Agenda Tecnica
informazione tecnico-scientifica
giugno 2020

SPERIMENTAZIONE SU MALTE DI CALCE FIBRO-RINFORZATE CON JUTA: PROVE DI LAVORABILITÀ E DI RESISTENZA A FLESSIONE

Antonio FORMISANO[1], Enzo Junior DESSÌ[1], Andrea BASILE[2], Alfonso IMPAGLIATO[3]

[1] Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – Università di Napoli "Federico II"antoform@unina.it; dessi.enzo@libero.it

[2]TecnoLab s.r.l. Napoli -1tecnolab@virgilio.it

[3] Ingegnere - a.impagliato@gmail.com

Abstract

Data l'importanza ed il numero di edifici in muratura sul territorio italiano, colpito sempre più di frequente da fenomeni sismici, e sulla scorta di una rinnovata sensibilità dei tecnici verso interventi ecosostenibili, appare evidente come le tecniche di recupero e restauro a tutela del costruito storico debbano essere eseguite con l'utilizzo di materiali innovativi derivati da materie prime naturali, quali la malta di calce, e fibre naturali come la juta. La campagna sperimentale prevede l'uso di materiali facilmente reperibili in edilizia, quale una malta di calce idrata Geocalce® Kerakoll M15 e fibre grezze di juta. Attraverso prove con tavola a scosse per la valutazione della lavorabilità, sono stati individuati due parametri fondamentali, quali l'intervallo del rapporto Acqua/Calce (A/C), che va a stabilire un valore di riferimento della percentuale di fibre di juta nell'impasto, ed il range di variabilità delle percentuali di fibra, una volta individuato il valore di A/C_{max}. Le fibre impiegate hanno una lunghezza compresa fra 5 e 15 mm e, da prove empiriche condotte, appare che le stesse assorbono acqua per circa 3 volte il loro peso. E' stato assunto un rapporto $(A/C)_{eff}$, inteso come somma dell'acqua indicata dal produttore e dell'acqua per la lavorabilità dell'impasto da cui detrarre l'acqua di imbibizione delle fibre, pari al 21.5%. Sono stati confezionati sia provini privi di fibre (tal quali) che provini con percentuali in peso di fibra pari allo 0.25, 0.50, 0.75 e 1.0%. Non è stato possibile incrementare ulteriormente le percentuali di fibre in quanto l'impasto perdeva le caratteristiche di lavorabilità, assumendo l'aspetto di una poltiglia e, pertanto, la prova di consistenza non risultava superata. I provini confezionati con le citate percentuali di fibre sono stati sottoposti a prove di rottura a flessione dalle quali si è osservato, rispetto ai provini tal quali, il passaggio da un comportamento fragile a duttile, con le fibre che innescano un effetto di cucitura della lesione.

Parole chiave: Murature– Malte di calce – Materiali compositi – Fibre di juta – Prove sperimentali

1. INTRODUZIONE

Osservando l'esito del censimento ISTAT 2011, in Italia sono presenti oltre 12 milioni di edifici residenziali, dei quali il 57.24%, corrispondente a quasi 7 milioni di unità, è realizzato in muratura (Fig. 1). Oltre il 90% di tali edifici sono stati realizzati in epoca antecedente il boom economico degli anni '90, con tecnologie tradizionali ed in un quadro normativo che ancora non contemplava il progetto degli edifici per le azioni sismiche. Analizzando i dati raccolti, però, appare ben più preoccupante lo stato di conservazione di tale patrimonio, caratterizzato da circa il 40% di edifici in cattivo stato di manutenzione. Pertanto le strutture in muratura, che costituiscono come visto una larga percentuale del patrimonio costruito, risultano particolarmente vulnerabili e necessitano di interventi atti a prolungarne la sopravvivenza. In tale contesto può prevedersi la realizzazione di nuovi intonaci per la riqualificazione delle facciate e di sistemi di rinforzo per incrementare la resistenza delle pareti murarie alle azioni sismiche. Alla luce di una rinnovata sensibilità tecnica rivolta verso soluzioni eco-compatibili e materiali naturali, una sperimentazione rivolta ad indagare un materiale classico come la calce idrata, ampiamente utilizzato in passato e presente in buona parte nel costruito storico italiano, ed un

materiale naturale quale la juta, derivante da colture biologiche ed a basso impatto ambientale, apre nuove e più ampie prospettive nel settore del recupero delle costruzioni esistenti in muratura mediante malte ed intonaci fibro-rinforzati.

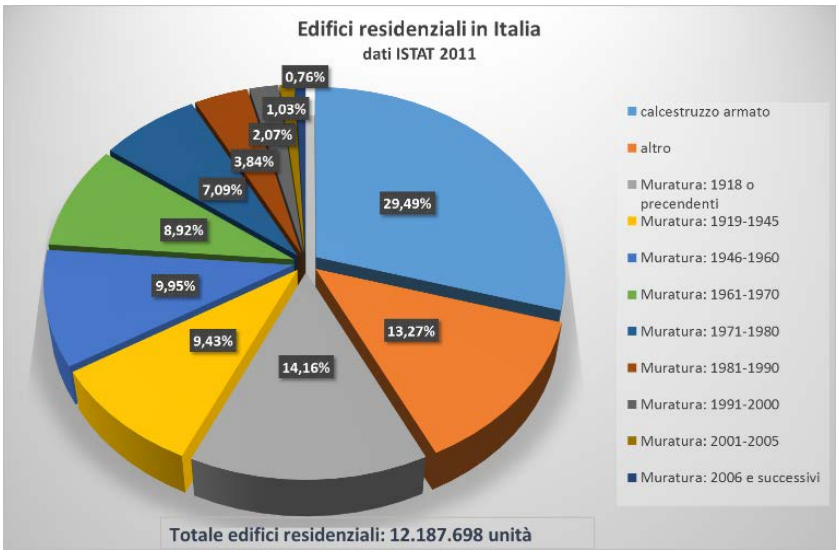


Figura 1:Statistica ISTAT sugli edifici residenziali in Italia

2. METODOLOGIA

2.1 Scopo

Una malta, costituita da legante (cemento e/o calce), acqua ed inerti fini, deve garantire adeguate caratteristiche di lavorabilità durante il confezionamento e determinate prestazioni allo stato solido in termini meccanici, chimici e fisici. Attraverso l'uso di materiali compositi è possibile incrementare l'efficienza e le prestazioni di un materiale di base, costituente la matrice, garantendo nuove caratteristiche derivanti dalla sinergia con il rinforzo in fibre.

