primario e gli atomi costituenti il campione, vengono emesse numerose particelle, fra le quali gli elettroni secondari. Questi elettroni sono catturati da uno speciale rivelatore e convertiti in impulsi

elettrici che vengono inviati in tempo reale, ad uno schermo (un monitor) dove viene eseguita simultaneamente una scansione analogica. Il risultato è un'immagine in bianco e nero ad elevata risoluzione e grande profondità di campo, che ha caratteristiche simili a quelle di una normale immagine fotografica (Fig. 3.2). Per questa ragione le immagini SEM sono immediatamente intelligibili ed intuitive da comprendere. Grazie alla lunghezza d'onda degli elettroni di molto inferiore rispetto a quella dei fotoni il potere di risoluzione di un microscopio elettronico a scansione è nettamente superiore rispetto a quella di un microscopio ottico. Inoltre anche la profondità di campo di un SEM è molto più elevata, consentendo immagini perfette anche per campioni tridimensionali (con uno spessore elevato).



Fig. 3.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).

Il risultato è rappresentato dalle figure qui di seguito:

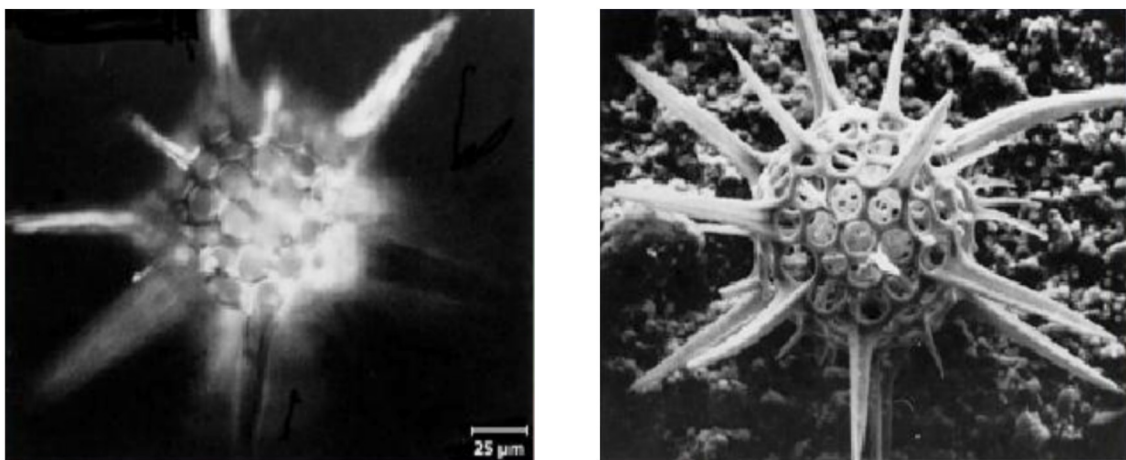


Fig. 3.2 Different modalità acquisizione dati OM e SEM.

Come si evince dalle figure con un microscopio ottico si possono raggiungere piccole profondità e una bassa risoluzione, mentre con un microscopio SEM si ottengono alte risoluzioni anche a grande profondità. Questi dati sono riportati nella tabella di seguito (Tab. 3.1).

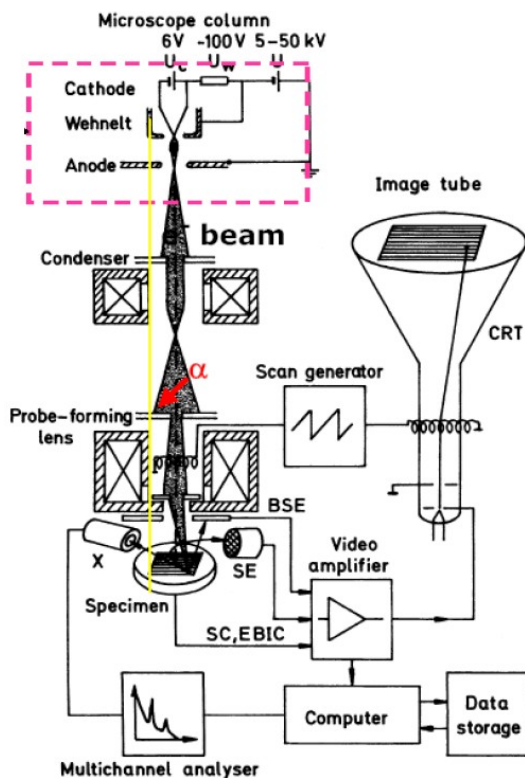
TIPOLOGIA	INGRANDIMENTI	PROFONDITA'	RISOLUZIONE
OM	4x – 1000x	15 μm – 0.19 μm	$\approx 0,5 \mu\text{m}$
SEM	20x – 10^6 x	4 mm – 0.4 μm	$< 10^{-3} \mu\text{m}$

Tab. 3.1 Optical Microscopy (OM) VS Scanning Electron Microscopy (SEM).

3.2.1.1 Riferimenti normativi

La ISO 16700:2004 specifica un metodo per calibrare l'ingrandimento delle immagini generate da un microscopio elettronico a scansione (SEM) con un materiale di riferimento. Questo metodo è limitato ad ingrandimenti determinate dalla gamma di dimensioni disponibili di strutture in materiale di riferimento come calibratura.

3.2.1.2 Strumentazione di misura



- Sorgente di illuminazione;
- Sistema per il vuoto spinto;
- Lenti elettromagnetiche;
- Bobine di deflessione;
- Lente obiettivo;
- Rivelatori di segnale;
- Sistema di trasformazione dei segnali in immagini;
- Camera porta campioni

Fig. 3.3 Componenti microscopio SEM.

3.2.1.3 Metodologia di misura

Il microscopio elettronico a scansione, come già detto, sfrutta la generazione di un fascio elettronico ad alta energia nel vuoto. Il fascio viene focalizzato da un sistema di lenti e deflesso per scandire un'area del campione. L'interazione fascio – campione genera vari segnali che vengono acquisiti da opportuni detectors e successivamente elaborati fino a formare una immagine a livelli di grigio.

La sorgente di elettroni di un microscopio elettronico a scansione può essere un filamento di tungsteno, oppure nei SEM da banco più sensibili e performanti, un filamento di Esaboruro di Lantanio (LaB6) o di Cerio (CeB6) (Fig. 3.4). Il campione viene mantenuto sotto vuoto per evitare che l'aria disturbi la creazione del fascio di elettroni. Il campione deve essere conduttivo, altrimenti produrrebbe cariche elettrostatiche che disturberebbero la rivelazione del segnale. Nel caso di campioni non conduttivi, essi possono essere metallizzati con degli apparecchi specifici oppure possono essere analizzati in basso vuoto con dei porta campioni adatti.

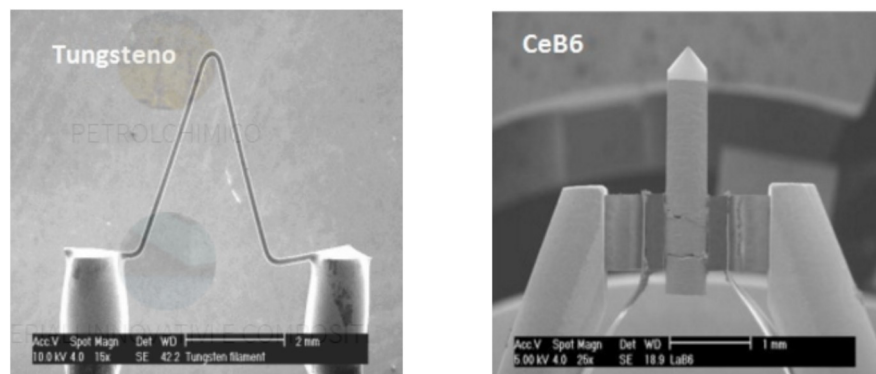


Fig. 3.4 Sorgente in filamento di Tungsteno e filamento in Cerio (CeB6).

3.2.2 Determinazione pesi specifici

3.2.2.1 Determinazione della massa volumica in mucchio

Prova condotta secondo la UNI EN 1097-3 “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari”.

Mediante questa prova viene stabilito il metodo per la determinazione della massa volumica di materie prime ma anche di prodotti premiscelati in polvere contenenti inerti di varia natura e dimensione granulometrica.

3.2.2.2 Riferimenti normativi

- UNI EN 1097-6 “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua”.
- UNI EN 932-2 “Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati - Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio”.
- UNI EN 13055-1 "Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per il calcestruzzo, malta e malta per iniezione".

3.2.2.3 Strumentazione di misura

La strumentazione prevede:

- recipiente volumetrico da 1 litro, ai fini di soddisfare i requisiti minimi previsti nel Prospetto 1 della UNI EN 1097-1, in allegato alla presente procedura operativa;
- bilancia elettronica di capacità idonea avente accuratezza pari allo 0,1% della massa del campione di prova. Per quanto riguarda la taratura, la bilancia deve avere accuratezza pari allo 0,1% della massa dell'acqua;
- palette di dimensioni adeguate;
- riga di acciaio più lunga di almeno 50 mm rispetto al diametro esterno del recipiente;
- lastra di vetro o altro supporto orizzontale.

3.2.2.4 Metodologia di misura

La procedura di campionamento deve prevedere il prelievo diretto del prodotto:

- eseguire 1 campionatura ogni 2 mescole prodotte, tendenzialmente al centro;
- eseguire 3 misurazioni del peso specifico del prodotto, in punti il più possibile diversi.

E' necessario ottenere 3 provini dal campione in analisi e per ciascuno di essi compiere le seguenti operazioni:

- pesare il recipiente metallico vuoto, asciutto e pulito, e tarare la bilancia a 0,00 g.
- prelevare materiale sufficiente a riempire il recipiente metallico di prova.
- durante il riempimento del recipiente, ridurre al minimo la segregazione e procedere facendo cadere il materiale "a pioggia" all'interno del contenitore metallico.
- rimuovere con attenzione l'aggregato in eccesso dalla parte superiore del recipiente assicurandosi che la superficie sia regolare per evitare la segregazione: utilizzare la riga facendo attenzione a non compattare.
- pesare il recipiente pieno (m_f) e registrare la sua massa arrotondandola allo 0,1% più prossimo.

Per ciascun provino, si calcola la massa volumica in mucchio ρ_b mediante la seguente equazione:

$$\rho_b = m_f / V$$

dove:

ρ_b è la massa volumica in mucchio, kg/l;

m_f è la massa del recipiente pieno a bilancia tarata, kg;

V è la capacità del recipiente, l.

La massa volumica finale sarà ottenuta calcolando la media tra i 3 provini.

3.2.2.5 Determinazione della massa volumica fresca

Prova condotta secondo la UNI EN 1015-6 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca". La norma si applica a malte fresche a base di leganti minerali sia con aggregati normali che leggeri. Il principio della prova consiste nel determinare il valore attraverso il rapporto tra la massa e il volume

che essa occupa quando viene introdotta e compattata in modo predeterminato, in un recipiente di misurazione di volume noto (Fig.3.5).



Fig. 3.5 Strumentazione di prova.

3.2.3 Tavola a scosse

Questa prova è volta a valutare la consistenza dell'impasto fresco di una malta e quindi più in generale la reologia di una miscela.

Il valore di fluidità è misurato attraverso la valutazione del diametro del campione di impasto fresco, il quale è posizionato in un supporto (tavolo) predisposto con un disco libero di muoversi lungo la direzione verticale, compiendo delle battiture a periodi costanti per un determinato e normato numero di volte (Fig. 3.6).

3.2.3.1 Riferimenti normativi

La prova viene eseguita tramite una tavola che imprime dei colpi all'impasto ancora fresco andandone a valutare lo spandimento secondo la normativa di riferimento UNI EN 1015-3 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della consistenza della malte fresca (mediante tavola a scosse).

I risultati ottenuti possono essere interpretati attraverso l'utilizzo del prospetto riportato nella UNI EN 1015-6 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Determinazione della massa volumica apparente della malta fresca" (Tab. 3.2).



Fig.3.6 Strumentazione di prova.

Tab. 3.2 Riferimenti normativi.

prospetto 1 **Procedimenti per la determinazione della massa volumica apparente della malta fresca**

Consistenza all'atto dell'applicazione	Valore dello scorrimento mm	Procedimento
Malta rigida	< 140 mm	Sottoporre a prova la malta secondo 7.2.1
Malta plastica	Da 140 mm a 200 mm	Sottoporre a prova la malta secondo 7.2.1 o 7.2.2
Malta tenera	> 200 mm	Sottoporre a prova la malta secondo 7.2.3

3.2.3.2 Strumentazione di misura

Per l'esecuzione delle prove è stata impiegata la seguente strumentazione di misura, conforme alla normativa di riferimento (Fig 3.7):

- Tavola rotante;
- Anello tronco conico, in acciaio di $h = 60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$; $d_i = 100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (inferiore); $d_s = 70 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (superiore); $s = 2 \text{ mm}$
- Martelletto, di lunghezza 200 mm di sezione circolare con $d = 40 \text{ mm}$ e peso $0,250 \text{ kg} \pm 0,015 \text{ kg}$;
- Calibro;
- Cazzuola;
- Spatola.

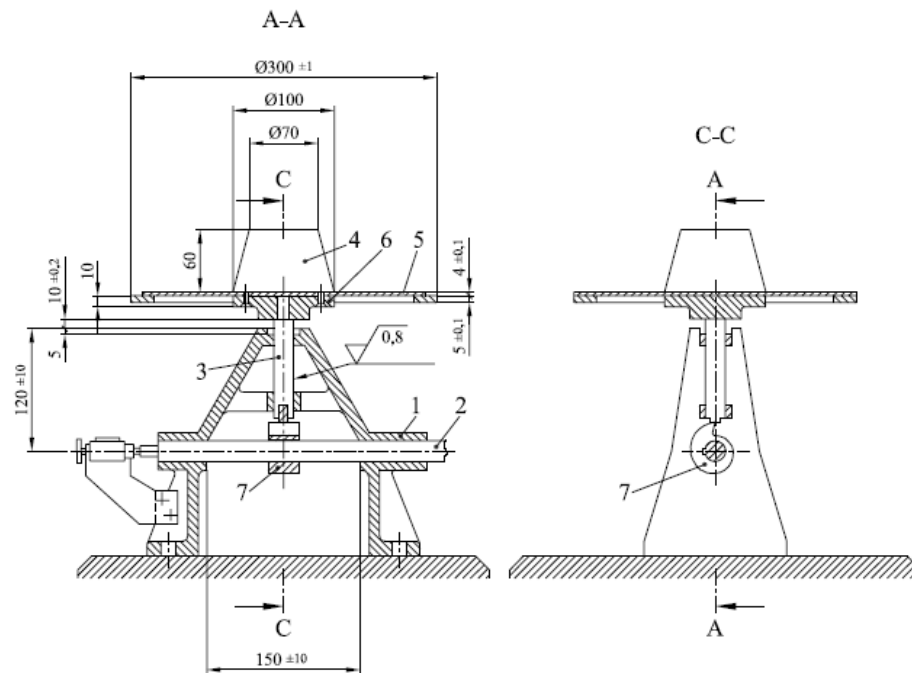


Fig. 3.7 Tavola a scosse - Componenti dell'apparecchiatura: 1 supporto, 2 albero orizzontale, 3 asta di sollevamento, 4 stampo troncoconico, 5 disco, 6 piano rigido, 7 camma di sollevamento (dimensioni in millimetri).

3.2.3.3 Metodologia di misura

Prima di ogni test, pulire la superficie e la formina conica tronca con un panno umido e lasciarli asciugare. Posizionare la formina al centro del disco (superficie) e introdurre l'impasto fresco su due strati; ogni strato deve essere compattato con almeno 10 colpi di martelletto per assicurare una distribuzione e compattezza ottimale del materiale appena inserito. Successivamente si procede con un secondo strato fino al riempimento, avendo cura di rimuovere il materiale in eccesso. Per compattare ulteriormente il materiale è utile eseguire nuovamente almeno 10 colpi di martelletto.

Pulire l'area del disco attorno al cassero con il materiale prima di procedere alla prova, in modo tale da evitare che la prova venga compromessa.

Rimuovendo con cura la formina verticalmente, l'impasto avrà la tipica forma conica.

Compiuti questi passaggi iniziali si può ora procedere alla prova applicando 15 colpi all'impasto fresco ad intervalli costanti. La prova si conclude andando a misurare il diametro (lungo entrambe le direzioni principali) dell'impasto ottenuto. E' buona norma

effettuare almeno due misurazioni con due partite di impasto differenti di una unica miscelazione e fare una media dei valori ottenuti. Se la media dei valori di una prova discosta di più del 10% dalla media dei valori della seconda prova è bene che l'intero processo venga ripetuto dall'inizio in modo tale da avere un risultato più veritiero.

3.2.4 Determinazione delle resistenze meccaniche a flessione e compressione

3.2.4.1 Riferimenti normativi

Le prove vengono condotte secondo la UNI EN 1015-11 “Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”.

3.2.4.2 Strumentazione e metodologia di misura

La prova consiste nel sollecitare mediante un dinamometro (Fig. 3.8) tre provini prismatici (40x40x160 mm) su tre punti fino a rottura, così da determinare la resistenza a flessione (N/mm²):

$$f = 1,5 F_i / b d^2$$

F = carico fornito dalla pressa (kN);

L = distanza tra i due appoggi (100 mm);

b = larghezza del provino (40 mm);

h = altezza del provino (40 mm).



Fig. 3.8 Strumentazione di prova.

Dalle due metà del provino sottoposto a flessione, una metà viene utilizzata per la prova di compressione semplice, applicando un carico costante ed incrementandolo fino a rottura.

La resistenza a compressione (N/mm^2) del provino “i” è data dalla relazione:

$$F_i = P/A$$

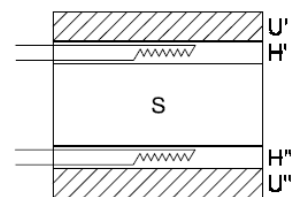
dove : A è l'area della sezione trasversale (40x40 mm);

P è il carico fornito dalla pressa.

3.2.5 Determinazione della conducibilità termica - Heat flow meter

L'heat flow meter misura la densità del flusso di calore attraverso un campione: flusso generato da una differenza di temperatura. L'apparecchiatura è costituita da un homogeneous core, un rilevatore di differenza superficiale di temperatura (multi – junction termopile) e un rilevatore/i di temperatura superficiale (Fig.3.9).

La regione del termoflussimetro occupata dal nucleo (core), in cui sono posti i rilevatori per la differenza di temperatura, è chiamata area di misurazione. A seconda della disposizione degli elementi di rilevazione e del numero e disposizione dei provini da misurare, si possono avere diverse configurazioni del macchinario: nel nostro caso la configurazione è riportata nell'immagine b).



b) Single-specimen symmetrical configuration

Fig. 3.9 Strumentazione di prova.

Il flussometro di calore è progettato per mantenere una temperatura costante su entrambi i lati del campione; tolleranza di variazione di temperatura inferiore a $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ (il flusso di calore viene misurato con due sensori di flusso termico separati).

I dati registrati vengono raccolti ed elaborati da un software che, una volta misurato un flusso costante di calore, restituisce il valore di output della conducibilità termica (λ).

3.2.5.1 Riferimenti normativi

Le prove di determinazione della conducibilità termica sono state eseguite secondo la UNI EN 12667 “Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con alta e media resistenza termica”.

Attraverso questa prova è possibile determinare le proprietà relative alla conducibilità e alla resistenza termica di lastre di materiale campionato concorde alle normative ISO 8301, EN 12667 e ASTM C518.

3.2.5.2 Strumentazione di misura

I principali elementi costitutivi del macchinario sono:

- un'unità riscaldante;
- 1 o 2 termoflussimetri;
- 1 o 2 campioni e un'unità di raffreddamento.

Le principali configurazioni possibili dell'apparecchiatura sono riportate in Fig.3.10 (per valutare i vantaggi e/o svantaggi una configurazione rispetto ad un'altra, occorre consultare la ISO 8301 Annex B).

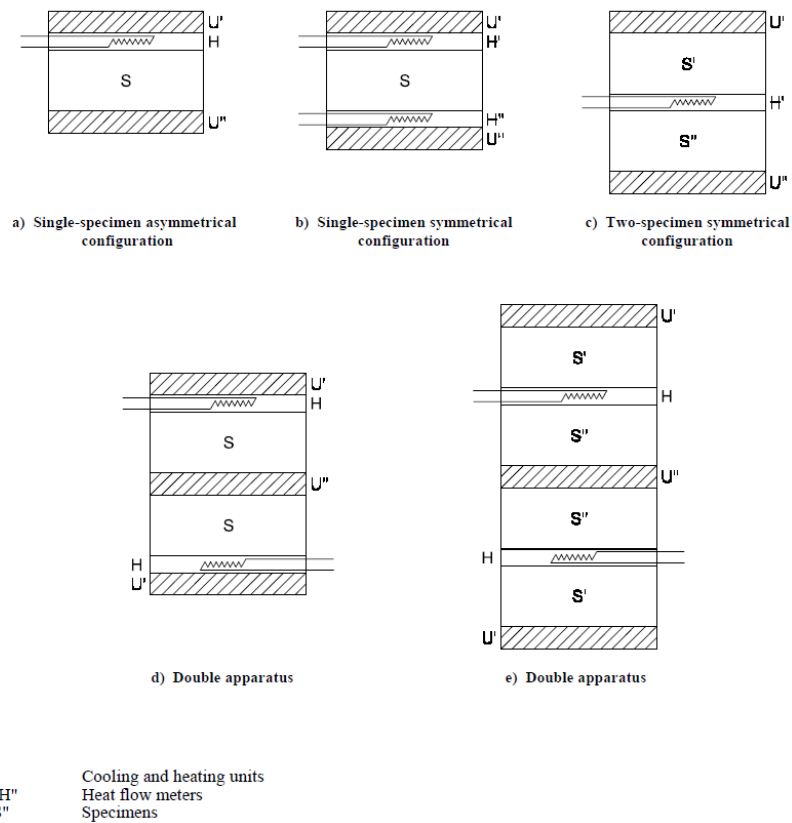


Fig.3. 10 Tipica configurazione di un heat flow meter.

3.2.5.3 Metodologia di misura

Il dispositivo restituisce come output il valore e_h

$$q = f e_h$$

dove:

- q quantità del flusso di calore
- f fattore di calibrazione
- e_h valore di output

Il fattore di calibrazione f , che correla e_h e q , non è una costante in tutti i casi, ma può dipendere dalla temperatura e, in misura più limitata, dalla densità del flusso termico. La procedura di calibrazione è fornita nella norma ISO 8301, l'apparecchio deve essere usato solo per densità di flusso termico all'interno di un range coperto dalla calibrazione. Questo metodo si basa sulla resistenza termica del provino/i misurata e comparata ad un campione standard di riferimento; per tal motivo è di grande importanza la fase di calibrazione dello strumento. Dalla misura della quantità del flusso di calore con il campione standard e del flusso di calore del campione da determinare, si deve raggiungere la condizione costante di

densità del flusso di calore attraverso la metering section e assumendo costante la differenza di temperatura e la temperatura media, è possibile determinare nel seguente modo la resistenza termica del campione standard R_s e quella del campione sconosciuto R_u :

$$R_u/R_s = \Phi_s/\Phi_u$$

3.2.6 Porosimetria

Questa prova misura la percentuale di micro e macro porosità del materiale, il volume e il diametro dei pori con un porosimetro a mercurio.

La tecnica è basata sulle proprietà di non bagnabilità del mercurio (Fig.3.11). Grazie a questa proprietà, il mercurio penetra attraverso la porosità aperta di un campione solido solo grazie all'applicazione di una pressione esterna. Misurando la quantità di mercurio penetrato nei pori del campione ad ogni valore di pressione, si ottengono i dati sperimentali da cui calcolare la distribuzione porosimetrica in funzione del raggio dei pori. La presenza di una maggiore o minore quantità di pori aperti interconnessi e il diametro dei pori influenza le performance termoacustiche di un materiale.



Fig.3. 11 Porosimetro.

La porosimetria a mercurio è basata sulla legge di capillarità, la quale governa l'intrusione dei liquidi all'interno di pori di piccole dimensioni.

Tale legge, nel caso di un liquido non bagnante, come il mercurio, ed in presenza di pori cilindrici, è espressa dall'equazione di Washburn:

$$D = -\left(\frac{1}{P}\right) \times 4\gamma \cos\varphi$$

dove:

- D diametro dei pori;
- P pressione di intrusione applicata;
- γ tensione superficiale, considerata pari a $485 \cdot 10^{-3}$ N/m;
- φ angolo di contatto, pari a 130° .

Attraverso il porosimetro è possibile classificare la grandezza di pori di dimensioni comprese tra $500 \mu\text{m}$ e $3,5 \text{ mm}$.

La porosimetria al mercurio fornisce una vasta gamma di informazioni come:

- grandezza dei pori;
- volume totale dei pori;
- densità;
- superficie specifica.

Uno dei maggiori limiti dello strumento è l'impossibilità di misurare l'effettiva misura di un poro interno in quanto viene misurata solo la quantità di fluido entrante attraverso un poro.

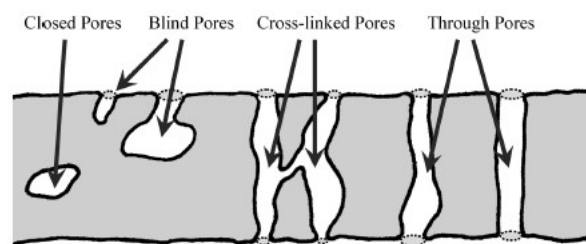


Fig. 3.12 *Rappresentazione schematica di un poro.*

Il macchinario non può essere nemmeno utilizzato per analizzare i pori chiusi, dal momento che il mercurio non riesce a penetrare all'interno. Attraverso un software che mette in relazione i vari dati registrati, si è in grado di ricostruire uno schema dei pori e delle interconnessioni del materiale (Fig. 3.12).

Di grande importanza è la forma dei pori; essenzialmente tutti gli strumenti assumono il poro di forma cilindrica utilizzando l'equazione modificata Young – Laplace, la quale è sulla base dell'equazione di Washburn.

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r_{\text{pore}}}$$

dove: r_1, r_2 curvatura interfaccia;
 r_{pore} corrispondente grandezza dei pori;
 γ tensione superficiale del mercurio;
 θ angolo di contatto tra il solido e il mercurio.

3.2.6.1 Riferimenti normativi

La normativa ASTM D6767 definisce il metodo di prova standard per la misurazione della dimensione dei pori di un materiale.

3.2.6.2 Strumentazione di misura

Il penetrometro è costituito da una parte in vetro (isolatore), riempito con mercurio (conduttore). Lo stelo del penetrometro è placcato con metallo (conduttore). I due conduttori, il mercurio e la placcatura in metallo, sono separati dal vetro, formando un condensatore coassiale (Fig.3.13 – 3.14).

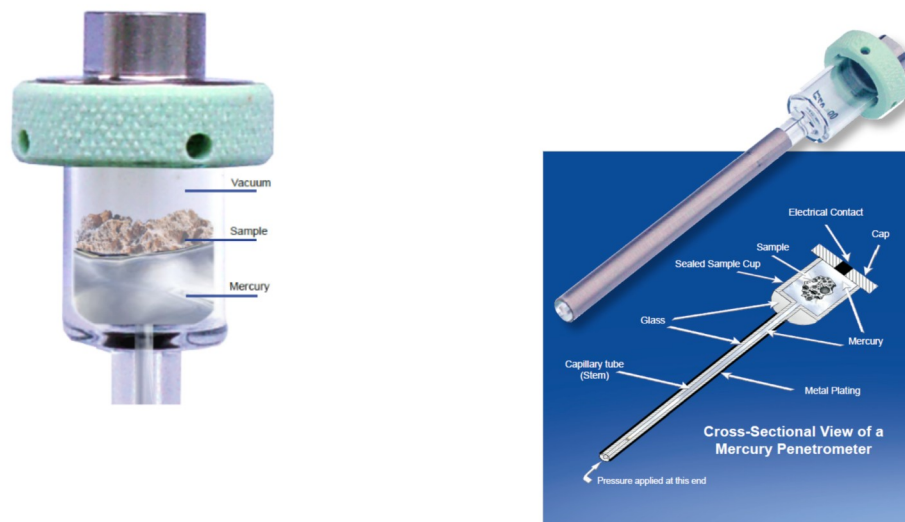


Fig. 3.13 Porosimetro al mercurio.

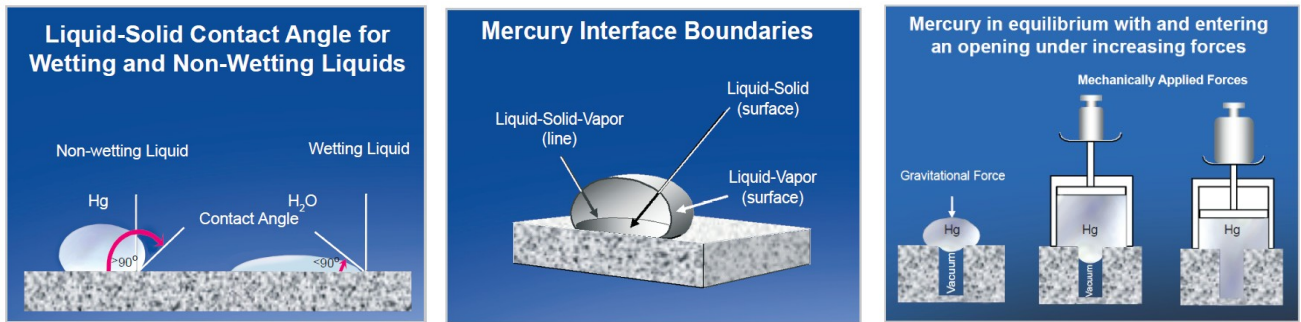


Fig. 3.14

Rappresentazione e illustrazione di un porosimetro al mercurio.

3.2.6.3 Metodologia di misura

L'analisi di porosimetria a mercurio prevede l'introduzione di un campione all'interno di una cella di misura (penetrometro), il degasaggio del campione e il successivo riempimento del penetrometro con mercurio per caduta gravitazionale.

In presenza di porosità del campione, l'applicazione di una pressione sulla colonnina di mercurio provoca la diminuzione dell'altezza della stessa (intrusione di mercurio); il rilevamento del volume di mercurio intruso alla pressione generata avviene con un principio capacitivo. In sostanza, viene creato un condensatore di cui un'armatura è costituita da un film metallico depositato sul capillare del penetrometro, l'altra è rappresentata dal mercurio che è anche dielettrico. La variazione dell'altezza della colonnina di mercurio comporta una variazione della capacità del condensatore che, mediante un opportuno fattore di conversione, porta al volume di mercurio intruso.

Nella fase iniziale dell'analisi il campione subirà la sola pressione idrostatica dovuta all'altezza della colonnina di mercurio. L'intervallo di porosità determinabile viene definito dall'altezza della colonnina di mercurio e dalla massima pressione raggiungibile dallo strumento compatibilmente con la struttura del campione.

Di conseguenza, l'altezza iniziale della colonnina di mercurio fissa il valore del diametro massimo dei pori che è possibile valutare, la pressione massima raggiungibile fissa invece il diametro più piccolo.

Aumentando la pressione applicata sul mercurio a gradini, esso penetrerà via via nei pori di diametro sempre più piccolo. Il volume di mercurio in ingresso viene misurato tramite l'abbassamento del mercurio nella colonnina. Il diametro dei pori intrusi è calcolato tramite l'equazione di Washburn. È così possibile tracciare curve che mettano in relazione il diametro dei pori con il volume occupato dai pori di tale diametro (Fig. 3.15 – 3.16).

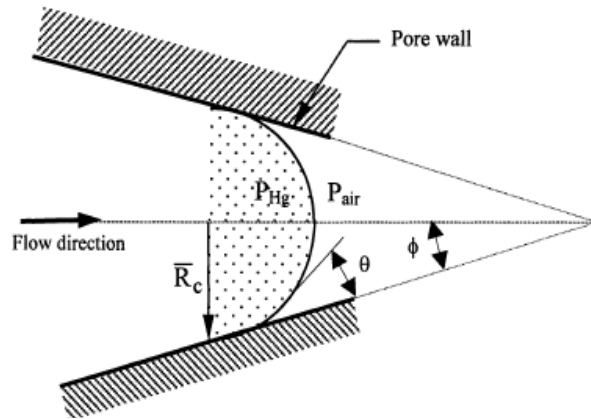


Fig. 3. 15 Modello di studio per l'analisi porosimetrica.

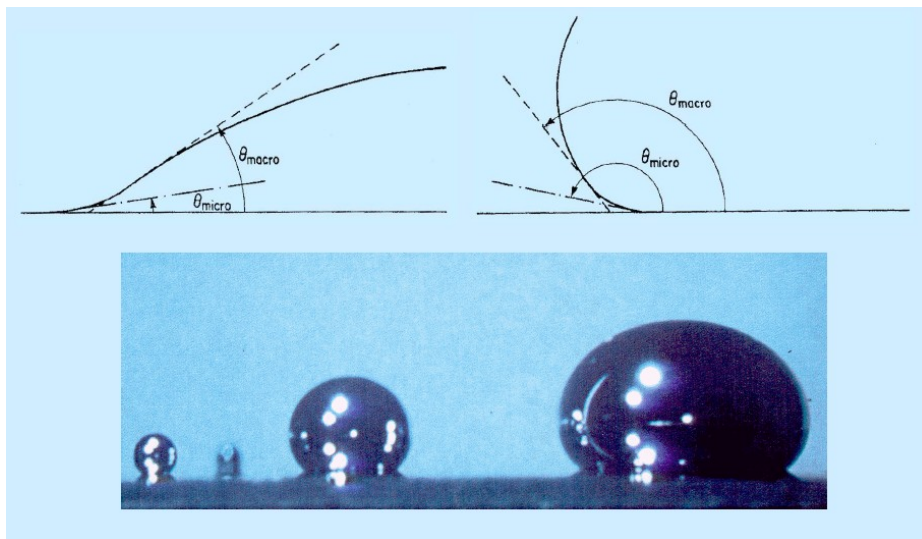


Fig. 3. 16 Angolo di contatto.

Generalmente, un valore compreso tra 130° e 140° si dimostra valido per la maggior parte degli scenari di analisi. L'equazione di Washburn, estesa con Laplace, usa un modello nel quale la capillarità all'interno di un mezzo poroso è assimilabile a un fascio di tubi capillari conici o cilindrici, dove:

$$P_c = P_{Hg} - P_{air}$$

dove:

- P_c pressione capillare del poro;
- P_{Hg} pressione capillare del mercurio utilizzato;
- P_{air} pressione dell'aria all'interno dei pori;

dove:

$$P_c = 2\gamma \left| \cos\theta + \phi \right| / R_c$$

3.2.7 Tortuosità

Il metodo si basa sulla misura della risposta all'impulso di un'onda acustica ultrasonica che attraversa un campione di materiale poroso. Dalla determinazione dello sfasamento, nel dominio della frequenza, tra l'onda che attraversa il materiale e la stessa onda che si propaga in aria, è possibile calcolare la velocità di fase all'interno del materiale e quindi la tortuosità del materiale stesso.

Il valore di tortuosità può essere ricavato sperimentalmente anche dalla prova di porosimetria al mercurio, poiché la tortuosità non rappresenta altro che la distribuzione delle porosità di un materiale. In altre parole, raffigura il percorso che l'onda sonora percorrerebbe all'interno delle porosità connesse di un materiale.

3.2.8 Misura del coefficiente di fonoassorbimento (α) con tubo di impedenza

La valutazione del coefficiente di fonoassorbimento avviene attraverso l'utilizzo di un tubo di impedenza, strumento dotato di elementi in grado di generare un suono e registrarne la propagazione in maniera tale da valutare quale sia il comportamento del materiale che viene posizionato all'interno dello strumento stesso.

La sorgente sonora genera una serie di onde piane (cioè dirette lungo un solo asse spaziale) che vanno ad investire il campione da testare posto nel fondo, all'altra estremità del cilindro. Le onde generate dalla sorgente giungono perpendicolari al campione, con una certa pressione P ed una velocità u istantanee. Dalla formula riportata qui di seguito è immediato il calcolo dell'impedenza equivalente.

$$Z = \frac{p(x,t)}{u(x,t)} \quad [Kg / m^2 s] = [rayl]$$

Perché la misura presenti la maggiore accuratezza possibile è necessario che il tubo presenti accorgimenti costruttivi, ad esempio un'estensione decisamente maggiore della lunghezza d'onda stabilita per il suono di prova emesso dall'altoparlante. Infatti, in tal maniera, è possibile che il campione venga investito da un'onda "pulita e completa", che non risente della vicinanza alla sorgente sonora; dunque si ragiona sempre in termini di $L \gg \lambda$. Per procedere con la misurazione, è conveniente fissare un sistema di riferimento cartesiano, destrorso, ideale, con origine nel centro del campione, sulla faccia rivolta alla sorgente sonora. Ora un suono di prova, con specifiche pressione e lunghezza d'onda, può

bersagliare il campione che, a sua volta, reagirà assorbendone una certa quantità e riflettendone un'altra. Nel processo sperimentale è di considerevole importanza l'insorgere di fenomeni aggiuntivi, quali quello delle onde stazionarie. Esse sono il prodotto della sovrapposizione di due distinti fenomeni ondulatori: il primo generato dall'altoparlante (il suono di prova), il secondo generato dal materiale (suono riflesso). Infatti, l'onda in arrivo sul campione non ha "strada libera" innanzi a sé, ma deve scontrarsi con quella porzione che viene riflessa dal materiale. Ne consegue una nota matematica: per tener conto di tale effetto, in materia di equazione di D'Alambert, dobbiamo considerare l'espressione del potenziale della velocità ϕ come la sommatoria di due distinte componenti, una positiva, l'altra negativa, rispettivamente appartenenti all'onda diretta la prima e all'onda riflessa la seconda. Per giungere al calcolo del coefficiente d'assorbimento del materiale in esame premettiamo alcune considerazioni: innanzitutto, come avviene per la maggior parte di questi fenomeni fisici, possiamo considerare valido il principio di sovrapposizione degli effetti. Infatti è possibile calcolare separatamente le intensità dell'onda incidente e di quella riflessa, come se l'altra delle due non fosse presente. L'intensità totale è dunque semplicemente la somma di quelle componenti. Nel caso specifico avviene questo: l'onda sonora investe il campione di materiale, poi mentre una parte di essa viene assorbita dallo stesso, la rimanente torna indietro.

$$I_{inc} = I_{rif} + I_{ass}$$

Dividendo membro a membro per l'intensità incidente, otteniamo due nuove grandezze:

- Coefficiente di riflessione r
- Coefficiente di assorbimento α

$$1 = r + \alpha$$

Infine esplicitiamo α come:

$$\alpha = 1 - r = 1 - \frac{|P_-|^2}{|P_+|^2} = 1 - |CRF|^2$$

in cui ci siamo avvalsi del rapporto tra la pressione dell'onda riflessa e quella incidente, denominato CRF (Rapporto complesso di riflessione), oltre che della relazione che lega l'intensità I alla pressione P , come espressione del modulo quadro di quest'ultima.

3.2.8.1 Riferimenti normativi

La normativa tecnica di riferimento per la determinazione del coefficiente di assorbimento acustico mediante tubo di impedenza è la UNI EN ISO 10534 – 2. La norma considera due diverse postazioni microfoniche ed un sistema digitale di analisi di frequenza per determinare il coefficiente di assorbimento della potenza sonora α di un campione rispetto ad un'onda piana incidente in direzione ortogonale alla sua superficie.

3.3.8.2 Strumentazione di misura

Per l'esecuzione delle prove è stata impiegata la seguente strumentazione di misura, conforme alla normativa di riferimento:

- Sistema di acquisizione multicanale;
- Tubo di impedenza/perdita di trasmissione;
- Amplificatore;
- Microfoni a condensatore da 1/4";
- Preamplificatori;
- Calibratore 01 Db;
- Software di analisi;
- Barometro/termometro/igrometro.



Fig. 3.16 Sistema d'acquisizione multimediale.



Fig. 3.17 Sistema di amplificazione.



Fig. 3.18 Pistonofono.



Fig. 3.19 Microfoni a condensazione.

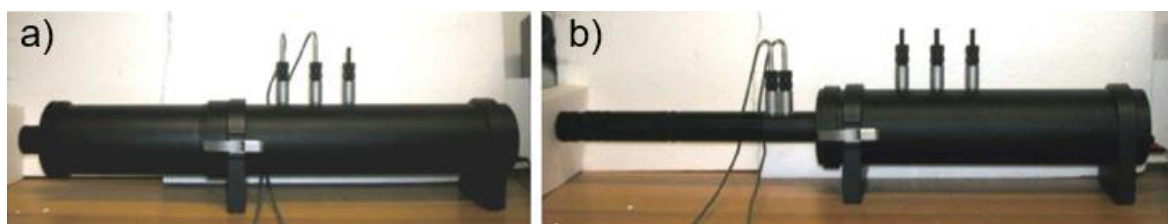


Fig. 3.20 Configurazione per la determinazione del coefficiente di assorbimento del tubo di impedenza: a) a tubo grande (50 – 1600 Hz); b) a tubo piccolo (400 – 6400 Hz).

3.3.8.3 Metodologia di misura

Il tubo di assorbimento è in grado di eseguire sperimentazioni su campioni di forma cilindrica, del diametro di 29 e 100 mm, che possono essere ottenuti perforando a rotazione il materiale da testare o in alternativa creando un campione avente le stesse dimensioni del tubo.

Per una corretta esecuzione della prova è necessario esaminare almeno un campione del diametro di 100 mm, per caratterizzarne le proprietà acustiche nelle frequenze comprese fra 50 e 1600 Hz, e uno del diametro di 29 mm, per frequenze comprese fra 500 e 6400 Hz.

Le misure effettuate nelle due configurazioni sono infine combinate con il software.

In Fig. 3.21 è riportato lo schema del tubo di impedenza impiegato per le misure del coefficiente di assorbimento e della relativa catena di misura. La sorgente sonora, connessa all'estremità del tubo, è alimentata tramite il generatore di segnale e l'amplificatore con un segnale random a banda larga, mentre il campione è fissato alle altre estremità e posizionato ad una distanza prefissata da una superficie riflettente, mediante apposito pistone rigido collegato ad asta graduata.

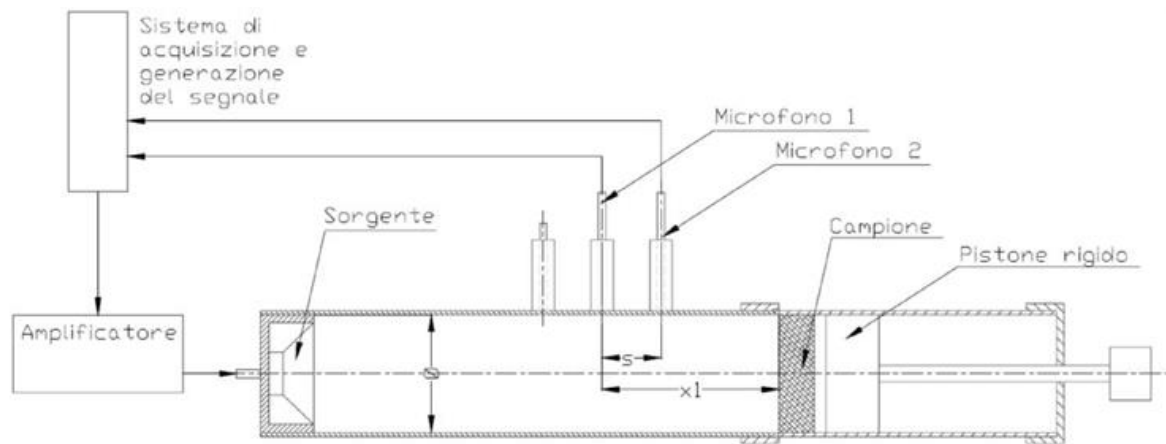


Fig. 3.21 Configurazione adottata per le misure del coefficiente di assorbimento: sezione longitudinale del tubo e catena di misura a 2 microfoni.

All'interno dell'apparato si genera un campo di onde stazionario per mezzo della sorgente, alimentata da un generatore di segnale e posta in fondo al tubo. La pressione sonora viene acquisita contemporaneamente in due posizioni microfoniche fissate (p_1 e p_2); viene quindi calcolata la funzione di trasferimento tra di esse. Da questa è quindi possibile determinare il coefficiente di riflessione della pressione sonora r e, infine, il coefficiente di assorbimento della potenza sonora α .

Il range di frequenza di accuratezza del metodo dipende dal diametro del tubo Φ e dalla distanza s tra i microfoni: il primo parametro determina il limite in alta frequenza (massima frequenza per la quale si propagano solo onde piane all'interno del tubo), la distanza tra i microfoni individua il limite in bassa frequenza. Per ottenere un range di accuratezza esteso tra 50 e 6400 Hz si possono impiegare due configurazioni dell'apparato di misura: un tubo di diametro maggiore (tubo grande: $\Phi = 100$ mm, $s = 50$ mm, x_1 (distanza della superficie del campione dal microfono 1) = 150 mm), range = 50 – 1600 Hz; un tubo di

diametro inferiore (tubo piccolo: $\Phi = 29$ mm, $s = 20$ mm, $x_1 = 55$ mm), range = 400 – 6400 Hz.

Le operazioni da seguire per la misura del coefficiente di assorbimento della potenza sonora α sono specificate nel seguito:

- 1) Rilevamento della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa e della pressione atmosferica all'interno dell'ambiente in cui è posta la strumentazione ed inserimento dei parametri all'interno del software;
- 2) Calibrazione in pressione dei microfoni;
- 3) Inserimento del campione all'interno del sistema porta – campione, posizionando il pistone rigido alla distanza desiderata e sigillando, eventualmente, i bordi esterni con nastro adesivo o plastilina in modo da evitare la presenza di fessure tra campione e pareti del tubo;
- 4) Valutazione del rapporto segnale – rumore all'interno del tubo compiendo due misure successive, rispettivamente con la sorgente attiva e disattiva: si verifica che il rapporto sia inferiore a 10 dB nell'intero range di frequenze esaminato;
- 5) Determinazione del fattore di calibrazione per correggere lo sfasamento tra i canali (microfono + preamplificatore + canale dell'analizzatore);
- 6) Collocazione dei microfoni nella configurazione ordinaria;
- 7) Determinazione dei coefficienti di riflessione e assorbimento.

3.3.8.4 Inserimento dei campioni

A seconda della misura effettuata, si monta il tubo di impedenza in base alle configurazioni (tubo grande, tubo piccolo) inserendo il campione nell'apposito alloggiamento. L'inserimento del campione necessita di particolare attenzione, in quanto si deve verificare che non ci sia troppo spazio tra le pareti laterali del campione e la superficie interna del tubo di impedenza (nel caso in cui questa condizione non si verifichi è necessario rivestire i bordi del campione con del nastro adesivo, come previsto dalla norma UNI EN ISO 10534 – 2). Inoltre, è necessario verificare che la base del provino aderisca perfettamente alla superficie terminale dell'alloggiamento (nel caso che questo non si verifichi, è

possibile regolarizzarla utilizzando del mastice). Infine, è utile constatare che la superficie del provino che sarà esposta direttamente al segnale sia il più possibile regolare.

Dopo aver inserito il campione nell'apposito alloggiamento e dopo aver installato quest'ultimo sulla parte principale della strumentazione, si passa all'installazione di tutti i componenti che consentono al software di interagire con il tubo di impedenza. In Fig. 3.22 si riportano alcune immagini relative a campioni alloggiati all'interno dell'apparato.

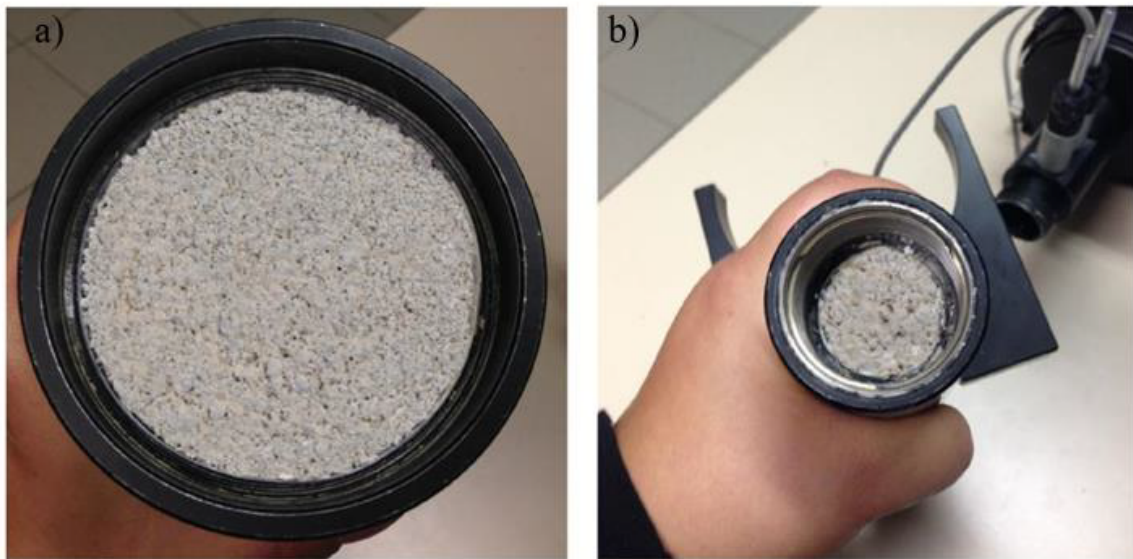


Fig. 3.22 Posizionamento del campione nell'alloggiamento: a) tubo grande; b) tubo piccolo.

4. MATERIALI IMPIEGATI

4.1 INTRODUZIONE

Nella presente sezione vengono descritti i materiali utilizzati nelle miscele di ricerca e che successivamente hanno condotto alla messa a punto dei differenti mix design ed ottimizzazioni.

In questa prima parte sono riportate, in maniera descrittiva, le caratteristiche chimiche e funzionali delle materie prime tradizionali e innovative sulle quali la ricerca è stata articolata.

Il capitolo può essere suddiviso nelle fasi di seguito elencate:

- classificazione dei materiali suddividendo, in prima battuta, tra tradizionali e innovativi. Successivamente si sono individuate in queste due macrocategorie i leganti, i filler e gli aggregati leggeri e non;
- elenco delle principali proprietà funzionali: curva granulometrica, densità apparente e/o superficie specifica, conducibilità termica, classe di reazione al fuoco, composizione chimica;
- analisi della microstruttura con microscopio elettronico a scansione, comunemente indicato con l'acronimo SEM, dall'inglese *Scanning Electron Microscope*.