L'obiettivo del lavoro di ricerca è la determinazione, per il confezionamento di una malta di calce idrata fibro-rinforzata con juta, dei seguenti parametri:

- Determinazione dei rapporti ottimali acqua/calce (A/C), espressi come percentuale in peso, per la sola matrice di base e per una matrice con percentuale di rinforzo in fibre di juta pari all'1%;
- Confezionamento di provini con rapporto A/C=costante e percentuale di fibre variabili;
- Prove meccaniche di rottura a flessione retta, su provini standard 40x40x160mm, stagionati a 28 giorni.

Per il conseguimento dei predetti obiettivi si prevede di individuare preliminarmente in maniera empirica i quantitativi di acqua di imbibizione delle fibre di juta.

2.2 Materiali

Per il confezionamento degli impasti si prevede l'impiego di prodotti facilmente reperibili sul mercato, quali:

- Geocalce® Kerakoll classe M15;
- Juta grezza in fibre.

Leader mondiale nei prodotti e servizi per l'edilizia sostenibile ed il restauro, Kerakoll annovera tra i suoi prodotti Geocalce®, della quale si riportano in Tabella 1 i dati significativi, secondo le norme UNI EN 998-1 [1] e UNI EN 998-2 [2], della malta M15.

Dati tecnici		
Massa volumetria della miscela fresca	≈1.76 kg/m^3	EN 1015-6
Massa volumetrica dell'impasto secco	≈1.61 kg/m^3	EN 1015-10
Acqua di impasto	0.204 l/kg	
High-tech EN 998-1		
Coefficiente di diffusione di resistenza al vapore (μ)	≥16	EN 1015-19
Coefficiente di assorbimento capillare	Categoria W1	EN 998-1
Aderenza al substrato	≥ 1 MPa – FP: B	EN 1015-12
Conducibilità termica($\lambda_{10'}$ dry)	0.67 W/mK	EN 1745
Durabilità (gelo-disgelo)	NPD	EN 998-1
Classe di reazione al fuoco	Classe A1	EN 1350-1
Resistenza a compressione (28 giorni)	Categoria CS IV	EN 998-1
High-tech EN 998-2		
Coefficiente di diffusione di resistenza al vapore (μ)	[15÷35]	EN 1745
Coefficiente di assorbimento capillare	≈0.3 kg/(m^2 · min$^{0.5}$)	EN 1015-18
Aderenza al substrato (28 giorni)	≥ 1MPa – FP: B	EN 1015-12
Conducibilità termica ($\lambda_{10'}$ dry)	0.67 W/mK	EN 1745
Resistenza a compressione (28 giorni)	Categoria M15	EN998-2
Resistenza a taglio	≥ 1 MPa	EN 1025-3
Modulo elastico statico	9230 MPa	EN 998-2

Tabella 1:Proprietà fisiche e meccaniche della Geocalce®Kerakoll classe M15

Relativamente alle fibre di juta, si riportano in Tabella 2 una serie di dati presenti nella bibliografia corrente. Le fibre di juta sono state ridotte, mediante cesoie e frullatore, in fiocchi e fibre "medie" con lunghezza variabile fra 5 e 15 mm (Fig. 2).

Diametro delle fibre (ϕ)	20÷200 μm
Densità relativa (ρ)	1.3÷1.49 g/cm^3
Resistenza a rottura (f_{yk})	320÷800 MPa
Modulo elastico (E)	≈30000 MPa
Allungamento a rottura (%)	1.0÷1.8
Assorbimento al 65% r.h., 20°C (%)	12
Differenza tra desorbimento e assorbimento a 65% r.h., 20°C	1÷5
Conducibilità termica($\lambda_{10'}$ dry)	0.05÷0.055 W/mK

Tabella 2:Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre di juta

a)

b)

Figura 2: Fibre (a) e fiocchi (b) di juta

Normalmente le fibre in commercio sono del tipo “lungo” (circa 15÷20 cm), e non possono essere direttamente utilizzate per il confezionamento di provini standard 40x40x160mm, sia per le dimensioni eccessive in relazione a quelle dei provini che per aspetti legati al confezionamento, in quanto andrebbero ad avvolgersi intorno alla pala dell’impastatrice.

2.3 Equipaggiamento e tipo di test

Per il confezionamento della malta di calce fibro-rinforzata con juta è stato impiegato un miscelatore conforme alla norma UNI EN196-1 [3] (Figura 3), dotato di tazza in acciaio e pala di miscelazione forata, collegata ad un sistema a controllo elettronico di velocità e rotazione. Il sistema consente di lavorare una massa complessiva di un impasto di malta fresca tale da rientrare nei limiti dati dalla UNI EN196-1 [3] (Tabella 3).

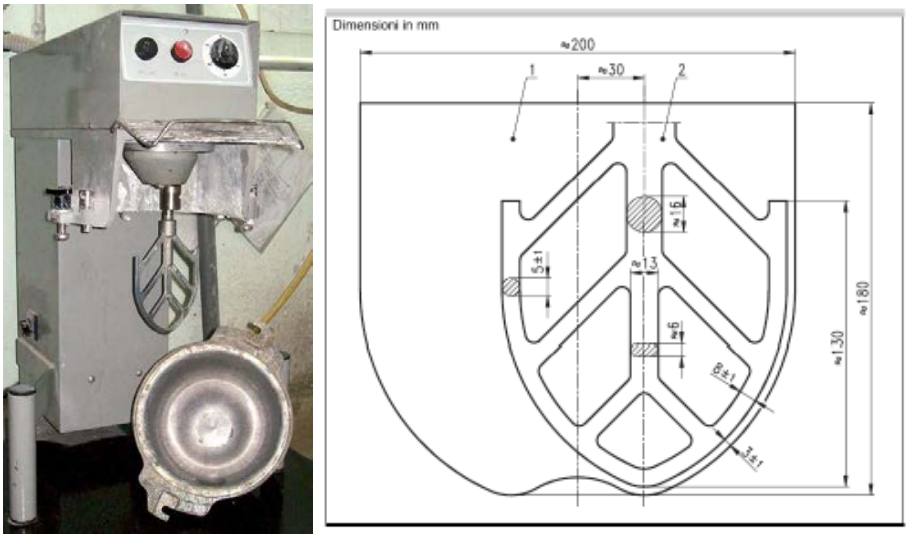


Figura 3: Blender conforme alla norma UNI EN 196-1

Impasto di malta fresca	Conforme UNI EN196-1	Tazza di miscelazione
Costituenti solidi (kg)	1.8÷3.0	30÷50
Volume (dm^3)	0.5÷2.5	25÷75