Dopo aver condotto la prima parte degli studi di laboratorio sulla caratterizzazione dei materiali utilizzati, si è proceduto con il confezionamento degli intonaci realizzando differenti mix design (Cap.5).

4.2 MATERIALI TRADIZIONALI

4.2.1 Leganti

Materiali dotati di proprietà coesive e adesive che, miscelati con altri materiali, danno origine ad una massa plastica, la quale, con il tempo subisce un progressivo processo di indurimento fino a raggiungere elevate resistenze meccaniche.

Nel processo di irrigidimento di un legante si distinguono due fasi, la prima fase, chiamata presa, che consente il passaggio dalla fase fluida iniziale ad una massa più consistente; la

seconda fase è l'indurimento, nel quale si verifica un continuo aumento di resistenza meccanica.

I leganti si dividono in due grandi categorie:

- Leganti aerei, fanno presa con acqua ed induriscono a contatto con l'aria:
 - Calce
 - Gesso

- Leganti idraulici, fanno presa ed induriscono a contatto con acqua:
 - Calce idraulica
 - Cemento

4.2.1.1 Cemento

Legante idraulico che se miscelato in acqua sviluppa proprietà adesive, chimicamente è una miscela di silicati e alluminati di calcio, che si ottengono dalla cottura a elevate temperature di calcare e argilla o di marna. In edilizia, esistono diversi tipi di cemento, differenti per composizione, per proprietà di resistenza e durevolezza; il materiale che si ottiene è denominato clinker di Portland, finemente macinato e addizionato con gesso nella misura del 4 – 6% ha la funzione di ritardante di presa (ettringite primaria). Questa miscela commercialmente prende il nome di cemento Portland che, una volta miscelato con acqua si idrata e solidifica progressivamente (Fig. 4.1).



Fig.4.1 Cemento.

4.2.1.2 Calce idrata

Prodotto ottenuto dallo spegnimento industriale della calce viva calcica; essa è costituita essenzialmente da idrossido di calcio accompagnato da piccole quantità di carbonato. Si presenta in polvere e per ottenere la calce idrata, o calce spenta, il materiale subisce la reazione di spegnimento, associata a due effetti macroscopici evidenti: un violento rilascio di calore e la disgregazione della pietra per l'effetto espansivo della trasformazione da ossido ad idrossido di calcio.

Lo spegnimento viene condotto in due metodi differenti, per aspersione o per immersione. Nel primo caso si ricorre ad un impianto di spegnimento relativamente complesso che prevede: una prima frantumazione dell'ossido in pietre di dimensione millimetrica, il trasferimento dei frammenti su un nastro trasportatore su cui avviene il vero e proprio spegnimento, mediante spruzzatori che distribuiscono l'acqua su tutta la sezione in modo da bagnare uniformemente le pietre, che si frantumano ulteriormente per la reazione. Dopo la reazione si ottiene una polvere fine detta appunto calce idrata in polvere che viene suddivisa in base alla finezza. Lo spegnimento per immersione avviene invece quando le zolle di calce viva vengono gettate in una vasca piena d'acqua. In genere questo tipo di spegnimento avviene in due passaggi, con una prima vasca di spegnimento e il successivo passaggio nelle vasche di stagionatura, dentro le quali si ha la formazione della pasta detta "grassello di calce". Nelle vasche di stagionatura è essenziale la presenza di un film d'acqua di qualche centimetro sopra la massa plastica che garantisce che l'idrossido di calcio non reagirà con l'anidride carbonica dell'aria (Fig.4. 2).



Fig.4.2 Calce Idrata.

4.2.1.3 Calce idraulica naturale NHL

Prodotto ottenuto in cottura dalla fusione del calcare con l'argilla, legante con capacità di indurire sia all'aria aperta che sott'acqua. La calce idraulica appartiene alla famiglia dei leganti idraulici, ovvero alla famiglia dei cementi, infatti, oltre ad essere chiamata calce idraulica viene comunemente detta cemento povero; con tutte le caratteristiche sia di struttura sia di resistenza. I tempi di cottura vanno dalle 36 ore circa a 1000°C della calce idraulica naturale ai 45 minuti circa a 1450°C per il cemento. Le quantità di argilla vanno dal 20 – 22% per la calce idraulica ai 25-27% per il cemento. Legante a base d'idrossido di calcio dall'elevata traspirabilità, è un ottimo coibente termico e in particolare resiste bene agli sbalzi termici (Fig. 4.3).



Fig. 4.3 Calce idraulica naturale NHL.

4.2.1.4 Gesso

Il materiale di partenza per la produzione del gesso è costituito dalla pietra da gesso la quale viene dapprima frantumata, quindi inviata ai forni di cottura ove subisce la disidratazione (perdita di acqua) che conferisce al prodotto finito le proprietà leganti, ed infine, setacciata ed omogeneizzata. Il minerale usato per la fabbricazione del gesso legante è il solfato di calcio bi-idrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig.4.4).



Fig.4.4 Gesso.

4.2.2 Filler

L'impiego dei filler apporta notevoli miglioramenti delle miscele sotto l'aspetto reologico e prestazionale, allargando le potenziali destinazioni e i campi di applicazione delle malte.

Per definizione il filler è un aggregato, la maggior parte del quale passa allo staccio 0,063 mm, che può essere aggiunto ai materiali da costruzione per conferirne diverse proprietà. Viene definito il termine polveri, (fini), come classe granulometrica di un aggregato che passa allo staccio medesimo, cioè 0,063 mm.

4.2.2.1 Perlite

La perlite è un composto del silicio ottenuta dalla reazione in fiamma fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Lo stato fisico più comune in natura è quello solido cristallino, in minerali come il quarzo e i suoi polimorfi, e più raramente quello amorfo (Fig.4.5).

La caratterizzazione al SEM sia nella configurazione filler che, in maniera più accentuata nella configurazione espansa, evidenziano la natura cristallina della materia prima, la quale forma macroregioni caratterizzate da un'elevata porosità e cavità interconnesse tra di loro. Ciò è molto importante dal punto di vista termico e acustico in quanto il materiale, sia in fase filler che in aggregato mantiene sempre la sua porosità, attribuendo al composto una percentuale di pori elevata (Fig.4.6).



Fig.4.5 Perlite.

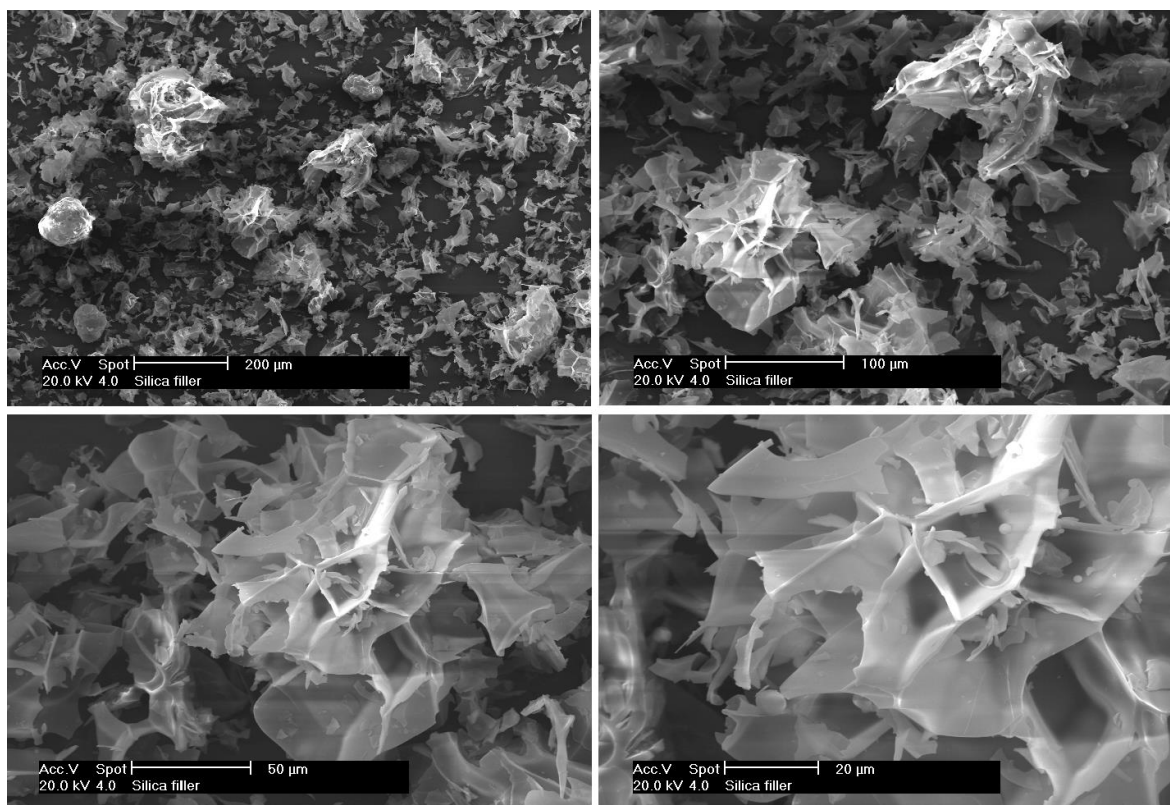


Fig. 4.6 Caratterizzazione SEM – Silice filler (200μm - 100μm - 50μm – 20μm).

COMPOSIZIONE CHIMICA

Perlite Filler		
silica	SiO ₂	74% - 78%
aluminia	Al ₂ O ₃	11% - 14%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,5% - 1,5%
sodium oxide	Na ₂ O	3% - 6%
potassium oxide	K ₂ O	2% - 4%
calcium oxide	CaO	1% - 2%
magnesium oxide	MgO	0% - 0,5%

4.2.2.2 *Polvere di marmo*

Filler ottenuto dalla macinazione e dalla vagliatura di marmo (Fig.4.7).



Fig.4.7 Polvere di marmo.

4.2.2.3 *Calcare*

Filler ottenuto dalla micronizzazione di un carbonato di calcio con tenore maggiore del 98% (Fig. 4.8).



Fig. 4.8 Calcare.

4.2.3 Aggregati

Materiali minerali granulari grezzi suddivisi in naturali, artificiali o riciclati provenienti da materiali precedentemente impiegati nel campo edilizio. Gli aggregati o inerti vengono utilizzati in edilizia principalmente come componenti di materiali compositi, come ad esempio i conglomerati cementizi, i conglomerati bituminosi e gli intonaci. Costituiscono l'ossatura del conglomerato, la cui coesione è garantita dalla pasta cementizia o dal bitume o dalla calce. Per la buona riuscita di un conglomerato è fondamentale, oltre che la qualità degli aggregati, anche la composizione granulometrica (curva granulometrica).

4.2.3.1 Pomice

La pomice è una roccia magmatica piroclastica, leggerissima a causa dell'elevatissima porosità (Fig. 4.9). Essa si forma principalmente da eruzioni di tipo esplosivo, quindi da magmi acidi, silicatici o felsici; la porosità è dovuta alla formazione di bolle di gas di struttura simile alla schiuma nella matrice vetrosa della roccia. Il rapido raffreddamento mantiene la struttura vescicolare (formante anche il 90% del volume mentre la scoria vulcanica è meno vescicolata), e la parte solida è costituita da roccia amorfa, raramente con una piccola componente cristallina. La caratterizzazione al SEM evidenzia come la pomice, grazie alla sua natura e origine, presenti una microporosità diffusa all'interno della sua matrice, ciò comporta alla formazione di un materiale poroso quando miscelata all'interno di una matrice (Fig. 4.10 – 4.11).



Fig. 4.9 Pomice.

Tipologia 1-2

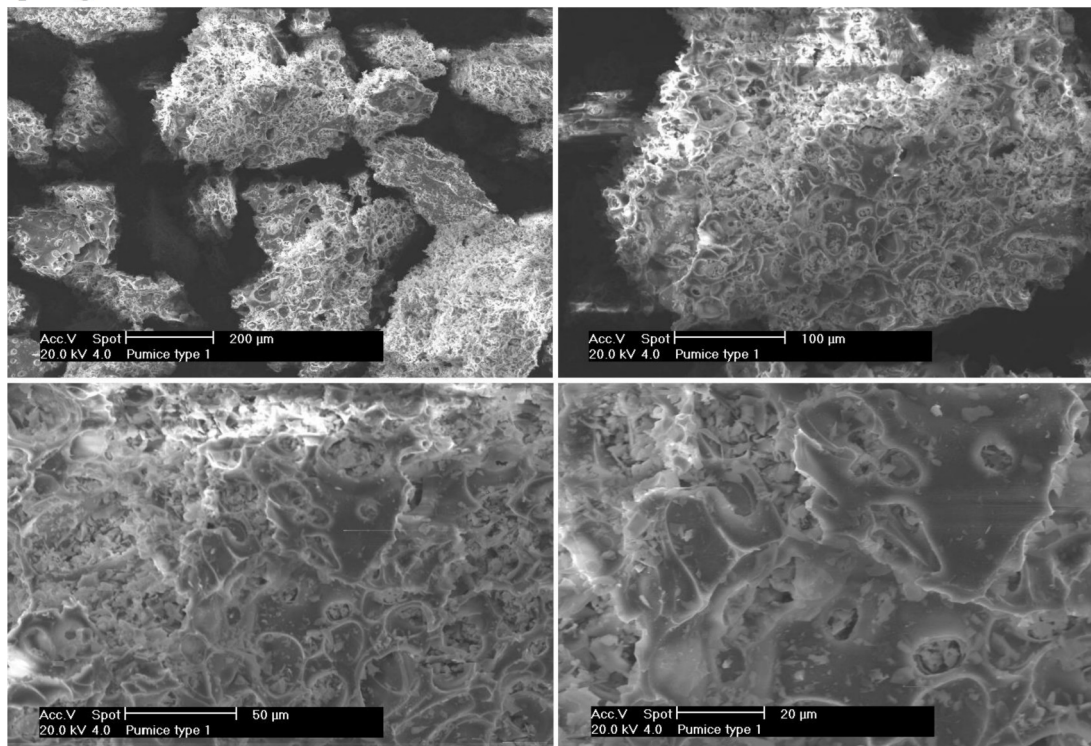


Fig. 4.10 Caratterizzazione SEM – Pomice – Tipologia1 (200µm - 100µm - 50µm – 20µm).

Tipologia 3

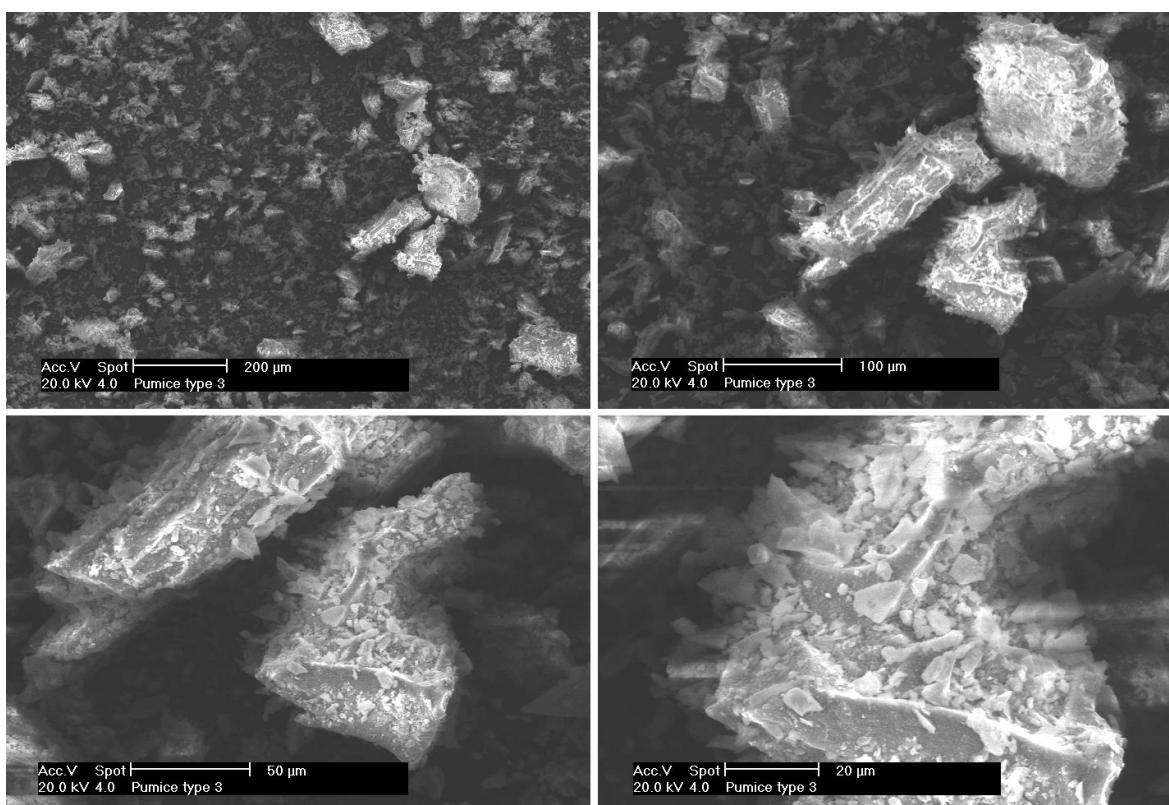


Fig. 4.11 Caratterizzazione SEM – Pumice – Tipologia3 (200μm - 100μm - 50μm – 20μm).

COMPOSIZIONE CHIMICA

Pumice Tipo 1 e 2		
Silicia	SiO ₂	71,7%
sodium oxide	Na ₂ O	13,3%
calcium oxide	CaO	8,9%
aluminia	Al ₂ O ₃	2,5%
magnesium oxide	MgO	2,1%
potassium oxide	K ₂ O	0,8%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,4%
sulfur dioxide	SO ₃	0,1%
titanium dioxide	TiO ₂	0,1%

Pomice Tipo 3		
Silicia	SiO ₂	62,5%
alumina	Al ₂ O ₃	17,5%
potassium oxide	K ₂ O	9,5%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	2,6%
calcium oxide	CaO	2,5%
sodium oxide	Na ₂ O	2,2%
titanium dioxide	TiO ₂	0,5%
magnesium oxide	MgO	0,4%

4.2.3.2 Sughero

Il sughero, è una risorsa naturale, sostenibile, ecologica e rispettosa dell'ambiente in quanto è biodegradabile e rinnovabile al 100%. Dotato di notevole elasticità, ha ottime proprietà fisico-chimiche e meccaniche, la sua struttura compatta e indeformabile lo rende impermeabile ai liquidi e ai gas. E' un ottimo isolante sia termico che acustico, resiste bene all'usura, al fuoco ed all'attacco di roditori e insetti; inoltre ha buone caratteristiche di isolamento nei confronti delle vibrazioni. Il sughero si estrae asportando la corteccia dal tronco e dai rami più grossi senza causare danni alla pianta, con cicli di estrazione di circa 9/12 anni; questo metodo non danneggia la pianta e permette alla nuova corteccia di crescere. Questo rende ogni albero una fonte di materie prime rinnovabili. Per le sue ottime caratteristiche isolanti (conduttività: 0,045-0,06 W/mK), viene utilizzato in edilizia, nello specifico nella Bioedilizia, in quanto il sughero al naturale o opportunamente trasformato rientra nel totale rispetto dei principi di sostenibilità e compatibilità tra i materiali (Fig.4.12). La caratterizzazione al SEM evidenzia come il sughero, grazie alla sua natura, present una microporosità diffusa all'interno della sua matrice (Fig. 4.13).



Fig. 4.12 Sughero in granuli.

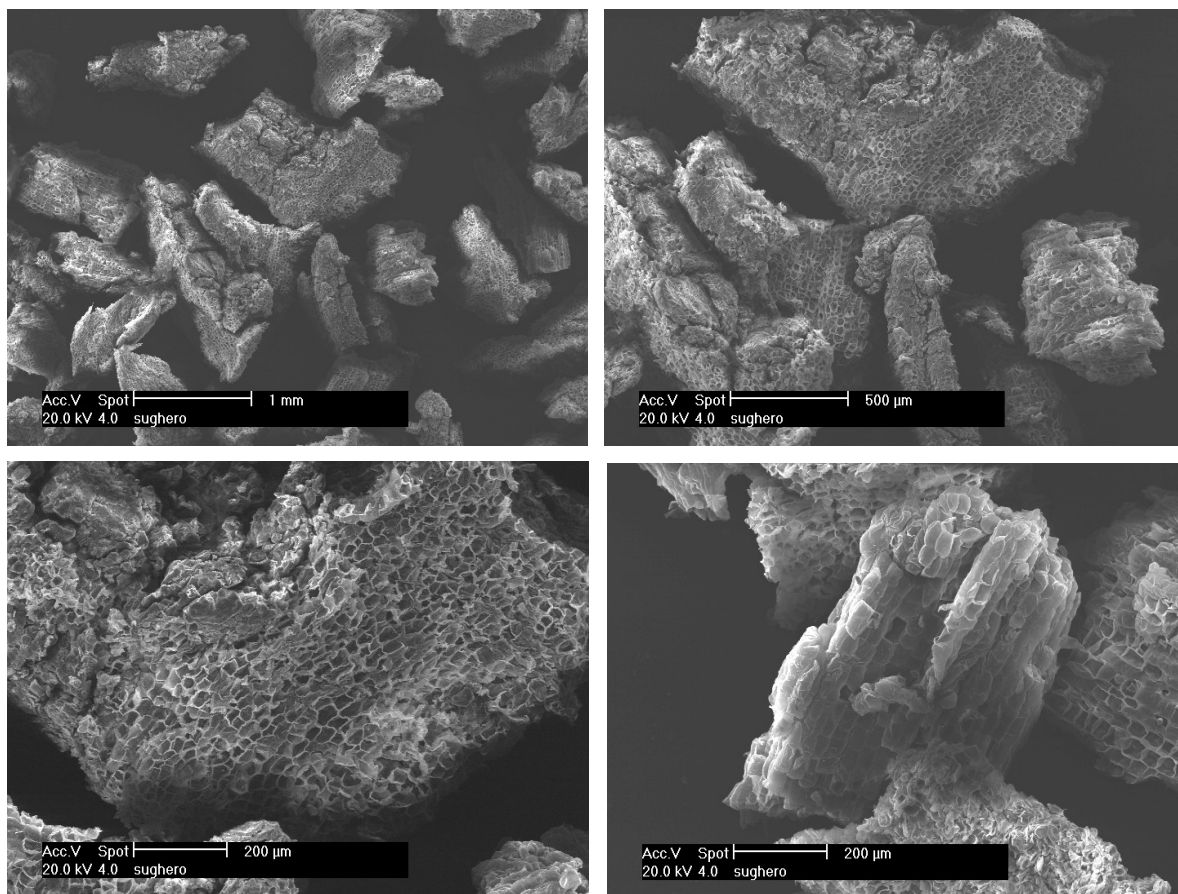


Fig. 4.13 Caratterizzazione SEM – (1mm - 500μm - 200μm).

4.2.3.3 Perlite

Rif. Cap. 4.2.2.1, roccia vulcanica effusiva di colore variabile tra il grigio e il rosa, che ha la capacità di espandere il proprio volume fino a 20 volte rispetto a quello originale quando viene portata a elevate temperature, prossime al suo punto di rammollimento. L'espansione è legata alla presenza di acqua rimasta confinata nella porosità chiusa della roccia per effetto del repentino raffreddamento in fase di fuoriuscita del magma. Quando viene sottoposta a temperature comprese tra 550 e i 900°C, la roccia si espande per la vaporizzazione dell'acqua: in questo processo irreversibile si generano internamente ai granuli delle bolle che conferiscono alla roccia espansa la leggerezza che la caratterizza, un buon potere di termo isolamento (conduttività: $0,05 \div 0,06$ W/mK) e il tipico colore bianco (Fig. 4.14 – 4.15).



Fig. 4.14 Perlite.

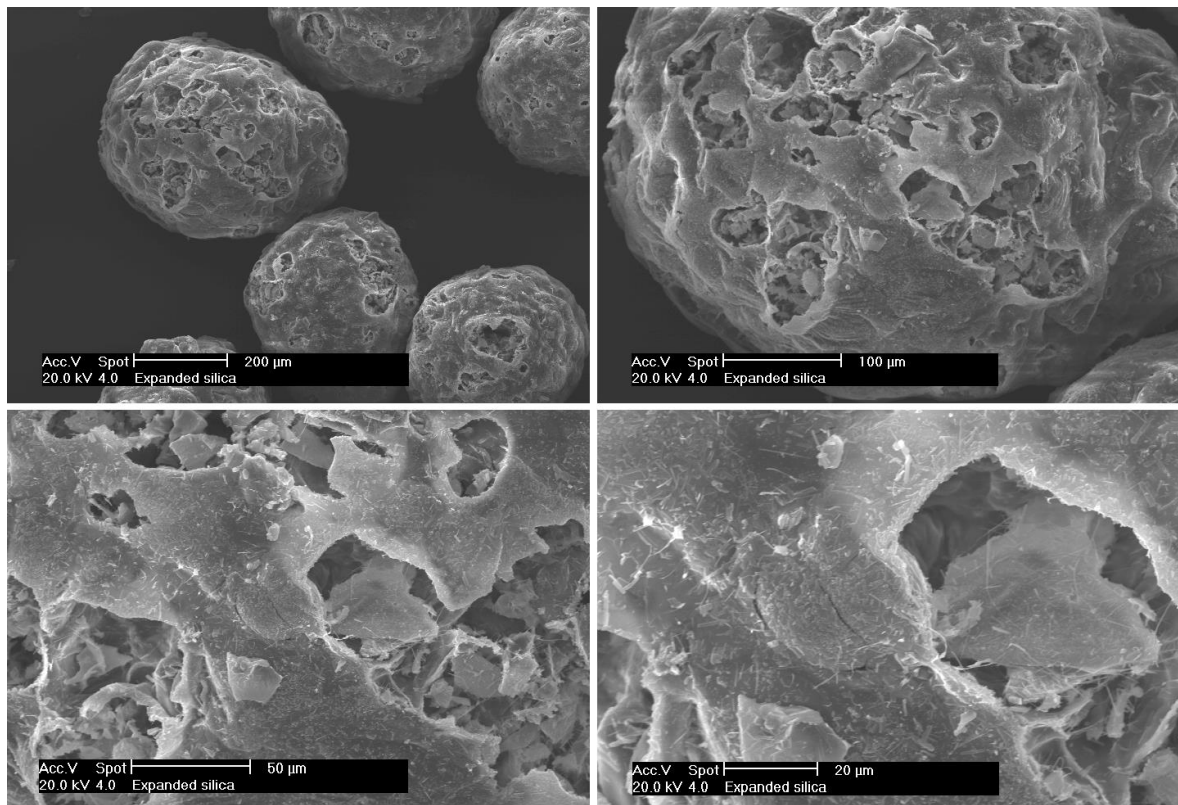


Fig. 4.15 Caratterizzazione SEM – Silice espansa (200µm - 100µm - 50µm – 20µm).

COMPOSIZIONE CHIMICA

Perlite espansa		
Silicia	SiO ₂	72%
aluminia	Al ₂ O ₃	14%
potassium oxide	K ₂ O	8,8%
sodium oxide	Na ₂ O	4,0%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,7%
calcium oxide	CaO	0,3%
magnesium oxide	MgO	0,1%
titanium dioxide	TiO ₂	0,1%

4.2.3.4 Vermiculite

La vermiculite è un minerale formato da minutissime scaglie o cristalli lamellari. Le lamine di vermiculite, riscaldate rapidamente a una temperatura sui 300°C, perdono acqua, che si trasforma in vapore, e si sfogliano, espandendosi (anche 25 volte il volume originario) in direzione perpendicolare ai piani di sfaldatura e assumendo forme contorte di aspetto vermicolare e dando una luminosità giallo – dorata. La vermiculite ha proprietà tixotropica. Se sottoposta a parziale cottura, dà un prodotto molto leggero, utilizzato mescolato a leganti nell'edilizia, come isolante termico e acustico (Fig.4.16).



Fig. 4.16 Vermiculite.

COMPOSIZIONE CHIMICA

Vermiculite					
silicia	SiO ₂	34,46%	permagnate	MnO ₄	0,15%
magnesium oxide	MgO	20,96%	vanadium oxyde	V ₂ O ₅	<0,05%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	8,98%	chromium oxyde	CrO ₃	<0,05%
aluminia	Al ₂ O ₃	12,79%	oxydo barico	BaO	<0,05%
titanium dioxide	TiO ₂	1,59%	zirconium dioxyde	ZrO ₂	<0,05%
calcium oxide	CaO	0,54%	zinc oxide	ZnO	<0,05%
potassium oxide	K ₂ O	0,29%	strontium oxide	SrO	<0,05%
sodium oxide	Na ₂ O	0,07%	carbon		0,03%
phosforus pentoxyde	P ₂ O ₅	0,29%	fluorine		0,44%

4.2.3.5 Quarzo

Le sabbie di quarzo vengono ricavate mediante estrazione o frantumazione di rocce contenenti quarziti. Il materiale viene selezionato mediante un processo di vagliatura a secco e successivamente selezionato granulometricamente (Fig. 4.17).

La sabbia di quarzo ad alto contenuto di silice (99%) è un materiale duro (7 scala Mohs) con un'ottima resistenza all'usura, alle alte temperature (1700°) e alla pressione.



Fig. 4.17 Sabbia di quarzo.

4.2.3.6 Carbonato di calcio

Il carbonato di calcio proveniente da giacimenti estrattivi, ed è costituito da roccia calcarea prevalentemente microcristallina la cui composizione chimica è CaCO₃ superiore al 99%. Per le sue caratteristiche chimiche e la varietà di granulometrie proposte, è

impiegato in diversi settori industriali, manifatturieri in agricoltura, in zootecnica, in edilizia, nella farmaceutica e nell'alimentare. La roccia calcarea, dopo l'estrazione nei giacimenti di proprietà, subisce un processo di riduzione della granulometria attraverso la macinazione a frantoio, una successiva selezione ai vagli e quindi la macinazione negli appositi mulini (Fig. 4.18).



Fig. 4.18 Carbonato di calcio.

4.3 MATERIALI INNOVATIVI

4.3.1 Filler

4.3.1.1 Caolino

Il caolino, è una roccia prevalentemente costituita da caolinite, ossia da un minerale silicato delle argille (alluminio silicato idrato). Si tratta di una roccia sedimentaria, prodotta dall'azione dell'acqua sul feldspato (gruppo di minerali che si cristallizzano dal magma), dall'aspetto terroso e tenero.

Ciò che caratterizza il caolino, è il colore bianco o grigiastro, anche se, talvolta, questa roccia può assumere colorazioni rossicce o arancio per la presenza di ossido di ferro.

Essendo un'argilla bianca dall'elevata purezza (silicato bianco), il caolino si presta per le lavorazioni in campo edile, dove, grazie all'ottima capacità di impasto (acqua e calce) ed alla spiccata elasticità, dà luogo a miscele versatili e dalle ottime caratteristiche (Fig. 4.19).

La caratterizzazione al SEM evidenzia le proprietà di questo materiale che funge principalmente da matrice/filler, andando a creare una "base" che unisce in maniera omogenea tutti i componenti dell'impasto. Questo, unito alle caratteristiche del caolino ed alla sua elasticità sono fondamentali in un composto con caratteristiche fonoassorbenti (Fig. 4.20).



Fig. 4.19 Caolino.

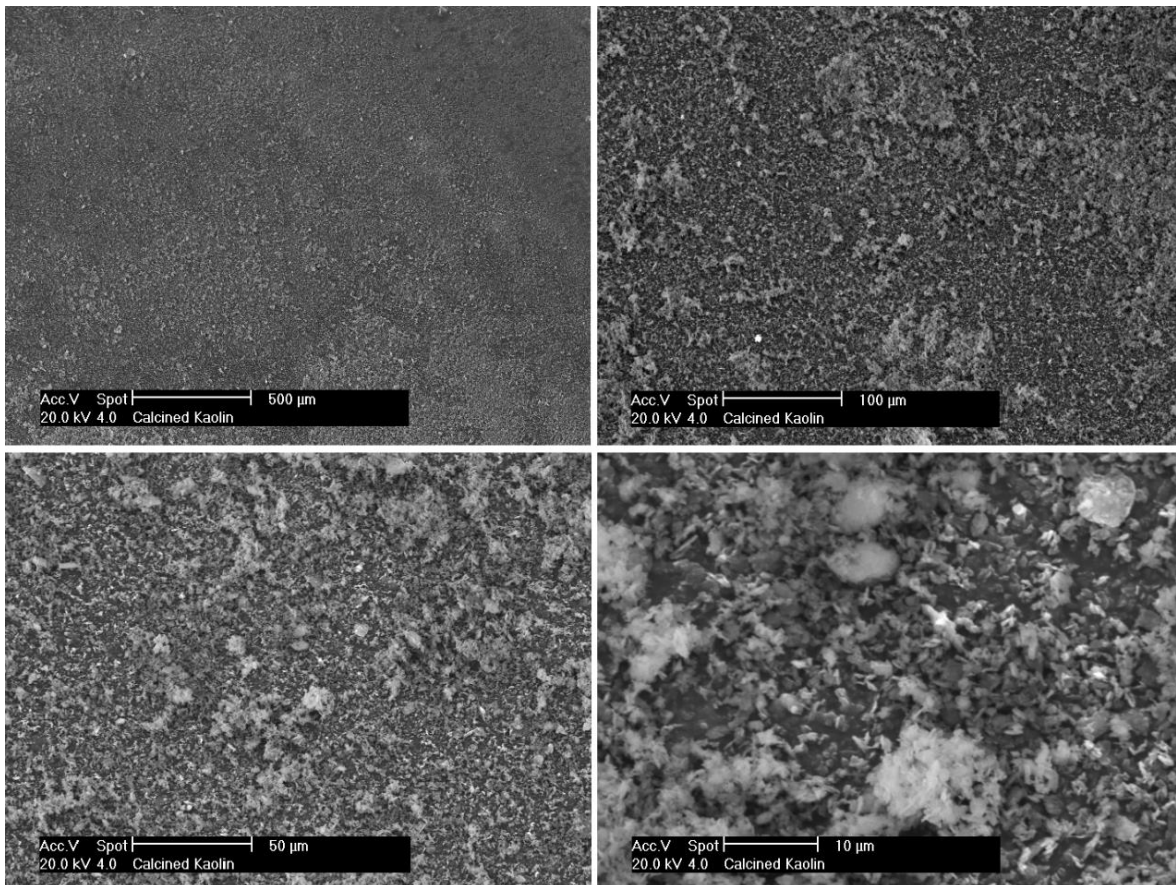


Fig. 4.20 Caratterizzazione SEM – Caolino (500μm - 100μm - 50μm – 10μm).

COMPOSIZIONE CHIMICA

Caolino calcinato		
silicia	SiO ₂	80%
alumina	Al ₂ O ₃	13,8%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,7%
titanium dioxide	TiO ₂	0,15%
magnesium oxide	MgO	0,1%
potassium oxide	K ₂ O	0,2%
sodium oxide	Na ₂ O	0,1%
calcium oxide	CaO	2,5%

4.3.1.2 Zeolite

Minerale di origine vulcanica, formatosi attraverso lunghe fasi di trasformazione delle lave vulcaniche. La parola zeolite significa “pietra che bolle” per la sua caratteristica di liberare vapore acqueo dalla roccia quando sottoposta a riscaldamento. Tale fenomeno è dovuto alla particolare presenza di acqua intrappolata nelle cavità cristalline. Le molecole di acqua e ioni dotati di estrema mobilità conferiscono alla zeolite un’elevata bioattività (Fig. 4.21).



Fig. 4.21 Zeolite.

4.3.2 Aggregati

4.3.2.1 Vetro espanso riciclato

Materiale derivante da vetro riciclato e utilizzato come filler per malta, intonaci, adesivi e pannelli da costruzione, per realizzare pareti separatorie, pavimentazioni e come materiale

fonoassorbente che sfrutta la capacità dei granuli di vetro riciclato di aderire saldamente alle matrici di gesso e cemento (Fig. 4.22).

La caratterizzazione al SEM evidenzia in modo ancor più marcato la porosità di questa materia prima, la quale, non solo si presenta sotto forma di granuli (quindi con caratteristiche porose quando inseriti in un impasto) ma anche la morfologia stessa delle sfere di vetro è caratterizzata da micropori che incrementano maggiormente le proprietà fonoassorbenti una volta all'interno di un composto (Fig.4.23).



Fig. 4.22 Vetro espanso riciclato.

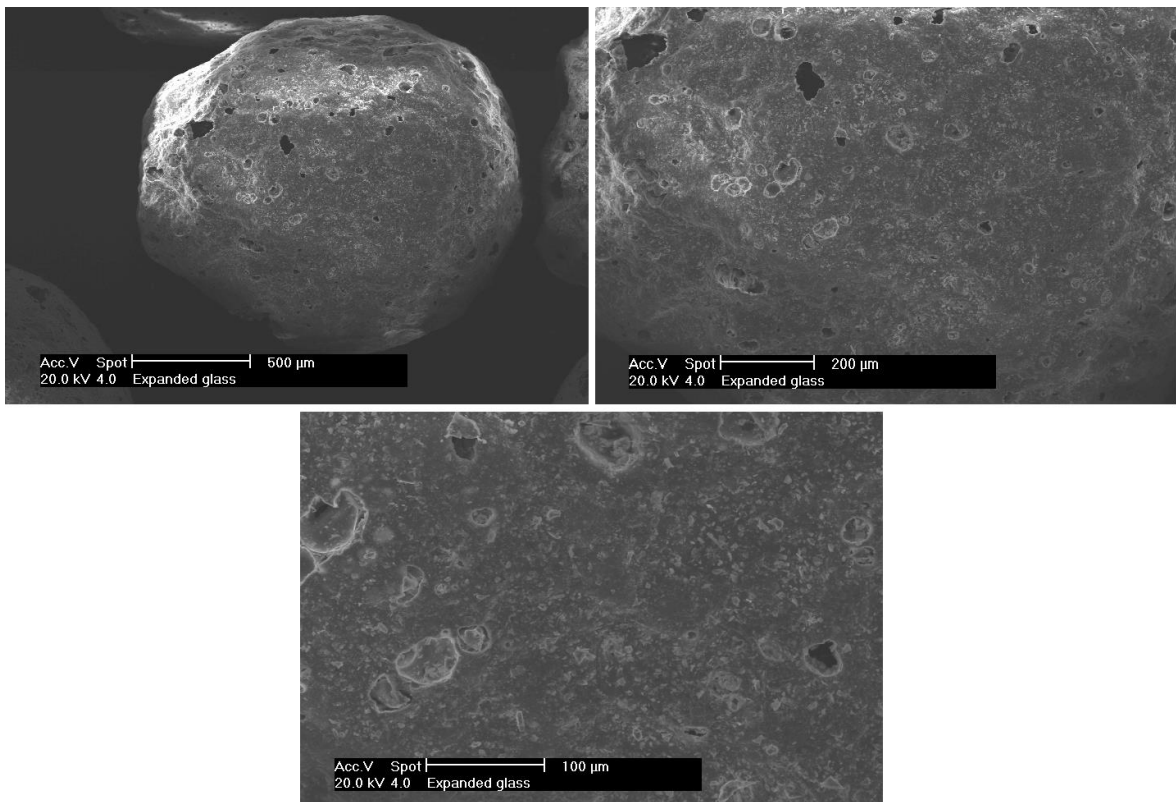


Fig. 4.23 Caratterizzazione SEM – Vetro espanso (500μm - 200μm – 100μm).

COMPOSIZIONE CHIMICA

Vetro riciclato espanso		
Silicia	SiO ₂	56%
Alumina	Al ₂ O ₃	22%
Alkali	K ₂ O+Na ₂ O	5% - 7%
iron oxide	Fe ₂ O ₃	3%
calcium oxide	CaO	2%
magnesium oxide	MgO	0,5%
titanium dioxide	TiO ₂	0,5%

4.3.2.2 Silice espansa con vetro riciclato

Costituito da silice amorfa e vetro riciclo (Fig. 4.24). La silice è un composto del silicio ottenuta dalla reazione in fiamma fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Lo stato fisico più comune in natura è quello solido cristallino, in minerali come il quarzo e i suoi polimorfi, e più raramente quello amorfo.



Fig. 4.24 Silice espansa con vetro riciclato.

COMPOSIZIONE CHIMICA

Silice espansa con vetro riciclato		
Silicia	SiO ₂	81%
sodium oxide	Na ₂ O	14%
calcium oxide	CaO	2%
alumina	Al ₂ O ₃	1%
magnesium oxide	MgO	1%
potassium oxide	K ₂ O	1%

4.3.2.3 Gel di silice

Sostanza allo stato solido scoperta nei primi del 900, simile al gel nella quale la componente liquida viene sostituita da gas. Come risultato finale si ottiene una schiuma solida con diverse proprietà, la più importante delle quali è l'efficacia nell'isolare.

È la sostanza solida meno densa conosciuta, la più leggera per metro cubo; è formata dal 99,8% di aria e dal 0,2% di diossido di silicio (silice), principale componente del vetro.

Chiamato fumo ghiacciato, fumo solido o blu in quanto trasparente; al tatto risulta essere simile alla gomma-piuma (Fig. 4.25).

Tale prodotto è mille volte meno denso del vetro e tre volte più pesante dell'aria, sopporta altissime temperature; con una conducibilità dell'ordine di $0,17-0,0042 \text{ W/mK}$ è un'ottimo isolante termico. Essendo costituito essenzialmente da aria è considerato come il solido più leggero esistente in natura.

Per quanto riguarda la caratteristica di trasmettere suono e calore, è molto simile ai gas, motivo per il quale i valori di propagazione di suono e calore sono molto bassi. E' un inibitore convettivo in quanto l'aria non può circolare all'interno del reticolo. In Fig. 4.25 il gel di silice al microscopio ottico, riferimento in mm.



Fig. 4.24 Gel di silice.

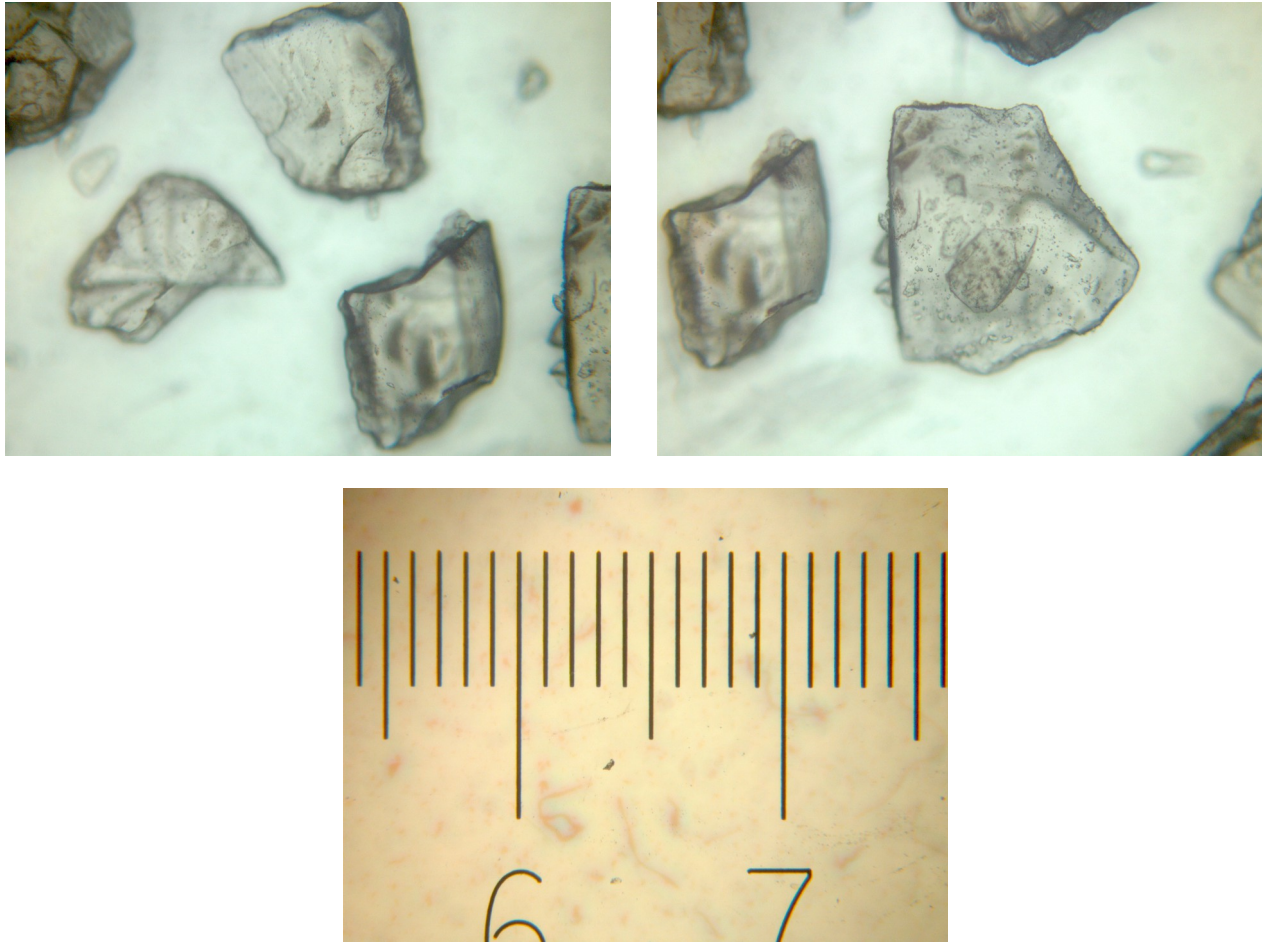


Fig. 4.25 Gel di silice - Immagini al microscopio ottico, riferimento in mm.

4.4 ADDITIVI

Composti generalmente di origine organica, sia liquidi sia in polvere, che, introdotti in piccole quantità nell'impasto, tramite un'azione chimica o fisica, inducono particolari modifiche nelle proprietà dell'intonaco fresco e indurito.

Gli additivi vengono classificati secondo la funzione coinvolta nel miglioramento.

I composti più comuni sono:

- Gli *additivi fluidificanti* o riduttori di acqua che migliorano la lavorabilità dell'impasto a pari valore del rapporto acqua/polvere (a/c). Tali additivi inoltre, poiché determinano una diminuzione della tensione

superficiale dell'acqua d'impasto, consentono di ridurre il fabbisogno d'acqua per la data consistenza desiderata. Pertanto senza modificare il dosaggio di legante (riduzione del rapporto a/c) ne risulta un aumento della resistenza caratteristica a compressione (R_{ck}) e migliorano la durabilità.

- Gli *acceleranti di presa e d'indurimento* hanno la funzione di modificare il grado d'idratazione del legante alle brevi stagionature in modo da ridurre i tempi di presa (acceleranti di presa) o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni (acceleranti d'indurimento) soprattutto nei climi invernali quando la bassa temperatura rallenta la reazione tra l'acqua e la polvere.
- I *ritardanti di presa e d'indurimento* hanno la funzione di ridurre il grado d'idratazione del legante nelle prime ore, soprattutto in climi caldi quando le alte temperature accelerano l'idratazione del cemento con perdita di lavorabilità la quale può ostacolare il trasporto del materiale in cantiere, le operazioni di getto e di finitura. Tali prodotti non modificano sostanzialmente le prestazioni dell'intonaco in servizio.
- Gli *aeranti* modificano la tensione superficiale dell'acqua e favoriscono la formazione nel getto d'intonaco di bolle d'aria a seguito della miscelazione dell'impasto in betoniera. La presenza di macropori nella matrice cementizia migliora la resistenza ai cicli di gelo e disgelo.
- I *riduttori di ritiro* sono prodotti liquidi a base di sostanze organiche che agiscono sulla tensione superficiale dell'acqua presente nei micro pori dell'intonaco e fanno diminuire il ritiro igrometrico e quello plastico provocati dall'evaporazione dell'acqua nello stato rispettivamente indurito e fresco. Tali additivi riducono anche il ritiro autogeno che si manifesta, anche in assenza di evaporazione, negli intonaci con rapporti a/c molto bassi ($< 0,40$).

Gli additivi utilizzati sono ottenuti da vegetali, hanno lo scopo di far amalgamare l'impasto rendendolo più lavorabile e facile da applicare. Inoltre danno luogo alla microventilazione, necessaria per mantenere un'alta permeabilità al vapore acqueo e una migliore resistenza termica del legante.

4.5 TABELLE RIASSUNTIVE MATERIALI

Tab. 4.1 Leganti tradizionali.

Leganti	Caratteristiche	Curva granulometrica (μm)	Densità apparente (kg/m^3)	Composizione chimica	pH
Cemento CEM II / B-LL 32,5 R – 42,5R	Cemento bianco Portland al calcare tipo II a resistenza iniziale elevata	0,415 m2/g	1400 - 1700	65% ÷ 79% di clinker bianco Solfati (come SO_3) \leq 3,5% Cloruri \leq 0,10%	11 - 13,5
Calce Idrata CL 80 S-01	Prodotto ottenuto dallo spegnimento industriale della calce viva calcica	0,312 m2/g	200 - 800	$\text{CaO} + \text{MgO} \geq 80\%$ $\text{CO}_2 \leq 7$ $\text{MgO} \leq 5$	12,4
Calce idraulica naturale NHL 5	Prodotto ottenuto in cottura dalla fusione del calcare con l'argilla	4,8% finezza a 90 1% finezza a 200	500 - 760	1,05 % SO_3 1,4,8 % contenuto di calce libera	12 - 13
Gesso	Prodotto in polvere composto da gesso e anidrene	< 0,3 mm	800	Solfato di calcio	7

Tab. 4.2 Filler tradizionali.

Filler	Caratteristiche	Curva granulometrica (μm)	Superficie specifica m^2/g (BET)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Reazione al fuoco
Perlite	polvere micronizzata di perlite espansa	0 - 150	-	100 - 160	6,5 - 7,5	0,04 - 0,06	Classe A1
Polvere di marmo	polvere micronizzata di marmo	0 - 0,2	-	270	-	-	Non infiammabile
Calcare	Carbonato di calcio CaO_3	1,8 - 3,3	3 - 5	800 - 1000	9	-	Non infiammabile

Tab. 4.3 Aggregati tradizionali.