Tabella 3: Massa e volume della malta di calce impiegata (EN 196-1)

In assenza di indicazioni specifiche, il campione di malta fresca può essere portato ad un valore di consistenza limite (Tabella 4), espresso come diametro di spandimento S_p della malta, determinato in conformità con la UNI EN 1015-3 [4], per il quale definire il contenuto di acqua di impasto.

Massa volumetrica dell'impasto (kg/m^3)	Diametro di spandimento S_p(mm)
> 1200	175±10
600÷1200	160±10
300÷600	140±10
≤ 300	120±10

Tabella 4: Consistenza in relazione alla massa volumetrica dell'impasto

Per la determinazione della consistenza di una malta fresca si adotta il metodo che impiega una tavola a scosse in accordo alla UNI EN 1015-3 [4]. L’apparecchiatura (Figura 4) è costituita da una

tavola circolare con un albero, montati su un robusto telaio, attraverso cui è possibile applicare delle scosse verticali di energia standard definita dalla corsa dell'albero. La malta viene posizionata all'interno di un cono di bronzo avente diametro superiore di 70 mm ed inferiore di 100 mm. Il riempimento avviene in due strati successivi, avendo cura di compattare la malta con 25 brevi colpi di pestello per assestarla nel provino tronco conico e garantire un riempimento uniforme. Sollevato il cono dopo 30 secondi, si applicano 15 scosse in 15 secondi, misurando al termine lo spandimento della malta su due diametri ortogonali. Presi due campioni di malta ed annotati i risultati delle prove in termini di diametro di spandimento(espresso in millimetri), la fluidità è data dal valore medio delle due misure. Ai fini di una buona lavorabilità della malta da impiegare per intonaci o per il confezionamento murario, è necessario adottare uno spandimento della malta di calce idrata S_p fra 140 e 180 mm (con una tolleranza di ±10 mm),come prescritto dalle norme UNI 998-1/-2 [1, 2].

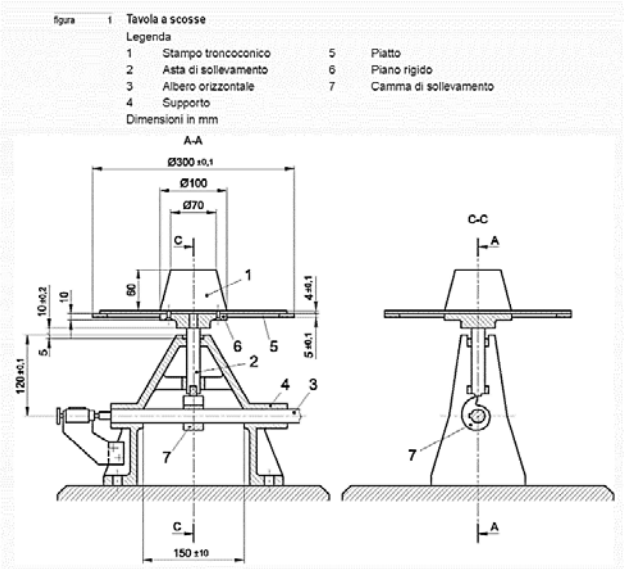


Figura 4:Tavola a scosse impiegata per la valutazione della lavorabilità della malta

Per la definizione del quantitativo di acqua di assorbimento delle fibre di juta, una volta ridotte le fibre stesse in elementi di dimensioni medie, queste sono state immerse completamente in acqua in condizioni ambientali standard (65% r.h., 20°C) per tempi di 5-10-30-60-120 minuti. In assenza di indicazioni di norma, al termine dei predetti tempi di immersione, le fibre sono state estratte dall'acqua, asciugate con un panno per rimuovere l'acqua in eccesso, e pesate per determinare il quantitativo di acqua assorbita.

I provini utilizzati per le prove meccaniche sono del tipo standard di dimensioni 40 x 40 x 160 mm, secondo la norma UNI EN 196-1 [3], con cassettiere normalizzate in acciaio (Figura 5). I provini sono stati scasserati a sette giorni e stagionati per 28 giorni in condizioni ambientali standard.

Figura 5:Casseformi in acciaio conformi alla norma UNI EN 196-1

3. LE ATTIVITA' SPERIMENTALI

3.1 Determinazione dell'acqua di assorbimento delle fibre di juta

La prova è stata condotta con tre campioni di 10 g di fibre medie di juta, effettuando pesate ad intervalli regolari. Attraverso la prova è stato possibile portare le fibre a completa imbibizione (Tabella 5).

Nome provino	T_0 =0' (*)	T_1 =5'	T_2 =10'	T_3 =30'	T_4 =60'	T_5 =120'
Juta01	10,05 g	22,59 g	32,03 g	43,20 g	41,33 g	42,35 g
Juta02	11,02 g	21,44 g	29,69 g	39,92 g	43,75 g	41,67 g
Juta03	10,86 g	22,28 g	31,16 g	37,80 g	39,33 g	39,88 g
(*) tempo espresso in minuti						

Tabella 5:Tempo di imbibizione e peso delle fibre

Il peso finale medio $W_{f,med}$è pari a 41.30 g, mentre il peso iniziale medio $W_{i,med}$ risulta 10.64 g. Pertanto il peso medio dell'acqua assorbita per completa imbibizione $W_{w,imb}$ è pari a 30.66 g.