Aggregati leggeri termici	Caratteristiche	Curva granulometrica (µm)	Densità apparente (kg/m ³)	pH	λ (W/mK)	Reazione al fuoco
Pomice tipo 1 e 2	Silicato espanso naturalmente	90 - 300	360	7 - 8	0,08	Classe A1
		250 - 500	320			
		300 - 1500	310			
		1 - 2	300			
Pomice tipo 3	da minerale magmatico effusivo espanso naturalmente	0 - 100	800 - 950	7 - 8	0,11	Classe A1
		100 - 850	750 - 800			
		0,850 - 3	850 - 1000			
Sughero	da sughero naturale	0 - 3,15	80 - 100	-	0,040 - 0,050	-
Perlite espansa	perlite espansa tramite espansione con bruciatori a metano	2000 - 5000	95 - 105	6,5 - 7,5	0,052	Classe A1
Vermiculite	fillosilicato di magnesio, ferro trivalente e alluminio, con ossidrilici e acqua	500 - 2800	80 - 135	7 - 8	0,0057	Classe A1
Aggregati tradizionali	Caratteristiche	Curva granulometrica (µm)	Densità apparente (kg/m ³)	pH	λ (W/mK)	Reazione al fuoco
Quarzo	sabbia di quarzo	60 - 100	2600	7,5	-	Classe A1
Carbonato di calcio	natura calcarea e forma delle particelle romboconica	200 - 600	2700	-	-	Classe A1

Tab. 4.4 Filler Innovativi.

Filler	Caratteristiche	Curva granulometrica (µm)	Superficie specifica m ² /g (BET)	Densità apparente (kg/m ³)	pH	λ (W/mK)	Reazione al fuoco
Caolino	caolino calcinato	0,8	-	210	4 - 7	-	Classe A1
Zeolite	origine vulcanica	5	-	360	10,7	-	Classe A1

Tab. 4.5 Filler Aggregati Innovativi.

Aggregati leggeri termici	Caratteristiche	Curva granulometrica (μm)	Densità apparente (kg/m^3)	pH	λ (W/mK)	Reazione al fuoco
Vetro espanso riciclato	vetro riciclato espanso	250 - 500	340	8 - 11	0,07	Classe A1
		500 - 1000	270			
		2000 - 4000	190			
Silice espansa con vetro riciclato	silice amorfa e vetro riciclato	100 - 300	85	11	0,04	Classe A1
		500 - 2000	60		0,03	
Gel di silice	silice amorfa idrofoba	10 - 4000	60 - 100	-	0,018 - 0,020	Classe A1

Tab. 4.6 Additivi

Tipologia additivo	Principio attivo	Contenuto solido (%)	Densità apparente (kg/m^3)	pH
Resina redispersibile	Polymer composition: VAC/VeoVa/E	98%	500	5 - 8
Antiritiro	Miscela di alcoli alifatici e glicoli con carrier inorganico	-	420	7,5
Cellulosa (Miscela di sostanze derivate dell'amido e della cellulosa)	HIDROXYPROPYL METHYL CELLULOSE	Methoxyl 19% -24% Hydroxypoxy 4% - 12%	300	4 - 8
Aerante	Sodiolaurilsolfato	-	200 - 400	9,5 - 10,5
Fibre 12 mm	Polipropilene	-	91	-

5. SPERIMENTAZIONE SU INTONACI AVANZATI

5.1 INTRODUZIONE

La malta è una miscela formata da un legante (cemento) unito a sabbia e acqua; i componenti vengono miscelati tra loro in opportune proporzioni, al fine di ottenere un impasto fresco di consistenza adatta all'uso e una determinata resistenza allo stato indurito. La malta è dunque un conglomerato in cui gli elementi inerti hanno piccole dimensioni; in particolare, quando si usa il cemento come legante, si può parlare di un "microcalcestruzzo".

Gli impieghi più conosciuti delle malte sono quelli tradizionali per murature ed intonaci e per l'applicazione di rivestimenti in genere.

Nuovi impieghi si sono via via aggiunti a quelli tradizionali: malte da iniezioni e consolidamento, particolari tipi di malte attivate per via chimica o meccanica, o malte ottenute per proiezione con attrezzature appositamente studiate.

Dopo aver analizzato le caratteristiche dei materiali che compongono le miscele, in questo capitolo saranno descritti il processo di messa a punto delle miscele.

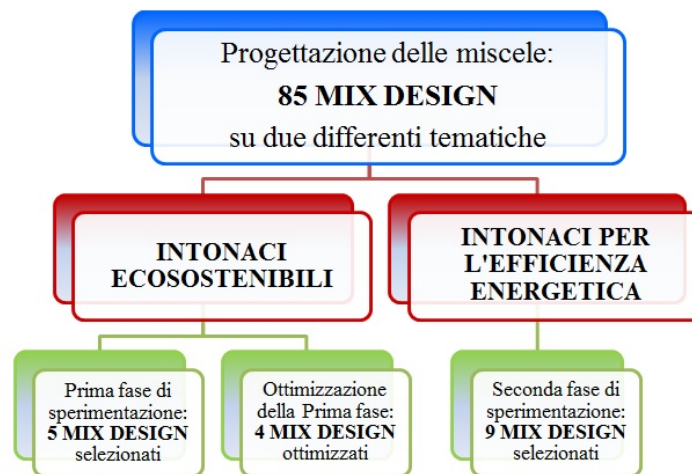
La sperimentazione è stata condotta per step progressivi, in cui le miscele sono state gradualmente ottimizzate al fine di ottenere un buon compromesso tra lavorabilità del composto fresco, proprietà funzionali allo stato indurito e resistenza meccanica finale.

Per questi motivi questa fase sperimentale di mix design può essere suddivisa come segue:

- prima fase di mix design: il progetto delle miscele è stato condotto inserendo gradualmente materiali innovativi ed ecosostenibili rispetto a materiali più tradizionali, modificando anche le frazioni di volume degli aggregati e dei filler da sostituire;
- ottimizzazione dei mix-design della prima fase, elaborata con lo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche, mantenendo allo stesso tempo una buona lavorabilità del composto fresco e proprietà funzionali come conducibilità termica e porosità;

- seconda fase di mix design: ulteriore ottimizzazione dei mix-design mirata a raggiungere intonaci ad elevate prestazioni per l'efficientamento energetico degli edifici.

La sperimentazione ha previsto la messa a punto iniziale di 85 mix- design di intonaci, sulla base delle prove preliminari e dal comportamento reologico della miscela sono state selezionate le migliori 18 che hanno rispettato gli standard energetici e meccanici previsti dalla normativa UNI EN 998-1.



5.2 MIX DESIGN

Il progetto delle miscele ha comportato un processo graduale di raffinamento che è iniziato con delle formulazioni di base che progressivamente sono state ottimizzate fino ad arrivare a una fase iniziale che ha permesso di individuare un punto di partenza dal quale sviluppare gli intonaci.

Di seguito sono riportati in maniera descrittiva, i mix design selezionati e analizzati durante la campagna di prove sperimentali.

MIX 1

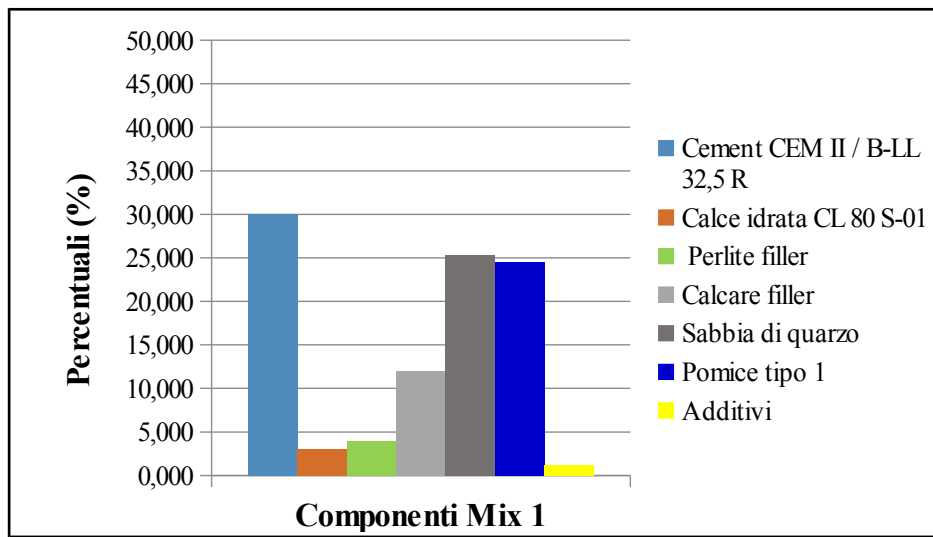


Fig. 5.1 Impasto fresco.

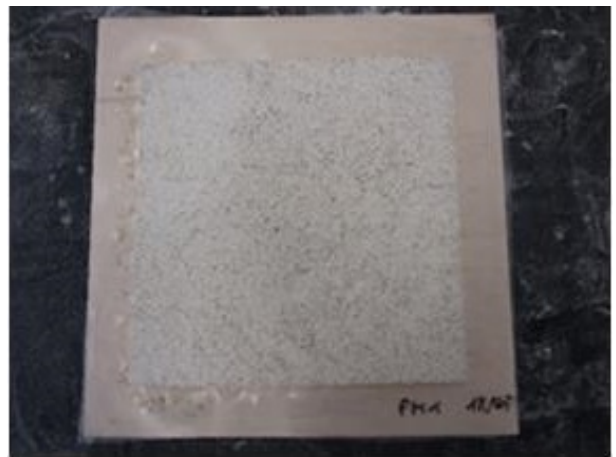


Fig. 5.2 Applicazione su provino 30x30.

MIX 1			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,37	0,4	2,0	

Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

MIX 2

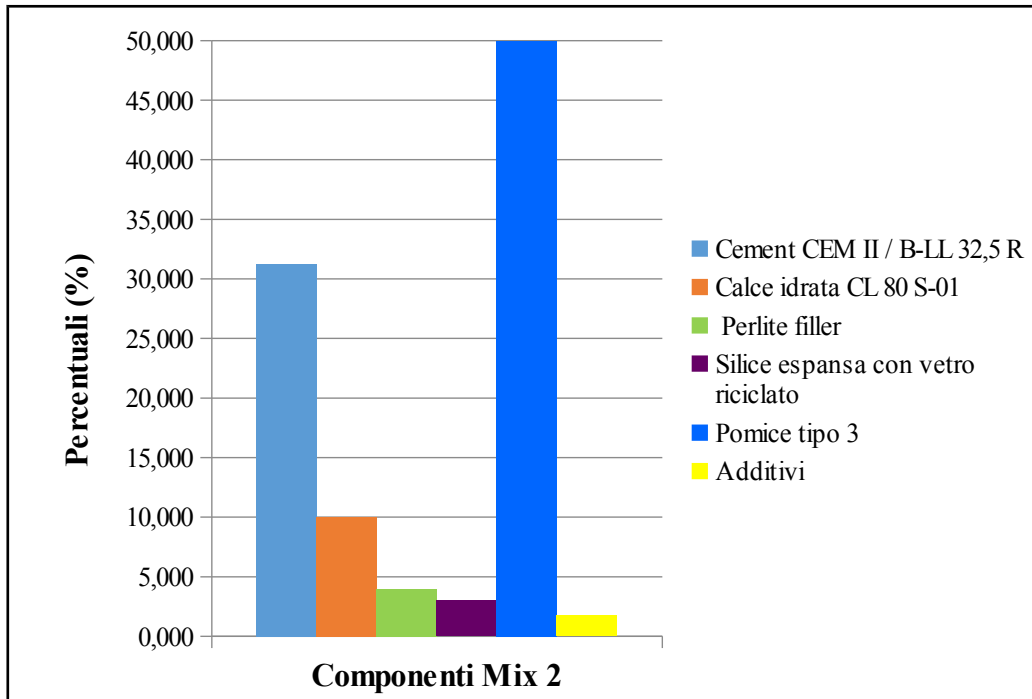


Fig. 5.3 Impasto fresco.

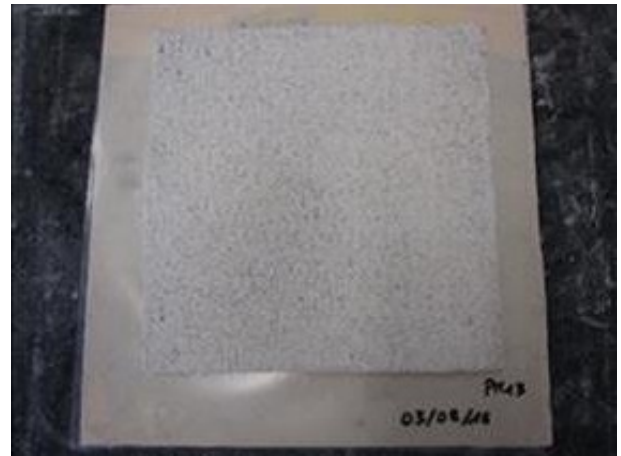


Fig. 5.4 Applicazione su provino 30x30.

MIX 2			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,56	0,1	1,4	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

MIX 3

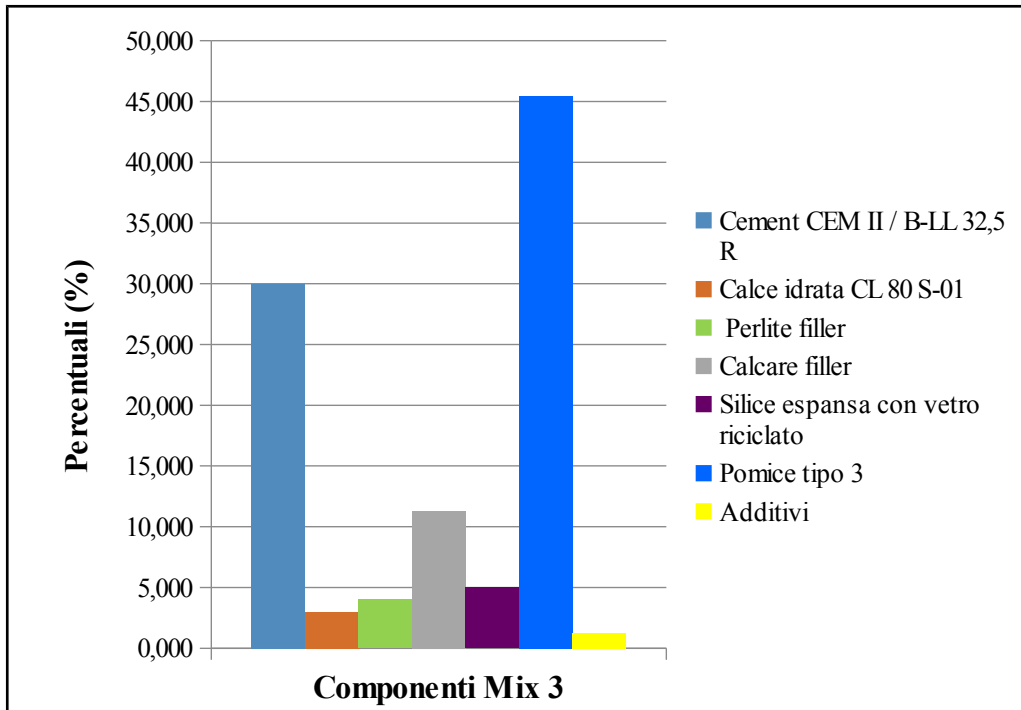


Fig. 5.5 Impasto fresco.

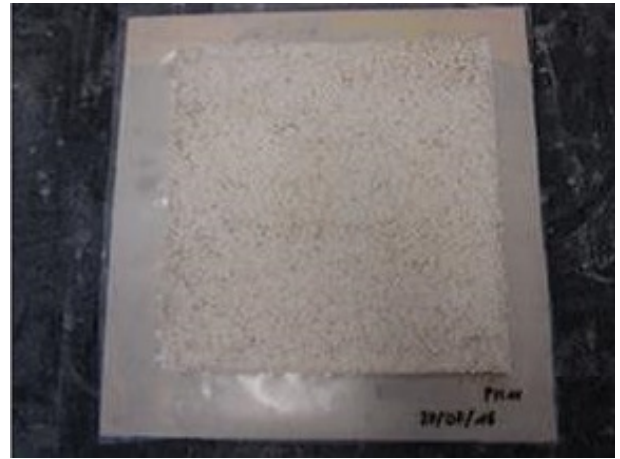


Fig. 5.6 Applicazione su provino 30x30.

MIX 3			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,51	0,1	2,0	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

MIX 4

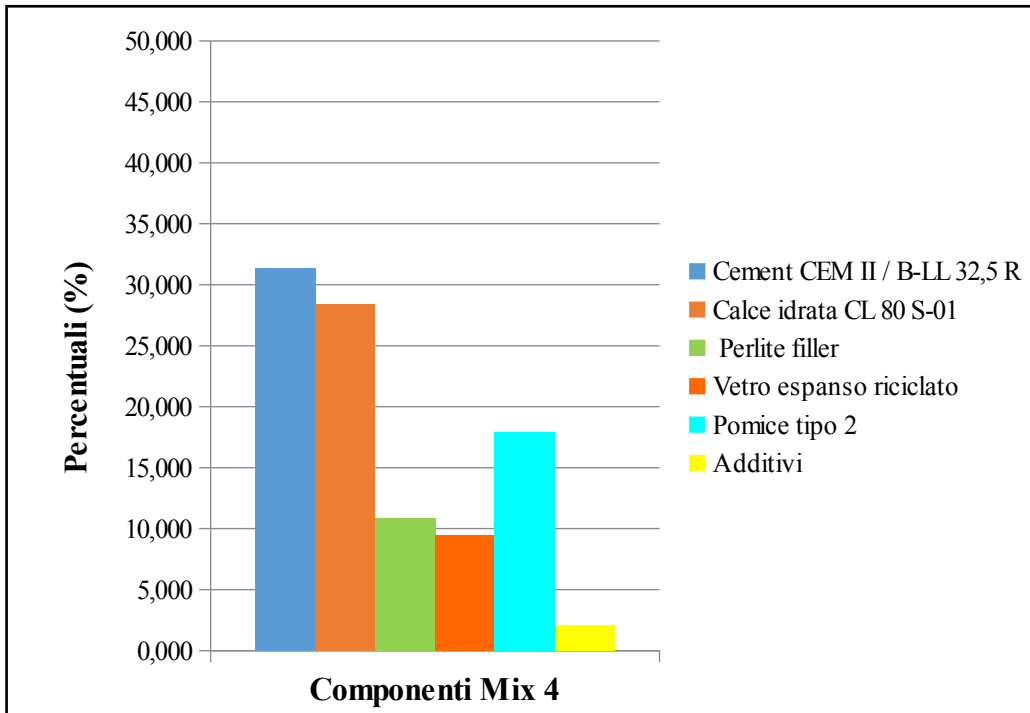


Fig. 5.7 Impasto fresco.

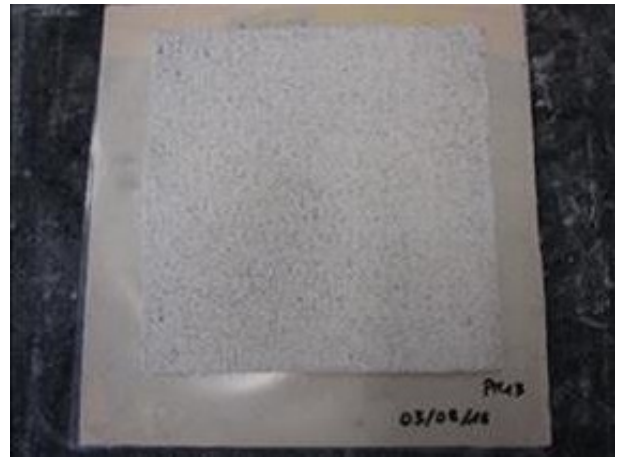


Fig. 5.8 Applicazione su provino 30x30.

MIX 4			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,70	1,0	0,6	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 5

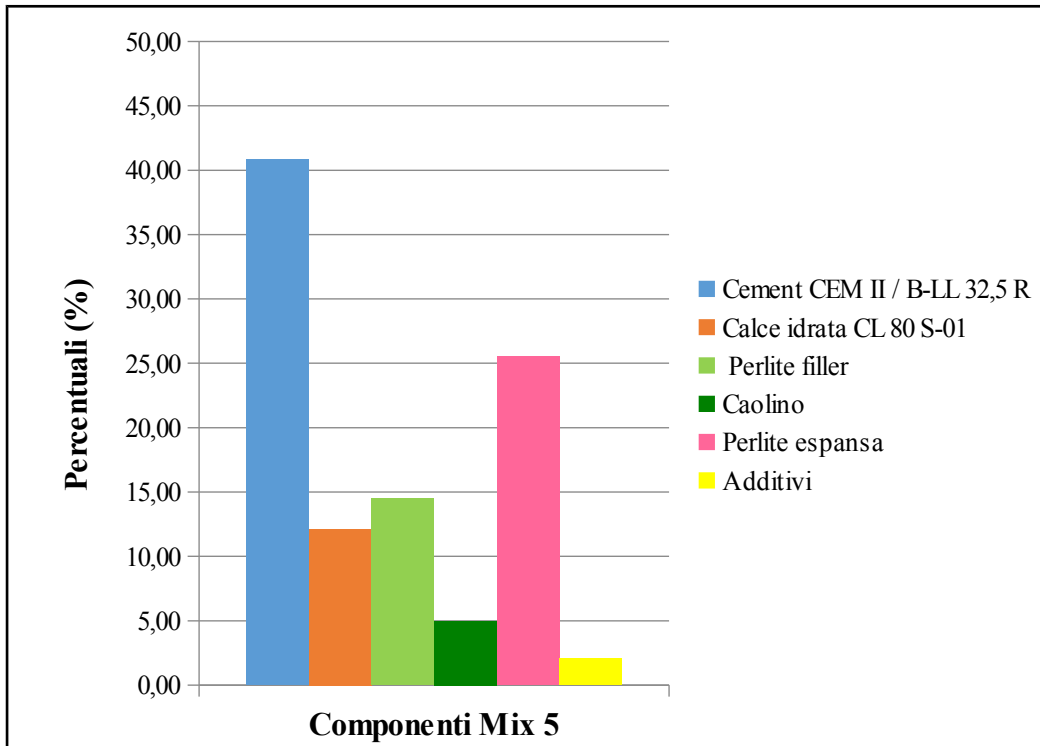


Fig. 5.9 Impasto fresco.



Fig. 5.10 Applicazione su provino 30x30.

MIX 5			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,90	0,9	0,8	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 1 OTTIMIZZATO

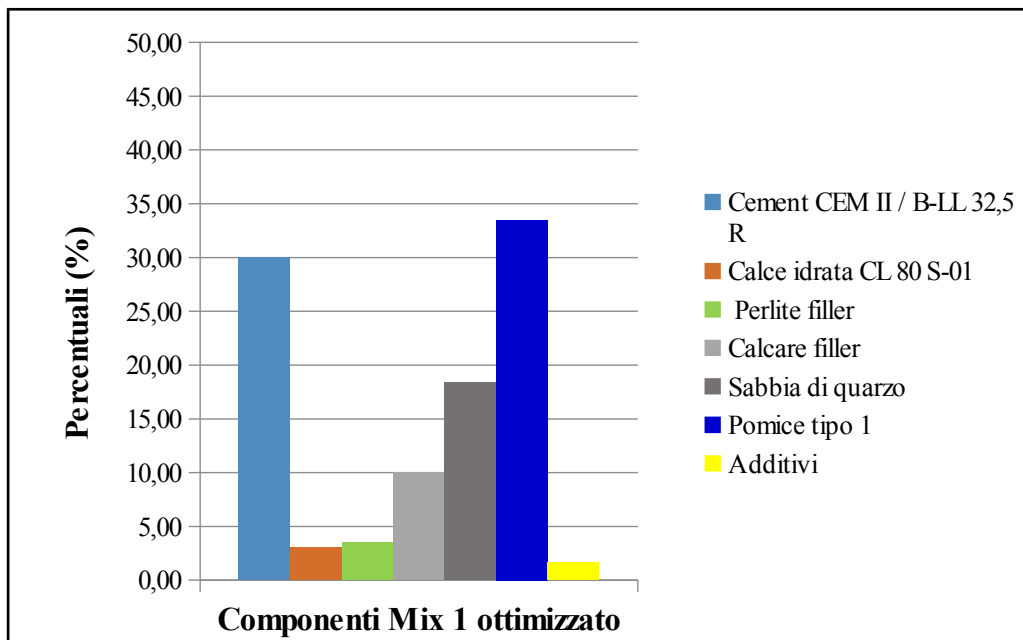


Fig. 5.11 Impasto fresco.

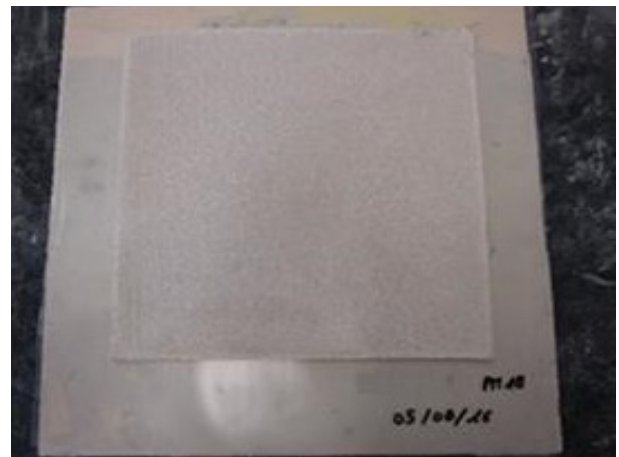


Fig. 5.12 Applicazione su provino 30x30.

MIX 1 OTTIMIZZATO		
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti
0,36	0,6	2,0

Additivi: presenti / assenti

Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

MIX 2/3 OTTIMIZZATO

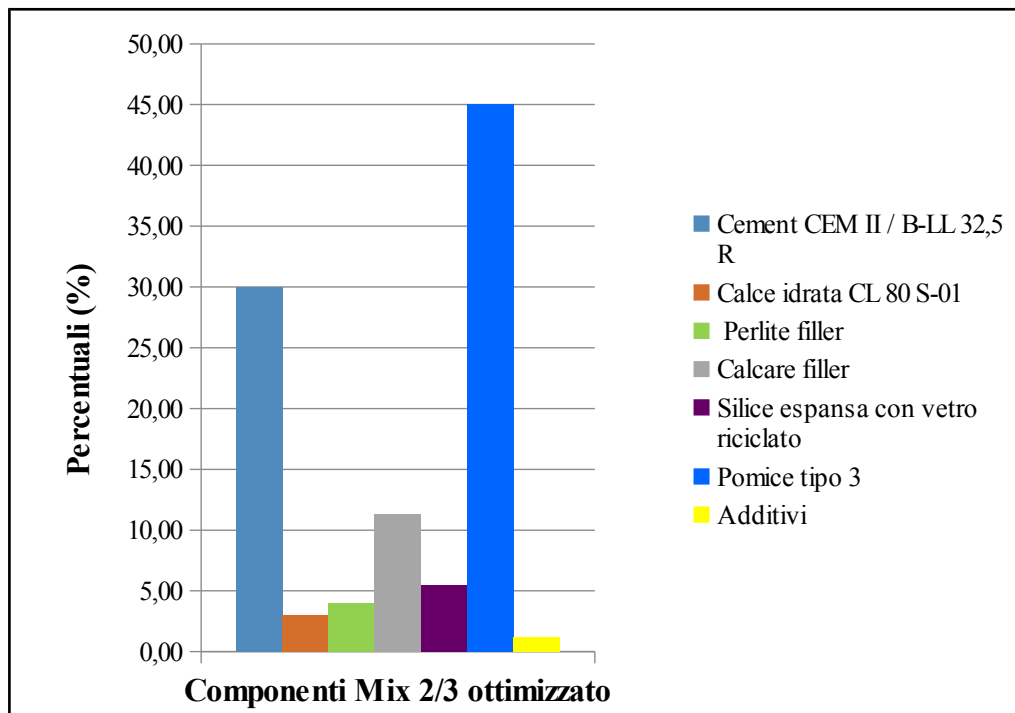


Fig. 5.13 Impasto fresco.



Fig. 5.14 Applicazione su provino 30x30.

MIX 2/3 OTTIMIZZATO			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot		aggregati/leganti
0,57	0,1		2,0
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

MIX 4 OTTIMIZZATO

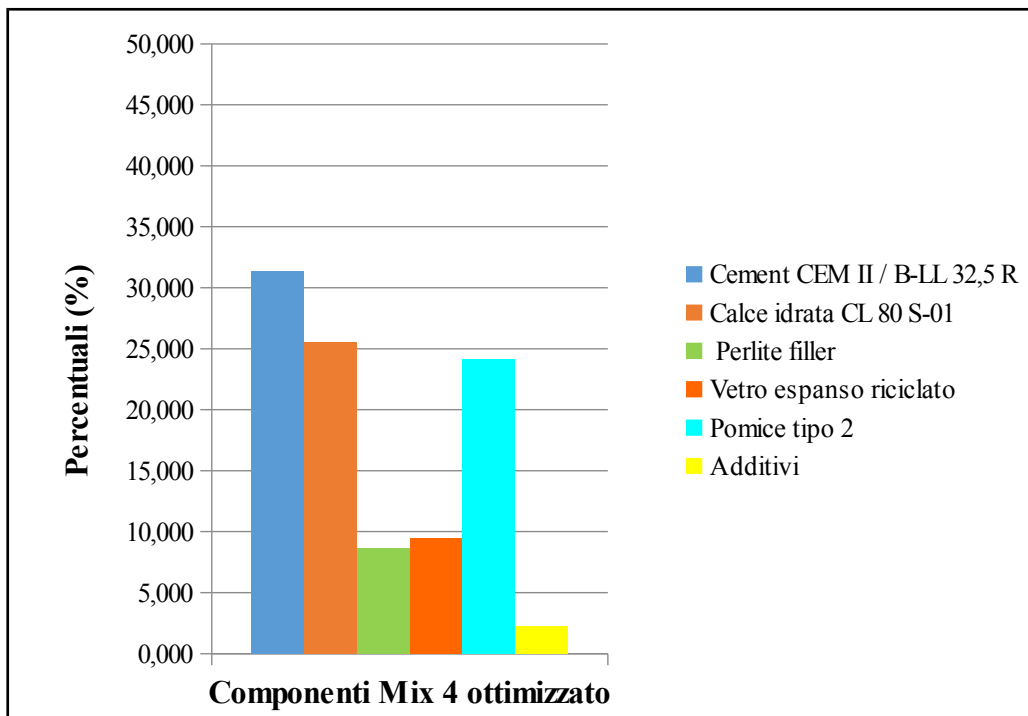


Fig. 5.15 Impasto fresco.

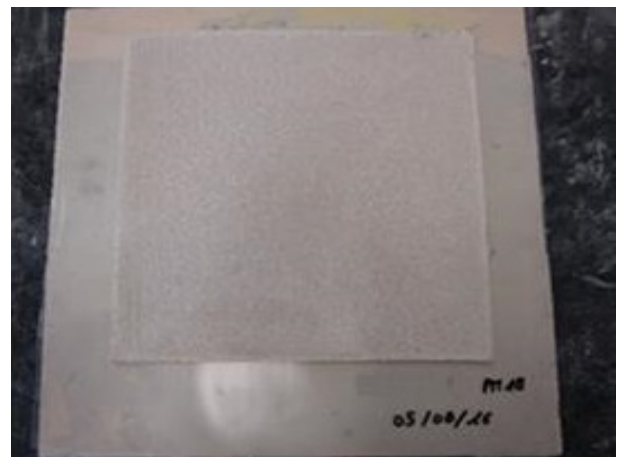


Fig. 5.16 Applicazione su provino 30x30.

MIX 4 OTTIMIZZATO			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot		aggregati/leganti
0,59	1,0		0,7
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 5 OTTIMIZZATO

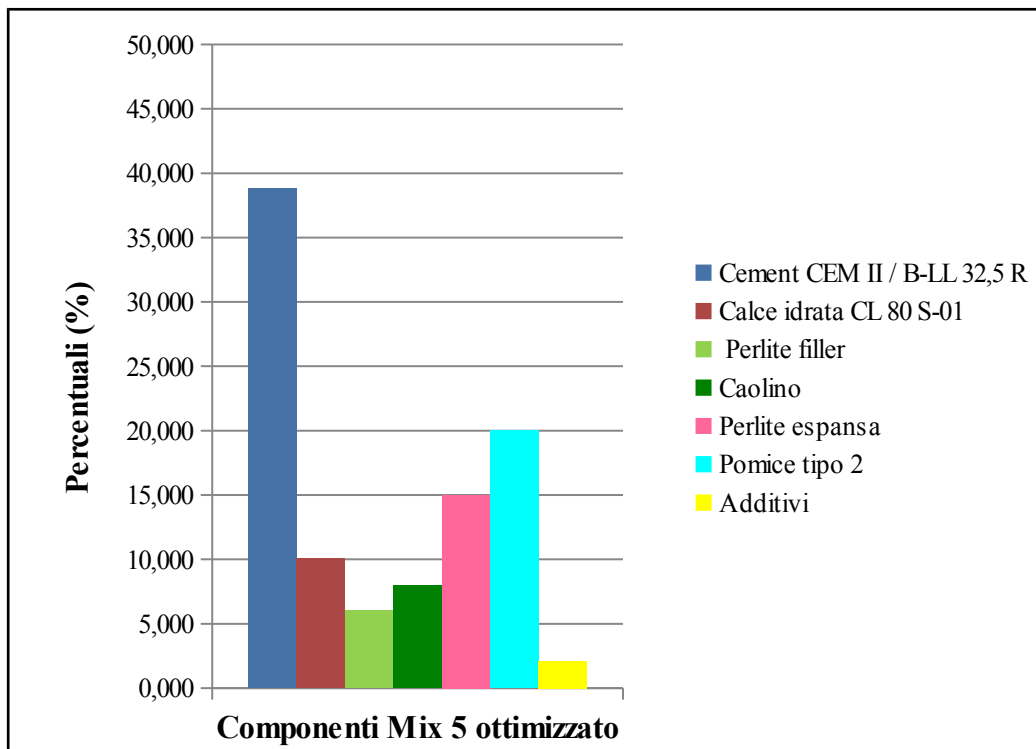


Fig. 5.17 Impasto fresco.

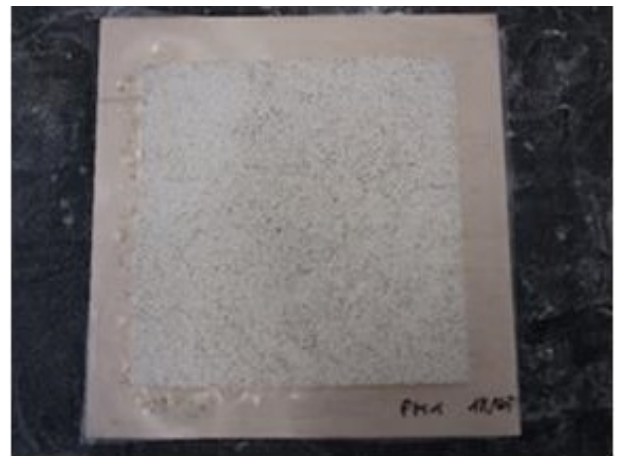


Fig. 5.18 Applicazione su provino 30x30.

MIX 5 OTTIMIZZATO			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,70	0,8	1,0	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 6

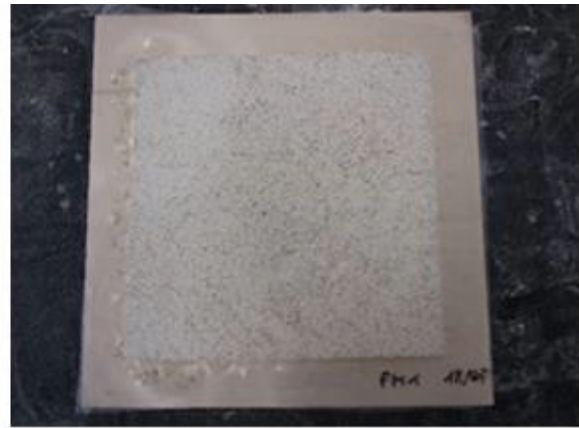
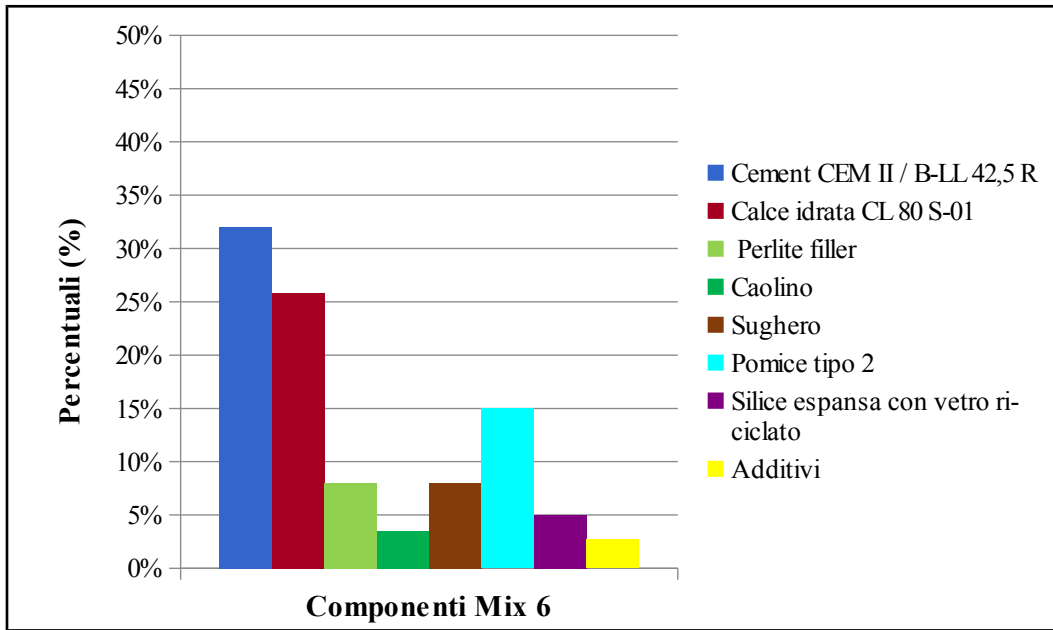


Fig. 5.19 Impasto fresco.

Fig. 5.20 Applicazione su provino 30x30.

MIX 6			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot		aggregati/leganti
0,65	0,9		0,7
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 7

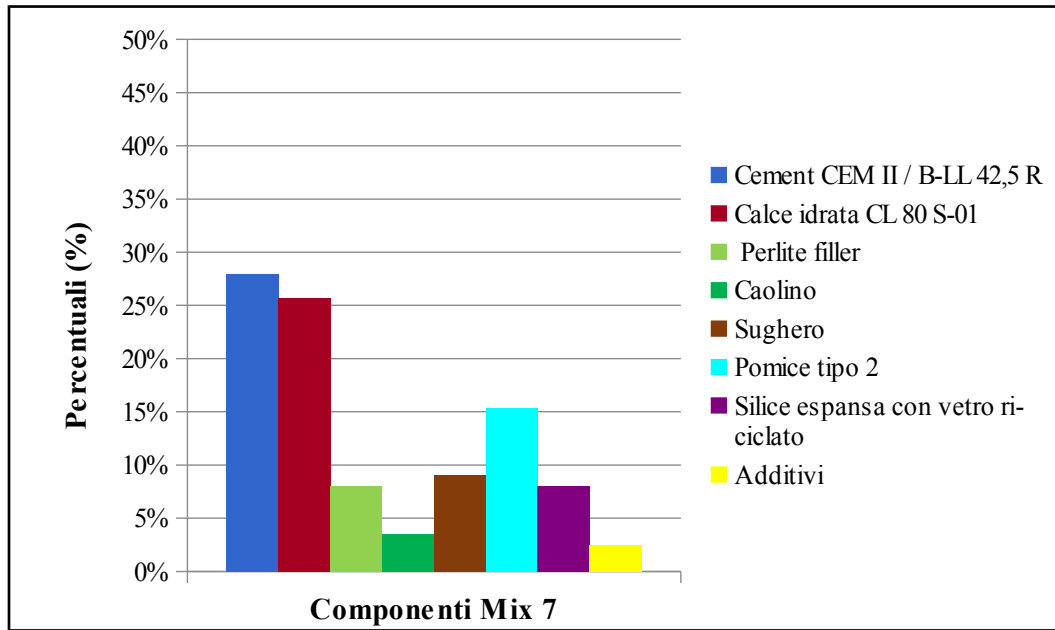


Fig. 5.21 Impasto fresco.

Fig. 5.22 Applicazione su provino 30x30.

MIX 7			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,90	0,9	0,8	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 8

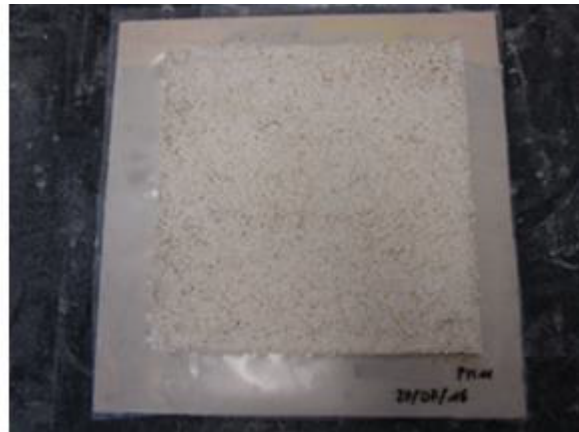
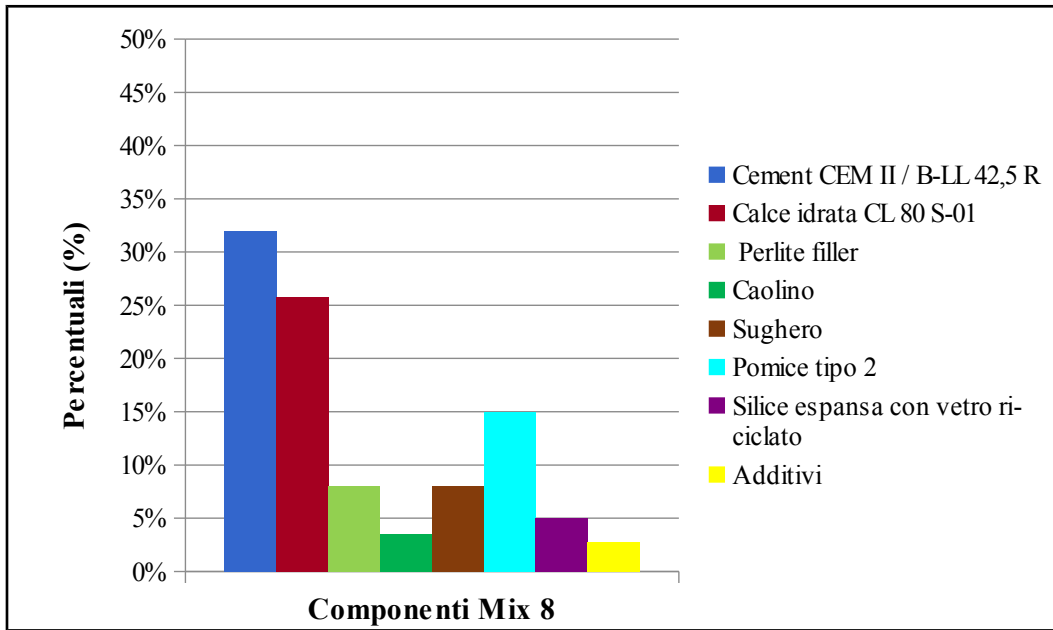


Fig. 5.23 Impasto fresco.

Fig. 5.24 Applicazione su provino 30x30.

MIX 8			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot		aggregati/leganti
0,75	0,9		0,8
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 9

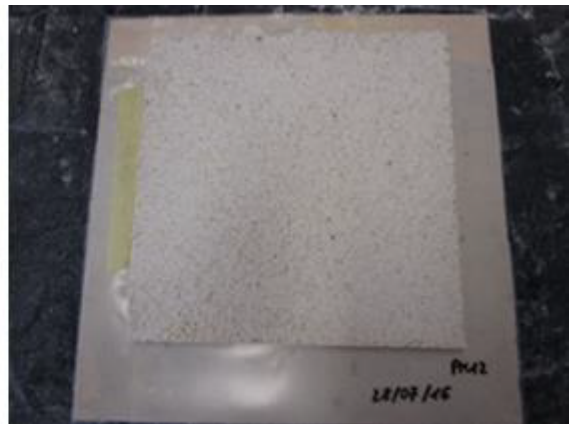
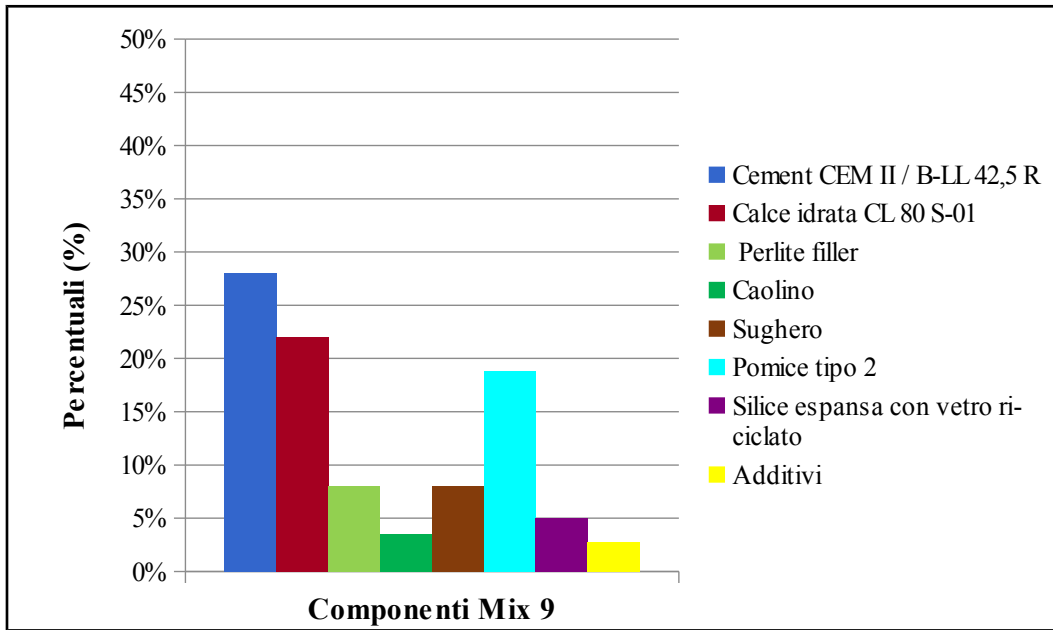


Fig. 5.25 Impasto fresco.

Fig. 5.26 Applicazione su provino 30x30.

MIX 9			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,73	0,9	1,0	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 10

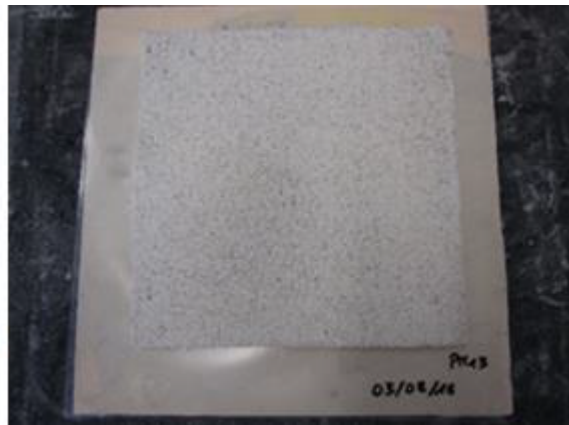
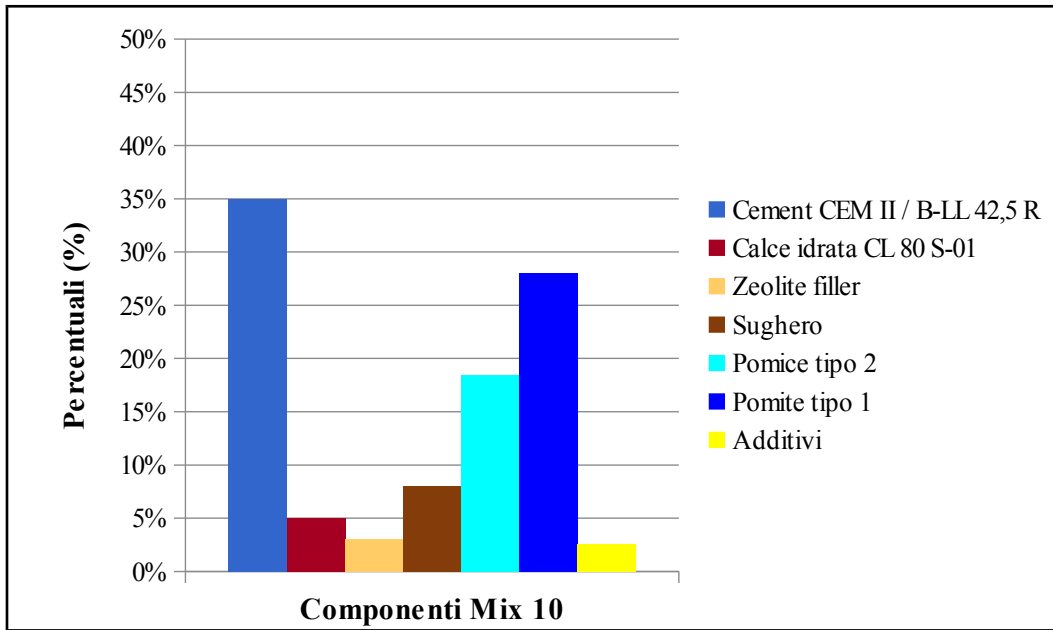


Fig. 5.27 Impasto fresco.

Fig. 5.28 Applicazione su provino 30x30.

MIX 10			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot		aggregati/leganti
0,62	0,9		1,4
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 11

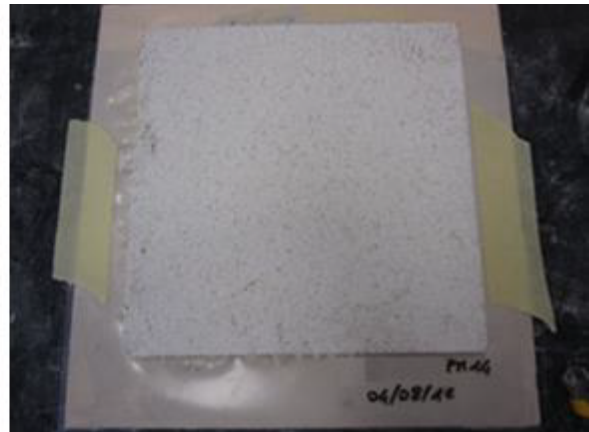
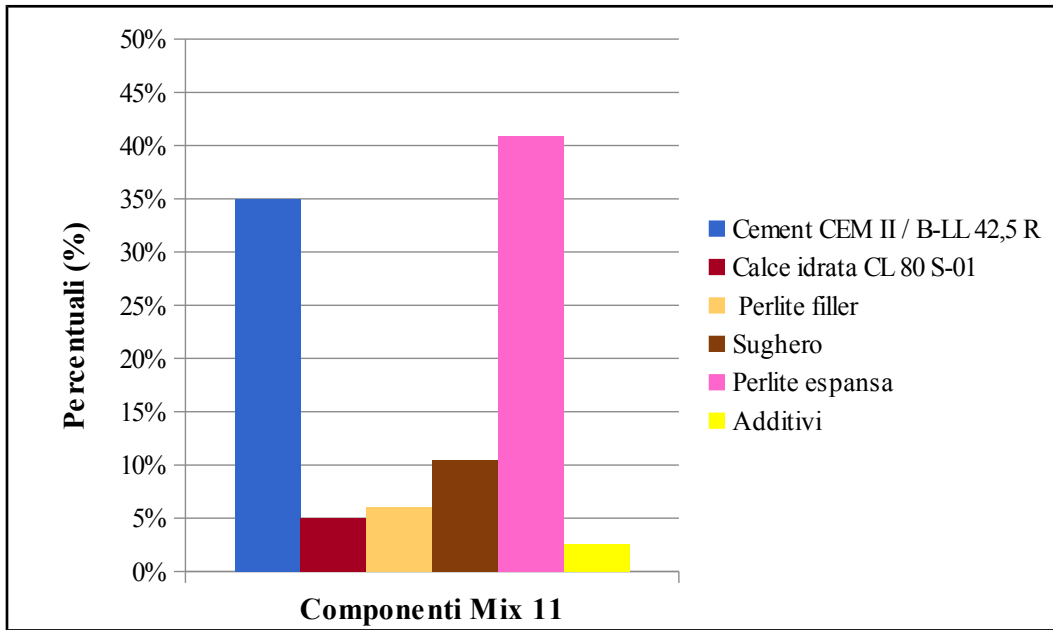


Fig. 5.29 Impasto fresco.

Fig. 5.30 Applicazione su provino 30x30.

MIX 11		
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti
0,97	1,0	1,4

Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI

Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela

MIX 12

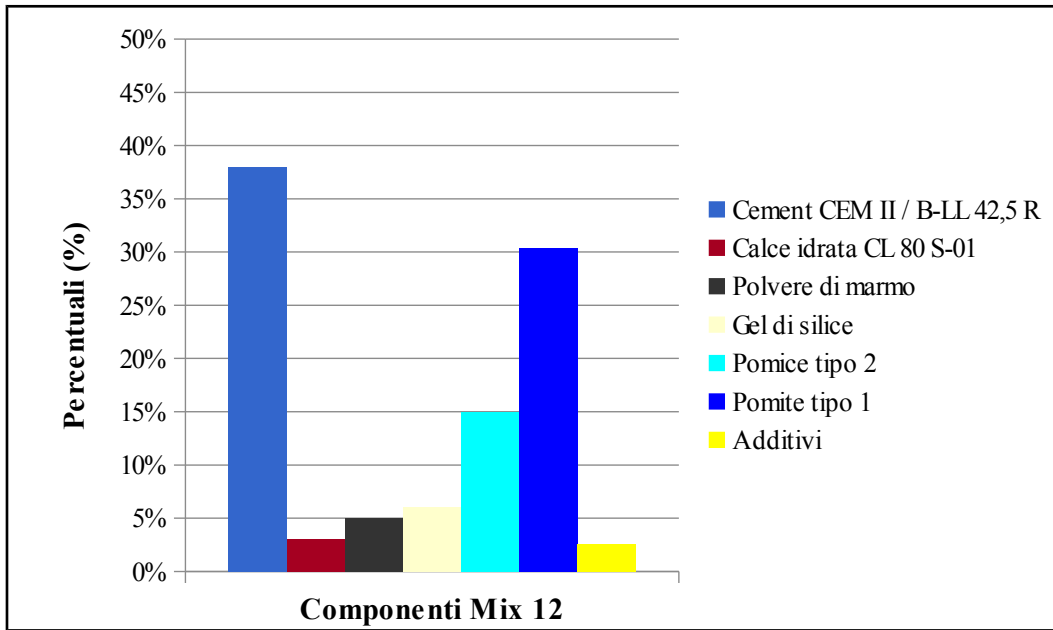


Fig. 5.31 Impasto fresco.

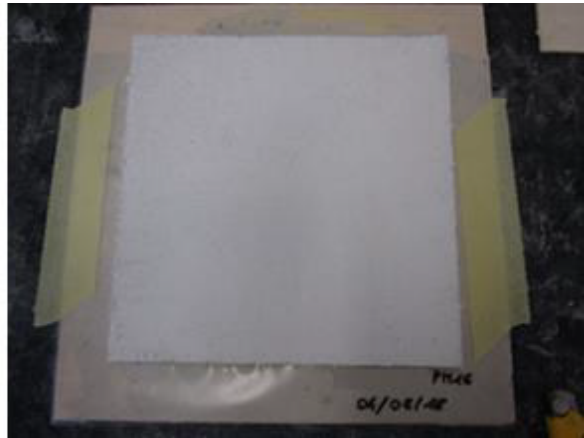


Fig. 5.32 Applicazione su provino 30x30.

MIX 12			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,66	0,9	1,4	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 13

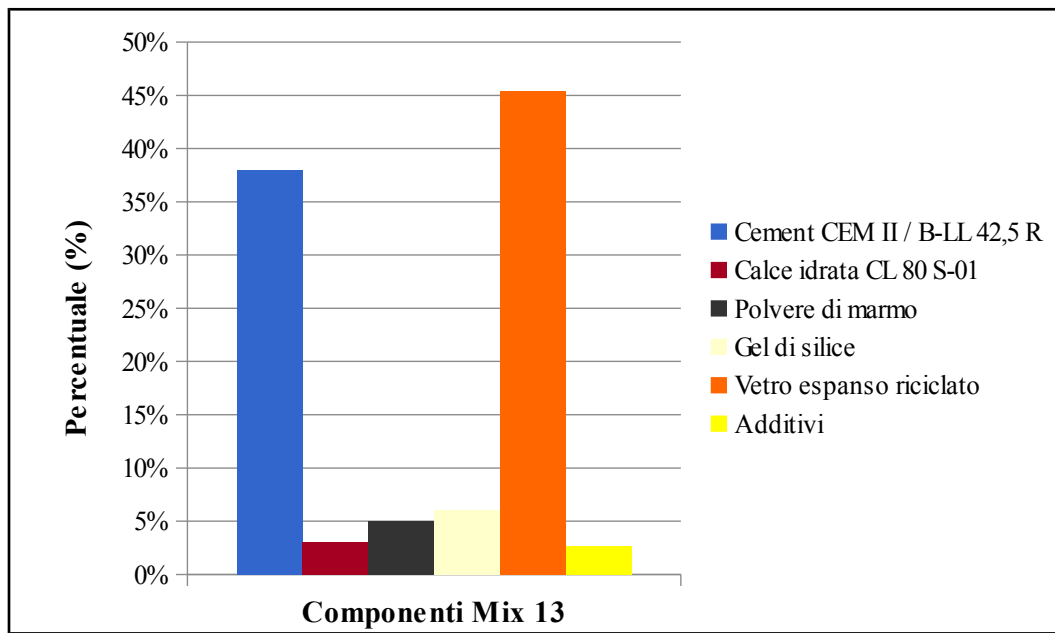


Fig. 5.33 Impasto fresco.

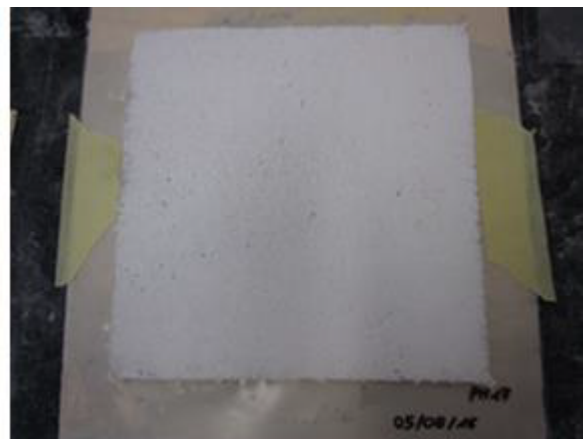


Fig. 5.34 Applicazione su provino 30x30.

MIX 13			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,84	0,9	1,4	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

MIX 14

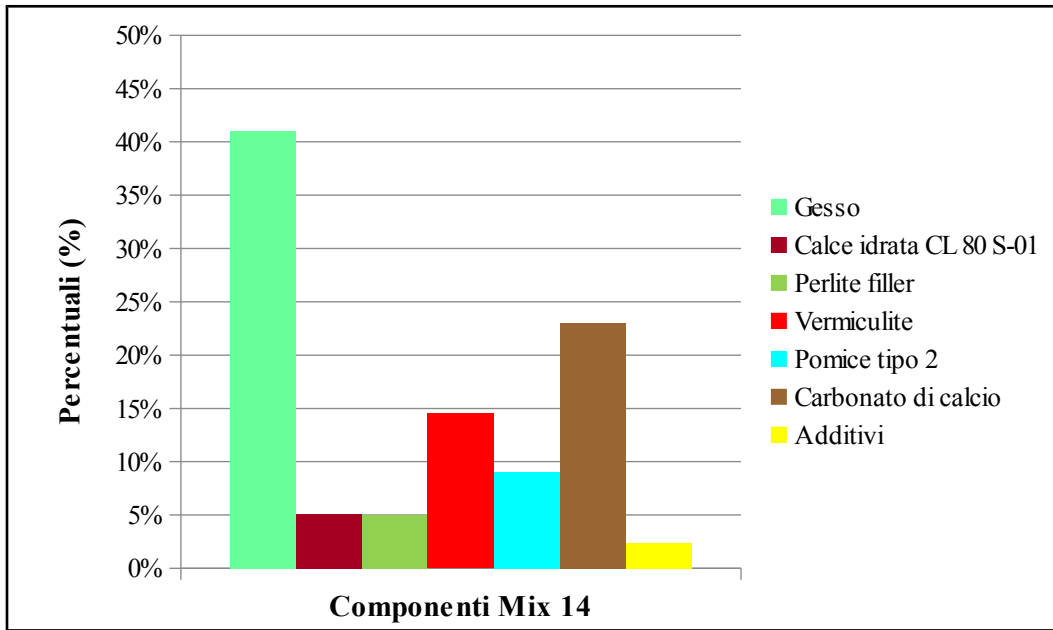


Fig. 5.35 Impasto fresco.



Fig. 5.36 Applicazione su provino 30x30.

MIX 14			
acqua/leganti	aggregati leggeri/aggregati tot	aggregati/leganti	
0,66	0,6	1,1	
Additivi: presenti / assenti			
Resina in polvere	Eteri di cellulosa	Aeranti	Fibre (PP)
SI	SI	SI	SI
Aggiunto additivo Antiritiro: 0,5% sul tot della miscela			

5.3 LAVORABILITA'

5.3.1 Procedura di miscelazione (norma UNI EN 1015-3)

Definiti i dosaggi per le diverse miscele, si è messa a punto la modalità di procedura dell'impasto. Per il mescolamento si è utilizzata un'impastatrice (Fig. 5.37) per poter amalgamare in maniera adeguata i vari componenti delle miscele, la cui capacità massima è di contenere 2 litri di materiale. Il tempo di miscelazione è stato standardizzato in modo da avere uguale omogeneità per tutte le miscele: 5 minuti circa per ognuna.



Fig. 5.37 Impastatrice.

Gli ingredienti sono stati inseriti nel cestello secondo le modalità di seguito descritte:

- inserimento di legante e acqua;
- mescolamento;
- inserimento degli aggregati leggeri, additivi e un certo quantitativo di aggregati tradizionali più pesanti;
- mescolamento;
- inserimento della restante di aggregati tradizionali;
- mescolamento.

Si è cercato di ottenere un impasto piuttosto fluido che possa essere gettato nelle casseforme di varie dimensioni idonee per la campagna prove delineata.

Importante per una corretta procedura è la modalità e l'attenzione con cui vengono riempite le casseforme, infatti è stato notato che i tre differenti tipi di materiale a contatto con acqua e cemento galleggiano e quindi, per evitare la segregazione degli inerti più leggeri in superficie, l'impasto va amalgamato omogeneamente. Tuttavia non sempre si sono ottenuti provini ottimali proprio in virtù del fatto che gli inerti alleggeriti tendono a galleggiare.

Alcuni esempi delle malte ottenute da queste miscele iniziali:



Fig. 5.38 Mix 1-5.



Fig. 5.39 Mix 4-5 Ottimizzati.

5.3.2 Lavorabilità della malta fresca: prova di spandimento

Secondo una definizione diffusa ma un po' ambigua, la lavorabilità indica la facilità di messa in opera. Un altro termine molto spesso usato in modo intercambiabile con quello di lavorabilità, è la consistenza: questa dovrebbe esprimere lo stato di deformabilità di un materiale e la sua capacità di muoversi sotto l'azione di una forza.

Nel caso specifico delle malte, la sabbia è l'inerte principalmente utilizzato. A seconda della granulometria variano anche alcune proprietà della malta stessa: di solito maggiore è la dimensione dell'inerte, maggiore sarà la resistenza meccanica, mentre più fine sarà l'inerte, migliore sarà la lavorabilità.

Nella preparazione della malta l'acqua ha la stessa importanza del legante e dell'inerte, sia dal punto di vista della sua qualità che dal punto di vista della quantità. Per quanto riguarda il rapporto quantitativo tra legante e acqua, esso influisce sulla resistenza meccanica della malta. Bisogna dunque fissare la quantità di acqua di volta in volta secondo le esigenze richieste. In ogni caso una quantità maggiore di acqua consente una maggiore lavorabilità ma una minore resistenza, mentre una minore quantità di acqua determina una minore lavorabilità, ma viceversa una maggiore resistenza.

La norma UNI EN 1015-3 specifica un metodo atto a determinare la consistenza di malte appena impastate, mediante tavola a scosse. La consistenza è la misura della fluidità e/o dell'umidità della malta e fornisce una misura della deformabilità della malta quando è sottoposta a certi tipi di sforzo. La consistenza, in ogni caso, non è associata al modo in cui la malta fresca si comporta quando viene utilizzata da un operatore. Generalmente, per una stessa malta con contenuti di acqua crescenti, c'è una correlazione lineare tra il valore di consistenza, misurato in conformità con il presente metodo di prova, e il valore di penetrazione della sonda misurato in conformità con la norma EN 1015-4.

Il valore di fluidità viene misurato tramite il diametro medio di un campione di prova della malta fresca che è stato posizionato su un disco definito di una tavola a scosse, per mezzo di uno stampo anch'esso standardizzato e che viene quindi sottoposto ad un certo numero di impatti verticali alzando la tavola a scosse e lasciandola poi cadere liberamente da una certa altezza (Fig. 5.40).



Fig. 5.40 Tavola a scosse.

Procedimento

Prima della prova, l'impasto deve essere delicatamente mescolato manualmente, utilizzando una cazzuola o una spatola piatta, per 5-10 secondi, per contrastare qualsiasi cenno di rapprendimento, ma senza mescolare ulteriormente l'impasto.

Posizionare lo stampo al centro del disco della tavola a scosse ed introdurre la malta in due strati, ciascuno dei quali deve essere assestato mediante almeno 10 brevi colpi di pestello per assicurare il riempimento uniforme dello stampo. Durante il riempimento, tenere fermo lo stampo sul disco con una mano. Rimuovere l'eccesso di malta con una spatola piatta, sollevare lentamente lo stampo in direzione verticale e spargere la malta sul disco facendo vibrare la tavola a scosse per 15 volte alla frequenza costante di circa un colpo al secondo. Misurare il diametro della malta in due direzioni perpendicolari l'una all'altra utilizzando le misure riportate in millimetri sul disco di carta sottostante lo stampo.

Per il calcolo e l'espressione dei risultati bisogna procedere in questo modo: calcolare il valore medio di due misure, questo è il valore della fluidità del campione di prova. Se due singoli valori di fluidità differiscono dal loro valore medio per meno del 10%, si può utilizzare questo valore medio come valore di fluidità della malta; altrimenti bisogna ripetere la prova.

Per ognuna delle miscele è stata effettuata la prova di spandimento, al fine di ottenere dei valori di fluidità confrontabili tra loro.

Qui di seguito (Tab. 5.1) si riportano i risultati della prova relativi alle varie formulazioni:

Tab. 5.1 Dati relativi alla prova di spandimento per le miscele di progetto al fine di valutarne la fluidità.

Formulazione	Risultato (mm)
Mix 1	128
Mix 2	131
Mix 3	131
Mix 4	132
Mix 5	135
Mix 1 Ottimizzato	135
Mix 2/3 Ottimizzato	131
Mix 4 Ottimizzato	132
Mix 5 Ottimizzato	140,5
Mix 6	106,5
Mix 7	109,5
Mix 8	122
Mix 9	120,5
Mix 10	131
Mix 11	122,5
Mix 12	135,5
Mix 13	141
Mix 14	137



Fig. 5.41 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 5.42 Tavola scosse: prova eseguita.

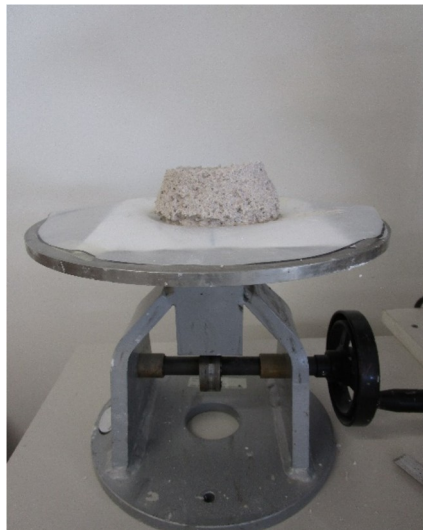


Fig. 5.43 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 5.44 Tavola scosse: prova eseguita.

5.3.3 Discussione dei valori sperimentali

La consistenza di un intonaco può essere valutata mediante il prospetto riportato nella UNI EN 1015-6. La quasi totale maggioranza dei valori ottenuti per tutte le miscele selezionate è risultata inferiore a 140 mm e quindi classificabile come "malta rigida". In realtà questa suddivisione è applicabile per malte piuttosto tradizionali, cioè che impiegano aggregati e filler comuni, i quali consentono di ottenere delle densità molto diverse rispetto ai mix design realizzati durante la campagna sperimentale. Valori superiori a 140 mm avrebbero

comportato un'accentuazione del problema della segregazione dei materiali pesanti da quelli alleggeriti. Per questo motivo e soprattutto in base alla presenza elevata in volume di aggregati leggeri, si è ritenuto opportuno mantenere basso il valore di spandimento mediante tavola a scosse. Inoltre, per avere una miscela applicabile e con una buona adesione, l'impasto deve avere un'ottima tixotropia e una discreta densità.

5.4 DETERMINAZIONE MASSA VOLUMICA FRESCA

5.4.1 Procedura (norma UNI EN 1015 -6)

La massa volumica apparente di una malta fresca viene determinata dal rapporto tra la sua massa ed il volume che occupa quando viene introdotta, o introdotta e compattata in modo predeterminato, in un recipiente di misurazione avente capacità nota.

La norma (UNI EN 105-6) specifica un metodo per la determinazione della massa volumica apparente di malte fresche a base di leganti minerali sia con aggregati normali sia leggeri.

L'apparecchiatura di prova è la seguente:

- un recipiente di misurazione cilindrico, avente diametro interno di circa 125 mm, costruito in metallo resistente alla corrosione da parte della malta e dotato di una sufficiente stabilità dimensionale. La capacità del recipiente di misurazione è circa 1 l e viene determinata con accuratezza dello 0,1%, mentre la sua massa m_1 viene determinata con accuratezza di 1 g;
- una spatola;
- una cazzuola;
- una sessola;
- un tavolo vibrante, se necessario, operante in direzione verticale avente frequenza di (50 ± 1) Hz ed una ampiezza di $(0,375 \pm 0,050)$ mm;
- una bilancia, avente portata di almeno 5 kg e accuratezza di 1 g.

La malta fresca destinata a questa prova deve avere un volume di almeno 3 l, o essere pari almeno 1,5 volte la quantità necessaria ad eseguire la prova (il maggiore dei due), e deve essere ottenuta o mediante riduzione del campione globale di prova (vedere EN 1015-2) utilizzando un divisore di campioni o quartatura, o mediante preparazione in laboratorio, a partire dai costituenti secchi ed acqua. Il valore di spandimento della malta nel campione

destinato alla prova deve essere determinato in conformità con il prospetto EN 1015-3 ed annotato.

I campioni di prova preparati in laboratorio devono, prima della prova, essere portati ad un valore di spandimento definito, come specificato nella EN 1015-2. La durata del periodo di miscelazione deve essere misurata dal momento in cui tutti i costituenti sono stati introdotti nel mescolatore.

Prima della prova, l'impasto deve essere delicatamente mescolato manualmente, utilizzando una cazzuola o una spatola per (5 - 10) s, in modo da contrastare qualsiasi rapprendimento, ecc., senza però insistere oltre nella miscelazione dell'impasto. Qualsiasi deviazione dal procedimento di miscelazione deve essere annotata. La prova deve essere eseguita su due campioni. Quando si sottopongono a prova malte contenenti agenti aeranti, si deve prestare attenzione a fare in modo che il procedimento non influenzi il contenuto d'aria.

Procedimento

Il riempimento dei recipienti cilindrici può avvenire in tre diverse modalità opportunamente descritte all'interno della normativa nella sezione procedimento Cap.7.2 della norma di riferimento:

- Riempimento e costipazione mediante il metodo della vibrazione;
- Riempimento e costipazione con il metodo della percussione;
- Metodo di riempimento.

Dopo aver riempito i recipienti, si procede col determinare la massa totale m_2 del contenitore riempito di malta, arrotondando la misura al più prossimo 1 g. Calcolare la massa volumica apparente della malta fresca mediante la seguente relazione:

$$\rho^m = m_2 - m_1 / V_v$$

Calcolare il valore medio di due misure arrotondando il risultato ai più prossimi 10 kg/m³. Se i singoli valori differiscono dal loro valore medio meno del 10%, utilizzare questo valore medio come massa volumica apparente della malta.

Se i due singoli valori differiscono dal loro valore medio per oltre il 10%, ripetere la prova utilizzando altra malta proveniente dal campione globale di prova ridotto e se i risultati differiscono dal loro valore medio per meno del 10%, utilizzare il valore medio ottenuto dalla ripetizione della prova come massa volumica apparente della malta. Se i risultati

differiscono per oltre il 10%, bisogna considerare le misure non soddisfacenti e prelevare dei nuovi campioni di prova dal campione globale di prova o dalla malta preparata in laboratorio e ripetere la prova.

Tab. 5.2 Dati relativi alla determinazione della massa volumica fresca.

Formulazione	Risultato (kg/m³)
Mix 1	715,21
Mix 2	778
Mix 3	691,2
Mix 4	760,86
Mix 5	449,97
Mix 1 Ottimizzato	1022,72
Mix 2/3 Ottimizzato	754,84
Mix 4 Ottimizzato	1045
Mix 5 Ottimizzato	1016
Mix 6	825,5
Mix 7	850
Mix 8	502,5
Mix 9	557,5
Mix 10	816
Mix 11	681
Mix 12	909
Mix 13	645
Mix 14	1361

5.4.2 Discussione dei valori sperimentali

I valori di massa volumica ottenuti sono coerenti con il peso specifico anidro di partenza: i premiscelati più leggeri mantengono una massa volumica fresca più leggera nonostante, nella maggioranza dei casi, proprio queste miscele richiedano un rapporto acqua/polvere più elevato.

5.5 PROVE MECCANICHE

5.5.1 Introduzione

Sono state eseguite prove di resistenza meccanica a flessione e a compressione su provini prismatici confezionati con le miscele di intonaci che hanno caratterizzato la prima fase della sperimentazione e la loro ottimizzazione. Le prove meccaniche sono state effettuate a 28 giorni di stagionatura in modo da avere un quadro preciso sull'andamento del valore di resistenza finale in correlazione con le diverse tipologie di materie prime impiegate nei mix design.

Stagionatura

La stagionatura ha lo scopo di creare condizioni favorevoli all'idratazione delle malte, quindi bisogna conservare i provini in un ambiente umido il più a lungo possibile per limitare l'evaporazione dell'acqua presente inizialmente nell'impasto. Prima di ogni rottura i provini sono stati pesati. Il numero di provini sottoposto alle prove meccaniche è stato di tre: dai tre provini sottoposti a flessione dopo la rottura se ne ricavano sei che a loro volta vengono testati a compressione. In questo capitolo viene descritta la procedura con cui sono state eseguite le prove e vengono riportati e confrontati i risultati ottenuti per ciascuna delle miscele.

5.5.2 Prova a flessione

Dalle prove di flessione è possibile ricavare il valore della tensione di trazione sulla fibra tesa nella parte inferiore del provino secondo la formula:

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{F * L}{B * H^2}$$



Fig. 5.45 Schematizzazione prova a flessione.

5.5.3 Prova a compressione

Dai valori ottenuti dai diagrammi forza-spostamento si sono calcolate:

- le tensioni normali σ , espresse in MPa, dividendo la forza per la superficie di base del provino pari a 1600 mm² (40 x 40 mm);
- le ε dividendo la deformazione (f) per l'altezza del provino (H) pari a 40 mm utilizzando le seguenti formule:

$$\sigma = \frac{F}{B * H}$$

$$\varepsilon = \frac{f}{H} * 100$$

Dove:

- F = forza (N);
- B = base provino (40 mm);
- H = altezza provino (40 mm);
- f = freccia (mm).

Si sono poi disegnate le curve tensione di flessione (MPa)–deformazione (%) e le curve tensione di compressione (MPa)–deformazione (%).



Fig. 5.46 Schematizzazione prova a compressione.

5.5.4 Mix design: prima fase di sperimentazione

5.5.4.1 Prova a flessione

La prova a flessione è stata eseguita sulle miscele realizzate durante la prima fase di ricerca focalizzata sulle tematiche dell'ecosostenibilità dei materiali e quindi sull'impiego di filler e aggregati innovativi e di riciclo. Per quanto riguarda questo primo progetto di miscele si può notare per tutte che all'incremento in volume di aggregati estremamente leggeri corrisponde una drastica diminuzione della resistenza meccanica. Questo dato è da correlare insieme ai diversi dosaggi di additivo aerante e additivi reologici (resine e cellulose) impiegati nei differenti mix design. All'interno di questo gruppo di miscele, il comportamento migliore risulta essere quello della miscela Mix 2, seguita dal Mix 4: entrambi i mix design contengono pomice combinata con inerti innovativi come il vetro espanso riciclato e la silice espansa con vetro riciclato.

Di seguito è riportato un istogramma (Figura 5.47) che mette a confronto questi valori in modo da evidenziare graficamente le differenze di comportamento tra le varie miscele contenenti materiali diversi.

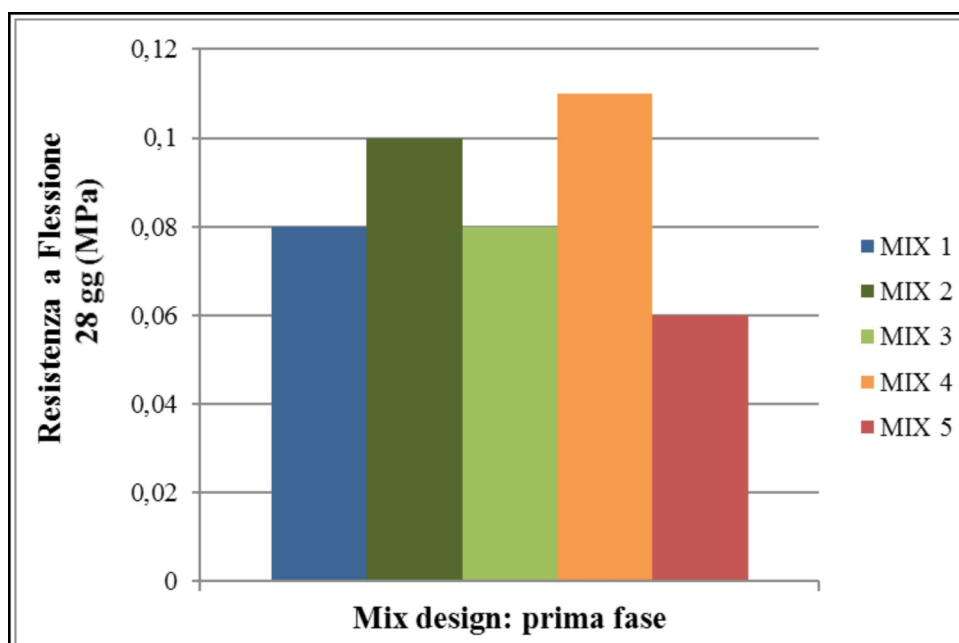


Fig. 5.47 Confronto tra le resistenze a flessione di intonaci realizzati con differenti percentuali di aggregati innovativi alleggeriti ecosostenibili.

Dai risultati sopra graficati, si può notare come il comportamento a flessione sia risultato molto basso per tutte le miscele, senza grossi distinguere tra una miscela e l'altra.

5.5.4.2 Prova a compressione

Anche la prova a compressione è stata eseguita sulla prima fase della ricerca analizzando le 5 miscele che hanno previsto l'impiego di filler e aggregati innovativi e di riciclo. Come si può notare dai valori del grafico, la miglior risposta è stata fornita dal Mix 1 e dal Mix 4 all'interno dei quali è presente pomice combinata con inerti innovativi come il vetro espanso riciclato (Figura 5.48).

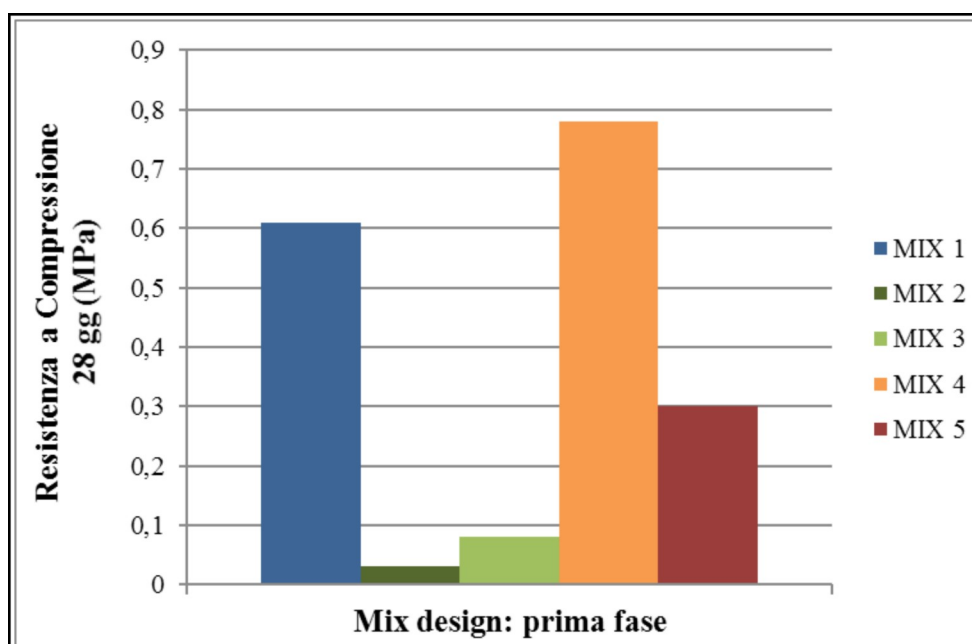


Fig. 5.48 Confronto tra le resistenze a compressione di intonaci realizzati con differenti percentuali di aggregati innovativi alleggeriti ecosostenibili.

Per quanto riguarda questo primo progetto di miscele si può notare come per tutte le miscele contenenti vetro espanso riciclato la resistenza meccanica tende ad aumentare sensibilmente.

5.5.5 Ottimizzazione della prima fase di mix- design

5.5.5.1 Prova a flessione

La sperimentazione è poi proseguita con la messa a punto del progetto delle miscele, eseguendo delle ottimizzazioni, il cui principale scopo è stato quello di creare una correlazione tra struttura porosa, conducibilità termica e migliori resistenze meccaniche.

Quindi anche per queste miscele si sono effettuate le prove a flessione, i cui dati sono riportati nell'istogramma sottostante, anche in questo caso si evince che il miglior comportamento è stato ottenuto dai mix realizzati con pomice e vetro espanso riciclato, Mix 1 e Mix 4 Ottimizzati (Fig. 5.49).

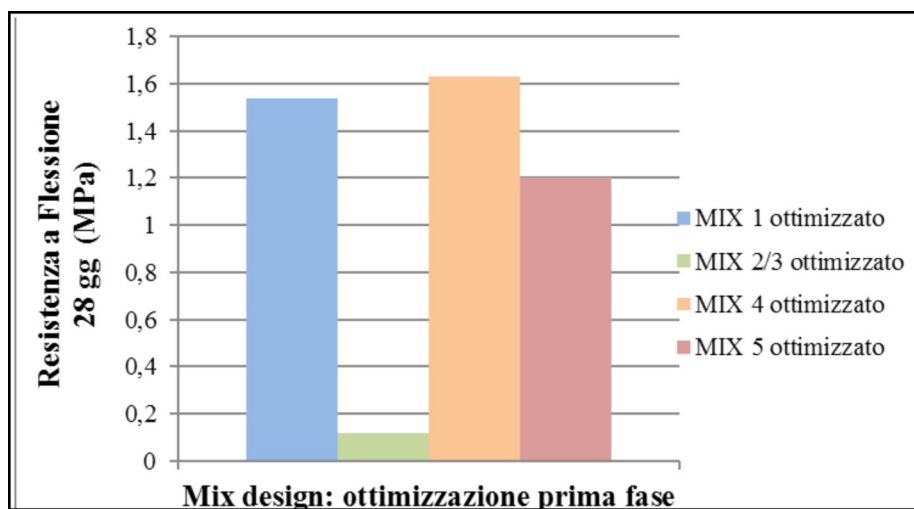


Fig. 5.49 Confronto tra le resistenze a flessione di intonaci appartenenti alla fase di ottimizzazione realizzati con differenti percentuali di aggregati innovativi alleggeriti ecosostenibili.

5.5.5.2 Prova a compressione

Analogamente, per le miscele ottenute ottimizzando il mix-design delle miscele iniziali è stata eseguita anche la prova a compressione. Di seguito sono riportati nel grafico i valori delle resistenze ottenuti che hanno riportato come per le precedenti prove un miglior comportamento per il mix design con all'interno il vetro riciclato espanso (Fig.5.50).

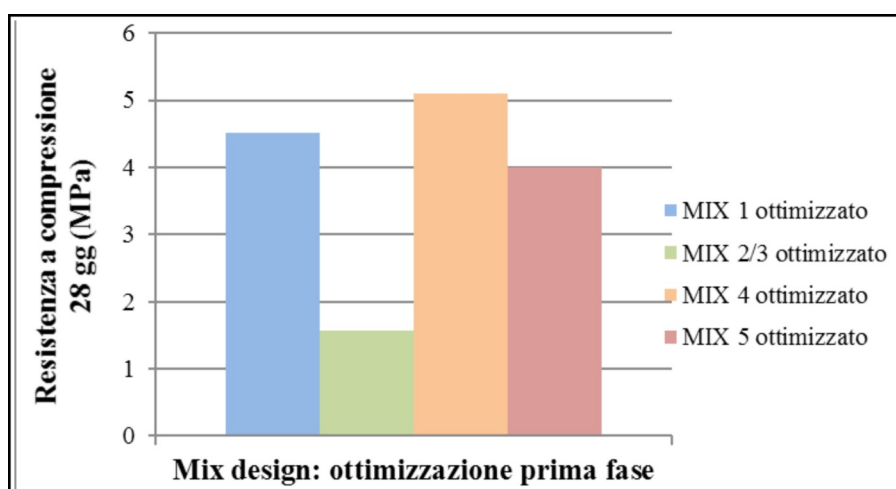


Fig. 5.50 Confronto tra le resistenze a compressione di intonaci appartenenti alla fase di ottimizzazione realizzati con differenti percentuali di aggregati innovativi alleggeriti ecosostenibili.

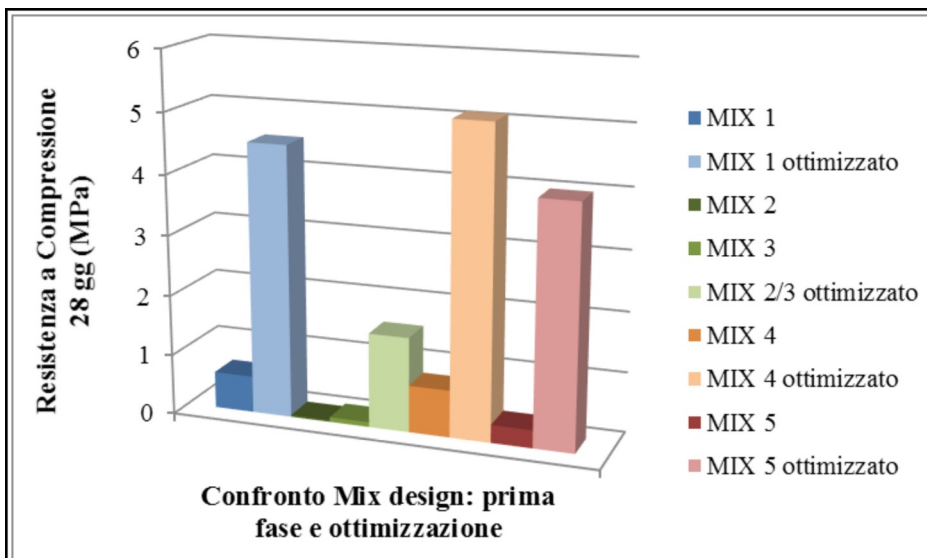
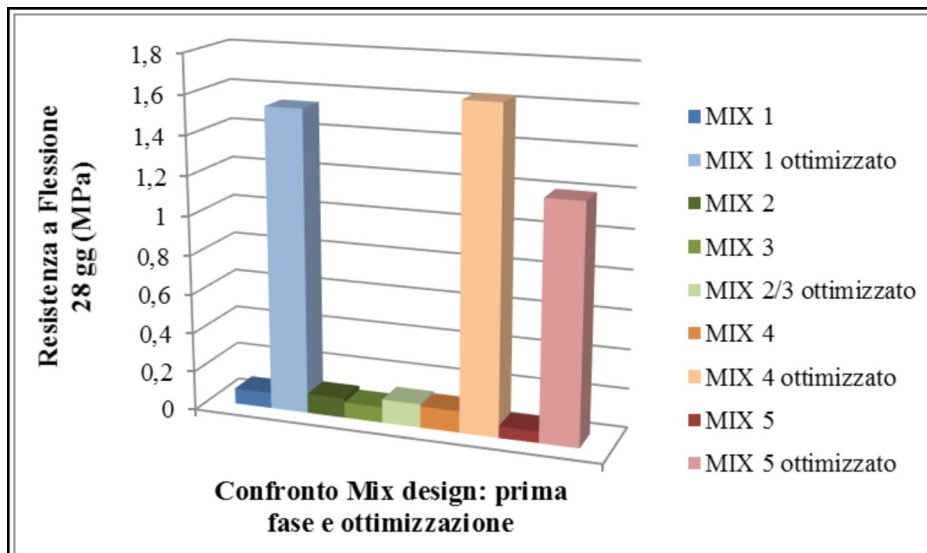


Fig. 5.51 Confronto tra le resistenze a flessione e compressione di intonaci appartenenti alla prima e alla fase di ottimizzazione realizzati con differenti percentuali di aggregati innovativi alleggeriti ecosostenibili.

5.5.6 Discussione dei valori sperimentali

Durante la prima fase di progettazione delle miscele, l'attenzione è stata focalizzata sull'ottenimento di miscele aerate e con una buona lavorabilità. Di contro, i risultati riscontrati sulle proprietà meccaniche hanno evidenziato una scarsa resistenza sia a flessione che a compressione. Nel complesso i dati ottenuti fanno emergere un comportamento migliore per determinate miscele che hanno mostrato migliori valori sia nella prima fase e poi successivamente nell'ottimizzazione (Fig.5.51). Il Mix 4 ha ottenuto i

migliori valori in entrambe le fasi, dimostrando l'ottimale combinazione tra la pomice di tipo 2 e il vetro espanso di riciclo. Inoltre, l'impiego della perlite come filler leggero con proprietà termiche, si dimostra una valida alternativa all'impiego di filler tradizionali come quelli di origine calcarea o silicea, confrontati in questa ricerca sperimentale. I Mix dal 6 al 14 non sono stati caratterizzati dal punto di vista meccanico poiché in quella fase della campagna di sperimentazione si è voluto indagare la correlazione tra conducibilità termica, porosità delle matrici e assorbimento acustico. La ricerca si è concentrata sull'individuazione dei parametri più performanti per questi settori, tralasciando valutazioni di tipo meccanico per un'altra fase di sperimentazione.

5.6 HEAT FLOW METER

Una volta stagionati, i provini, di dimensioni 300x300 mm, prima di essere sottoposti alla prova Heat flow meter, sono stati condizionati in stufa ad una temperatura costante di 23°C fino al raggiungimento della massa costante.

Le seguenti schermate provenienti direttamente dalla prova mostrano i valori di conducibilità (Heat flow meter) delle varie formulazioni, una volta raggiunto il condizionamento. Dalla prova sono state escluse due formulazioni, Mix 6 e Mix 14, in quanto non idonee alla prova:

- Mix 6, indurisce troppo rapidamente, consistenza discreta appena miscelato ma dopo poco diventa un composto malleabile a mano;
- Mix 14, consistenza non fluida e con un impasto di non facile applicazione, troppo consistente.

MIX 1

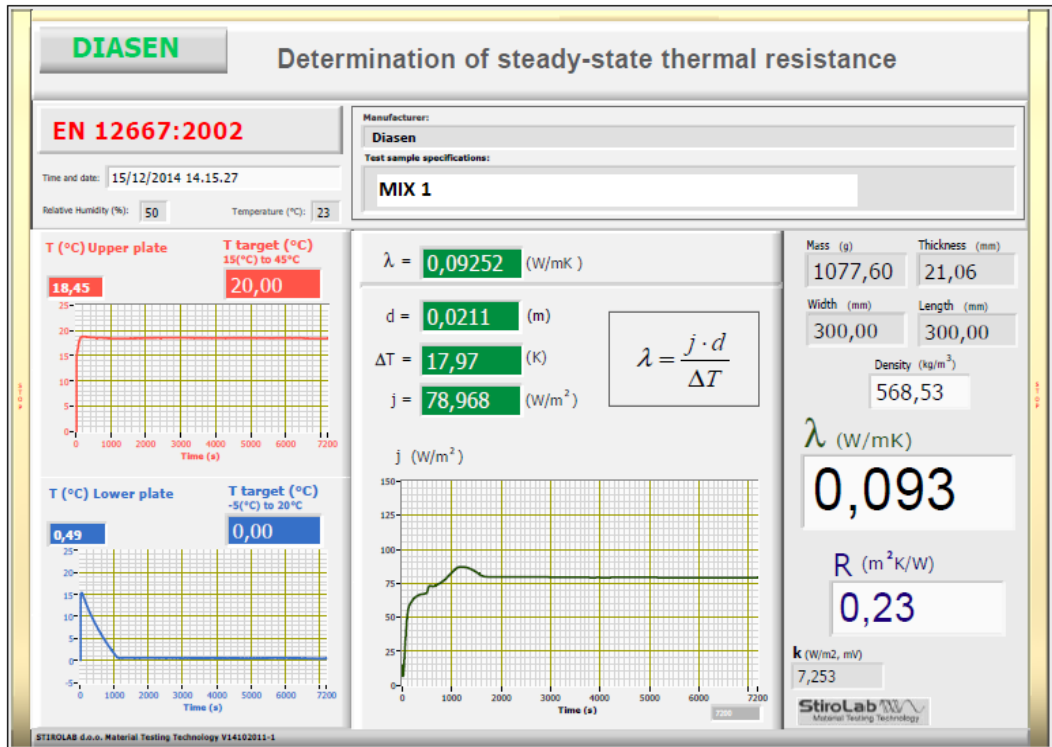


Fig. 5.52 Risultato Heat Flow Meter – MIX 1.

MIX 1 OTTIMIZZATO

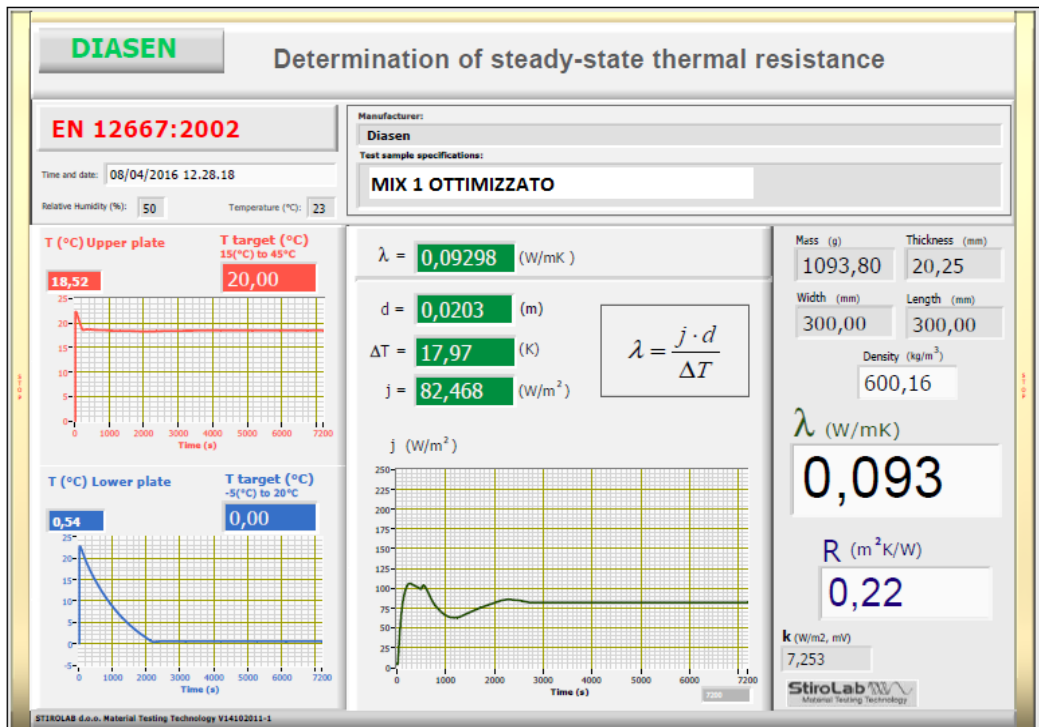


Fig. 5.53 Risultato Heat Flow Meter – MIX 1 OTTIMIZZATO.

MIX 2

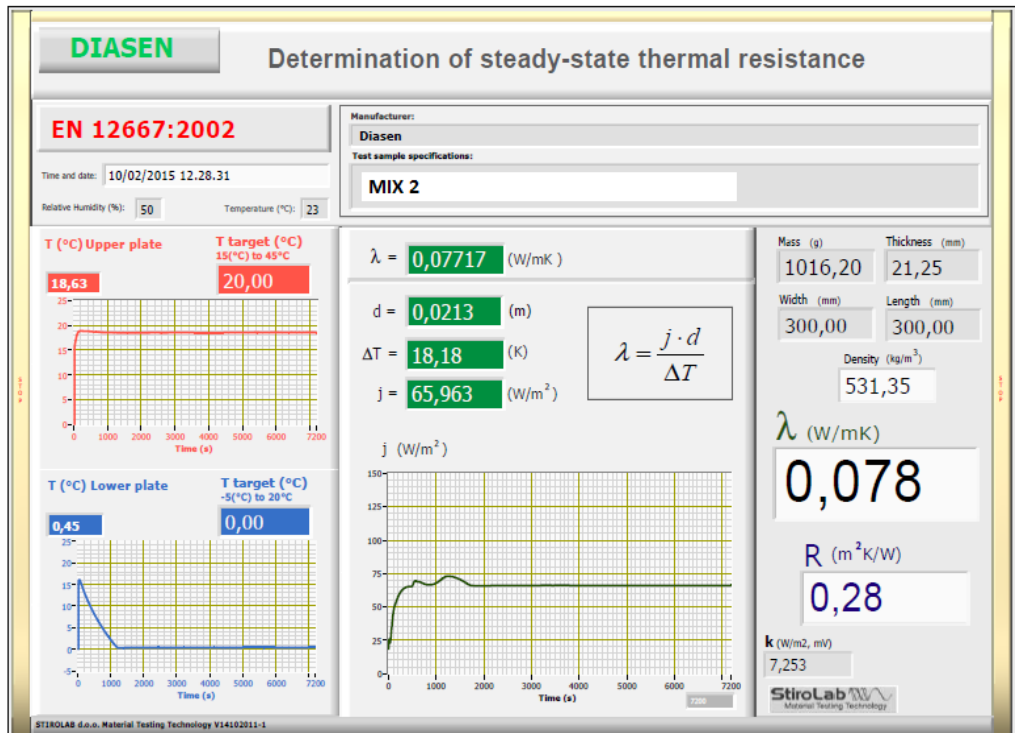


Fig. 5.54 Risultato Heat Flow Meter – MIX 2.