3.2 Determinazione della massima percentuale di acqua nell'impasto di sola calce

Come detto in precedenza, il produttore indica un rapporto A/C_{min}=20% per la malta M15. Attraverso una serie di prove di lavorabilità è stato determinato il valore massimo del rapporto A/C per un impasto di sola malta di calce (Tabella 6).

Nome provino	Peso della calce (g)	Peso acqua iniziale (g)	Incremento di acqua (g)	Totale acqua di impasto (g)	Rapporto acqua/calce totale $(A/C)_{tot}$	Valore di consistenza (mm)
TQ	1001	200,0	0,0	200,0	0,200	161
X1.4	1000	205,0	5,0	205,0	0,205	170
X1.3	1005	210,0	10,0	210,0	0,210	180
TQ1	1002	215,0	15,0	215,0	0,215	192
X1.2	1000	220,0	20,0	220,0	0,220	210 (*)
(*) Test di consistenza a rifiuto						

Tabella 6: Percentuali di acqua presenti nell'impasto di malta di calce

Dalla precedente tabella si osserva che, in assenza di fibre, al rapporto $(A/C)_{tot}$ = 21.5% corrisponde il valore limite del contenuto di acqua assorbile dalla calce.

3.3 Determinazione della percentuale massima di acqua nell'impasto

Ai fini del confezionamento dell'impasto, il quantitativo totale di acqua da impiegare deve essere considerato come somma di un'aliquota indicata dal produttore, di una parte assorbita per imbibizione dalle fibre e da un'ulteriore aliquota legata ad aspetti di lavorabilità dell'impasto. Individuato il quantitativo di acqua assorbita dalle fibre di juta, sono stati confezionati una serie di impasti di prova, variando il quantitativo in peso di acqua ed assumendo per i componenti dell'impasto i seguenti pesi:

- polvere di calce(P_{grout}): 1000 g;
- fibra di juta (1% in peso):10 g;
- acqua di impasto del produttore(A_{grout}): 200 g.

Dai dati sopra riportati si nota che è stata assunta una percentuale di fibra pari all'1% in peso della masse della calce in quanto, sebbene le fibre di juta risultino infiammabili, secondo la UNI 1350-1-1 [5], per quantitativi di fibre presenti ≤1%, il composito ottenuto dall'impasto risulta incombustibile, con classe di resistenza al fuoco A1. Fissata poi l'acqua di imbibizione (30 g) assorbita dalla quantità di fibra presente, è stato effettuato il confezionamento dell'impasto aumentando l'acqua totale con incrementi percentuali di peso pari al 25% dell'acqua di imbibizione. Per ogni impasto è stata condotta la prova di lavorabilità con tavola a scosse (Tabella 7).

Nome provino	Increm. acqua (%) [1]	A^*_{work} (g) [2]	Totale acqua di impasto (g)	Rapporto acqua/calce totale $(A/C)_{tot}$	Rapporto acqua – calce"effettivo" $(A/C)_{eff}$	Valore di consistenza (mm)
1	0,00	0,0	200,0	0,200	0,170	(*)
1bis	0,25	7,5	207,5	0,208	0,178	(*)
2	0,50	15,0	215,0	0,215	0,185	(*)
3	0,75	22,5	222,5	0,223	0,193	(*)
4	1,00	30,0	230,0	0,230	0,200	120
4quat	1,25	37,5	237,5	0,238	0,208	141
4ter	1,50	45,0	245,0	0,245	0,215	161
4quinq	1,75	52,5	252,5	0,253	0,223	177
4bis	2,00	60,0	260,0	0,260	0,230	192

[1] Percentuale di incremento dell'acqua di imbibizione
[2] Incremento in peso dell'acqua
(*) Test di consistenza a rifiuto

Tabella 7: Report sulle percentuali di acqua nell'impasto

Nella tabella si riportano sia i valori totali del rapporto (A/C), sia i valori effettivi, in cui si valuta l'effetto dell'imbibizione delle fibre sulla miscela. Tali rapporti si definiscono sulla base delle seguenti relazioni:

(1) $$(A/C)_{tot} = \frac{A_{grout} + A^*_{work}}{P_{grout}}$$

(2) $$(A/C)_{eff} = \frac{A_{grout} + A_{work} - A_{f,imb}}{P_{grout}}$$

L'introduzione di $(A/C)_{eff}$ deriva dal fatto che l'acqua di imbibizione inizialmente viene sottratta sia alla lavorabilità dell'impasto, che soprattutto ai fenomeni di presa.

3.4 Determinazione della percentuale massima di fibre nell'impasto

Al fine di valutare l'influenza delle fibre sulla lavorabilità, si considera un rapporto $(A/C)_{eff}$ = 21.5% e percentuali variabili in peso di fibre. Per campioni con P_{grout} =2000 g né consegue un peso minimo di acqua A_{grout} =400 g e di acqua di lavorabilità A^*_{work} = 30 g. Il confezionamento dell'impasto è stato effettuato con incrementi percentuali pari allo 0.25% in peso di fibre, aggiungendo per ognuno l'acqua di imbibizione $A_{f,imb}$ corrispondente all'impasto. Per ognuno degli impasti è stata condotta la prova di lavorabilità con tavola a scosse (Tabella 8). In Figura 6 si osserva che i campioni 5 e 5bis, sui quali sono state comunque condotte le prove, presentano una consistenza troppo secca tale da renderli inadatti ad essere impiegati in edilizia.