MIX 3

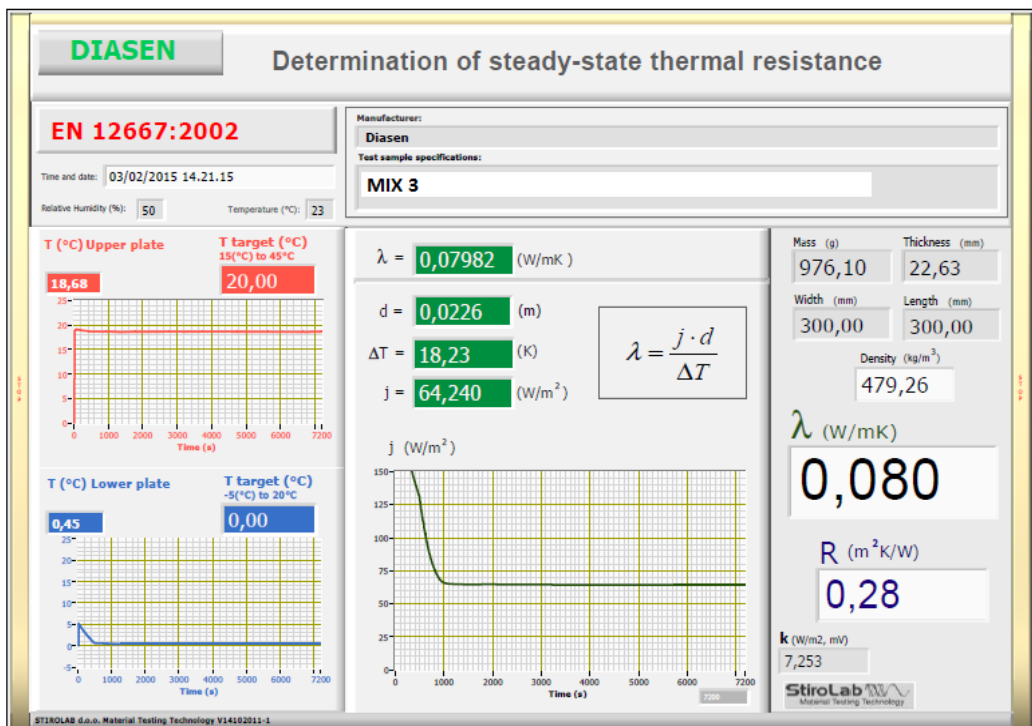


Fig. 5.55 Risultato Heat Flow Meter – MIX 3.

MIX 2-3 OTTIMIZZATO

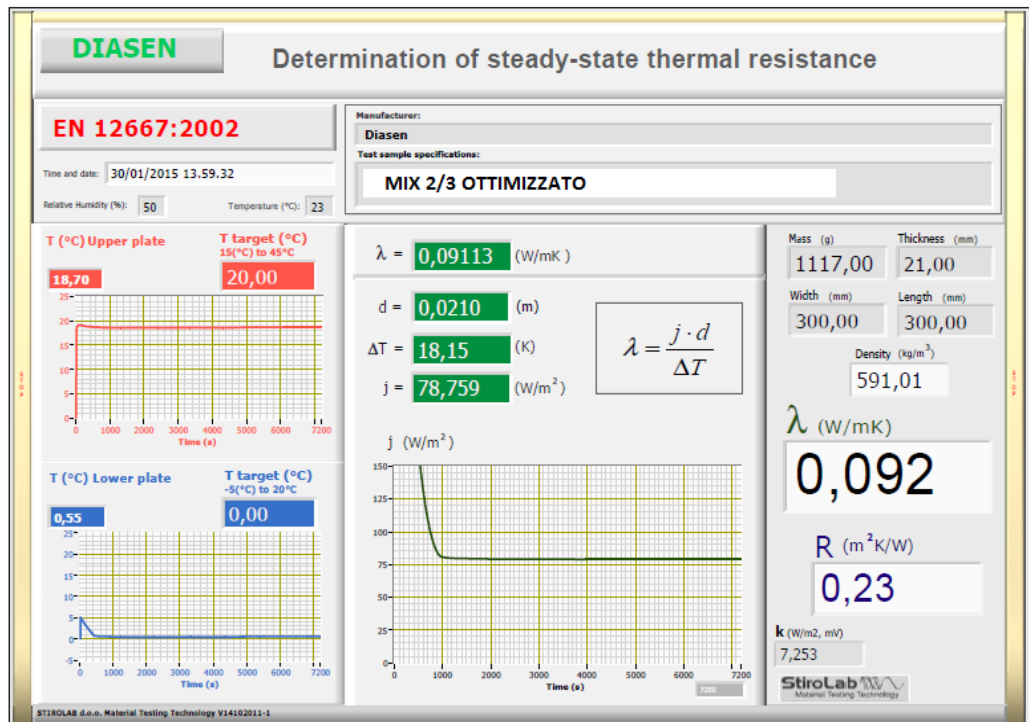


Fig. 5.56 Risultato Heat Flow Meter – MIX 2-3 OTTIMIZZATO.

MIX 4

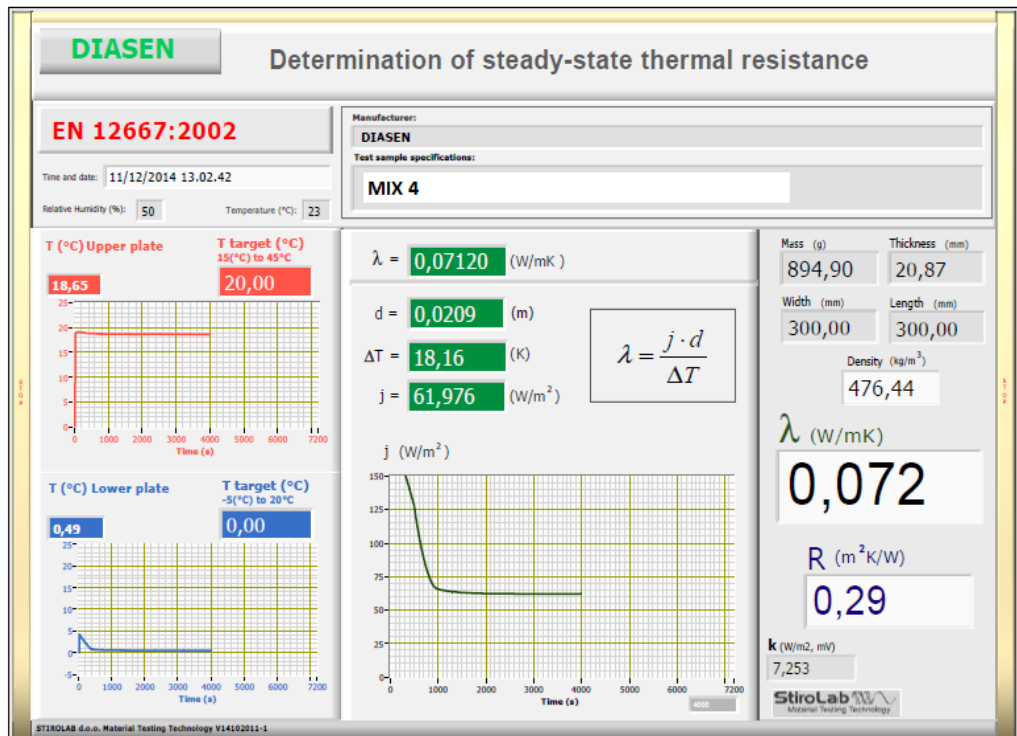


Fig. 5.57 Risultato Heat Flow Meter – MIX 4.

MIX 4 OTTIMIZZATO

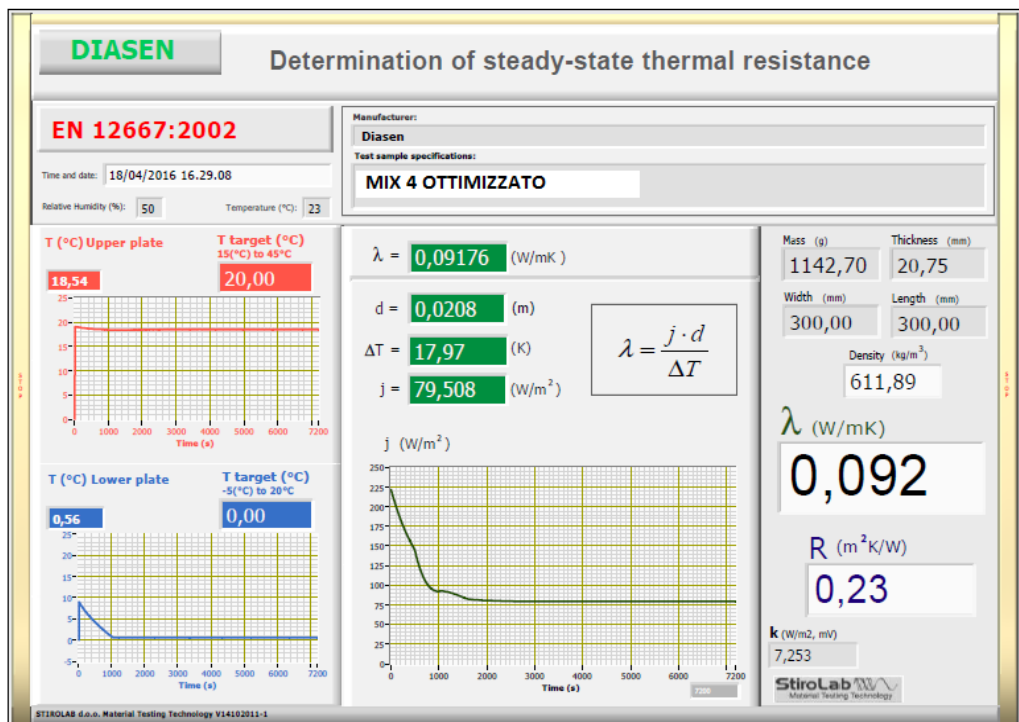


Fig. 5.58 Risultato Heat Flow Meter – MIX 4 OTTIMIZZATO.

MIX 5

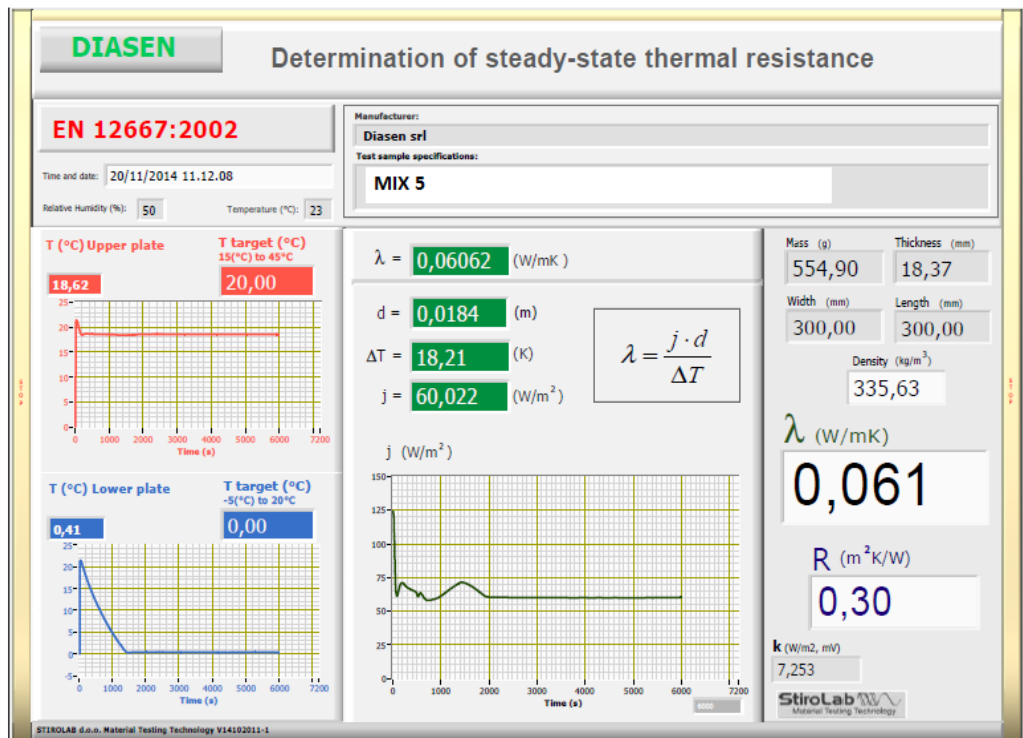


Fig. 5.59 Risultato Heat Flow Meter – MIX 5.

MIX 5 OTTIMIZZATO

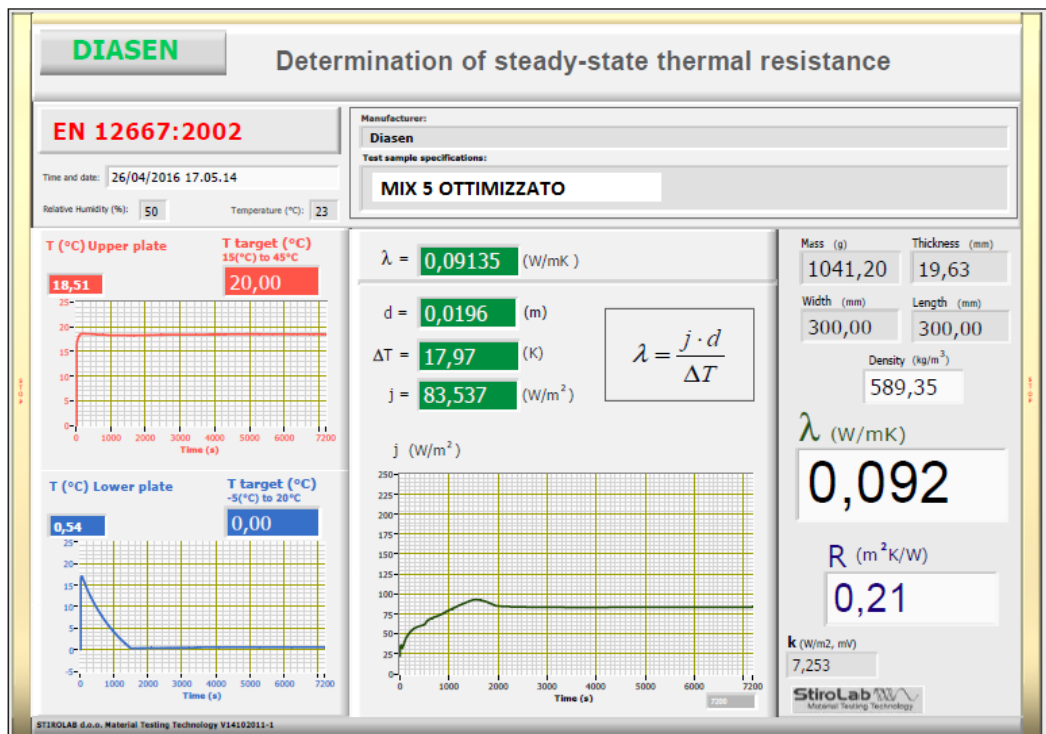


Fig. 5.60 Risultato Heat Flow Meter – MIX 5 OTTIMIZZATO.

MIX 7

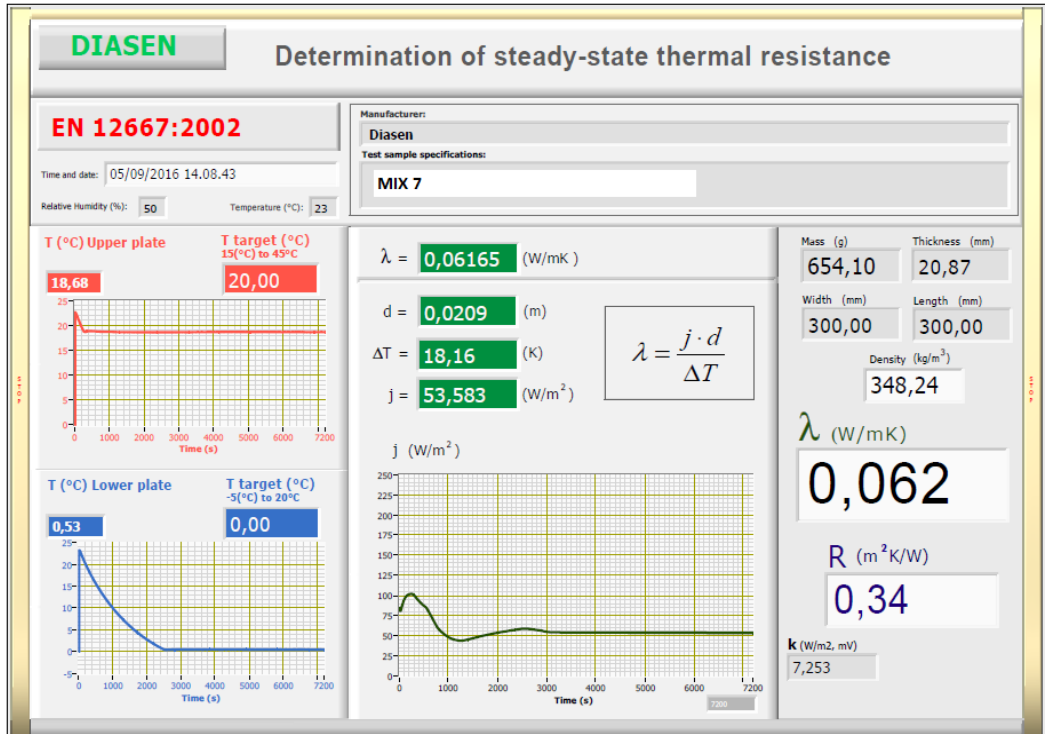


Fig. 5.61 Risultato Heat Flow Meter – MIX 7.

MIX 8

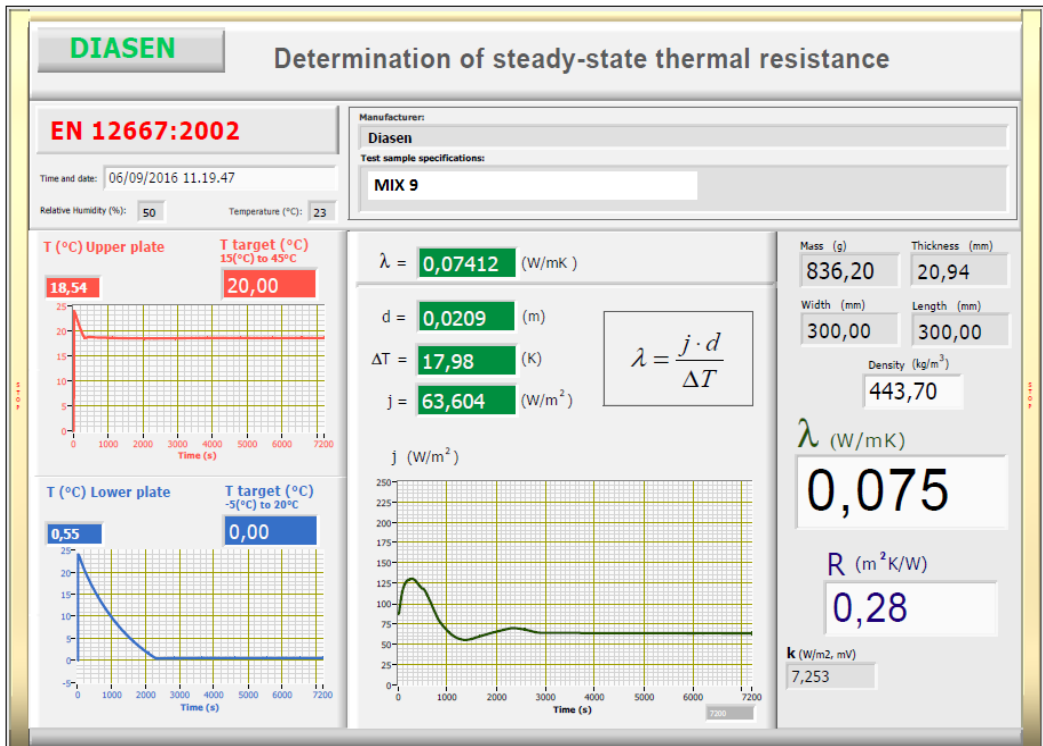


Fig. 5.62 Risultato Heat Flow Meter – MIX 8.

MIX 9

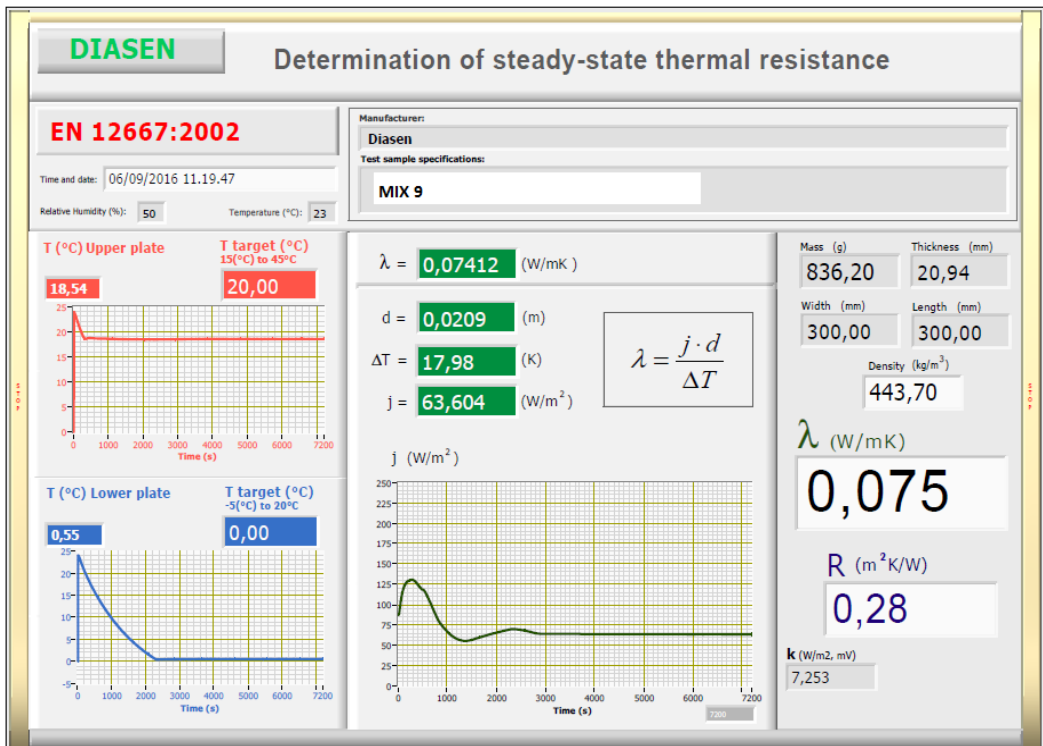


Fig. 5.63 Risultato Heat Flow Meter – MIX 9.

MIX 10

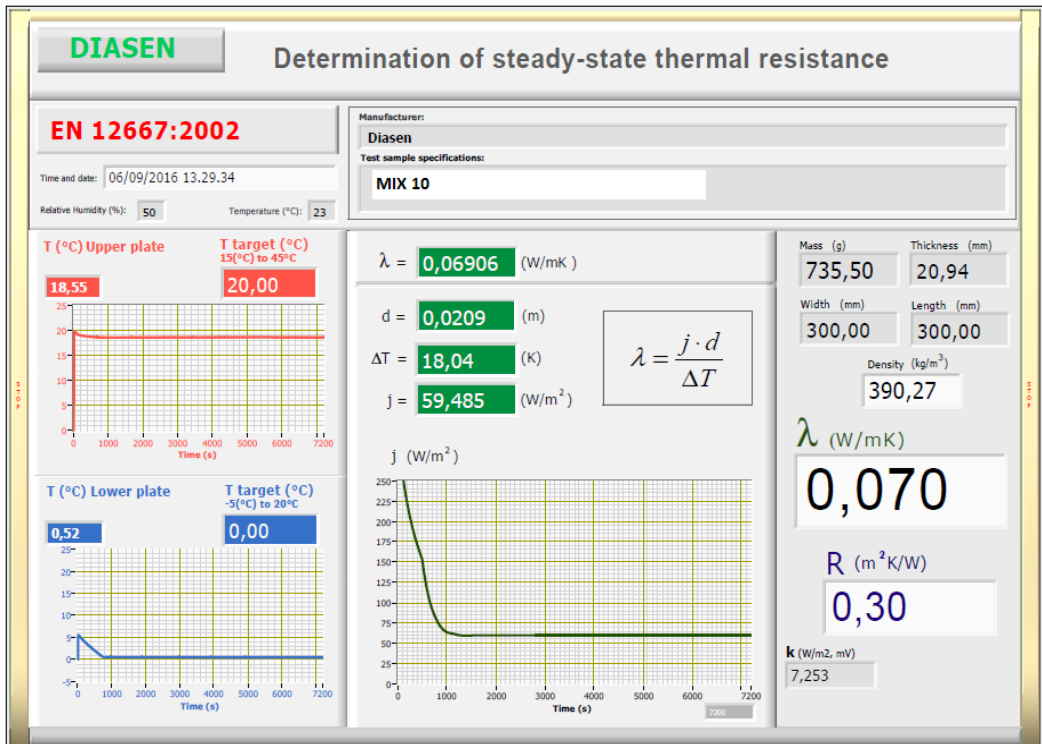


Fig. 5.63 Risultato Heat Flow Meter – MIX 10.

MIX 11

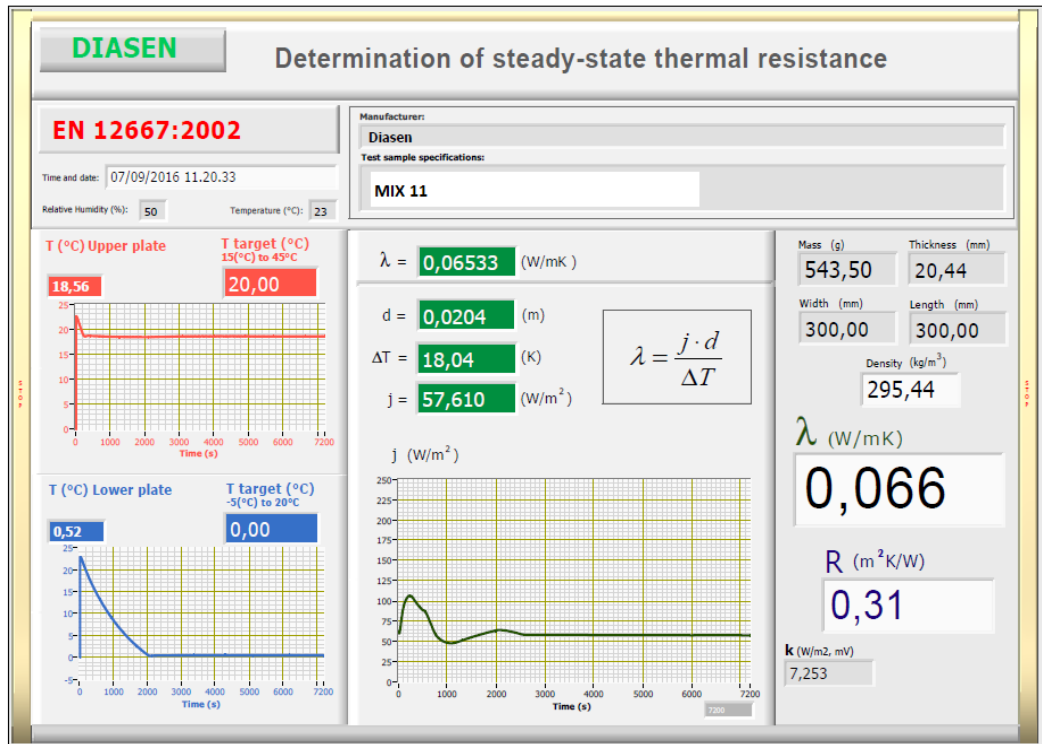


Fig. 5.64 Risultato Heat Flow Meter – MIX 11.

MIX 12

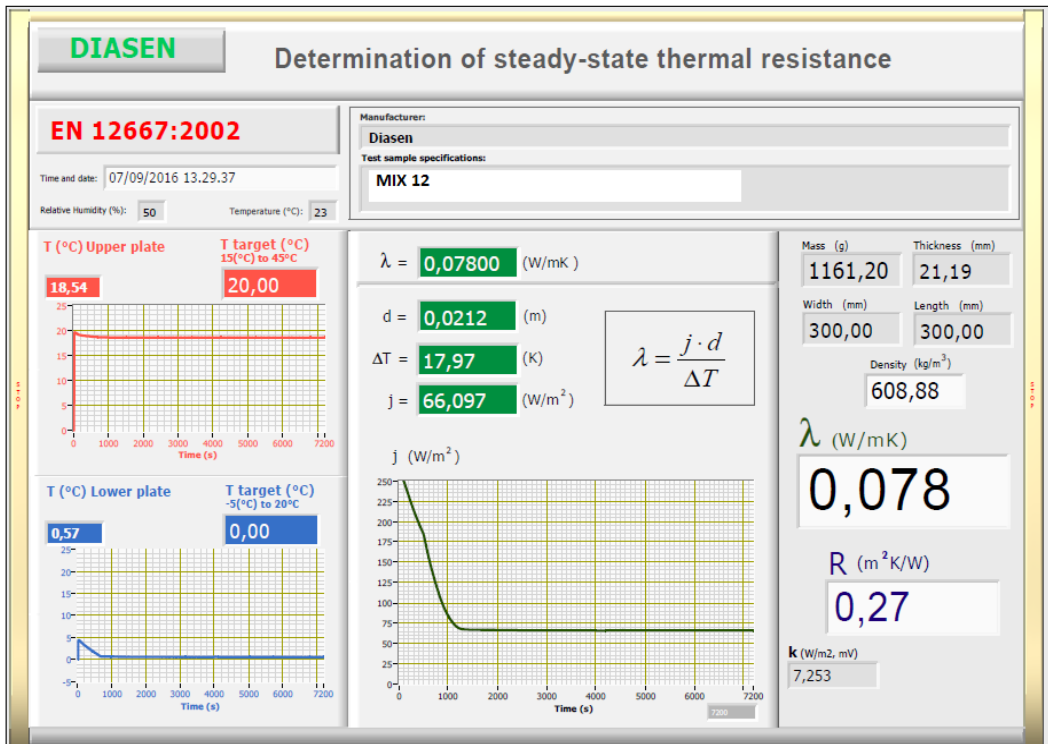


Fig. 5.65 Risultato Heat Flow Meter – MIX 12.

MIX 13

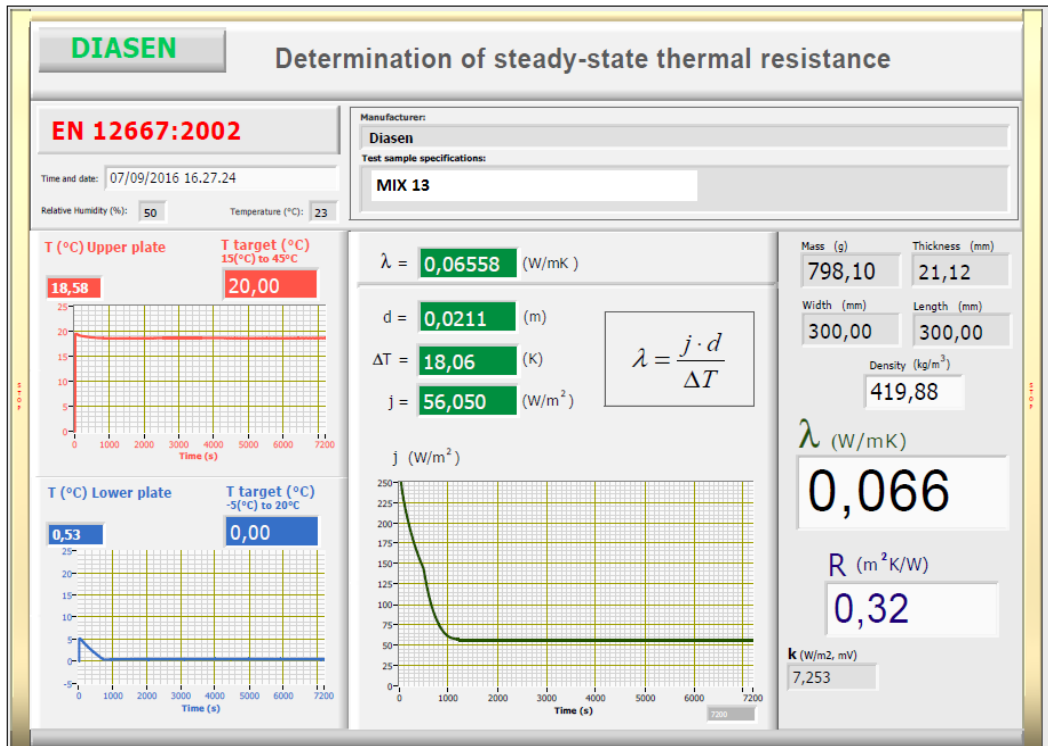


Fig. 5.65 Risultato Heat Flow Meter – MIX 13.

Di seguito (Tab. 5.3) si riportano i risultati della prova relativi alle varie formulazioni:

Tab. 5.3 Risultati formulazioni Heat Flow Meter

Formulazione	λ [W/mK]
Mix 1	0,09252
Mix 2	0,07717
Mix 3	0,07982
Mix 4	0,0712
Mix 5	0,06062
Mix 1 Ottimizzato	0,09298
Mix 2/3 Ottimizzato	0,09113
Mix 4 Ottimizzato	0,09176
Mix 5 Ottimizzato	0,06062
Mix 7	0,06165
Mix 8	0,06682
Mix 9	0,07412
Mix 10	0,06906
Mix 11	0,06533
Mix 12	0,078
Mix 13	0,06558

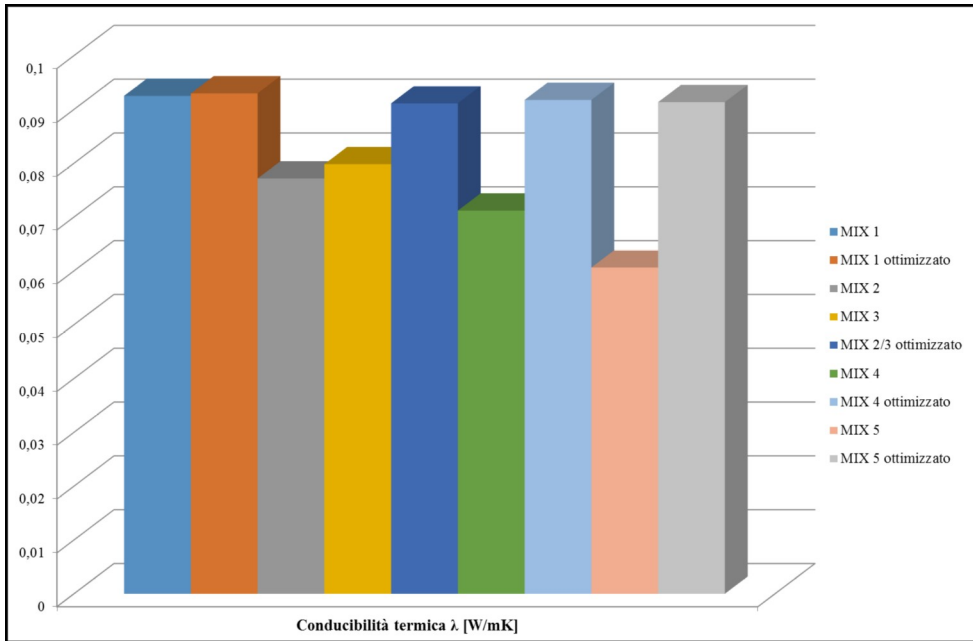


Fig. 5.66 Confronto tra le varie conducibilità termiche di intonaci appartenenti alla prima e alla fase di ottimizzazione.

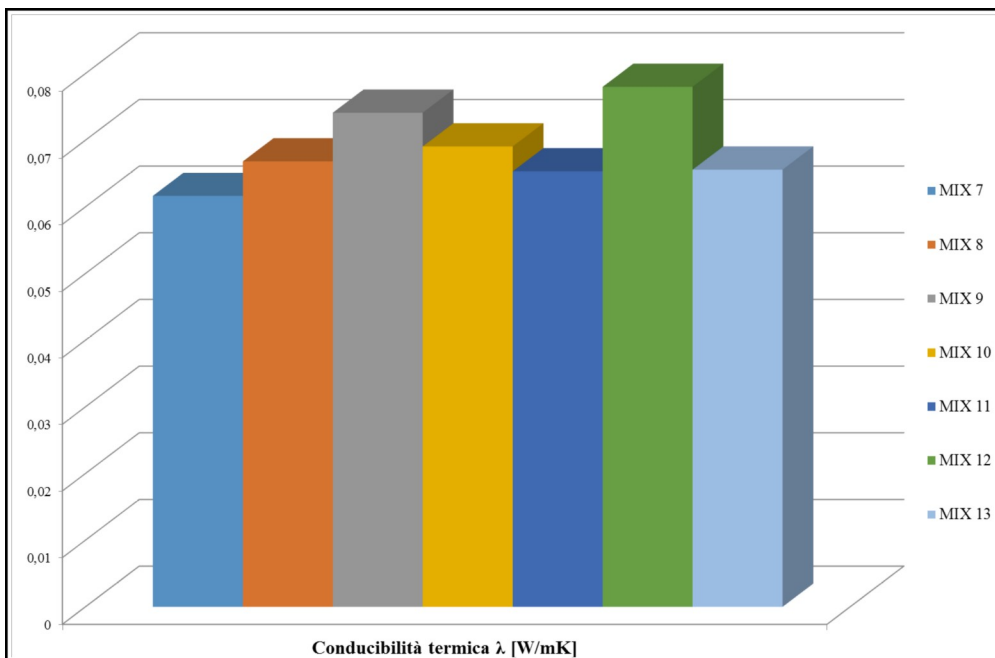


Fig. 5.67 Confronto tra le varie conducibilità termiche di intonaci appartenenti alla seconda fase di sperimentazione.

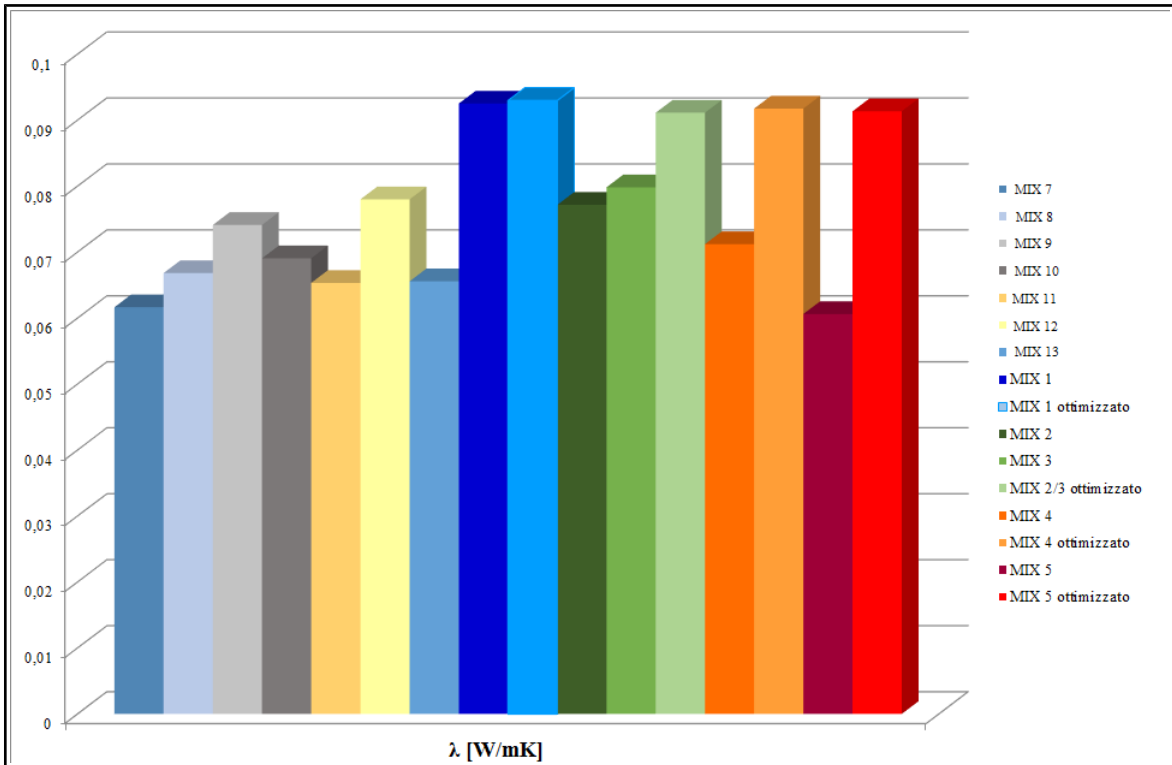


Fig. 5.68 Confronto tra le varie conducibilità termiche di intonaci appartenenti alle varie fasi di sperimentazione.

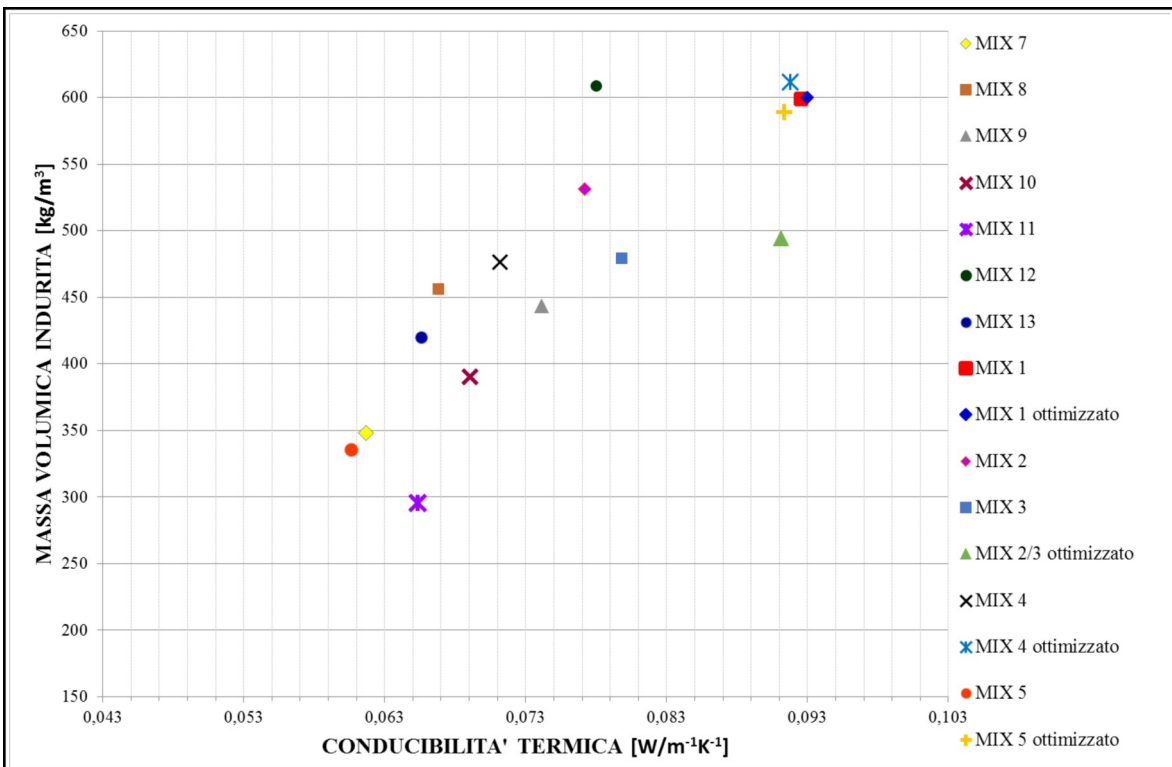


Fig. 5.69 Confronto tra le varie conducibilità termiche e massa volumica indurita di intonaci appartenenti alle varie fasi di sperimentazione.

5.6.1 Discussione dei valori sperimentali

Durante la fase iniziale di progettazione delle miscele, dalla Mix 1 alla Mix 5 e successive ottimizzazioni, la sperimentazione si è focalizzata sull'impiego di aggregati leggeri di riciclo da mettere a confronto con aggregati più tradizionali alleggeriti e non. Dalla rielaborazione dei dati attraverso un istogramma comparativo (Fig. 5.66), si può vedere come l'impiego di un materiale piuttosto che un altro, incida sulle performance termiche della miscela complessiva. L'uso della perlite espansa apporta una notevole azione isolante sul Mix 5, registrando il miglior risultato di conducibilità termica pari a $0,06062 \text{ W/mK}$. Allo stesso modo, l'impiego di questo materiale sotto forma di filler e nel più avanzato aggregato di silice espansa con vetro riciclato, presente nel Mix 2 e Mix 3, permette di raggiungere l'ottimo risultato di $0,07717 \text{ W/mK}$. Altra combinazione estremamente interessante dal punto di vista termico è quella raggiunta dal Mix 4, dove sono presenti la pomice di tipo 2, il vetro espanso riciclato e la perlite espansa sotto forma di filler. In questo caso il risultato raggiunto è il secondo migliore: $0,07120 \text{ W/mK}$.

Allo stesso tempo, come già analizzato nel paragrafo sulle proprietà meccaniche delle miscele, gli ottimi risultati conseguiti nella conducibilità termica corrispondono a un drastico peggioramento delle resistenze meccaniche. Per questo motivo, le miscele Mix 1, Mix 2 - Mix 3, Mix 4 e Mix 5 sono state ottimizzate in termini di resistenza a flessione e compressione. L'ottimizzazione ha però comportato un aumento delle conducibilità raggiunte e un sostanziale uguagliamento dei valori che si attestano tra $0,09135 - 0,9298 \text{ W/mK}$.

Nella seconda fase della ricerca si è ripartiti da questi risultati per formulare nuovi intonaci per l'efficienza energetica, con l'impiego di materiali sempre più avanzati come il gel di silice, più noto come Aerogel.

Nella tabella (Fig. 5.68) vengono riportati solo i mix migliori che sono stati testati e che hanno evidenziato tutti dei buoni valori di conducibilità mai superiori a $0,074 \text{ W/mK}$. Anche in questo caso le migliori performance termiche sono da associare ai mix design che includono la perlite espansa, il vetro riciclato e l'innovativo aerogel, con valori compresi tra $0,06165 - 0,06533 \text{ W/mK}$.

Il grafico di correlazione tra massa volumica indurita e conducibilità termica (Fig. 5.69) stabilisce una correlazione tra i due valori.

Questa fase sperimentale fornisce un sufficiente punto di partenza per continuare lo sviluppo di intonaci avanzati con ottime proprietà termiche isolanti, coniugando gli aspetti funzionali legati alle resistenze meccaniche e di durabilità dell'intonaco.

5.7 POROSIMETRIE

La campagna sperimentale è seguita con la messa a punto del progetto delle miscele, con il principale scopo di creare una correlazione tra struttura porosa, conducibilità termica e prestazioni acustiche dei campioni analizzati.

La valutazione della porosimetria delle miscele misura la percentuale di micro e macro porosità del materiale, il volume e il diametro dei pori mediante un porosimetro a mercurio. Il mercurio penetra attraverso le porosità aperte del campione solido analizzato solo mediante l'applicazione di una pressione esterna.

Misurando la quantità di mercurio penetrato nei pori del campione ad ogni valore di pressione, si ottengono i dati sperimentali da cui calcolare la distribuzione porosimetrica in funzione del raggio dei pori. Maggiore o minore quantità di pori aperti interconnessi e il diametro dei pori influenza le performance termoacustiche di un materiale (Fig.5.70).



Fig. 5.70 Porosimetro.



Fig. 5.71-72 Struttura porosa impasto stagionato – MIX 9-12.

Tab. 5.4 Porosità.

	λ [W/mK]	Massa volumica [kg/m ³]	Porosità tot accessibile %	Total pore volume mm ³ /g	Average pore diameter μ
MIX 1	0,09252	599,17	45,725	574,23	0,1065
MIX 1 OTTIMIZZATO	0,09298	600,16	50,73	431,62	0,1737
MIX 2	0,07717	531,35	55,71	798,54	0,1785
MIX 3	0,07982	479,26	49,86	638,21	0,1645
MIX 2/3 OTTIMIZZATO	0,09113	494,3	45,68	593,89	0,1578
MIX 4	0,0712	476,44	60,09	1035,74	0,179
MIX 4 OTTIMIZZATO	0,09176	611,89	63,55	788,84	0,2017
MIX 5	0,06062	335,63	69,16	1448,905	0,22455
MIX 5 OTTIMIZZATO	0,09135	589,35	65,965	910,235	0,20635
MIX 7	0,06165	348,24	58,47	815,27	0,2444
MIX 8	0,06682	455,99	60,39	845,86	0,1905
MIX 9	0,07412	443,7	62,73	863,08	0,1677
MIX 10	0,06906	390,27	58,96	762,64	0,1348
MIX 11	0,06533	295,44	68,57	1348,97	0,1627

MIX 12	0,078	608,88	65,45	1024,66	0,1506
MIX 13	0,06558	419,88	62,83	1208,33	0,1689

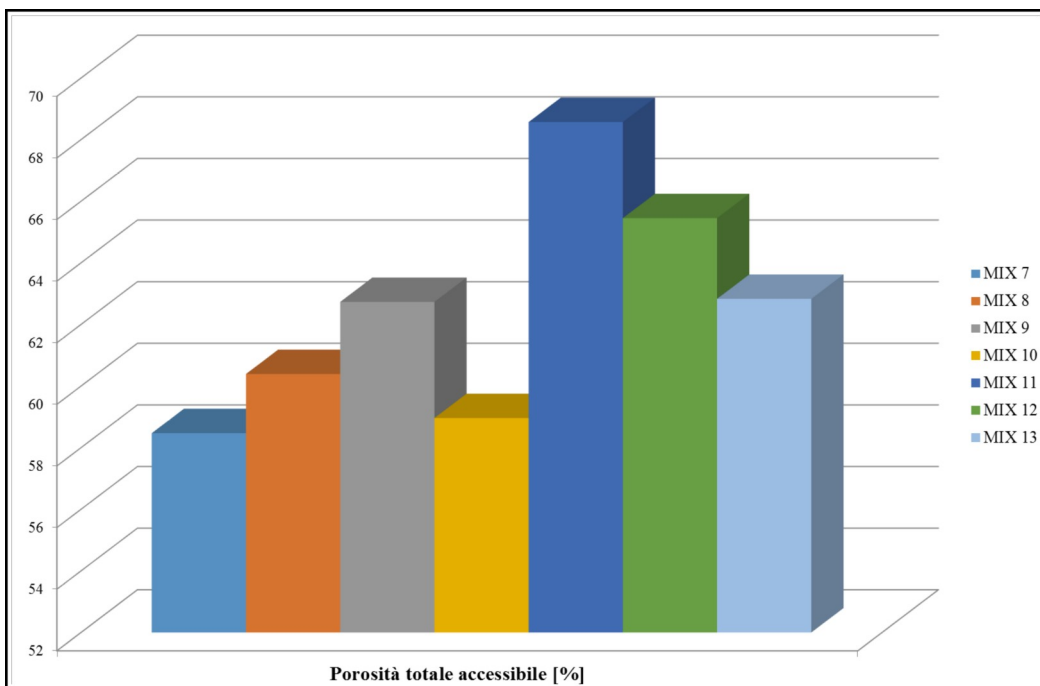
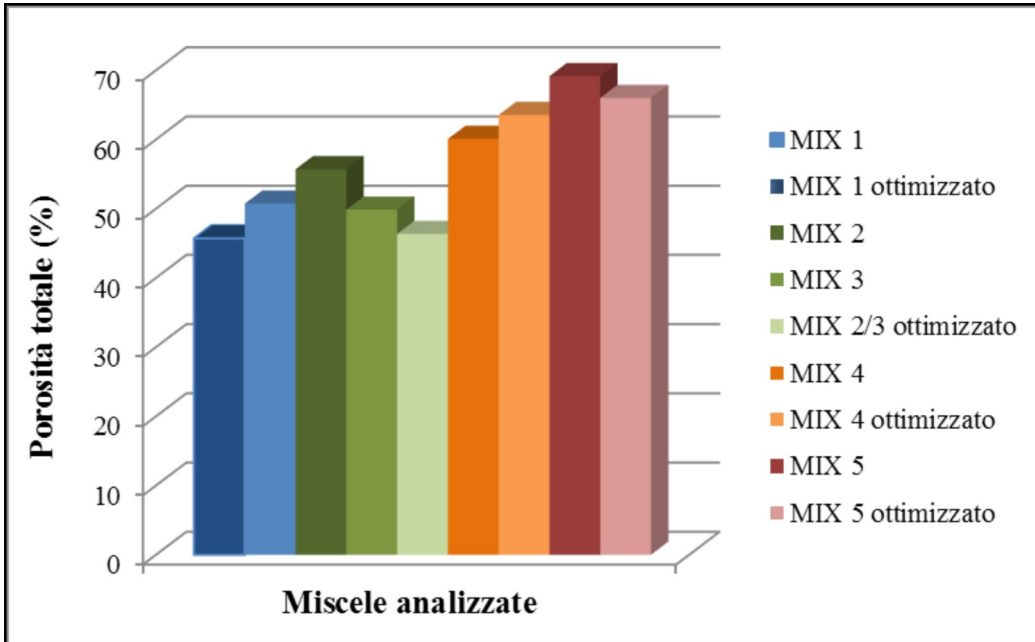


Fig. 5.73 -74 Confronto porosità tra i vari mix di intonaci.

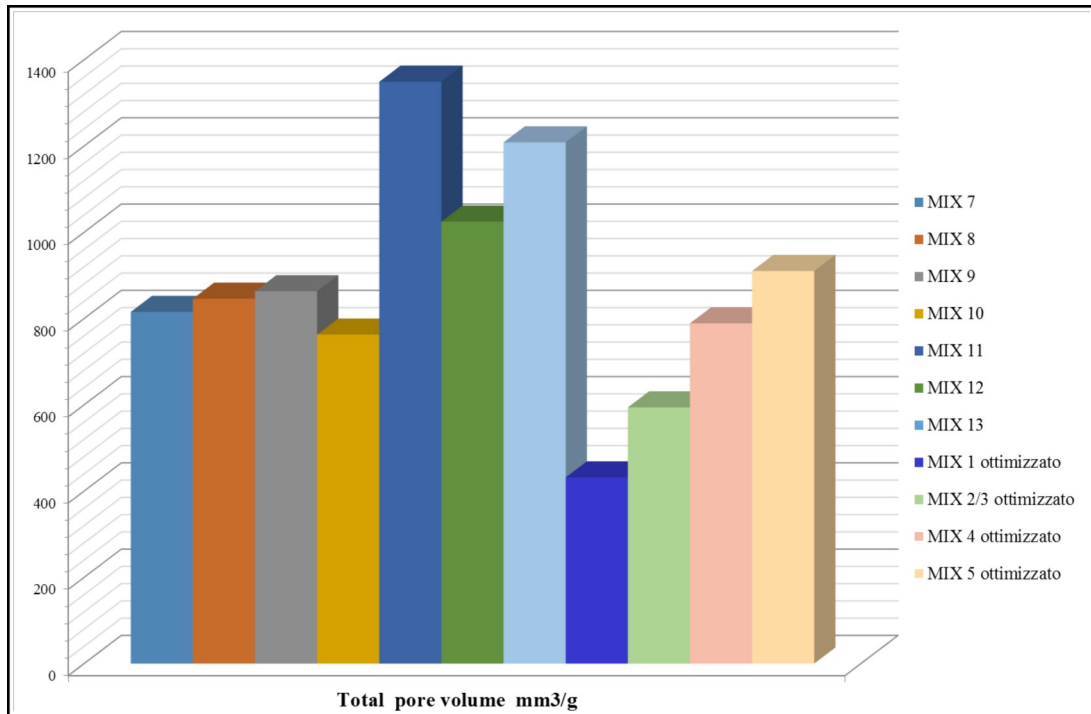


Fig. 5.75 – Volume totale dei pori.

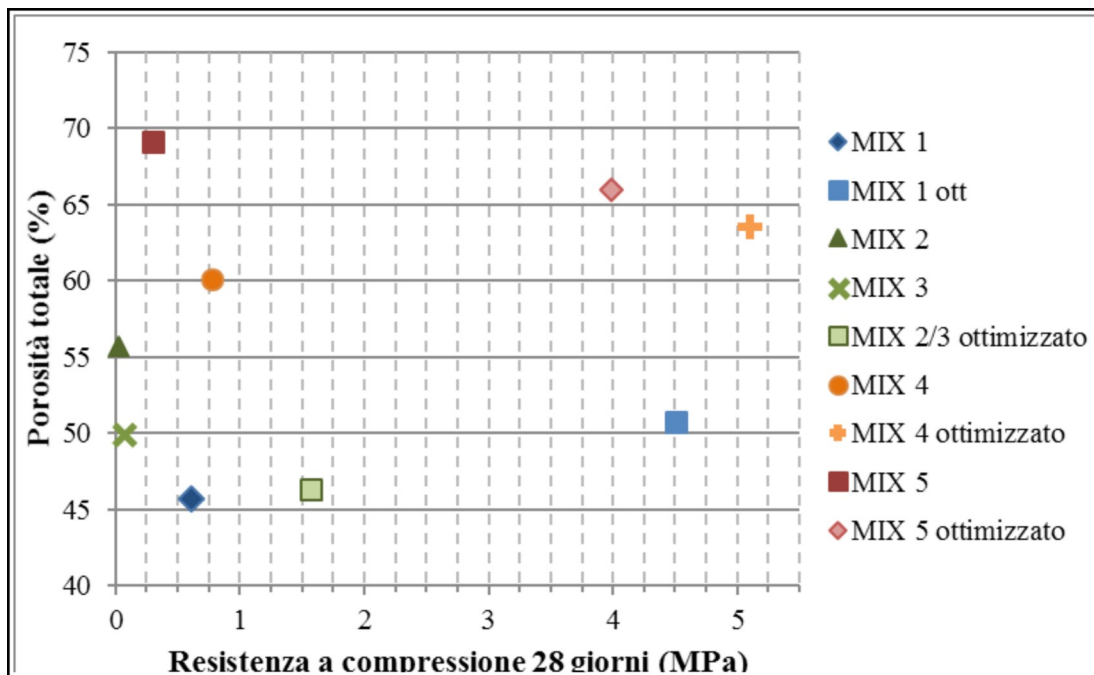


Fig. 5.76 – Resistenza a compressione in funzione della porosità totale.

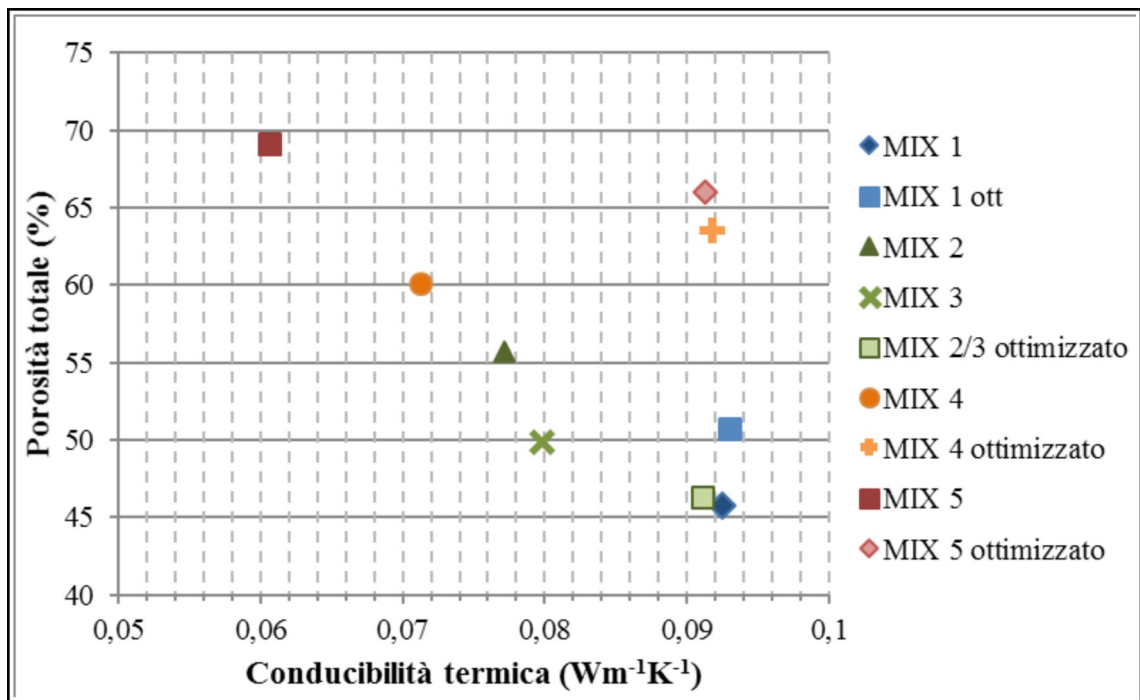


Fig. 5.77 – Conduttività termica in funzione della porosità totale.

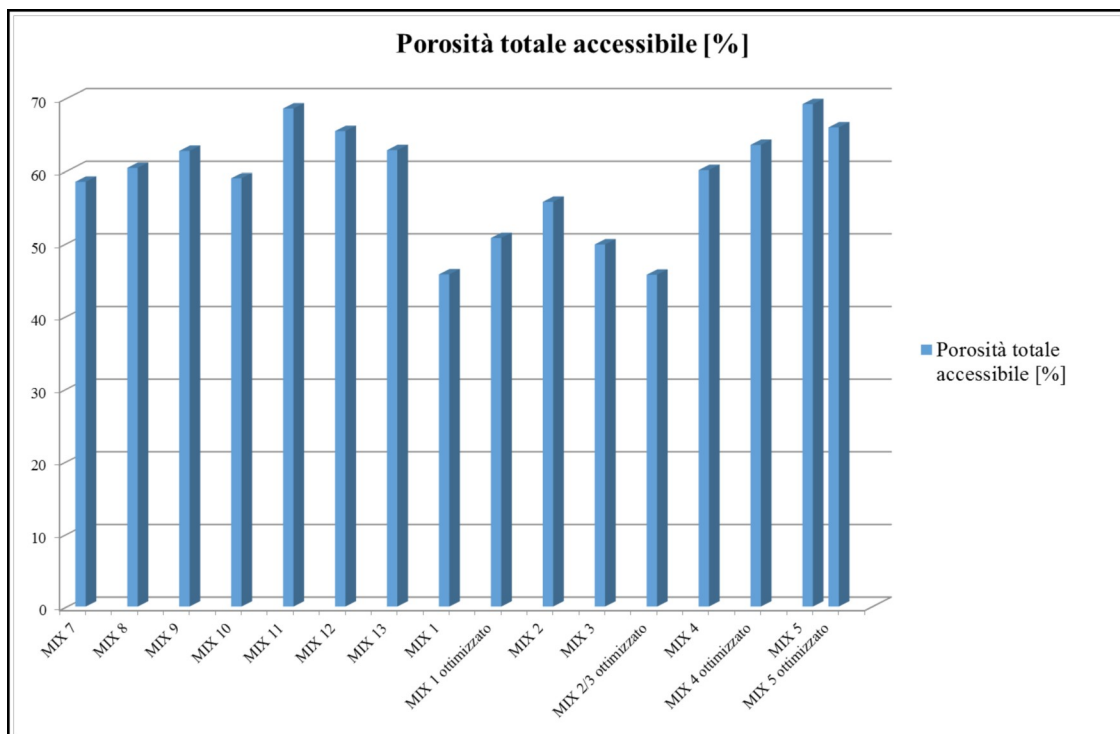


Fig. 5.78 – Porosità totale espressa in percentuale.

5.7.1 Discussione dei valori sperimentali

La campagna sperimentale condotta attraverso l'analisi della porosità delle miscele sviluppate nella prima fase conferma la relazione tra conducibilità termica e struttura porosa. Infatti, come si evidenzia dall'istogramma elaborato, i Mix 4 e 5 sono quelli con la maggiore percentuale di porosità e quindi con un volume totale di pori maggiore (Fig.5.73).

Le miscele realizzate nella seconda fase della sperimentazione (Fig.5.74) che sono state analizzate con la porosimetria al mercurio hanno prodotto dei risultati molto incoraggianti, con elevate percentuali di porosità accessibile. In particolare le migliori sono state il Mix 11, 12 e 13, contenenti rispettivamente perlite espansa, aerogel e un mix di pomice e infine aerogel e vetro espanso.

Sono state confrontate solo le miscele ottimizzate (Fig.5.75) della prima fase con quelle della seconda fase per evidenziare l'ulteriore sviluppo dei mix design alla ricerca di intonaci sempre più avanzati al fine del miglioramento dell'efficienza energetica.

Relativamente alla prima fase di sviluppo, si può stabilire una correlazione coerente tra le seguenti proprietà funzionali analizzate: porosità tot, conducibilità e resistenza a compressione. L'ottimizzazione delle miscele, al fine di aumentarne le prestazioni meccaniche, ha comportato una riduzione della porosità totale e della conducibilità termica. Da notare come il peggioramento sia molto più evidente sul valore di termicità della miscela che non sul valore di porosità tot. Si può dedurre quindi che il parametro della conducibilità è legato non solo alla microstruttura più o meno porosa della miscela ma anche alla tipologia di inerti utilizzati e quindi al potere isolante di quest'ultimi (Fig.5.76-5.77).

5.8 MISURA DEL COEFFICIENTE DI FONOASSORBIMENTO (α) CON TUBO DI IMPEDENZA

Questa seconda fase del progetto di ricerca ha affrontato la progettazione di nuove miscele da sviluppare e caratterizzare dal punto di vista dell'assorbimento del suono. La scelta del mix design è stata guidata attraverso l'individuazione di prove preliminari che potessero portare alla scelta di materiali più adeguati al fine di raggiungere elevate performance di assorbimento acustico. La scelta delle miscele è stata eseguita in base all'analisi dei dati ottenuti dalle prove di conducibilità termica e di porosimetria. Da questa combinazione sono stati portati avanti gli intonaci più performanti, e per questi è stata eseguita la misura del coefficiente di fonoassorbimento (α) con tubo di impedenza.

5.8.1. Descrizione dei campioni di prova

Prima campagna di misura

I campioni testati (Fig. 5.79 e 5.78) sono intonaci di due diverse formulazioni (Mix 11, Mix 10). Nelle tabelle (Tab. 5.5 e 5.6) si riportano le principali caratteristiche dei campioni analizzati. Per ogni tipologia sono stati forniti campioni del diametro 100 e 29 mm. Si elencano nel seguito il numero dei campioni forniti per ogni tipologia:

- Campione Mix 11: 8 provini di diametro 100 mm e 10 da 29 mm



Fig. 5.79 Campioni testati Mix 11: tubo grande e piccolo.

- Campione Mix 10: 7 provini di diametro 100 mm e 10 da 29 mm



Fig. 5.78 Campioni testati formulazione Mix 10: tubo grande e tubo piccolo.

Per ogni tipologia sono stati testati i campioni con la superficie più regolare possibile e per ogni provino sono state fatte una o più prove, anche modificandone la posizione all'interno dell'apparato strumentale.

Da una prima analisi visiva, i provini della stessa tipologia di campione risultano visibilmente differenti sia per la granulometria sia per lo spessore (con differenze fino a 5 mm). Per tale ragione si è ritenuto opportuno misurare, con appositi strumenti di precisione, lo spessore e il diametro di ciascun provino.

Un'ulteriore indagine è stata condotta scegliendo 3 campioni per ciascuna tipologia, quelli con le superfici più regolari, che sono stati testati esponendo entrambi i lati verso la sorgente, per poter fare un confronto dei valori di assorbimento misurati. Anche in questo caso i risultati ottenuti hanno confermato la disomogeneità dei provini di uno stesso campione.

CAMPIONE MIX 11

Provino	Spessore [mm]	Diametro [mm]	Note
1	35	100	Parzialmente disgregato da una parte (escluso)
2	33	100	-
3	34	100	Bordo leggermente irregolare
4	33	100	Superficie non orizzontale (escluso)
5	31	100	-
6	34	100	-
7	32	100	-
8	32	100	Spessore non uniforme
9	31	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
10	32	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
14	33	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
15	34	29	Lato posteriore piuttosto irregolare

Tab. 5.5 Descrizione dei campioni di prova – Campione Mix 11.

CAMPIONE MIX 10

Provino	Spessore [mm]	Diametro [mm]	Note
1	30	100	Densità molto diversa (escluso)
2	34	100	-
3	34	100	-
4	34	100	Superficie verso la sorgente irregolare
5	32	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
6	33	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
7	34	29	Lato posteriore piuttosto irregolare
8	35	29	Lato posteriore piuttosto irregolare

Tab. 5.6 Descrizione dei campioni di prova – Campione Mix 10.

Seconda campagna di misura

Sono state studiate due diverse tipologie di campioni:

- Campione Mix 12, spessore pari a 3 cm (Fig.5.79)



Fig.5.79 Campioni testati: tubo grande e piccolo.

- Campione Mix 7 con finitura superficiale carteggiata, spessori pari a 3 cm (Fig.5.80 -5.81).



Fig.5.80 Campioni testati: tubo grande e piccolo.



Fig. 5.81 Campioni testati Mix 7, finitura superficiale carteggiata: tubo piccolo.

Viste le difficoltà riscontrate nelle campagne di misura precedenti (bordi dei campioni non regolari e spessori dei provini differenti), il campione Mix 12 è stato realizzato all'interno di un supporto porta – campione, costituito da un cilindro cavo di acciaio di altezza pari allo spessore del campione da testare (3 cm per il campione Mix 12). Ciascun provino di intonaco è stato quindi applicato all'interno del porta – campione con una procedura manuale tramite spatola (e non a spruzzo come avviene in opera) ed è stato poi stagionato all'interno di esso. I cilindri vuoti, per tubo piccolo e grande, sono mostrati in Fig. 5.82.



Fig. 5.82 Supporti porta – campione: tubo grande e tubo piccolo.

I provini del campione Mix 7, sia per tubo grande sia per tubo piccolo, sono stati invece ottenuti mediante carotaggio da un pannello di dimensioni maggiori, precedentemente carteggiato a mano.

Per ogni tipologia sono stati forniti campioni del diametro 100 e 29 mm e sono stati scelti i provini con le superfici più regolari da testare (come mostrato nelle tabelle successive); per ogni provino sono state fatte più prove, anche modificandone la posizione all'interno dell'apparato strumentale.

Nelle tabelle di seguito (Tab. 5.7 e 5.8) si riportano le principali caratteristiche dei campioni analizzati.

Tab. 5.7 Descrizione dei campioni di prova – Campione Mix 12.

CAMPIONE MIX 12			
Provino	Spessore [mm]	Diametro [mm]	Note
1	30	100	-
2	30	100	-
3	30	100	-
4	30	100	-
1	30	29	-
2	30	29	-
3	30	29	-
4	30	29	-

Tab. 5.8 Descrizione dei campioni di prova – Campione Mix 7.

CAMPIONE MIX 7			
Provino	Spessore [mm]	Diametro [mm]	Note
1	29,2	100	Testato con mastice (*)
2	28,5	100	Testato con mastice (*)
3	28,3	100	Testato con mastice (*)
4	28,8	100	-
1	26,2	29	Bordo irregolare escluso (escluso)
2	26,5	29	-
3	26,2	29	-
4	26,3	29	-

(*) test con mastice



Fig. 5.83 Utilizzo del mastice per testare il campione Mix 7.

Prima campagna di misura

Si riportano in figura gli andamenti in frequenza dei coefficienti di assorbimento per incidenza normale relativamente alle misure eseguite in tubo grande (100 – 1600 Hz) e in tubo piccolo (400 – 6400 Hz). In fase di misurazione, tre campioni per ciascuna tipologia (quelli con superfici più regolari possibili) sono stati testati esponendo entrambi i lati verso la sorgente: i valori di assorbimento misurati hanno confermato la disomogeneità dei provini di una stessa formulazione (Fig. 5.83-5.89).

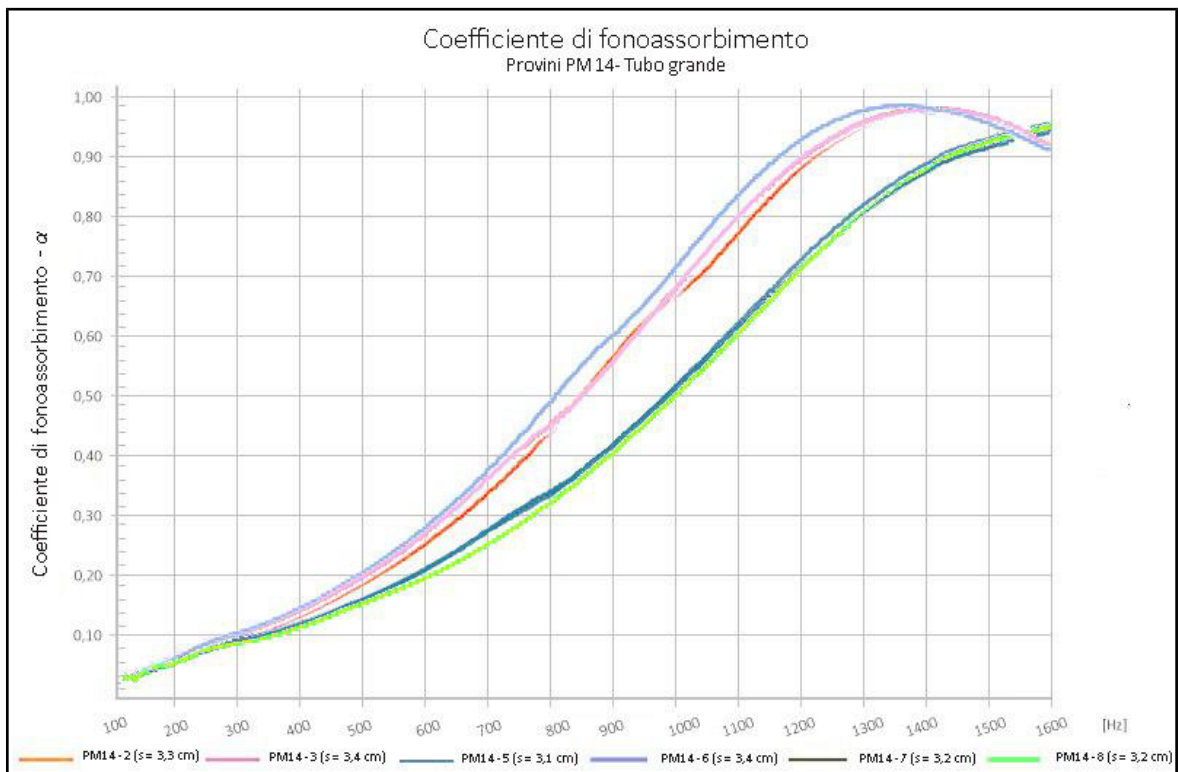


Fig. 5.84 Campione Mix 11 (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

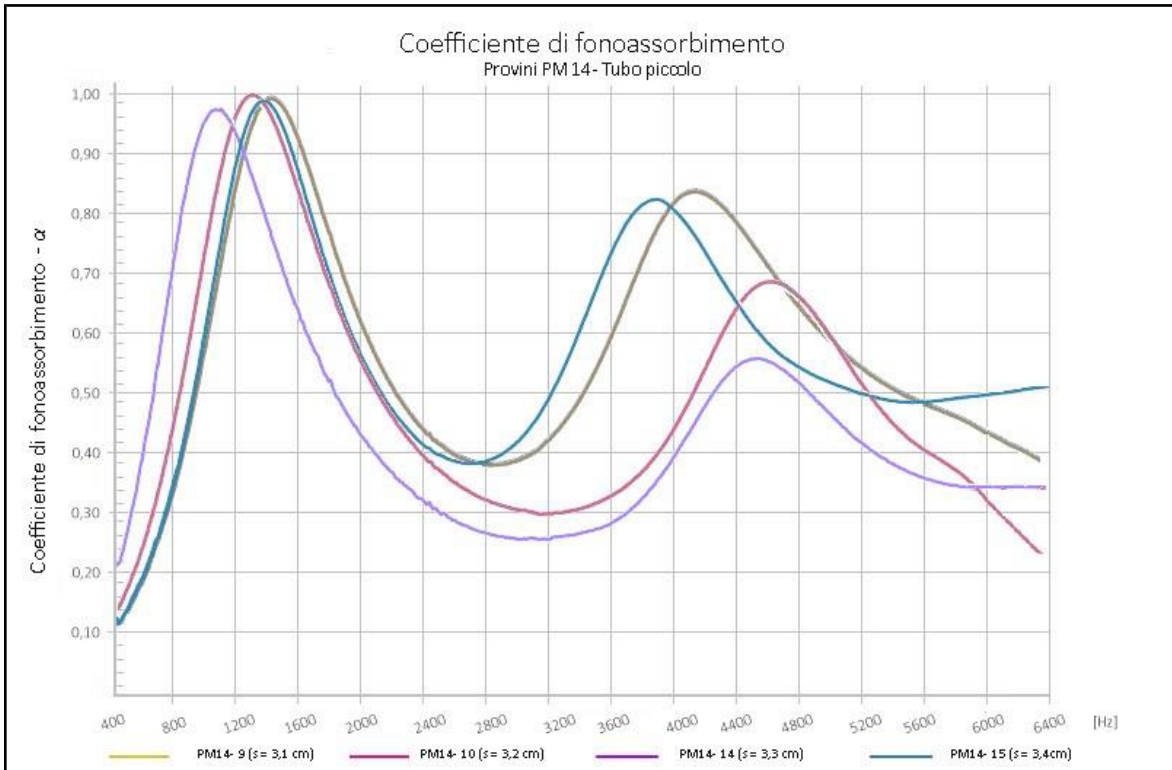


Fig. 5.85 Campione Mix 11 (tubo piccolo): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.



Fig. 5.86 Campione Mix 10 (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

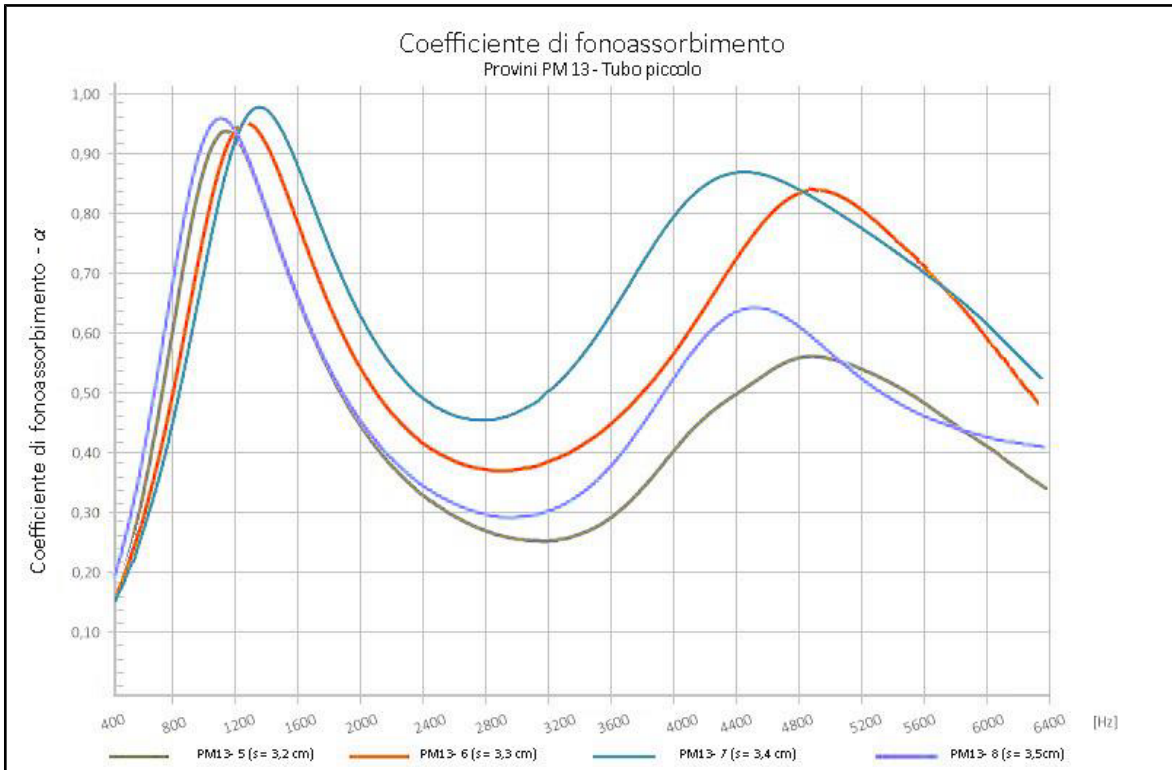


Fig. 5.87 Campione Mix 10 (tubo piccolo): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

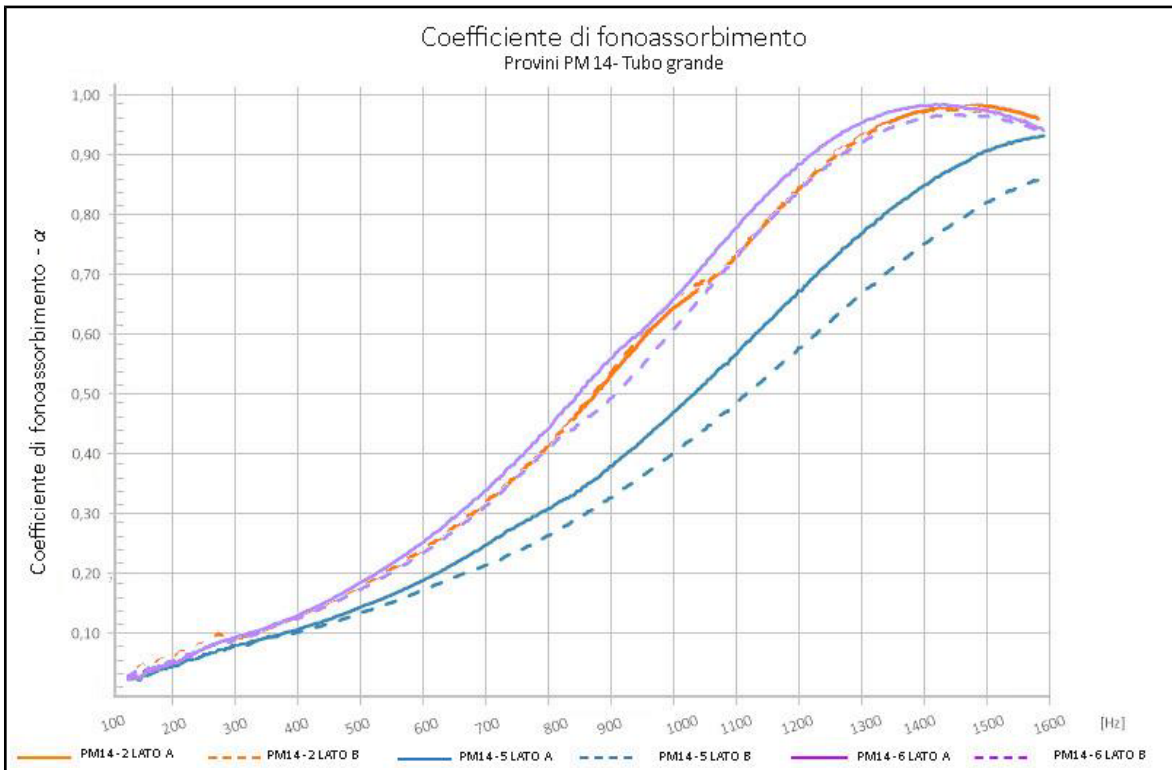


Fig. 5.88 Campione Mix 11, lati A e B (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

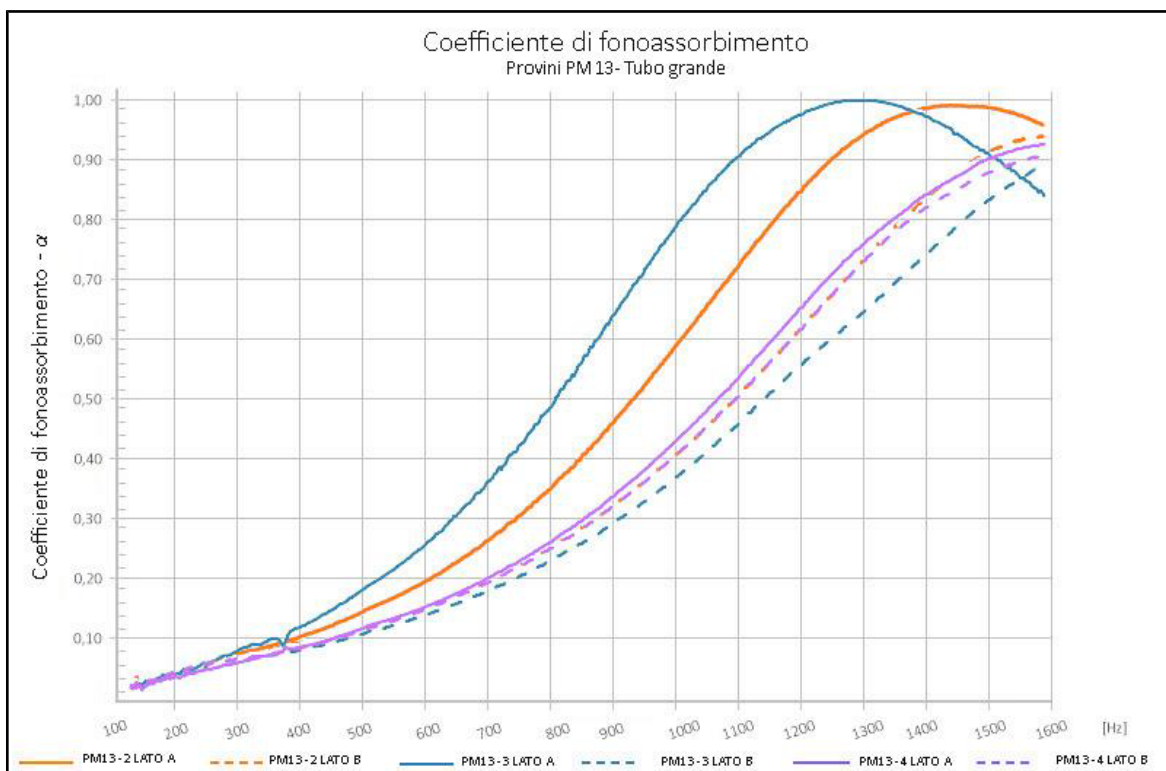


Fig. 5.89 Campione Mix 10, lati A e B (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

Nelle figure di seguito si riportano i confronti, relativamente alla zona di sovrapposizione dei due tubi (400 – 1600 Hz): i risultati sono relativi ai provini tubo grande e piccolo di spessore simile. Per i campioni Mix 11 e 10, i risultati nella zona di sovrapposizione sono confrontabili, pertanto le prove in tubo grande e piccolo sono state combinate attraverso il software a coprire l'intero range di frequenze 100 – 6400 Hz.

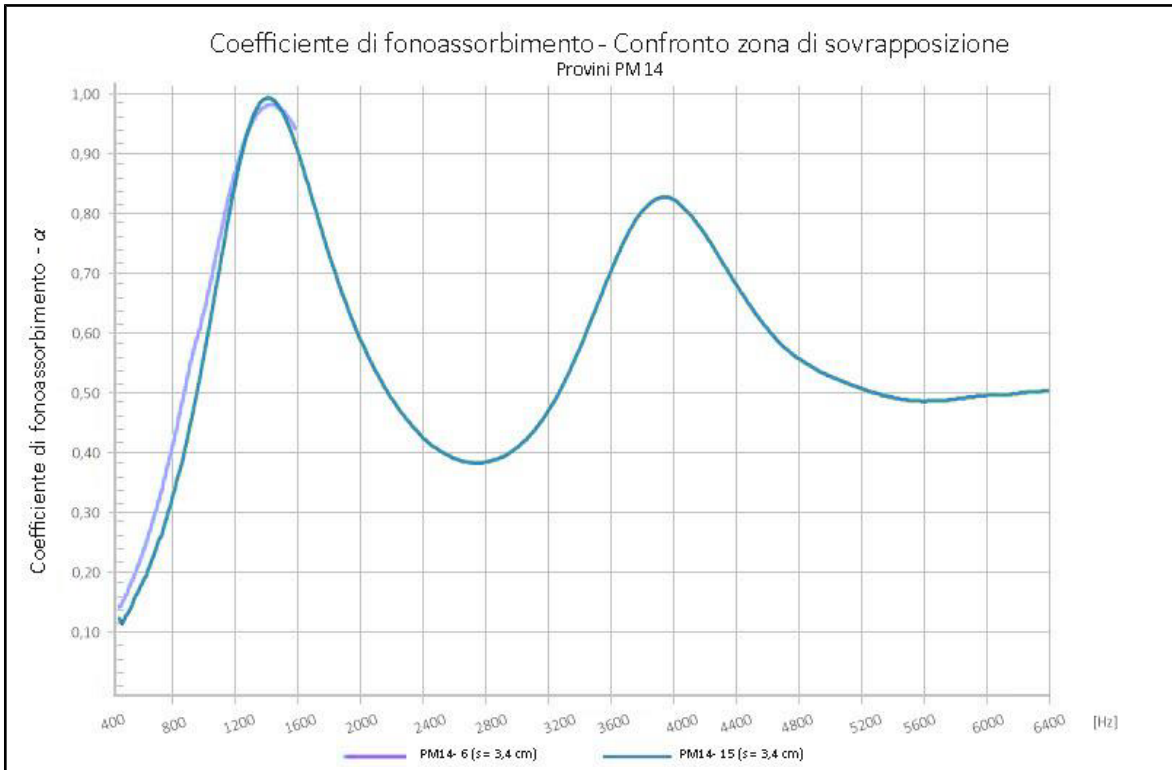


Fig. 5.90 Campione Mix 11, coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza: confronto zona di sovrapposizione (400 – 1600 Hz).

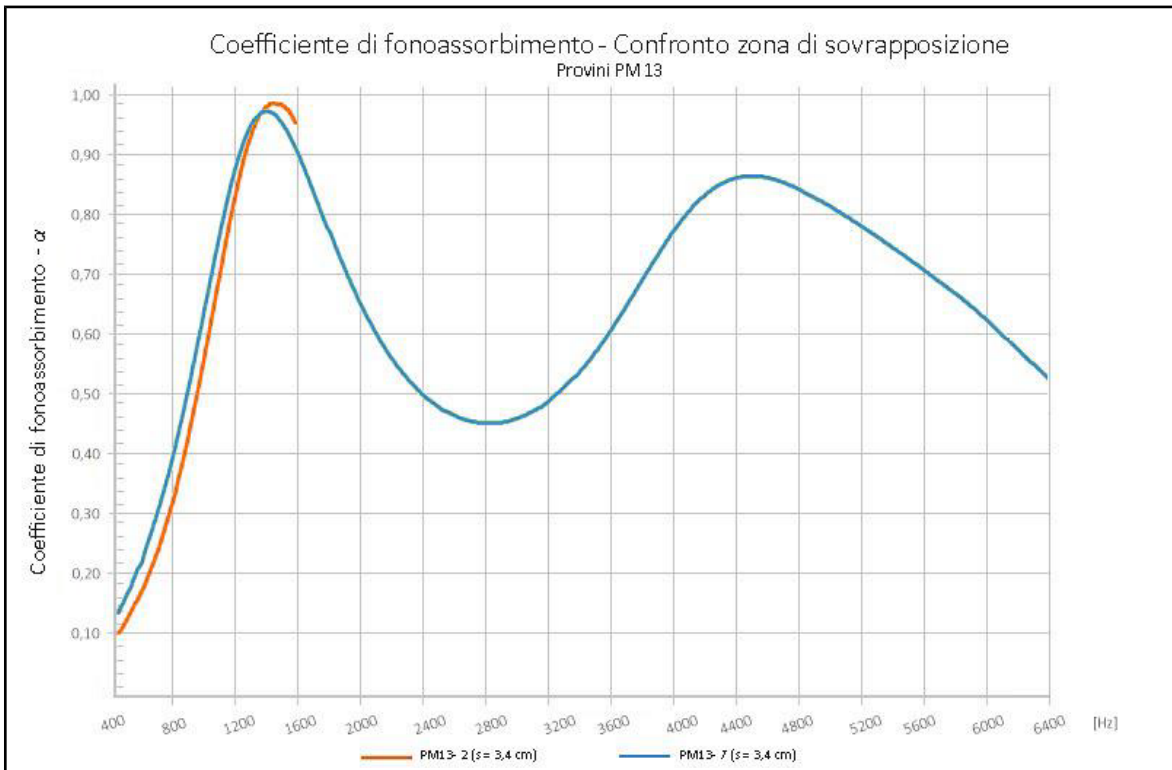


Fig. 5.91 Campione Mix 10, coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza: confronto zona di sovrapposizione (400 – 1600 Hz).

In figura di seguito si riportano gli andamenti in frequenza dei coefficienti di assorbimento per incidenza normale combinati dei campioni Mix 10 e Mix 11 dello spessore 3,4 cm.

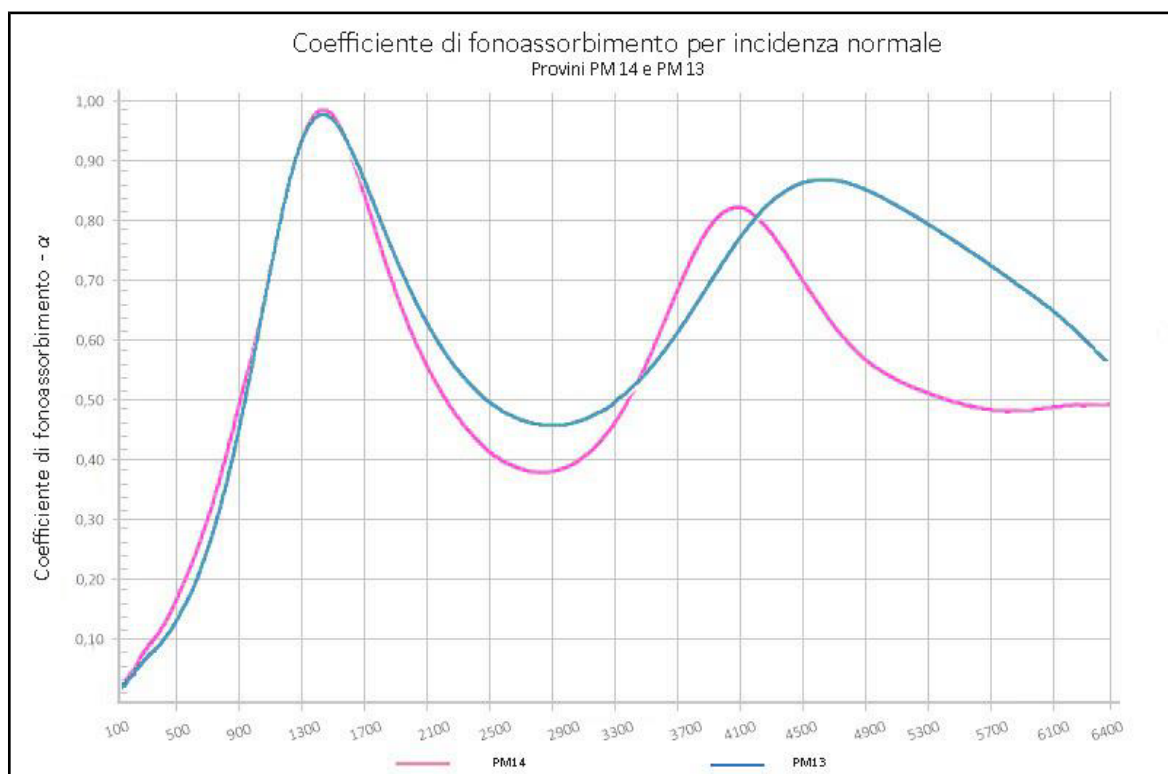


Fig. 5.92 Campioni MIX 10 e 11: andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

Dal grafico si evidenzia che gli andamenti del coefficiente di assorbimento acustico delle due tipologie sono praticamente confrontabili alle basse frequenze, con un picco pari a 0,98 attorno ai 1400 Hz. Ad alte frequenze, invece, entrambe le tipologie presentano un secondo picco: per la tipologia Mix 11 pari a 0,82 alla frequenza di circa 4100 Hz, per PM13 pari a 0,87 alla frequenza di circa 4700 Hz. Sulla base di tutti i grafici si può osservare che le differenze tra i campioni Mix 11 e 10 sono poco significative e sono dello stesso ordine di grandezza delle differenze tra campioni dello stesso materiale (spessori e densità non uniformi), piuttosto che alla natura del materiale stesso. Bisogna tenere conto del fatto che, scegliendo per il confronto campioni diversi (anche con uno stesso spessore) si otterrebbero grafici diversi, soprattutto nel range di frequenze 1600 – 6400 Hz. Per tali ragioni i campioni si possono considerare in prima approssimazione equivalenti dal punto di vista dell'assorbimento acustico e nella scelta della soluzione migliore dovrebbero essere tenuti in considerazione altri aspetti quali la lavorabilità dell'impasto, il costo di produzione, la durabilità, ecc.

Nel seguito si riporta una tabella riassuntiva (Tab. 5.9) ed il relativo grafico (Fig. 5.93) con i valori del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava delle formulazioni Mix 11 e 10. Gli andamenti ottenuti confermano quanto riportato precedentemente.

Tab. 5.9 *Coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava delle formulazioni Mix 11 e Mix 10.*

Frequenza [Hz]	Tipologia Mix 11	Tipologia Mix 10
100	0,03	0,03
125	0,04	0,03
160	0,05	0,05
200	0,07	0,06
250	0,09	0,07
315	0,11	0,09
400	0,15	0,11
500	0,20	0,16
630	0,29	0,23
800	0,43	0,38
1000	0,64	0,63
1250	0,92	0,91
1600	0,91	0,91
2000	0,61	0,67
2500	0,42	0,50
3150	0,42	0,47
4000	0,81	0,72

5000	0,56	0,84
6300	0,50	0,62

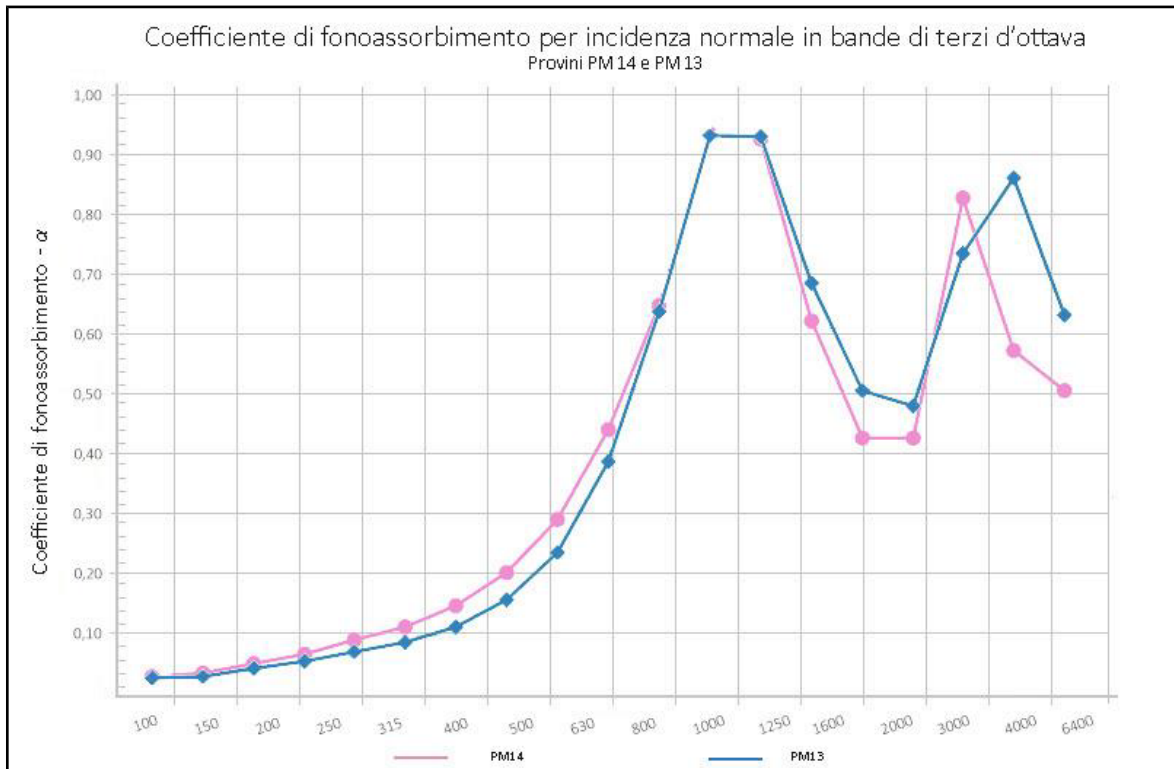


Fig. 5.93 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava: campioni Mix 10 e Mix 11.

Seconda campagna di misura

Le dimensioni relativi i provini della formulazione Mix 12, sono riportati in Tab. 5.10 ed evidenziati in figura (figura provini Mix 12 Fig. 5.79).

Le differenze osservate tra i provini si riflettono in maniera evidente sulle prestazioni acustiche degli stessi (Fig. 5.94 e 5.95): il provino denominato Mix 12 – 4, che presenta una superficie più liscia e meno porosa e un grado di compattazione più elevato, ha prestazioni acustiche nettamente inferiori agli altri provini della stessa tipologia; per tali ragioni non è stato considerato nell'elaborazione del valore medio del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale. Variazioni tra i valori misurati per i diversi provini sono state osservate anche per le misure effettuate in tubo piccolo, tuttavia la media è stata effettuata considerando i risultati dei 4 provini.

Tutti i provini testati in tubo piccolo presentano nel range di sovrapposizione (frequenze comprese tra 400 e 1600 Hz) valori del coefficiente di assorbimento per incidenza normale significativamente inferiori a quelli misurati in tubo grande, dovuti al maggiore grado di compattazione dei provini più piccoli, che comportano un significativo decremento delle prestazioni acustiche.