Figura 6:Campioni 5 e5bis con consistenza molto secca

Nome provino	*Increm. fibre* (%) [1]	P_{fibra} (g) [2]	$A_{f,imb}$ (g) [3]	A_{work} (g) [4]	Acqua di impasto (g)	Rapporto acqua/calce totale A/C_{tot}	Valore di consistenza (mm)
TQ1	0,0	0	0	30	430	0,215	190
11	0,25	5	15	45	445	0,223	182
10	0,50	10	30	60	460	0,230	180
12	0,75	15	45	75	475	0,238	177
4ter	1,00	20	60	90	490	0,245	161
5bis	1,50	25	75	105	505	0.253	142 (*)
5	2,00	30	90	120	520	0.260	(*)

[1] Incremento percentuale di fibre
[2] Peso delle fibre
[3] Peso dell'acqua di imbibizione
[4] Peso dell'acqua di lavorabilità
(*) Test di consistenza a rifiuto

Tabella 8: Report sulle percentuali di fibre nell'impasto

3.5 Prove di rottura meccanica a flessione

A valle delle prove di lavorabilità, con alcuni degli impasti eseguiti sono stati confezionati provini prismatici standard 40x40x160mm per prove a flessione. Sono stati impiegati per le prove i campioni TQ1, 11, 10, 12 e 4ter, le cui percentuali dei componenti costituenti sono illustrate in Tabella 8. Dopo 7 giorni i provini sono stati scasserati e sottoposti ad ulteriori 21 giorni di stagionatura, per un totale di 28 giorni naturali e consecutivi di maturazione in condizioni ambientali standard. A 28 giorni è stata eseguita la prova di rottura a flessione secondo la norma UNI EN 1015-11(Tabella 9). Lo schema di prova impiegato è riportato in Figura 7. Il calcolo della resistenza a flessione σ_{bend} del provino si effettua secondo la UNI EN 1015-11 [6] in accordo alla seguente espressione:

(3) $$\sigma_{bend} = 1.5\frac{F_{sd}L_0}{bd^2}$$

dove:

F_{sd} è la forza di rottura a flessione;

L_0=100mmè la distanza fra gli appoggi del provino;

b=40 mm è la base della sezione del provino;

d=40 mm è l'altezza della sezione del provino.

Nome provino	F_{sd} (kN) [1]	U_{sd} (mm) [2]	σ_{bend} (MPa) [3]	F_{ul} (kN) [4]	U_{ul} (mm) [5]
TQ1.1	1,380	1,194	3,234	(*)	(*)
TQ1.2	1,547	1,320	3,626	(*)	(*)
TQ1.3	1,627	1,470	3,813	(*)	(*)
11.1	1,250	0,336	2,930	0,086	1,104
11.2	1,705	0,391	3,996	0,127	1,103
11.3	1,450	0,297	3,398	0,078	0,607
10.1	1,097	0,297	2,571	0,127	1,217
10.2	1,247	0,470	2,923	0,232	1,314
10.3	1,601	0,275	3,752	0,133	1,224
12.1	1,160	0,687	2,719	0,126	1,947
12.2	1,329	0,761	3,115	0,136	1,796
12.3	1,351	0,586	3,166	0,283	1,328
4ter.1	1,240	0,501	2,906	0,110	2,499
4ter.2	1,572	0,363	3,684	0,204	2,421
4ter.3	1,366	0,225	3,202	0,137	1,728

[1] Forza di rottura a flessione
[2] Spostamento verticale corrispondente a F_{sd}
[3] Tensione di rottura per flessione corrispondente a F_{sd}
[4] Forza corrispondente al punto di spostamento massimo U_{ul}
[5] Massimo spostamento verticale U_{ul}
(*) Test di rottura a flessione a rifiuto

Tabella 9: Report dei test di rottura a flessione

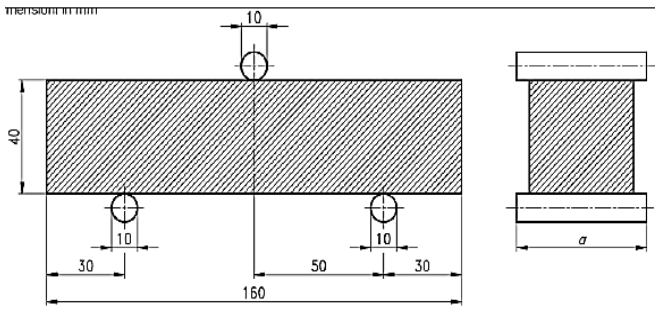


Figura 7: Schema della prova di rottura a flessione

4. I RISULTATI DELLE PROVE

4.1 Acqua di assorbimento per imbibizione delle fibre di juta

La prova ha evidenziato l'elevato potere assorbente delle fibre, che di fatto aumentano di circa 3 volte il loro peso iniziale a seguito della completa imbibizione. Analizzando i dati (Figura 8) appare evidente che la completa imbibizione si ottiene dopo circa 30 minuti.

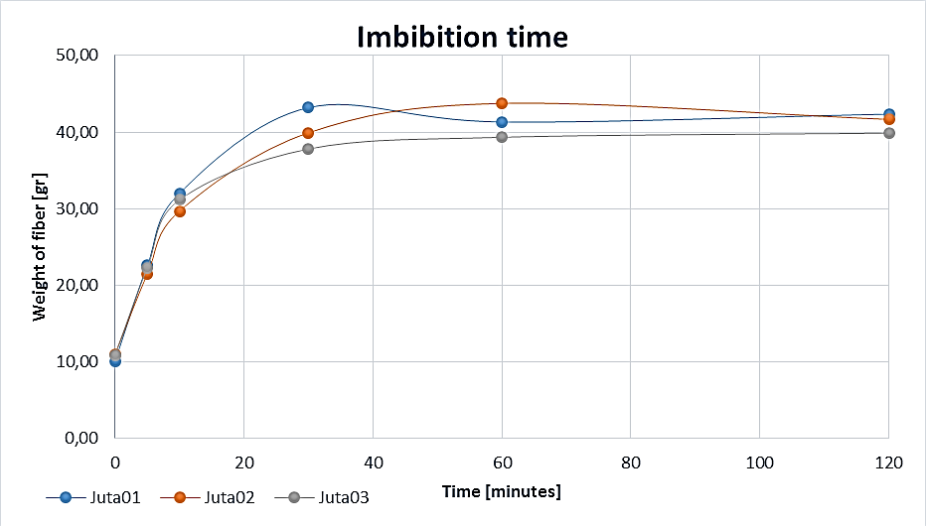


Figura 8:Tempo di imbibizione delle fibre di juta

Al termine della prova non sono stati condotti studi per valutare l'instabilità dimensionale, detta "swelling", o prove meccaniche sulle fibre stesse.

4.2 Massima percentuale di acqua nell'impasto di sola calce

Come detto in precedenza, il produttore indica un rapporto $(A/C)_{grout}$=20%. Senza l'aggiunta di fibre, è stata incrementata l'acqua di impasto sino a determinare il valore limite superiore del rapporto A/C per un impasto di sola malta di calce (Tabella 6). Durante la prova si sono osservate alcune evidenze sperimentali circa la consistenza e la lavorabilità dell'impasto.

Durante la fase di riempimento della forma in bronzo (Figura 9), si osserva che l'aumento di acqua rende molto fluido l'impasto, al punto che per il campione X1.2(Tab.6) è stato possibile colarlo direttamente, senza necessità di costipamento. In tal caso il provino ha perso consistenza durante la rimozione della forma, prima ancora della prova sulla tavola a scosse.

Al termine della prova (Figura 10) per ogni campione è stato misurato lo spandimento lungo le due direzioni.

Figura 9: Formazione del provino con cono in bronzo (a) e disarmo (b)

a)

b)

Figura 10: Inizio della prova (a) e spandimento dopo 25 colpi (b)

4.3 Percentuale di acqua nella miscela di calce

Dalle prove condotte si osserva che per i provini 1, 1bis, 2 e 3, in cui l'aggiunta di acqua è inferiore all'acqua di imbibizione (30 g), l'impasto presenta una consistenza secca, poco umida, fortemente disomogenea e con grumi di polvere e fibre asciutti. Visivamente si presenta come una poltiglia o un miscuglio (Figura 11), in cui la scarsa lavorabilità non consente nemmeno di riempire il cilindro troncoconico per la prova con la tavola a scosse.

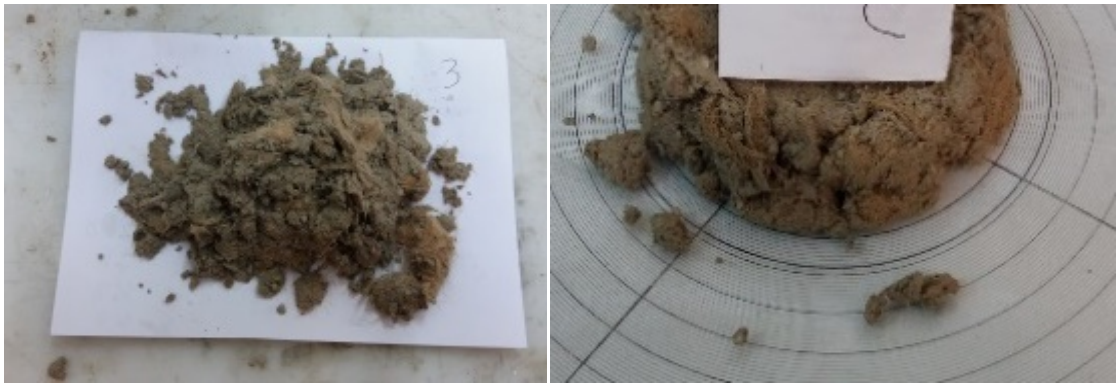


Figura 11:Campioni con consistenza molto secca

Il campione n.4, in cui l'aggiunta di acqua eguaglia l'acqua di imbibizione, presenta comunque una scarsa lavorabilità, ma tale da consentire comunque l'esecuzione della prova di spandimento. Il campione (Figura 12) presenta una consistenza umida (Tabella 7), insufficiente per garantire un corretto impiego della malta. Durante la prova esso tende a sfaldarsi, facendo osservare la presenza al suo interno di grumi di impasto asciutti.

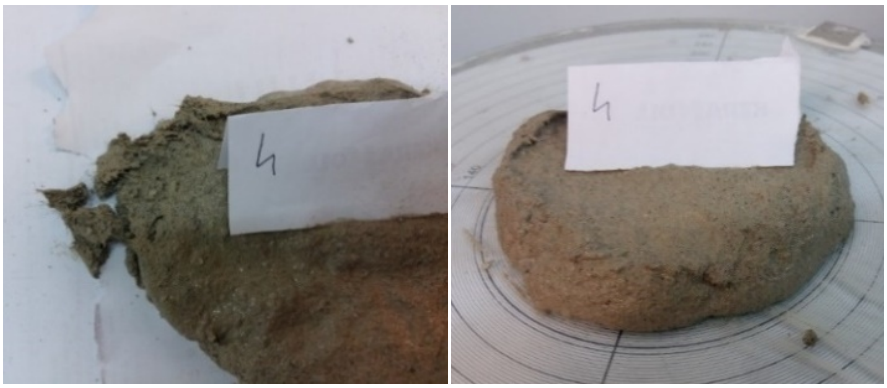


Figura 12:Campione 4 con consistenza umida

I campioni 4ter, 4quat e 4quinq presentano rapporti acqua/malta ottimali. Tali impasti, che si presentano uniformi ed omogenei (Figura 13a), hanno consentito il riempimento dei provini per la prova in accordo alle indicazioni di norma. I campioni così confezionati presentano spandimenti (Tabella 7) che assicurano un graduale passaggio da una consistenza plastica a fluida, senza rilasciare acqua in eccesso sulla tavola a scosse. Il campione 4bis presenta invece elevati rapporti acqua/malta. L'impasto si presenta molto fluido con evidenti gocce di acqua sulla superficie (Figura 13b).

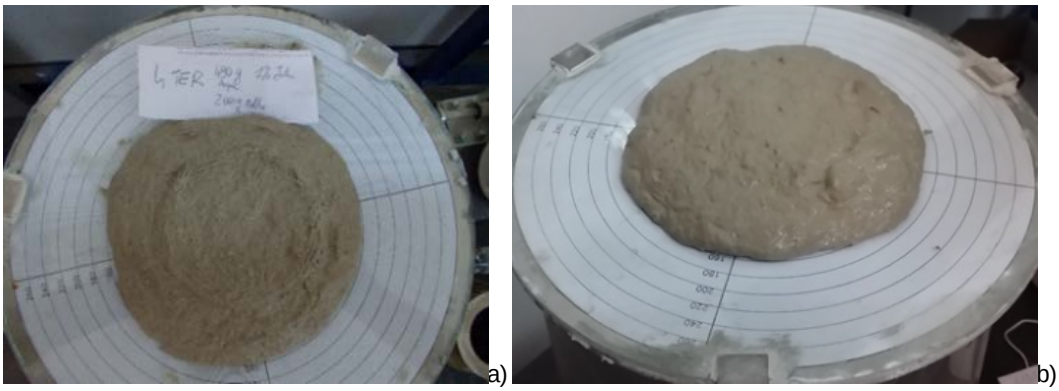


Figura 13:Campione 4ter con consistenza semi-fluida o plastica (a) e campione 4bis con consistenza super-fluida (b)

Pertanto, essendo stati ottenuti valori di spandimento superiori al limite consentito (Tab.7) che non ne consentono l'impiego per malte da intonaci o per murature, non sono stati confezionati ulteriori provini con l'impasto caratterizzante il campione 4bis.