Per tali ragioni, i provini preparati manualmente per le misure in tubo piccolo si ritengono poco rappresentativi per il campione esaminato e i risultati ottenuti sono da ritenersi scarsamente significativi. Per le motivazioni sovraespresse, combinare le misure effettuate mediante tubo grande con quelle relative al tubo piccolo perde di significato: la combinazione ha senso se si stanno caratterizzando campioni della stessa natura e rappresentativi del materiale testato.

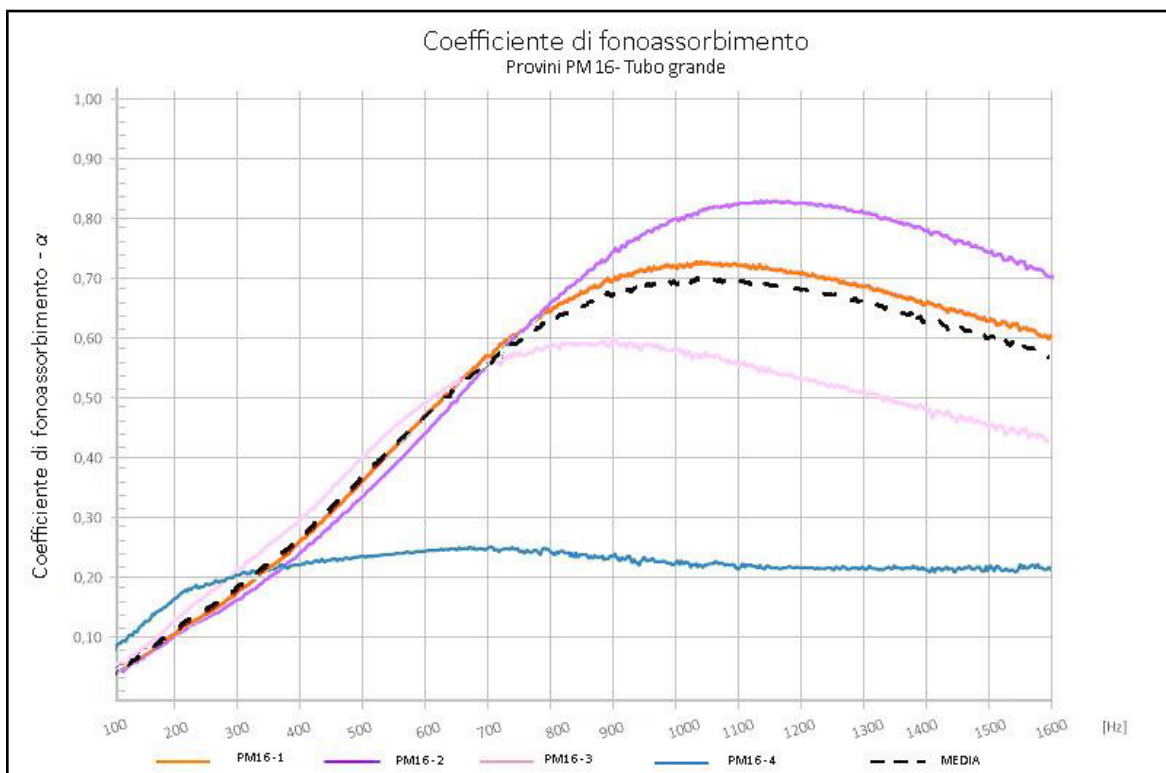


Fig. 5.94 Campione Mix 12 (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

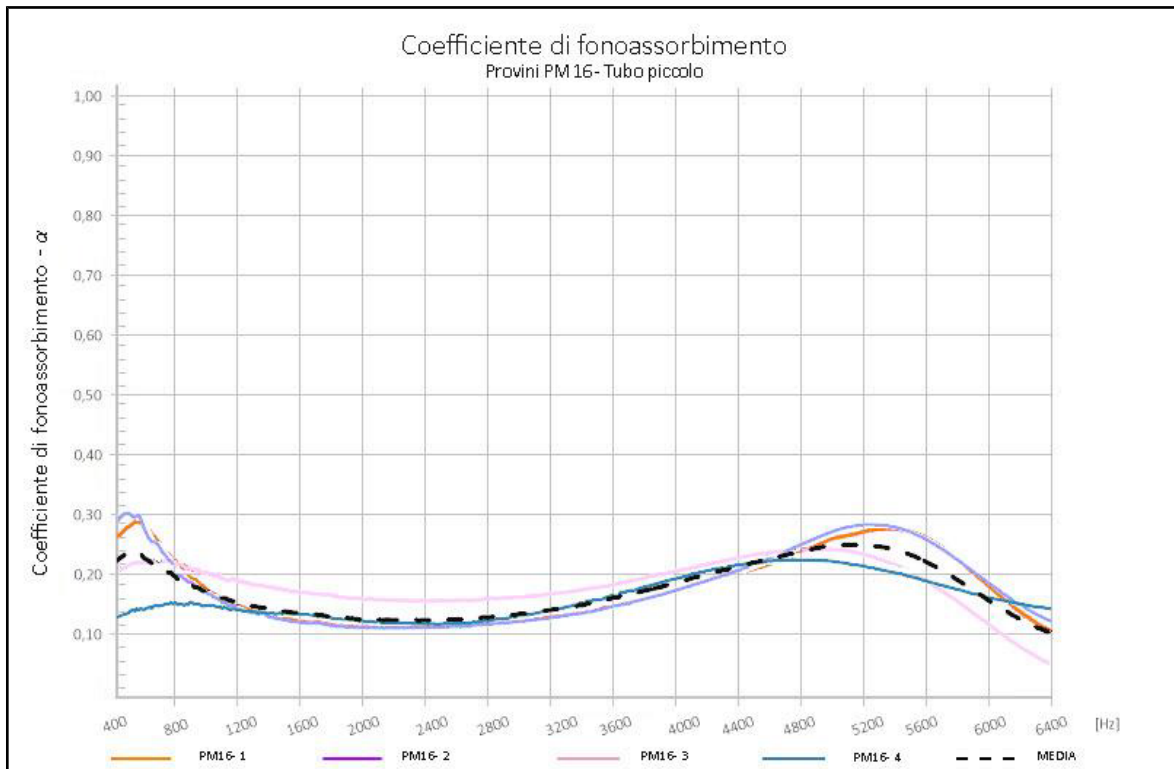


Fig. 5.95 Campione Mix 12 (tubo piccolo): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

Ferme restando le osservazioni precedenti, si è effettuato comunque un tentativo di combinazione, considerando sia i valori medi (Fig. 5.96) sia i valori dei provini ritenuti più simili in termini di prestazioni acustiche (i provini denominati Mix 12 – 4 sia per il tubo grande sia per il piccolo).

I risultati ottenuti considerando i valori medi mostrano una curva con andamento poco realistico, a conferma delle osservazioni suddette, mentre il tentativo di combinazione considerando il provino più compatto sia per tubo piccolo sia grande appare più realistico, anche se ovviamente peggiorativo in termini di prestazioni acustiche.

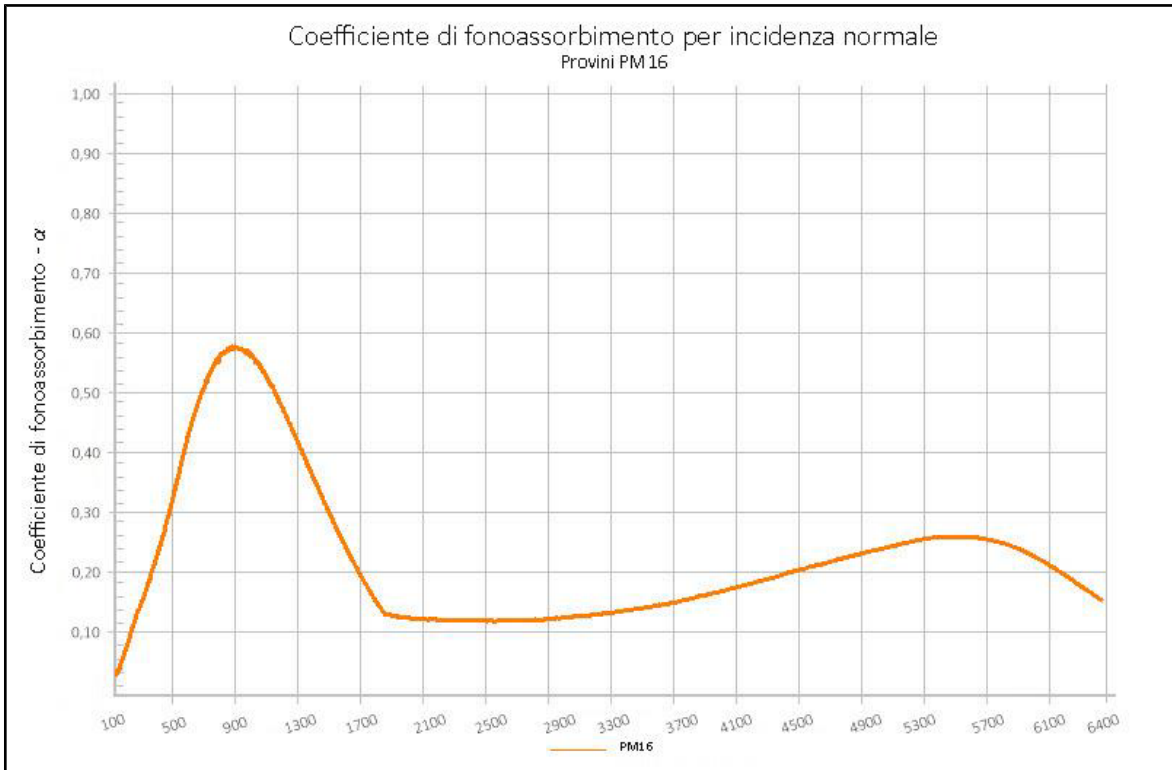


Fig. 5.96 Campione Mix 12 (combinazione valori medi): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

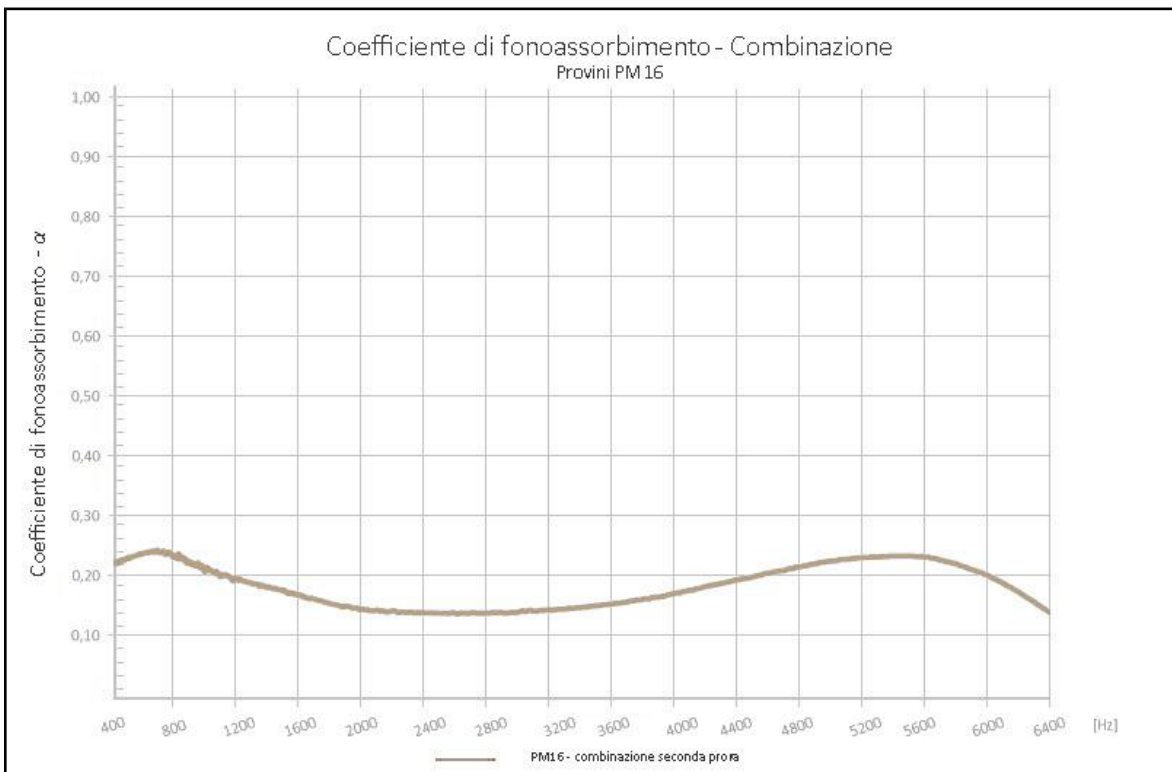


Fig. 5.97 Campione Mix 12 (combinazione su provini più densi): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

Ferme restando le osservazioni precedenti, nel seguito si riporta una tabella riassuntiva (Tab. 5.10) ed il relativo grafico (Fig. 5.98) con i valori del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava per il campione Mix 12, relativi ai valori medi combinati dei campioni testati.

Tab. 5.10 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava: campione Mix 12.

Frequenza [Hz]	α
100	0,05
125	0,06
160	0,09
200	0,12
250	0,16
315	0,21
400	0,29
500	0,40
630	0,50
800	0,53
1000	0,46
1250	0,31
1600	0,14
2000	0,13
2500	0,13
3150	0,15
4000	0,21
5000	0,24
6300	0,09

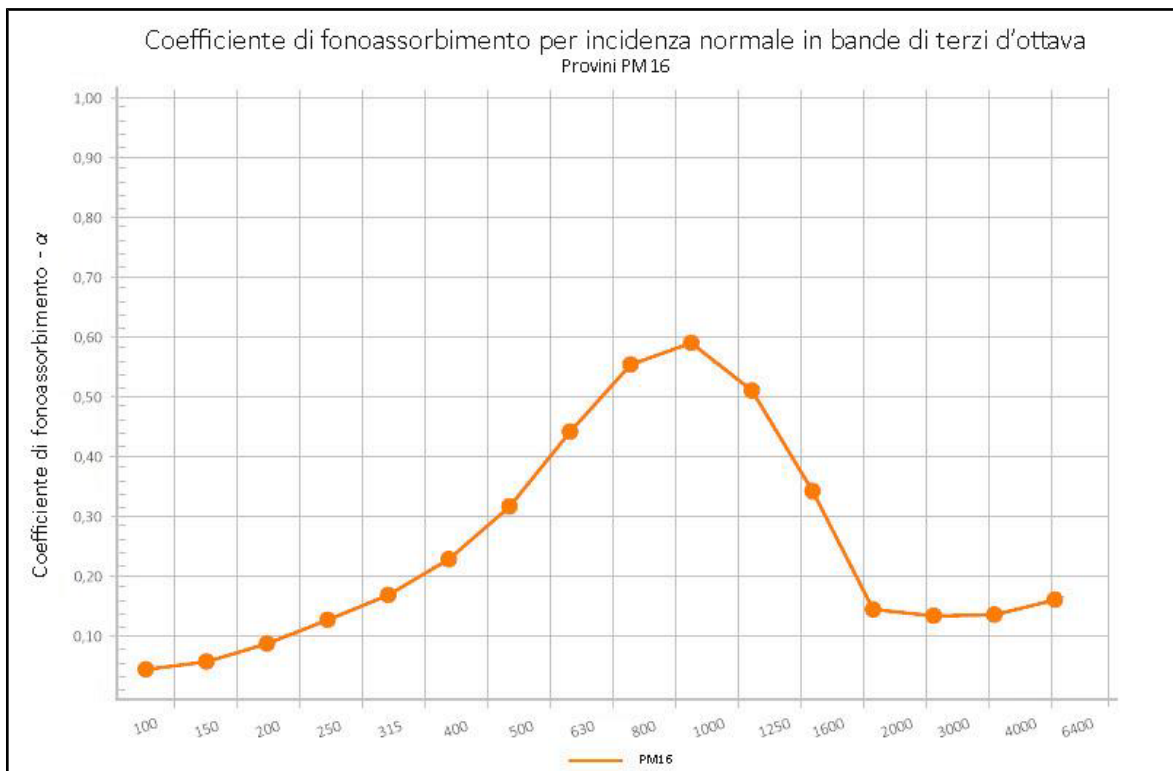


Fig. 5.98 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava: campione Mix 12.

Per quanto concerne il campione Mix 7 si riportano in figura sotto (Fig. 5.99 e 5.100) gli andamenti in frequenza dei coefficienti di assorbimento per incidenza normale relativamente alle misure eseguite in tubo grande (100 – 1600 Hz) e in tubo piccolo (400 – 6400 Hz). I risultati ottenuti per i provini in tubo grande sono pressoché sovrapponibili ed evidenziano come la realizzazione mediante carotaggio renda i provini più omogenei tra loro e idonei per la misura in tubo di impedenza. Anche in tubo piccolo sono stati ottenuti andamenti del coefficiente di assorbimento per incidenza normale confrontabili; la differenza che si evidenzia nella zona di sovrapposizione (Fig. 5.101) delle misure in tubo grande e piccolo (400 – 1600 Hz) è da imputarsi al diverso spessore dei campioni da 100 mm e 29 mm (differenza di spessore di oltre 2 mm).

Ferme restando le differenze riscontrate, le prove in tubo grande e piccolo sono state combinate attraverso il software a coprire l'intero range di frequenza 100 – 1600 Hz (Fig. 5.102).

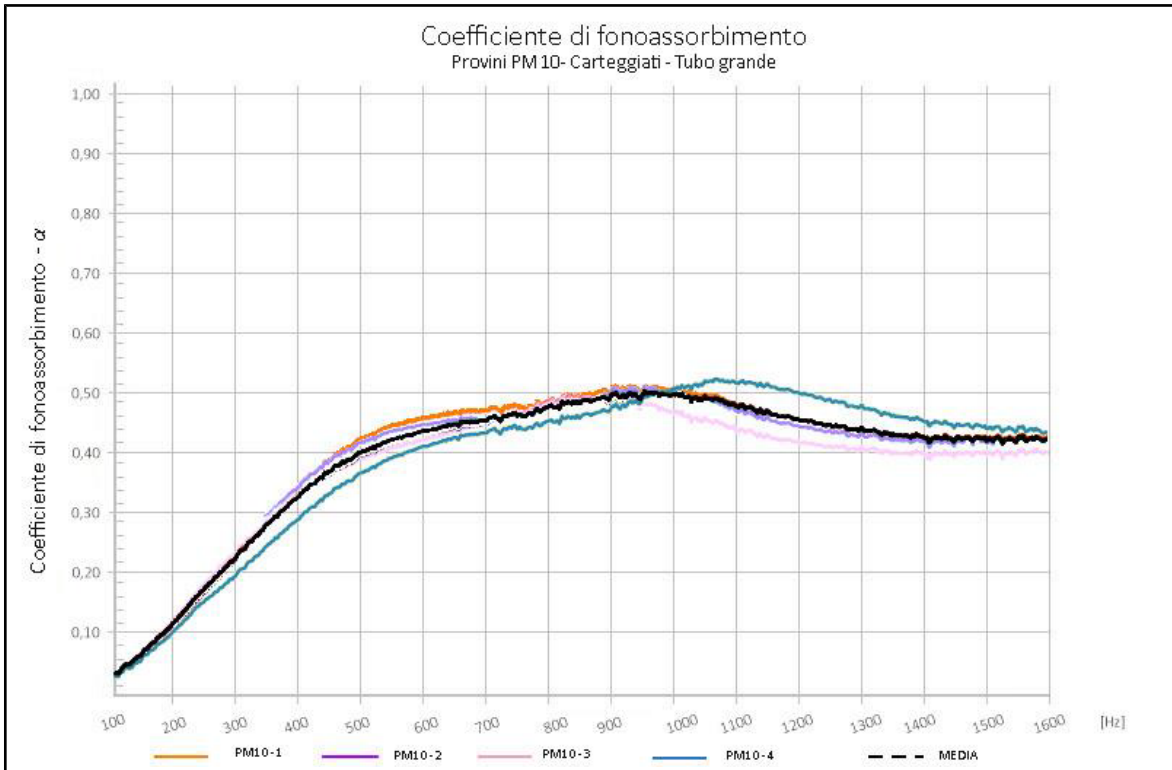


Fig. 5.99 Campione Mix 7 (tubo grande): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

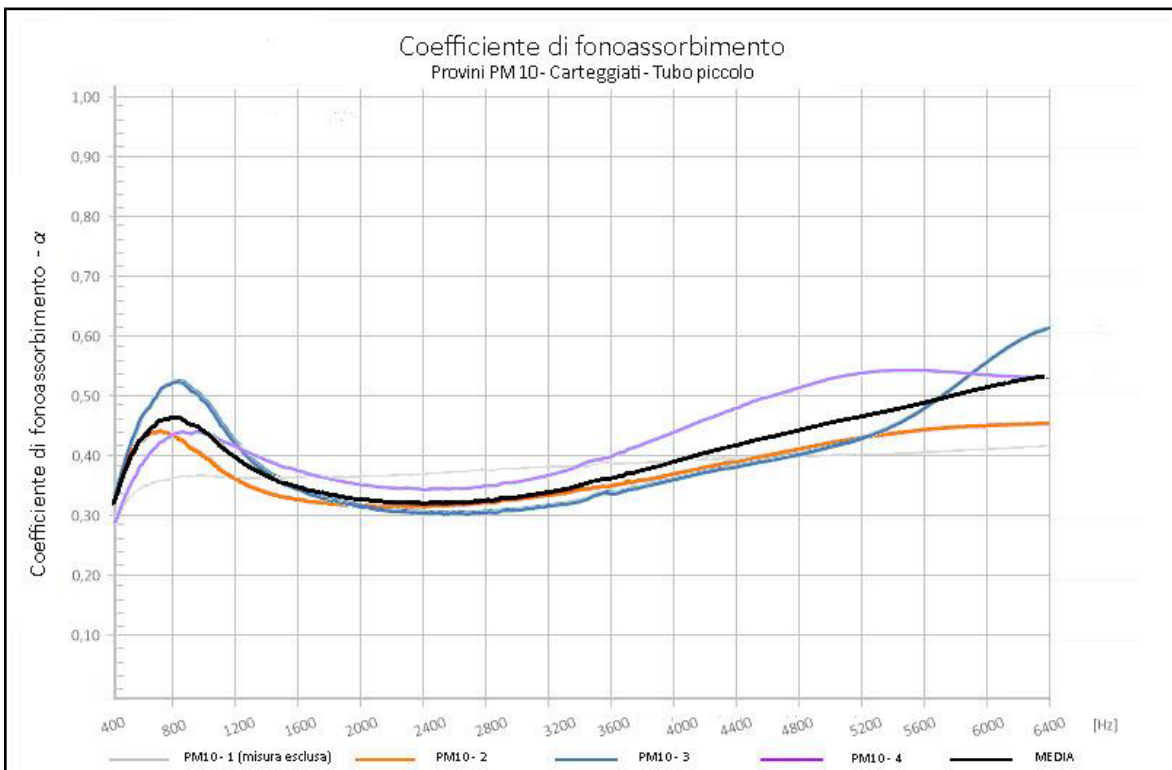


Fig. 5.100 Campione Mix 7 (tubo piccolo): andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

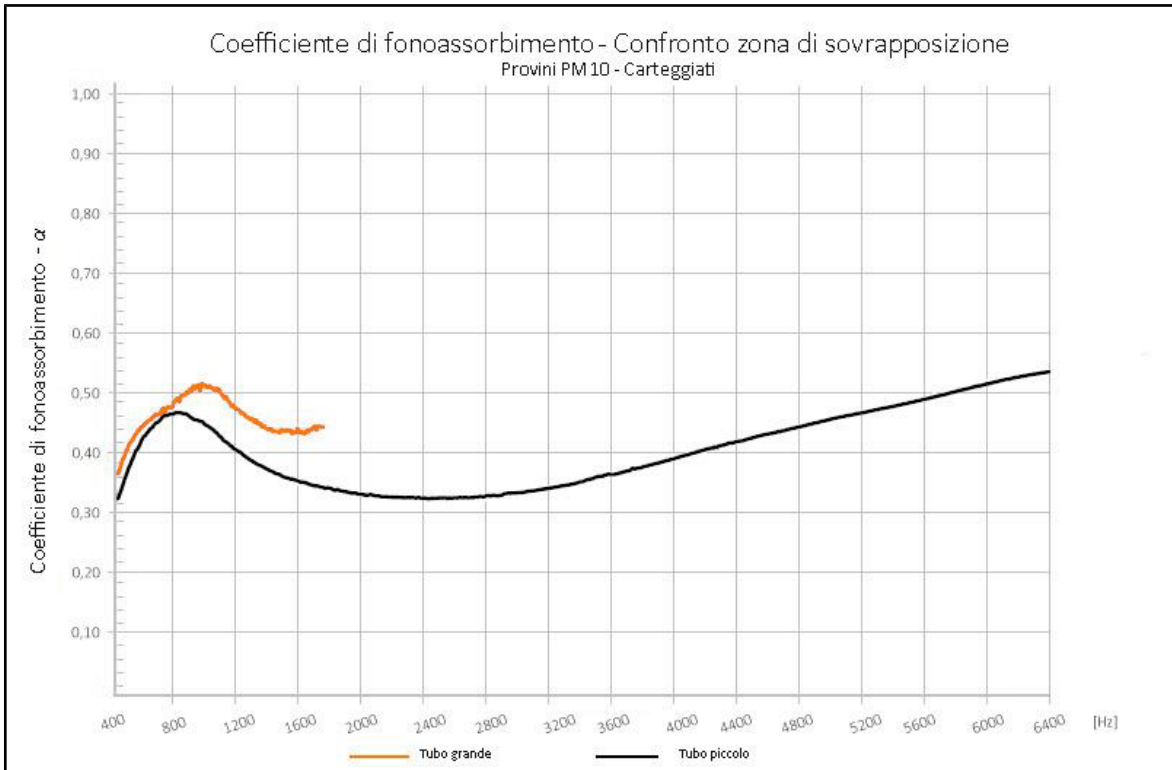


Fig. 5.101 Campione Mix 7, coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza: confronto zona di sovrapposizione (400 – 1600 Hz).

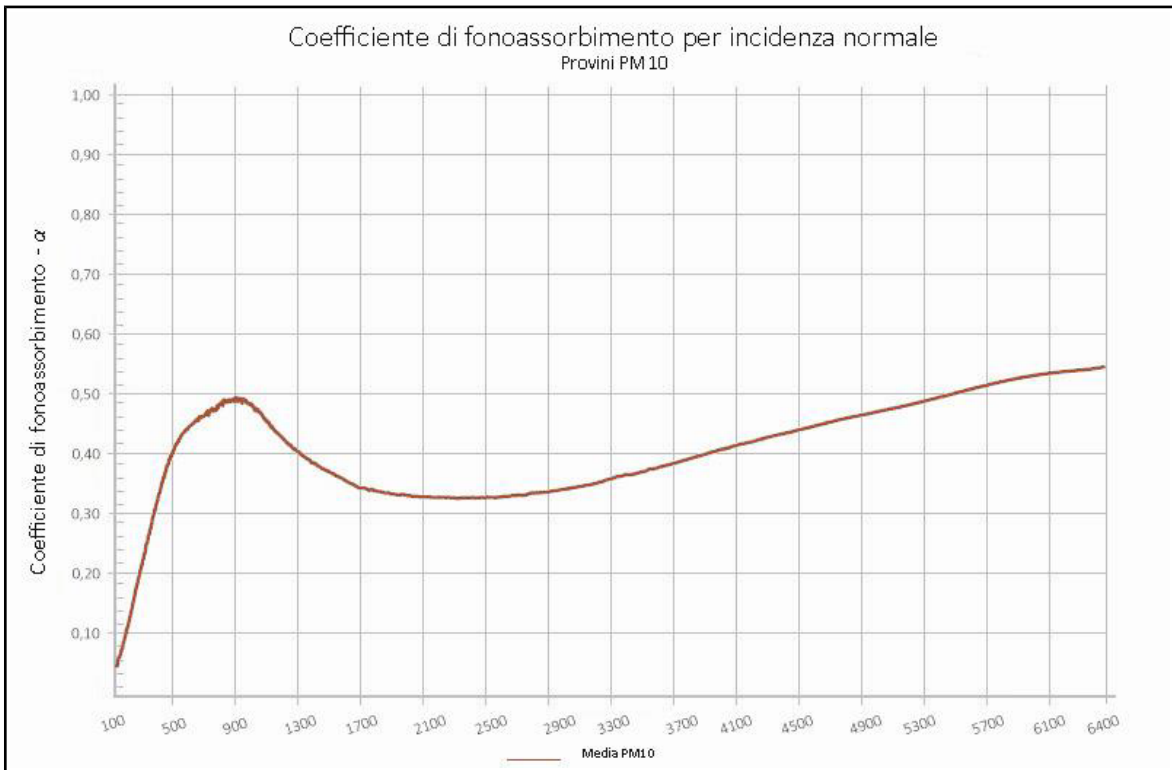


Fig. 5.102 Campione Mix 7: andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in frequenza.

Nel seguito si riporta una tabella riassuntiva (Tab. 5.11) ed il relativo grafico (Fig. 5.103) con i valori del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava per il campione Mix 7 con superficie carteggiata, relativi ai valori medi combinati dei campioni testati.

Tab. 5.11 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava: campione Mix 7.

Frequenza [Hz]	α
100	0,04
125	0,06
160	0,10
200	0,14
250	0,20
315	0,28
400	0,36
500	0,42
630	0,46
800	0,48
1000	0,46
1250	0,39
1600	0,34
2000	0,32
2500	0,32
3150	0,35
4000	0,41
5000	0,47
6300	0,54

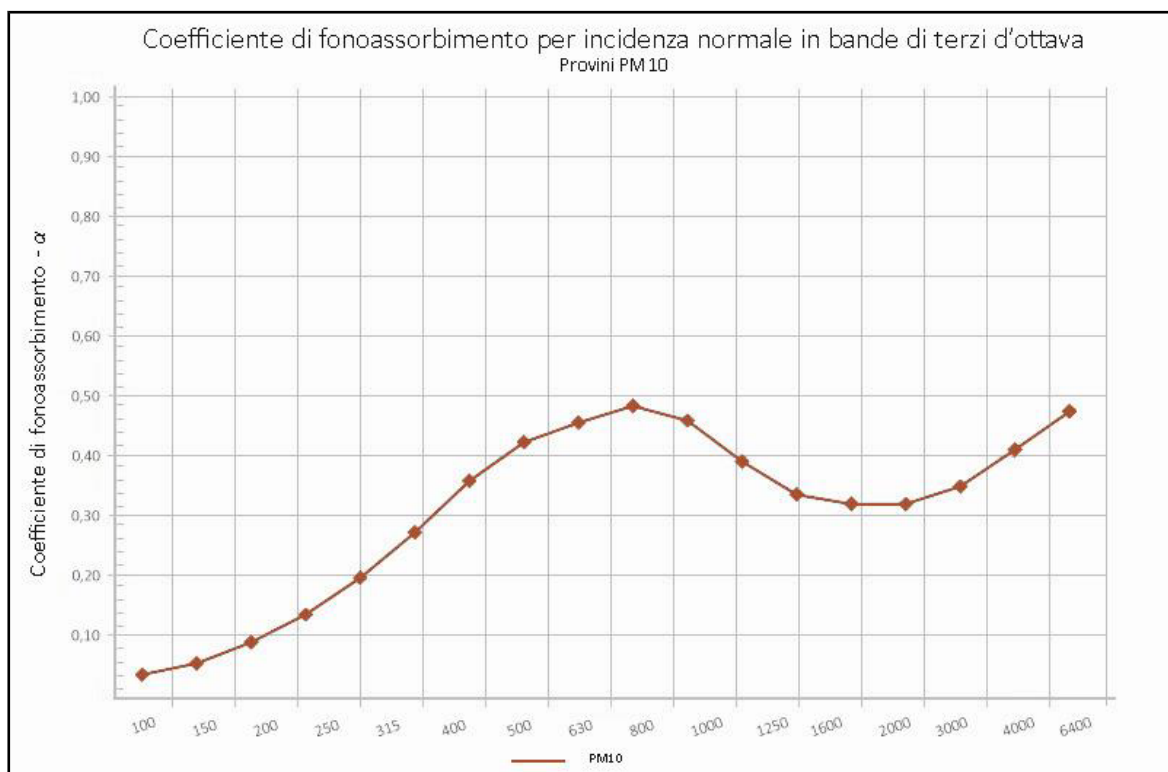


Fig. 5.103 Andamento del coefficiente di assorbimento per incidenza normale in bande di terzi d'ottava: campione Mix 7.

5.8.2 Discussione dei valori sperimentali

Prima campagna di misure: Mix 10 – Mix 11

Le due miscele Mix 10 e Mix 11 sono state scelte per essere analizzate in antitesi l'una rispetto all'altra proprio per le loro differenze a livello di mix design e di proprietà funzionali come la massa volumica indurita e la porosità della struttura. Rispetto alla composizione, i due mix hanno la stessa matrice legante, ma differiscono notevolmente sul proporzionamento e sulla scelta degli aggregati impiegati. Nel Mix 10 sono presenti sughero e un mix di pomice di tipo 1 e 2, mentre come filler si è impiegata la zeolite. Al contrario, nel Mix 11, affianco al sughero troviamo la perlite espansa sia come filler che come aggregato leggero. Infine, la parte di additivi è stata la stessa per entrambi, proprio per avere un termine di confronto univoco.

Dalle caratterizzazioni delle miscele allo stato indurito, i due mix differiscono in prima battuta per la massa volumica e di conseguenza negli altri parametri analizzati.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva.

	Massa volumica (kg/m ³)	Λ (W/mK)	Porosità tot accessibile (%)	Volume tot dei pori mm ³ /g	Diametro medio dei pori (micron)
MIX 10	390,27	0,06906	58,96	762,64	0,1348
MIX 11	295,44	0,06533	68,57	1348,97	0,1627

Per questa prima campagna di prove è stato possibile ottenere le misurazioni per l'intero range di frequenze 100 – 6400 Hz. Dal grafico che mette a confronto le miscele selezionate Mix 10 e Mix 11, si evidenzia che gli andamenti del coefficiente di assorbimento acustico delle due tipologie sono praticamente confrontabili alle basse frequenze, con un picco pari a 0,98 attorno ai 1400 Hz. Ad alte frequenze, invece, entrambe le tipologie presentano un secondo picco: per la tipologia Mix 11 pari a 0,82 alla frequenza di circa 4100 Hz, per Mix 10 pari a 0,87 alla frequenza di circa 4700 Hz. Per tali ragioni i campioni si possono considerare equivalenti dal punto di vista dell'assorbimento acustico, nonostante la notevole differenza della microstruttura porosa, riscontrabile nei valori di volume totale dei pori e di porosità totale accessibile.

Seconda campagna di misure: MIX 12 – MIX 7 carteggiata

Anche per la seconda campagna di indagini acustiche sono state selezionate due miscele ancora più differenti tra loro: Mix 7 e Mix 12. Rispetto alla composizione, i due mix differiscono anche per matrice legante, oltre che sul proporzionamento e sulla scelta degli aggregati impiegati. Nel Mix 7 sono presenti sughero, pomice di tipo 2 e silice espansa con vetro di riciclo, mentre come filler si sono impiegati caolino e perlite. Al contrario, nel Mix 12 non è presente né il sughero né la perlite, ma come filler è stata impiegata la polvere di marmo. Come aggregato leggero è stato introdotto l'innovativo gel di silice unitamente al mix di pomice 1 e 2. Infine, anche la parte di additivi è differente nel dosaggio dell'aerante che risulta doppio nel Mix 7 rispetto al Mix 12. Dalle caratterizzazioni delle miscele allo

stato indurito, anche questi due mix differiscono molto in prima battuta per la massa volumica e di conseguenza negli altri parametri analizzati.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva.

	Massa volumica (kg/m ³)	Λ (W/mK)	Porosità tot accessibile (%)	Volume tot dei pori mm ³ /g	Diametro medio dei pori (micron)
MIX 7	348,24	0,06165	58,47	815,27	0,2444
MIX 12	608,88	0,078	65,45	1024,66	0,1506

Questa seconda campagna di misurazioni ha presentato maggiori difficoltà, in particolare per il Mix 12, poiché sono stati ottenuti campioni molto differenti tra loro a causa della difficoltà del getto all'interno dei contenitori più piccoli rispetto a quelli più grandi. I dati sono stati comunque combinati insieme per l'ottenimento della curva su tutto il range di frequenze.

Minori difficoltà sono state riscontrate per il Mix 7, per il quale le prove in tubo grande e piccolo sono state combinate attraverso il software a coprire l'intero *range* di frequenza.

Il grafico che mette a confronto le miscele selezionate Mix 7 e Mix 12, evidenzia che gli andamenti del coefficiente di assorbimento acustico delle due tipologie hanno un comportamento simile alle basse frequenze, con un picco pari a 0,48 per il Mix 7 e di 0,53 per il Mix 12 attorno agli 800 Hz. Ad alte frequenze, invece, soltanto il Mix 7 presenta un secondo picco di 0,54 alla frequenza di circa 6300 Hz, mentre il Mix 12 subisce un peggioramento su tutte le alte frequenze rimanendo costante.

Complessivamente i migliori risultati dal punto di vista dell'assorbimento acustico sono da attribuire alle miscele 10 e 11, con valore di assorbimento 0,98 ai 1400 Hz. Allo stesso tempo, i due mix riescono a mantenere una buona performance anche alle alte frequenze, evidenziando l'estrema versatilità per un impiego sia alle basse che alle alte frequenze.

6. SPERIMENTAZIONE SU RASANTI AVANZATI

6.1 INTRODUZIONE

Il rasante, rappresenta un ulteriore strato, applicato sullo strato di intonaco indurito, in grado di livellare le irregolarità del supporto. Generalmente è composto da calce idrata, sabbie e additivi specifici.

Le funzioni del rasante sono quelle di proteggere, livellare e abbellire la superficie.

Per definizione, la rasatura è uno strato di preparazione per la successiva decorazione che fa da ponte intermedio con il sottofondo; per adempiere a tale compito, il rasante dovrà presentare un modulo elastico inferiore a quello del supporto (ma superiore a quello dell'eventuale finitura).

Infine, se il supporto ha caratteristiche specifiche, viene richiesto al rasante una determinata traspirabilità, la quale potrà essere minore dello strato di finitura ma dovrà essere maggiore del supporto per non influenzare le proprietà del supporto stesso.

La ricerca è stata svolta verso la formulazione di un rasante con caratteristiche termiche e fonoassorbenti, con caratteristiche traspiranti, da accoppiare all'intonaco in maniera tale da ottenere un pacchetto di finitura completo.

E' evidente che la scelta e la posa in opera di un rasante con opportune caratteristiche fisico-tecniche, è fondamentale per il funzionamento globale dell'involucro edilizio, rappresentando un tassello costruttivo non di poco conto.

Un rasante può essere considerato "avanzato" se prende in considerazione tutti quegli elementi di energy efficiency e di sustainability già introdotti per gli intonaci.

6.2 MIX DESIGN

MIX BS1

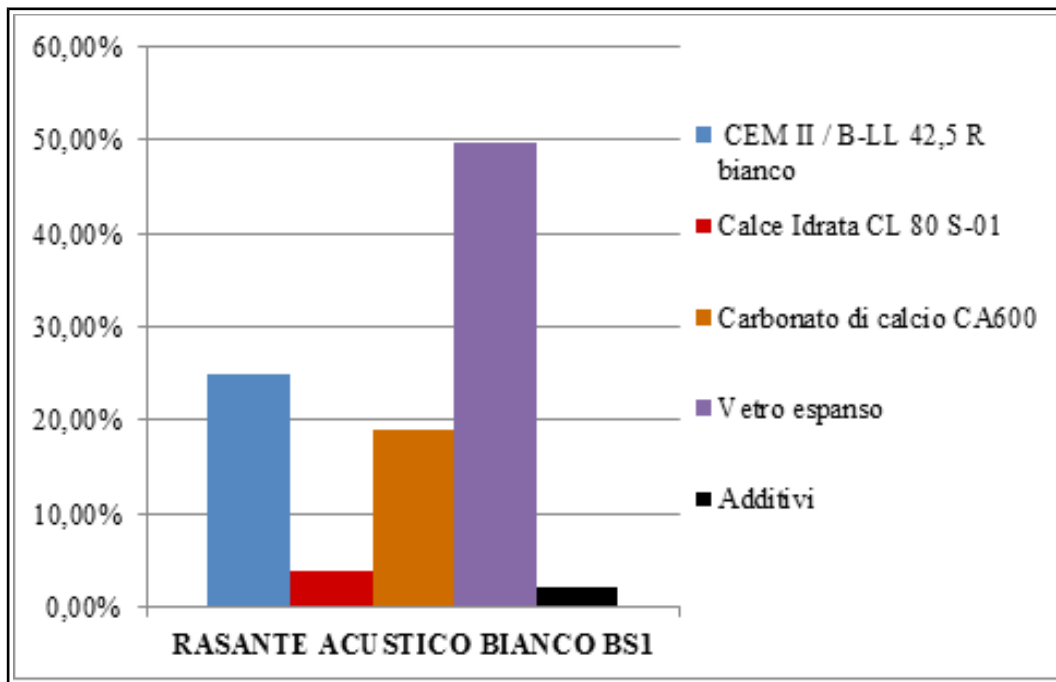


Fig. 6.1 Impasto fresco.

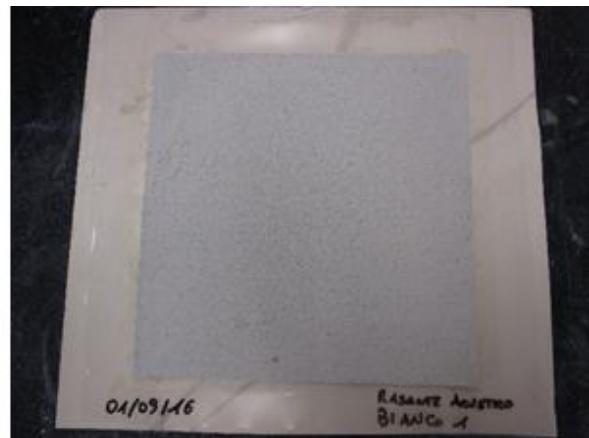


Fig. 6.2 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: cemento bianco 42.5 + calce idrata

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS2

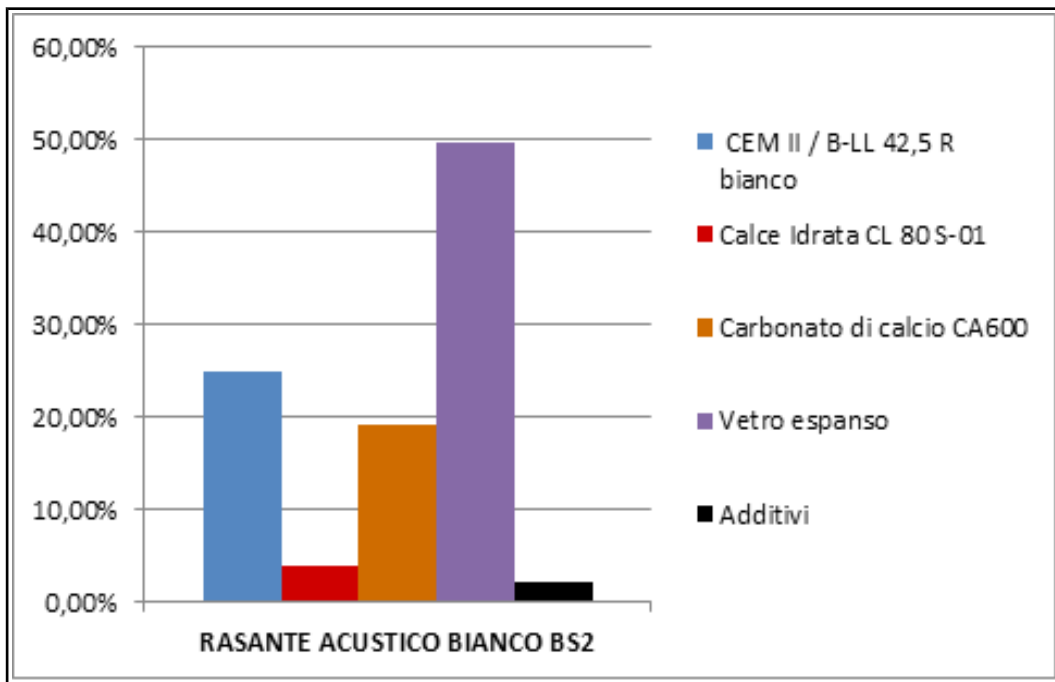


Fig. 6.3 Impasto fresco.



Fig. 6.4 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: cemento bianco 42.5 + calce idrata

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS3

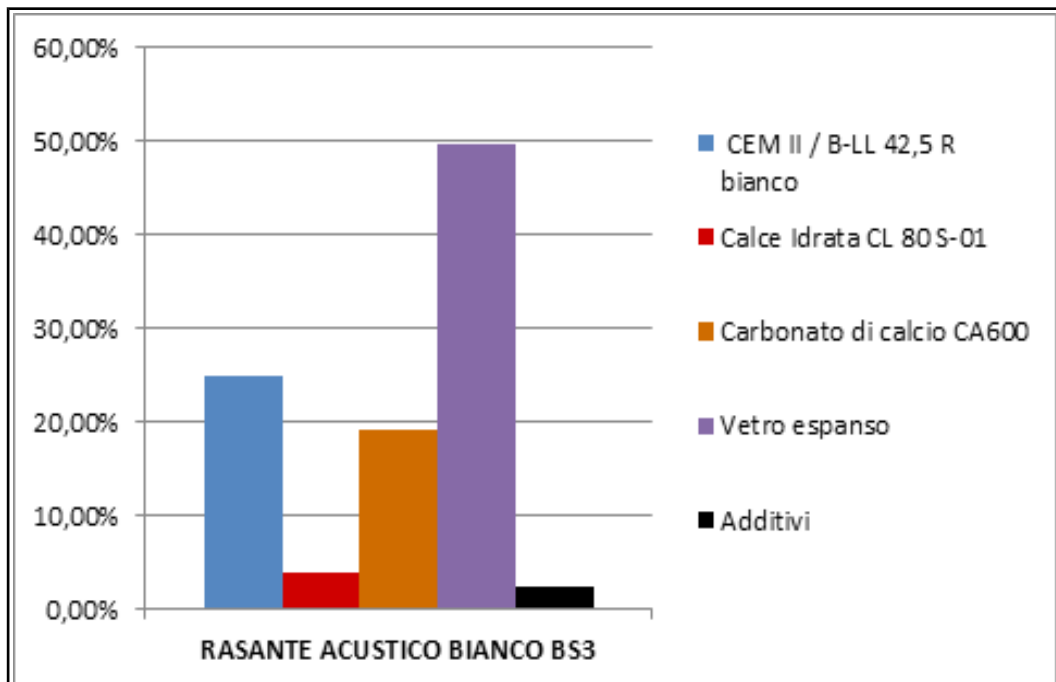


Fig. 6.5 Impasto fresco.

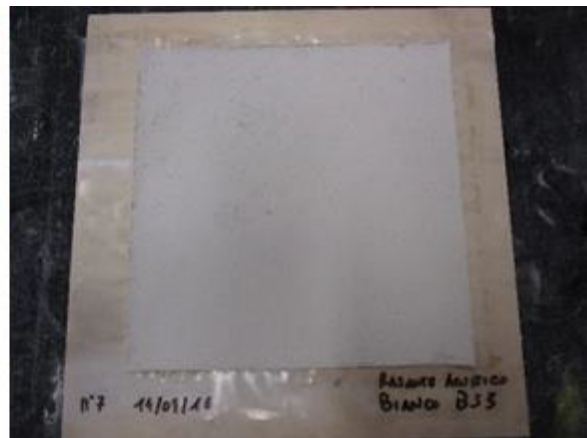


Fig. 6.6 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: cemento bianco 42.5 + calce idrata

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS4

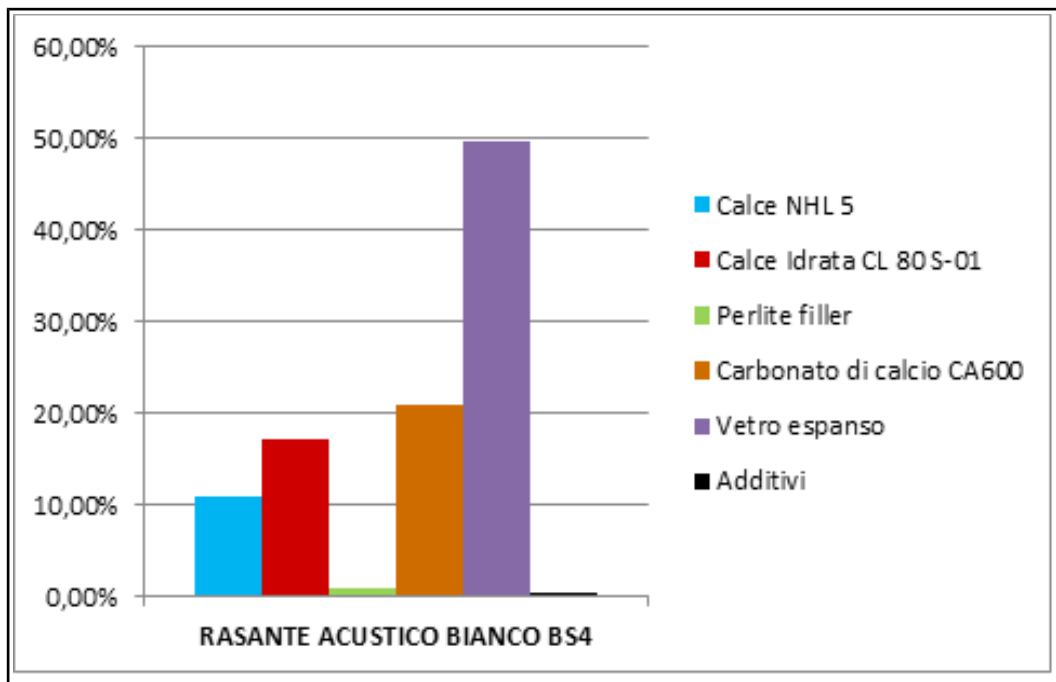


Fig. 6.7 Impasto fresco.