4.4 Percentuale di fibre di juta nell'impasto

Avendo assunto un rapporto $(A/C)_{eff}$ =21.5%, i campioni 10 e 11 presentano elevati rapporti acqua/malta, con un impasto di consistenza da superfluida a fluida (Tab.8). Durante la prova si evidenzia la formazione di gocce di acqua sia sulla superficie dell'impasto, sia sulla tavola, che denotano acqua in eccesso nella miscela (Figura 14).

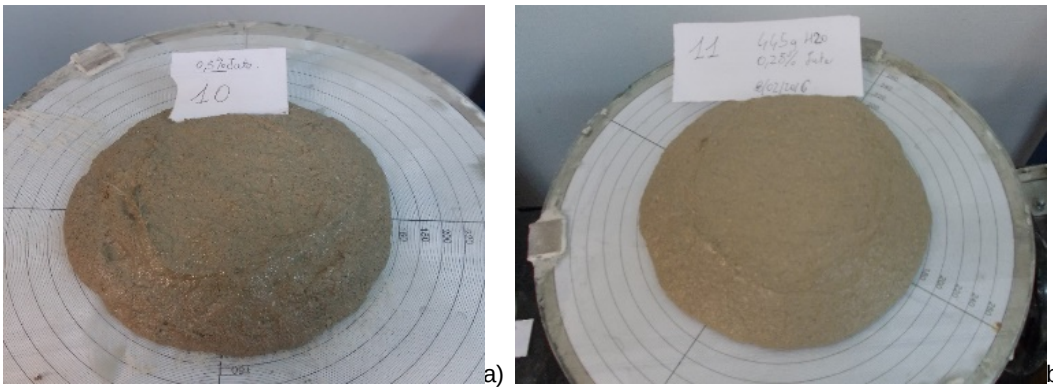
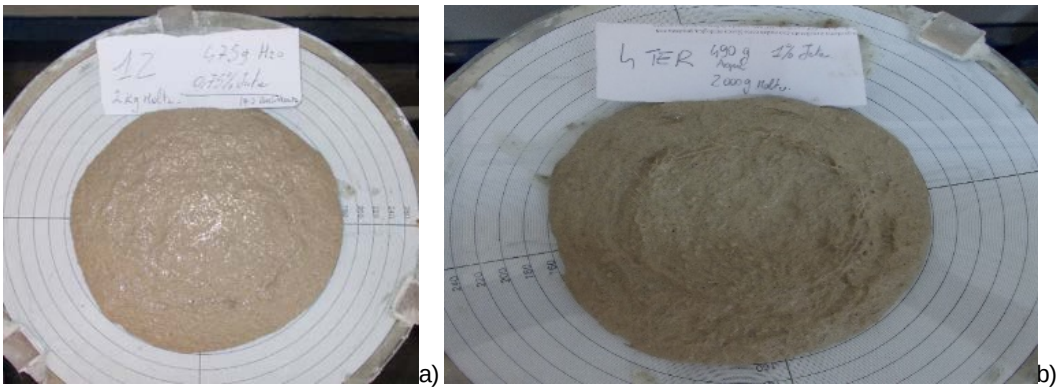


Figura 14:Campione 10 con consistenza fluida (a) e campione 11 con consistenza superfluida (b)

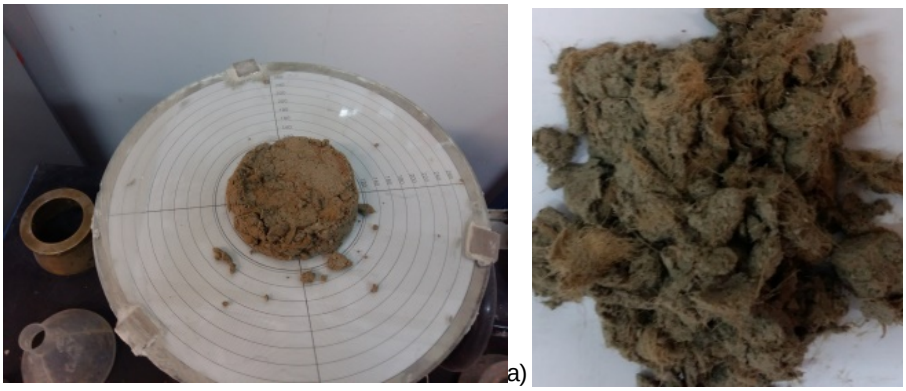
I provini 12 e 4ter presentano la giusta lavorabilità, con una consistenza rispettivamente da plastica a semi-fluida (Figura 15). L'impasto si presenta omogeneo, facilmente lavorabile a mano, ottimale per garantire un corretto impiego della malta.



a) b)

Figura 15:Campione 12 (a) con consistenza semifluida e campione 4ter (b) con consistenza plastica

Il provino 5bis presenta una consistenza umida (Figura 16a), con una miscela poco omogenea e di scarsa lavorabilità. Infine l'impasto del provino 5 (Figura 16b) si presenta fortemente disomogeneo, con numerosi grumi e parti asciutte, ed alcune porzioni dell'impasto stesso che sono rimasti bloccate nella pala del miscelatore durante la fase di confezionamento.



a) b)

Figura 16:Campione 5bis (a) e campione 5 (b) con consistenza secca

4.5 Test di rottura a flessione

Prima di effettuare le prove di rottura a flessione i provini (Figura 17) sono stati misurati e pesati, di modo da controllare eventuali fenomeni di ritiro a 28 giorni di stagionatura della malta. Tuttavia, dall'esito delle predette misurazioni, non sono stati rilevati apprezzabili fenomeni di ritiro dei campioni.