Fig. 6.8 Applicazione su provino 30x30

COMPOSIZIONE

MATRICE: calce idrata + calce idraulica NHL 5

FILLER: perlite

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS5

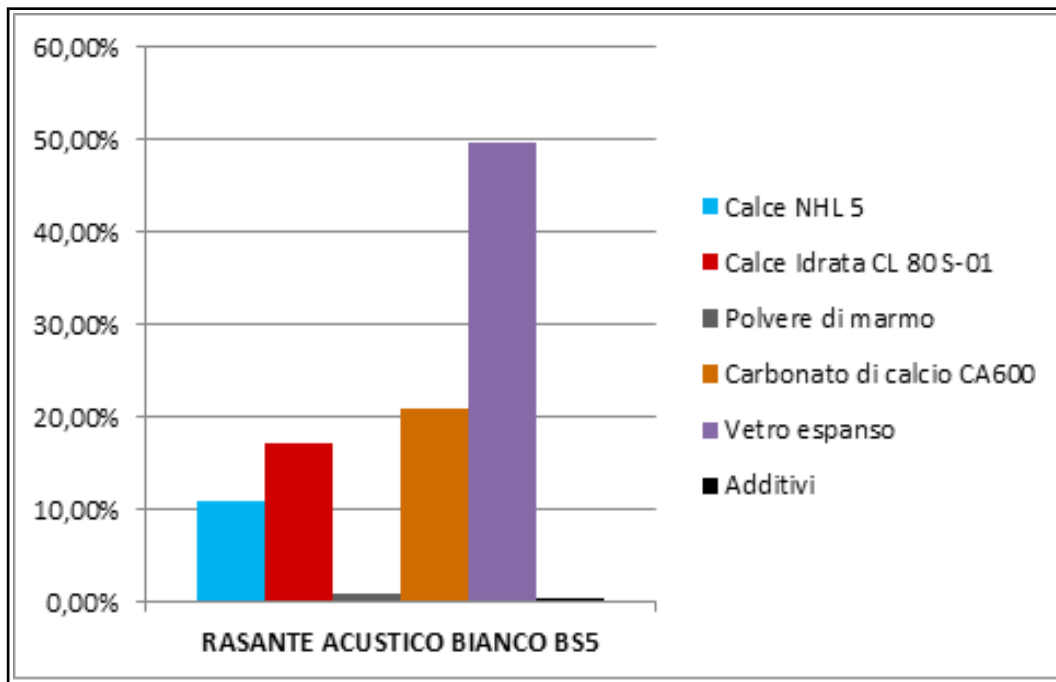


Fig. 6.9 Impasto fresco.



Fig. 6.10 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: calce idrata + calce idraulica NHL 5

FILLER: polvere di marmo

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS6

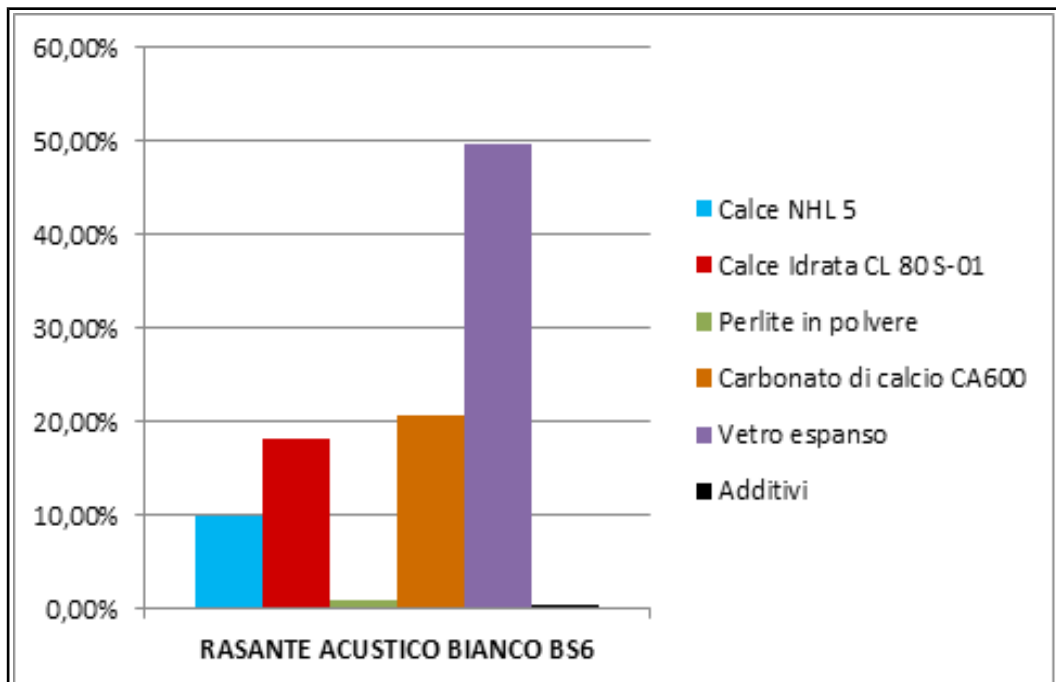


Fig. 6.11 Impasto fresco.

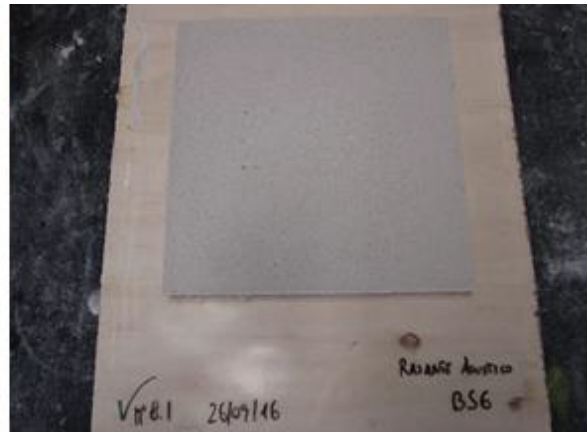


Fig. 6.12 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: calce idrata + calce idraulica NHL 5

FILLER: perlite

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

MIX BS7

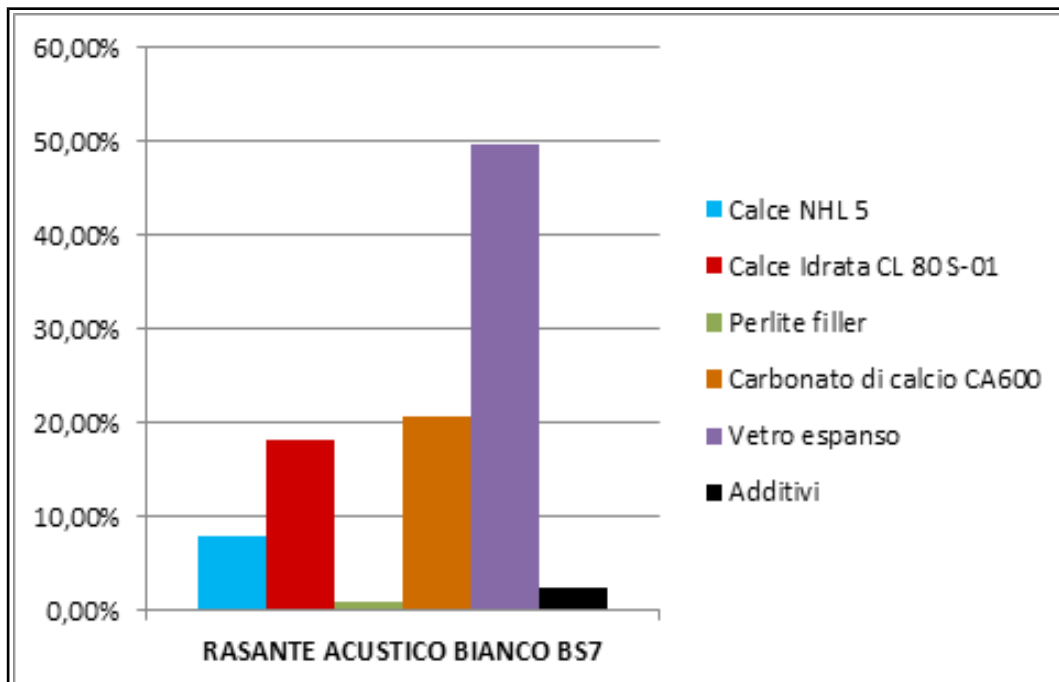


Fig. 6.13 Impasto fresco.

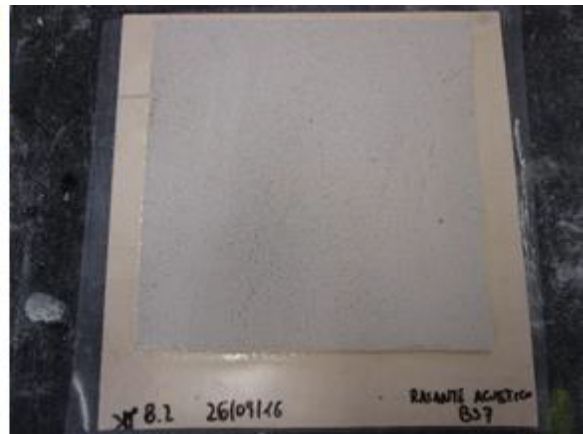


Fig. 6.14 Applicazione su provino 30x30.

COMPOSIZIONE

MATRICE: calce idrata + calce idraulica NHL 5

FILLER: perlite

ADDITIVI REOLOGICI: differenti % di cellulose

AGGREGATI: vetro espanso riciclato + carbonati di calcio

Le miscele prodotte possono essere riunite in due gruppi principali: la prima, che comprende i primi tre mix, ha un alto contenuto di cemento bianco per favorire la rapidità di presa e indurimento e fornire una resistenza adeguata nei primi giorni di stagionatura alle miscele BS1, BS2 e BS3. Il secondo raggruppamento di miscele, che comprende le restanti miscele (BS4, BS5, BS6 e BS7), utilizza invece un mix di calce come legante senza servirsi di alcun cemento (Fig. 6.15).

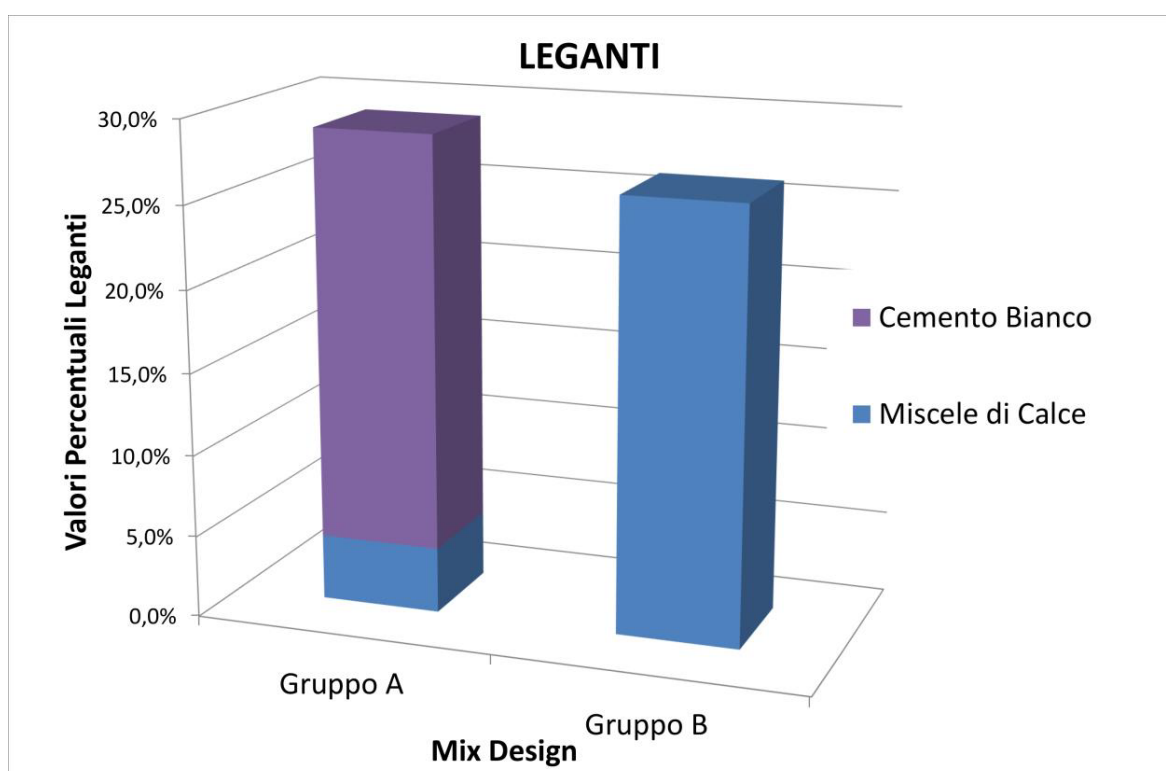


Fig. 6.15 Mix Design rasanti.

L'assenza di cemento nel gruppo B ha tuttavia apportato delle problematiche legate alla fase di scasseratura dei provini poiché la stagionatura è risultata più lenta, un po' per le temperature invernali, un po' per la composizione delle miscele, che appunto non contengono il cemento che avrebbe aiutato il processo. L'utilizzo della calce come legante predominante è però dovuta alla necessità di contenere la finezza caratteristica delle polveri (che in questo modo scende da 0,41 m²/g a circa 0,27 m²/g) per avere un composto viscoso e fluido, ma anche per favorire l'utilizzo di un materiale naturale e ecologico.

Per quanto riguarda gli additivi invece, la variabilità all'interno delle miscele è evidente in (Fig. 4.16). Questa scelta è stata fatta proprio in considerazione del fatto che la combinazione di additivi diversi, in percentuali variabili, potesse essere il fattore dominante per la variabilità delle caratteristiche fisiche e termoacustiche delle miscele, per cui si è deciso di andare ad osservare la variabilità dei risultati di miscele con additivi mescolati in quantità e qualità molto diverse.

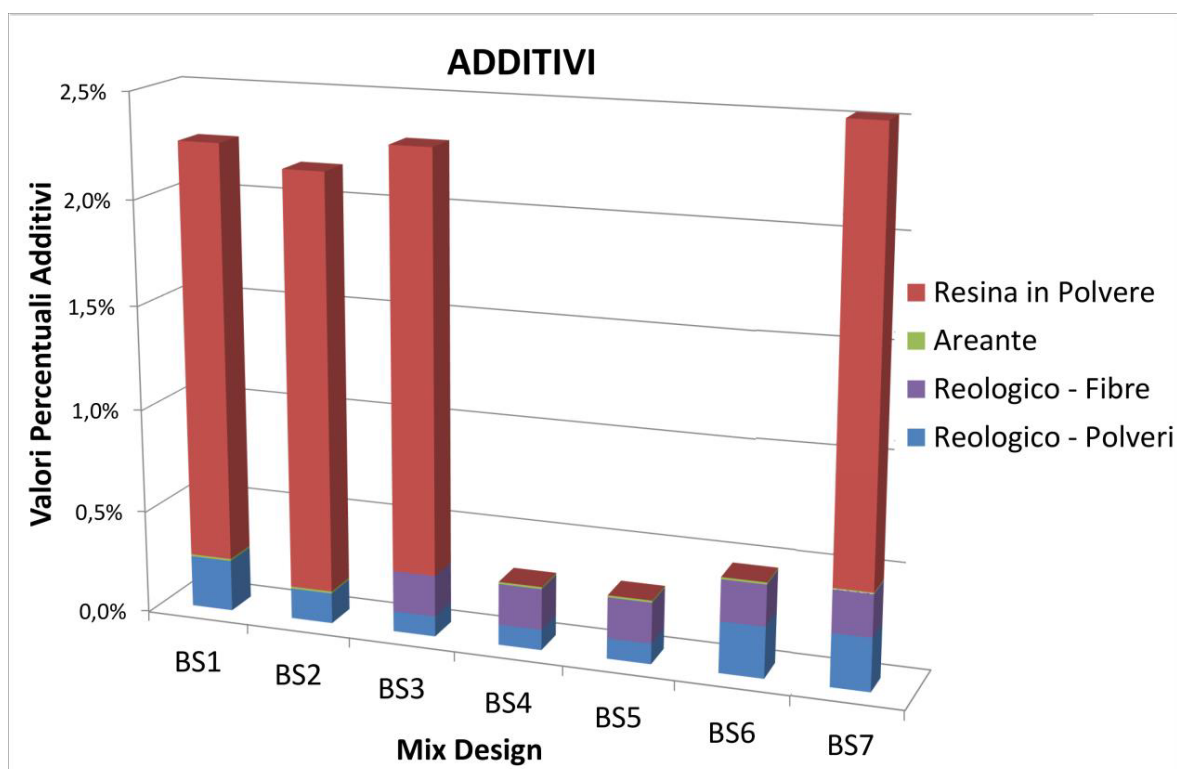


Fig. 6.16 Additivi all'interno delle miscele innovative.

Nelle prime tre miscele è predominante l'utilizzo della resina in polvere. Questa scelta è stata pensata per migliorare la lavorabilità dei mix contenenti cemento bianco.

Nelle restanti miscele la resina in polvere è meno presente, lasciando maggiore spazio alle fibre di cellulosa, che con le loro proprietà garantiscono migliori prestazioni a livello reologico per l'impasto fresco, nonché un miglior comportamento termico dell'impasto stagionato.

Solo il mix BS7 differisce dalle precedenti tre miscele, dove la resina in polvere torna a predominare rispetto agli altri additivi.

6.3 LAVORABILITA' DELLA MALTA FRESCA: PROVA DI SPANDIMENTO



Fig. 6.17 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.18 Tavola scosse: prova eseguita.



Fig. 6.19 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.20 Tavola scosse: prova eseguita.

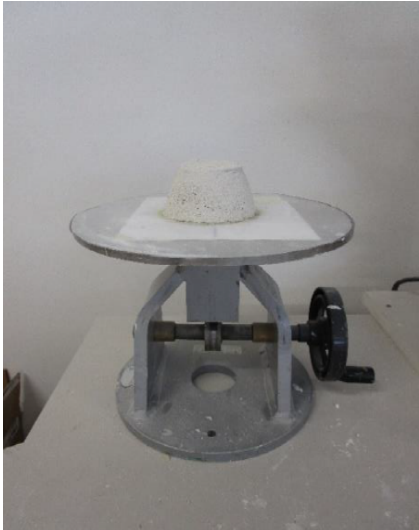


Fig. 6.21 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.22 Tavola scosse: prova eseguita.

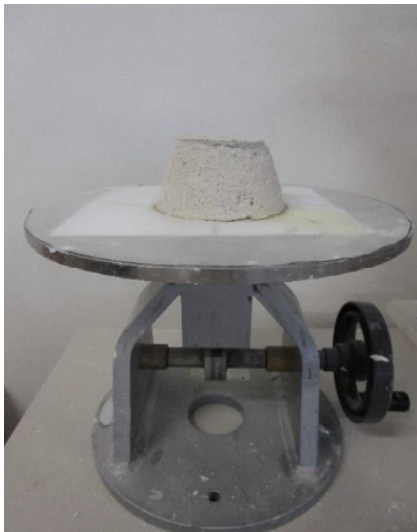


Fig. 6.23 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.24 Tavola scosse: prova eseguita.



Fig. 6.25 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.26 Tavola scosse: prova eseguita.

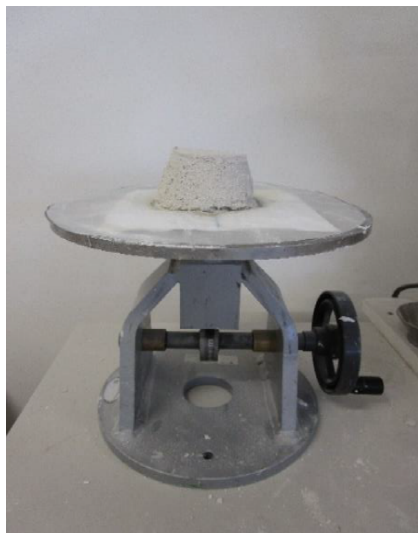


Fig. 6.27 Tavola scosse: posizionamento impasto.



Fig. 6.28 Tavola scosse: prova eseguita.

Di seguito (Tab. 6.1) si riportano i risultati della prova relativi alle varie formulazioni:

Tab. 6.1 Risultati formulazioni tavola scosse.

Formulazione	Risultato [mm]
BS1	130,5
BS2	158,5
BS3	123,5
BS4	128,5
BS5	142,5
BS6	124
BS7	141,5

6.4 HEAT FLOW METER

Una volta stagionati come per gli intonaci, i provini, di dimensioni 300x300 mm, prima di essere sottoposti alla prova Heat flow meter, sono stati condizionati in stufa ad una temperatura costante di 23°C fino al raggiungimento della massa costante. Di seguito sono riportati i dati relativi al monitoraggio del condizionamento.

MIX BS1

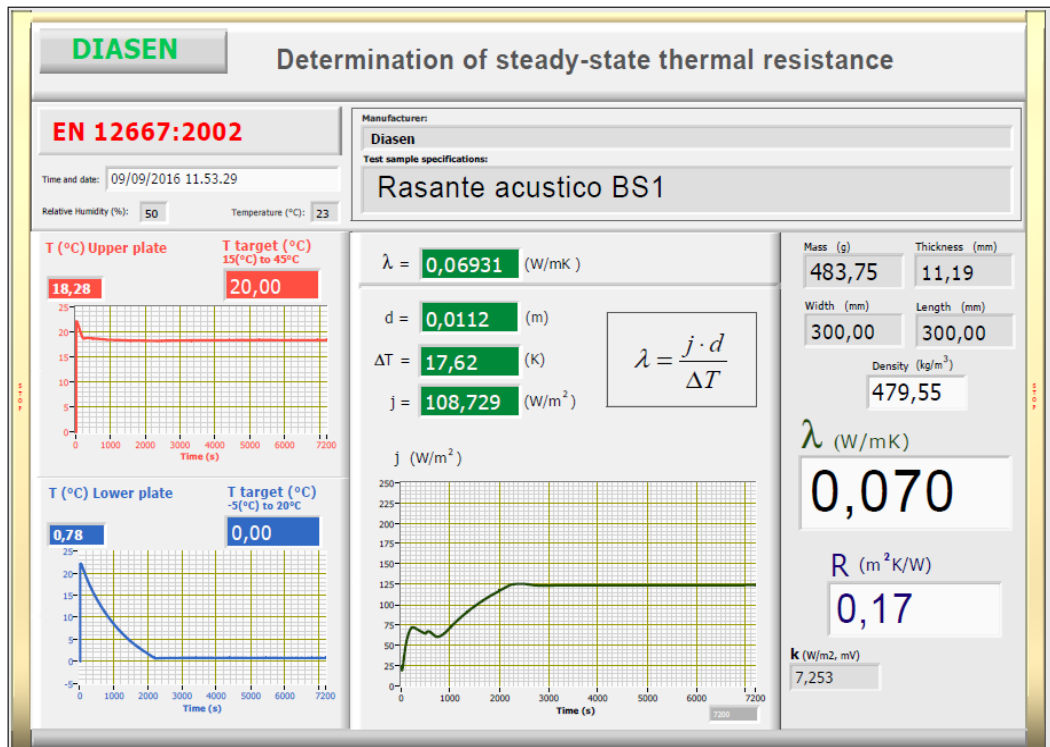


Fig. 6.29 Risultato Heat Flow Meter – BS1.

MIX BS2

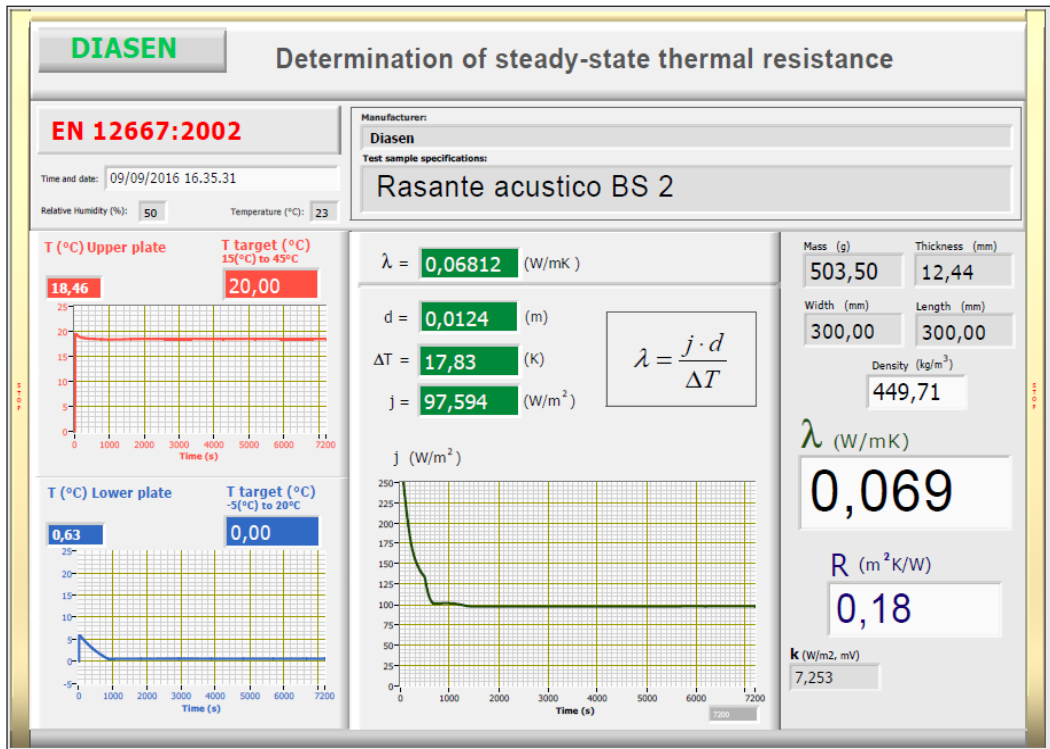


Fig. 6.30 Risultato Heat Flow Meter – BS2.

MIX BS3

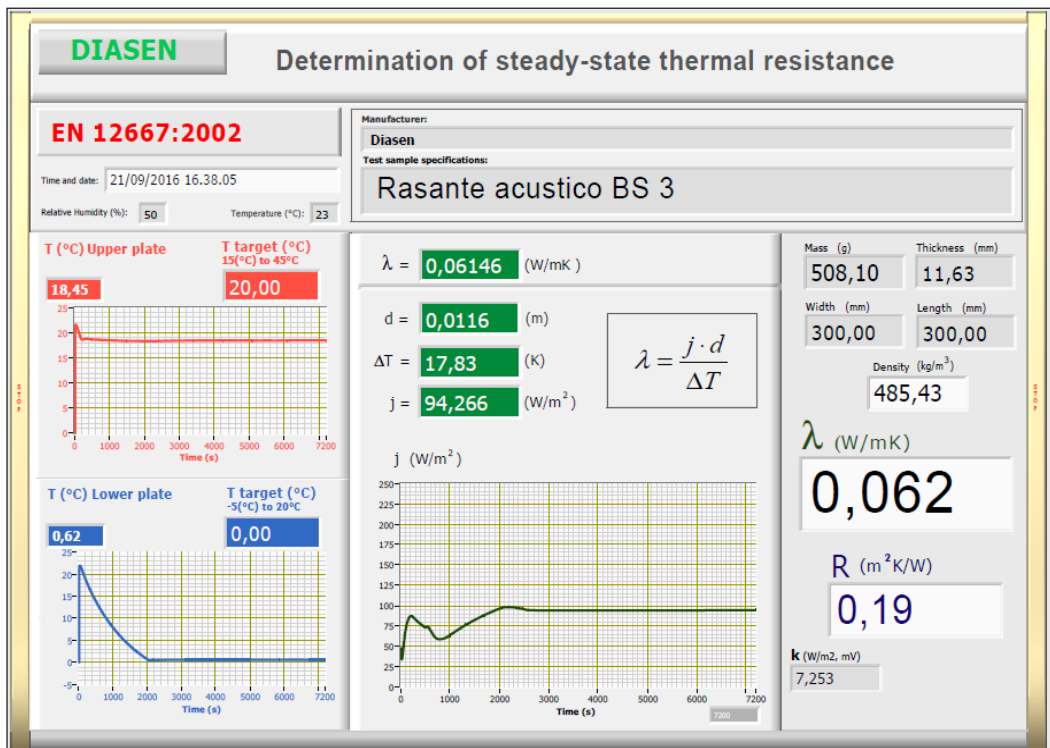


Fig. 6.31 Risultato Heat Flow Meter – BS3.

MIX BS4

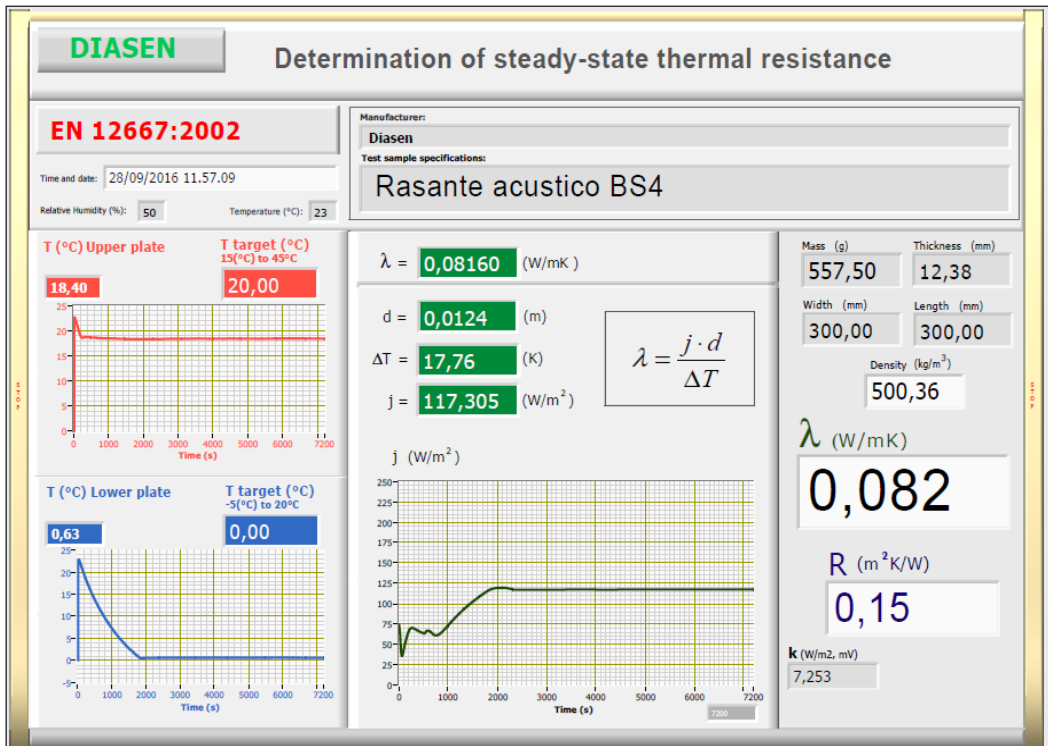


Fig. 6.32 Risultato Heat Flow Meter – BS4.

MIX BS5

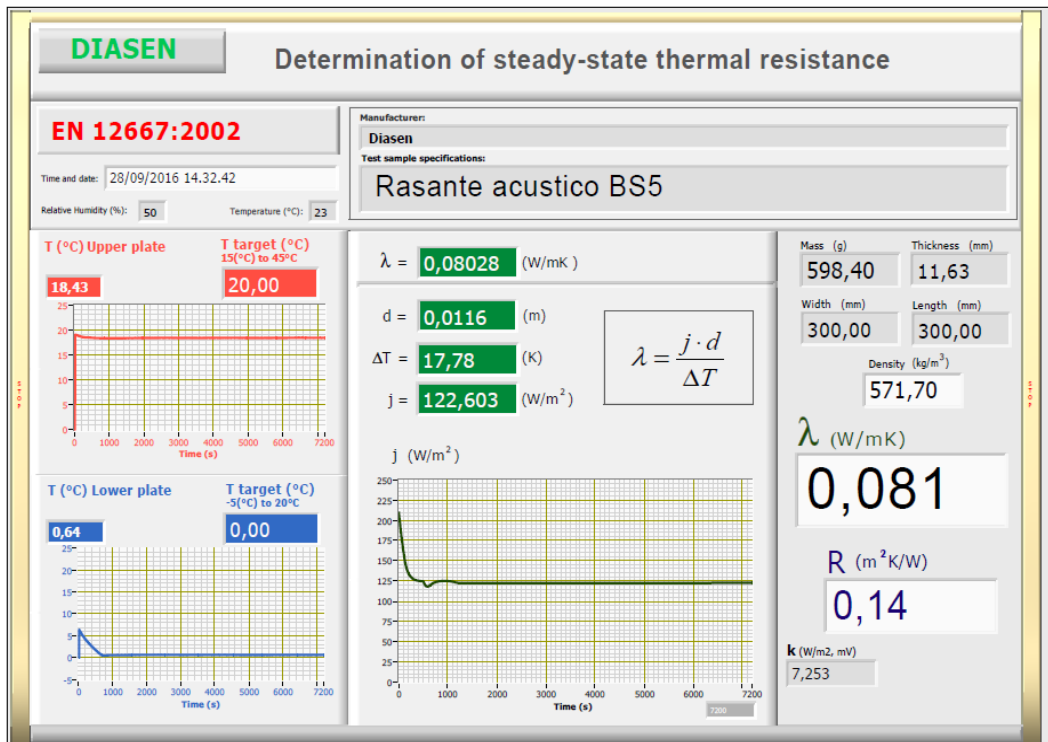


Fig. 6.33 Risultato Heat Flow Meter – BS5.

MIX BS6

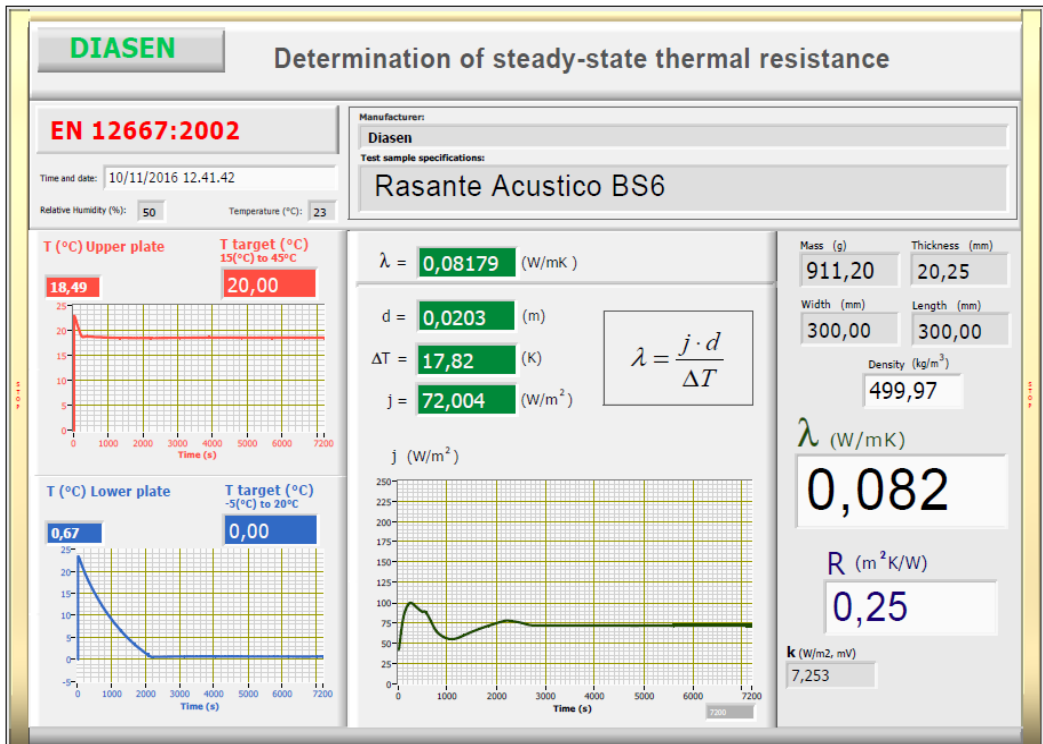


Fig. 6.34 Risultato Heat Flow Meter – BS6.

MIX BS7

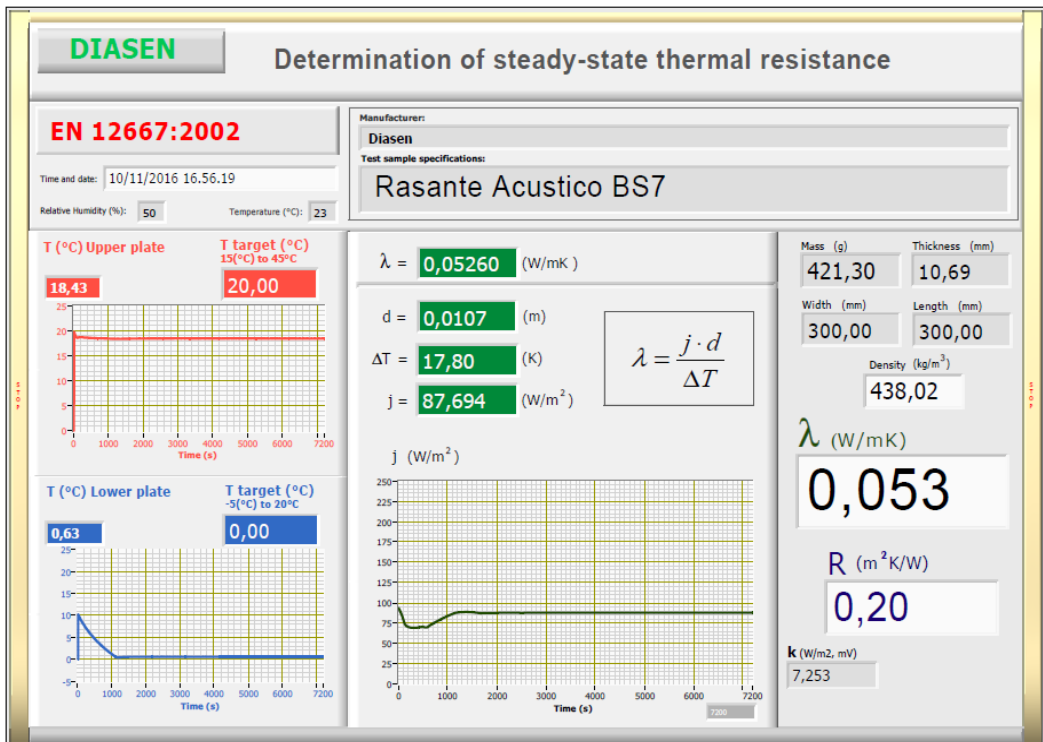


Fig. 6.35 Risultato Heat Flow Meter – BS7.

Di seguito (Tab. 6.2) si riportano i risultati della prova relativi alle varie formulazioni:

Tab. 6.2 Risultati formulazioni Heat Flow Meter.

Formulazione	λ [W/mK]
BS1	0,06931
BS2	0,06812
BS3	0,06146
BS4	0,08160
BS5	0,08028
BS6	0,08179
BS7	0,05260

6.4.1 Discussione dei valori sperimentali

Nel complesso i dati ottenuti fanno emergere un comportamento migliore dei rasanti del gruppo B con sola matrice calce. La ricerca si è concentrata sull'individuazione dei parametri più performanti, quali lavorabilità e conducibilità termica tralasciando valutazioni di tipo meccanico e porosimetrie per un'altra fase di sperimentazione. I risultati delle prove termiche mostrano un valore di trasmittanza termica fino a quattro/cinque volte inferiore di un normale rasante commerciale (A64). Tutti i mix hanno evidenziato un eccellente potere isolante, in particolare per il BS7 nel quale sono presenti aggregati e filler termici dalla microstruttura porosa, mostrando una stretta correlazione tra peso specifico e conducibilità termica.

Solo dall'equilibrio di questi fattori è possibile ottenere elevate performance di isolamento termico e di traspirabilità, qualità indispensabili per operare sul costruito esistente e futuro.

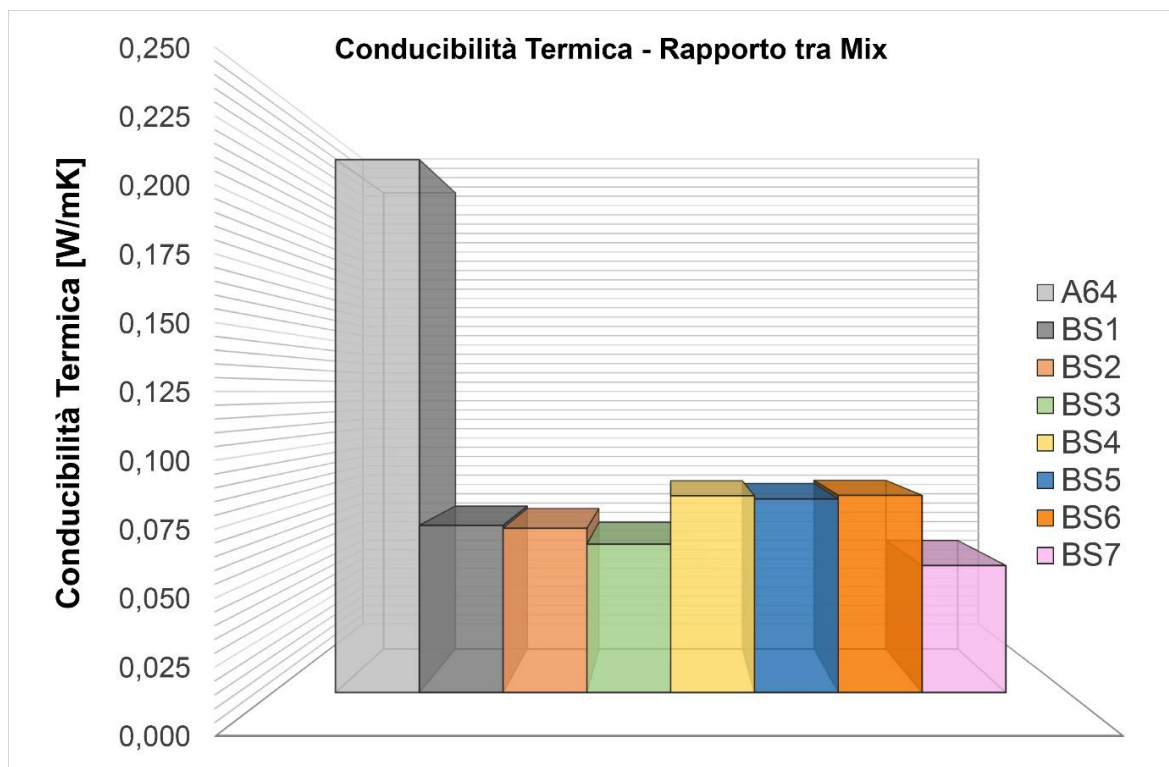


Fig. 6.36 Conducibilità termica – Rapporto tra mix.

7. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto nell'ambito di questa tesi di dottorato, ha riguardato lo studio e il progetto di intonaci coinvolti su due tematiche tra loro correlate e interdipendenti: efficienza energetica ed ecosostenibilità. L'approfondimento di questi due ambiti di ricerca aveva come scopo quello di valutare le possibili prestazioni e impieghi ingegneristici di materiali innovativi all'interno di intonaci contenenti percentuali di aggregati alleggeriti termici di varia natura e origine. Successivamente, la ricerca è stata portata sullo sviluppo di rasanti avanzati con proprietà termiche ed acustiche, che fungessero da complemento alla stratigrafia costruttiva tipica della nostra cultura: tamponatura, intonaco, rasante e finitura.

In particolare sono state esaminate le seguenti proprietà funzionali: la caratterizzazione dei materiali, la scelta dei rapporti leganti/inerti per i diversi mix-design, la valutazione della lavorabilità allo stato fresco, la valutazione delle prestazioni meccaniche allo stato indurito, la conduttività termica, l'analisi della micro e macrostruttura attraverso la porosimetria al mercurio, la caratterizzazione del fonoassorbimento acustico.

Dalla ricerca bibliografica condotta sugli intonaci impiegati per il miglioramento dell'efficienza energetica, è emerso che fino ad ora in letteratura è possibile trovare numerosi lavori riguardanti l'utilizzo di aggregati leggeri più tradizionali di origine naturale e di origine sintetica.

Tra i materiali naturali, gli studi riportano l'introduzione di granuli di sughero all'interno di matrici a base gesso, che ne diminuiscono la densità totale, riducono la conducibilità termica e incrementano l'igroscopicità dell'intonaco. Alcuni studi permettono di evidenziare come le prestazioni termo igrometriche delle pareti interne degli edifici possono essere notevolmente migliorate mediante l'impiego di intonaci a base di calce e canapa. Un altro campo di ricerca è quello degli "earth plaster", cioè una miscela di argilla, inerti fini e fibre di origine naturale e vegetale (orzo, paglia, mais, e altri): queste aggiunte di materiale vegetale vanno ad incidere sulla miscela fornendo buoni risultati sulla densità finale del prodotto e quindi sulla conducibilità termica, la permeabilità al vapore e anche sulla capacità deumidificante. Lo studio della bibliografia ha mostrato che l'aggiunta di materiali vegetali ha una grande influenza sulla densità e sulla conducibilità termica più che sulla permeabilità al vapore e sulla capacità di moisture buffering. Tra gli aggregati leggeri tradizionali largamente impiegati in letteratura vi è la perlite espansa, la quale se

inclusa nella matrice, ne incrementa la porosità totale e diminuisce la conducibilità termica all'aumentare della percentuale di porosità.

Sulla tematica dell'efficienza energetica, il panorama della ricerca scientifica include anche l'impiego di materiali di origine sintetica come il poliuretano espanso macinato e inserito in opportuna curva granulometrica all'interno di malte e intonaci.

Attualmente in letteratura scientifica è inoltre possibile trovare numerosi studi riguardanti l'utilizzo di materiali isolanti basati sulla nanotecnologia. Le loro prestazioni sono tre volte superiori rispetto agli isolanti convenzionali comunemente utilizzati in edilizia; sono caratterizzati da uno spessore minore, provenienti da risorse rinnovabili e a bassa tossicità. I nanoisolanti è possibile trovarli sotto forma di aerogel, di pannelli isolanti a vuoto (VIP, Vacuum Insulation Panels) che contengono aerogel o PCM (materiali a cambiamento di fase) .

L'altra tematica affrontata durante la sperimentazione condotta è quella sui materiali sostenibili ed ecofriendly. Il concetto di ridurre notevolmente l'impatto ambientale, ha contribuito in letteratura scientifica allo studio e alla realizzazione di sperimentazioni su malte da intonaco che promuovono la sostituzione di materiali isolanti sintetici come il poliuretano e il polistirene espanso, con materiali isolanti naturali con un buon LCA (Life Cycle Assessment) o riciclati come sughero, fibra di legno e lana di pecora e fibre vegetali.

Lo scopo che ci si è posti in questa ricerca è stato quello di formulare intonaci termoisolanti in grado di agire sulla riduzione dei consumi energetici, in particolare è stata affrontata la tematica relativa al riciclo e al riutilizzo di materiali all'interno del ciclo edilizio grazie all'impiego e alla scelta accurata di materie prime seconde. Pertanto, la scelta consapevole di materiali da impiegare nella ricerca è stata fondamentale: pomice con estrazione e lavorazione a basso impatto ambientale, silice espansa composta principalmente da silice amorfa e una percentuale di vetro riciclato, vetro post-consumo espanso. Da letteratura, l'impiego di aggregati leggeri di origine naturale e provenienti dal riciclo sta diventando una necessità per poter abbattere l'aumento dei rifiuti in campo edilizio e non solo. Al fine di poter fronteggiare questa problematica la ricerca si è focalizzata su materiali con un buon Life-Cycle Assessment in grado di rispettare e sostenere il concetto di sostenibilità dei materiali. Ad esempio, l'introduzione del vetro espanso post-consumo all'interno di alcune miscele ha apportato miglioramenti per l'ottimizzazione di intonaci energy efficient e allo stesso tempo ecofriendly. Le prove

condotte sulle miscele analizzate hanno consentito di studiare la correlazione tra le principali proprietà degli intonaci e i materiali selezionati, inoltre i parametri funzionali determinati sono serviti a caratterizzare i mix realizzati dal punto di vista della micro e macro porosità delle matrici, conducibilità termica e resistenza meccanica e a dimostrarne un collegamento.

Dalla compagna prove è emerso un incoraggiante punto di partenza per la realizzazione di intonaci sempre più avanzati e allo stesso tempo ecofriendly. L'introduzione di materiale post-consumo, vetro espanso, all'interno di una miscela tradizionale a base pomice ha apportato effetti benefici su molteplici aspetti; i risultati ottenuti, aprono nuove strade di ricerca nell'utilizzo di materiali leggeri e termici ma sempre con buone prestazioni meccaniche.

I dati di porosità ottenuti con il metodo della porosimetria a mercurio, forniscono spunti di riflessione che potrebbero indirizzare la ricerca verso la messa a punto di prodotti innovativi con un'elevata porosità totale ma resistenti alle sollecitazioni esterne. Pertanto, anche i buoni valori di conducibilità termica indicano nuove possibili evoluzioni nell'ambito di intonaci energy efficient ed ecofriendly sempre più avanzati.

Visti gli incoraggianti risultati raggiunti nelle prove di determinazione della porosità totale accessibile delle miscele progettate, unitamente alle caratteristiche coibenti che queste hanno evidenziato, la sperimentazione è passata ad analizzare in maniera più approfondita la correlazione tra porosità, conducibilità termica e fonoassorbimento per la messa a punto di intonaci termoacustici dimostrandone un stretta correlazione, pertanto la ricerca ha riguardato anche la progettazione di nuove miscele con caratteristiche termoisolanti e di assorbimento del suono.

Dai risultati ottenuti, è stata quasi immediata la scelta di analizzare e formulare un rasante con le giuste caratteristiche fisico-tecniche, indispensabile per il funzionamento globale dell'involucro edilizio, visto come complemento all'interno di una stratigrafia costruttiva con la funzione di proteggere e preservare lo strato sottostante di intonaco. Un rasante, si può considerare "avanzato" quando prende in considerazione tutti quegli elementi energy efficiency e sustainability già introdotti per gli intonaci.

Le proprietà funzionali analizzate in questa ricerca hanno compreso:

- Determinazione dei pesi specifici;
- Analisi al SEM delle materie prime;

- Determinazione della reologia delle miscele;
- Determinazione delle resistenze meccaniche;
- Porosimetria a mercurio;
- Determinazione della conducibilità termica.

Sulla base delle prove effettuate, sviluppi futuri potrebbero indirizzarsi su una nuova campagna di prove sperimentali legate a studiare i seguenti parametri:

- Permeabilità al vapore μ ;
- Assorbimento d'acqua per capillarità;
- Porosimetria e Fonoassorbenza rasanti;
- Cicli di gelo e disgelo – durabilità matrice macroporosa.