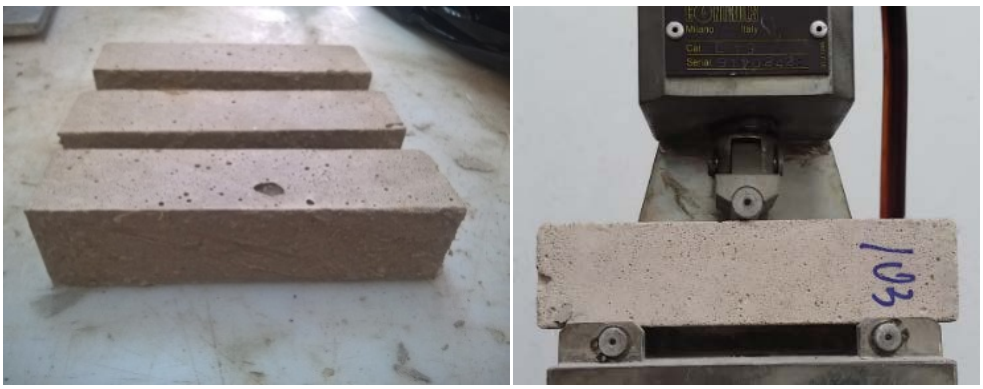


Figura 17:Campioni per prove di rottura a flessione

Si riportano di seguito gli andamenti delle curve relative alle prove di rottura a flessione su provini prismatici standard 40x40x160mm confezionati con gli impasti TQ1, 11, 10, 12 e 4ter, i cui componenti costituenti presentano pesi riportati in Tabella 8.
Per il campione tal quale (TQ1), si osserva una rottura di tipo fragile tipica delle matrici cementizie (Figura 18). Con la formazione della prima lesione, il provino collassa infatti completamente. Data la tipologia di prova, a controllo di spostamento, nel momento della rottura la macchina registra un veloce abbassamento della dima di carico a cui corrisponde un repentino decremento della forza applicata.
Il campione 11.3 presenta anch'esso un comportamento fragile, mentre per i campioni 11.1 ed 11.2 si osserva una ripresa della curva di carico, con un'escursione in campo plastico, dopo l'istantanea caduta di resistenza (Figura 19).

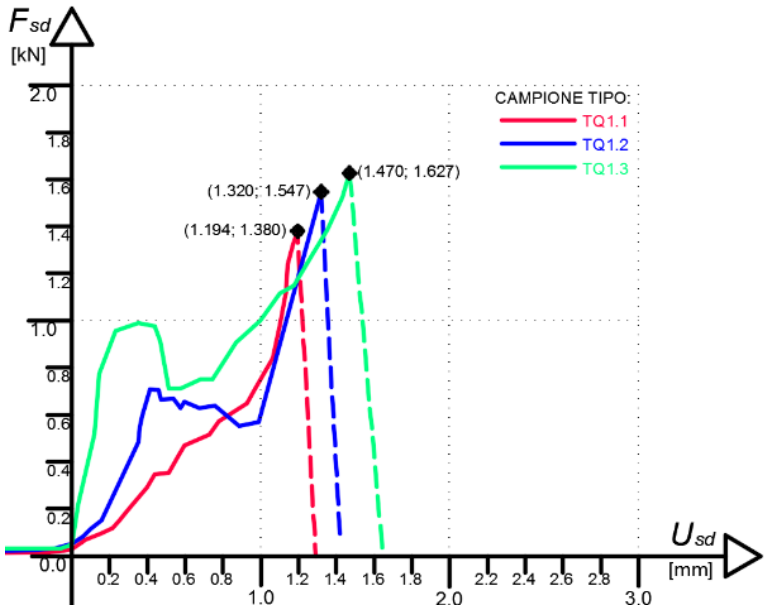


Figura 18:Prova a flessione su campione TQ1 – $(A/C)_{eff}$=21.5% - %F=0.0%

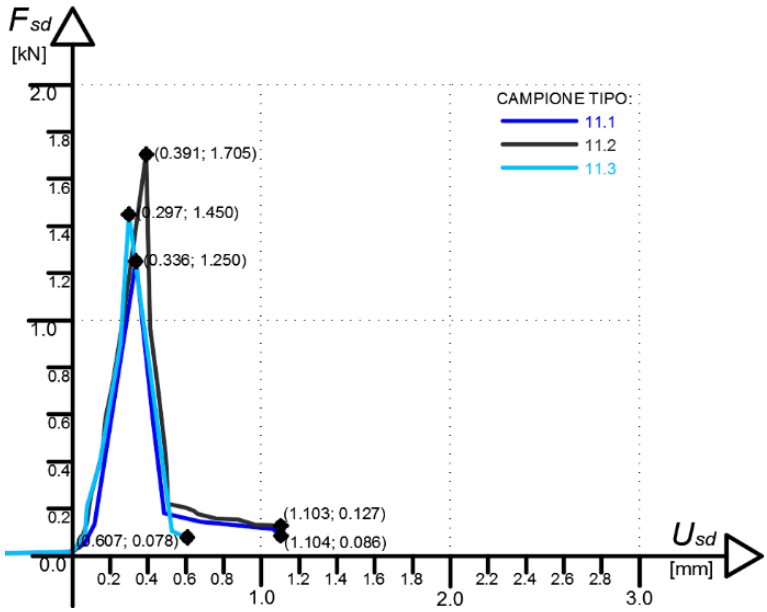


Figura 19:Prova a flessione su campione 11 – $(A/C)_{eff}$=21.5% - %F=0.25%

I campioni 10, 12 e 4ter presentano andamenti simili delle curve di carico, con la formazione di una lesione iniziale, che coincide con la brusca caduta di resistenza. Dopo l'apertura della prima lesione, si attiva un effetto di cucitura delle fibre poste a ridosso della lesione, che inibiscono il successivo allargamento della lesione, contribuendo ad una graduale ripresa del rapporto spostamento/carico fino al collasso del provino (Figure 20, 21 e22). L'effetto cucitura esercitato sulla matrice dalle fibre di juta è visibile in Figura 23.

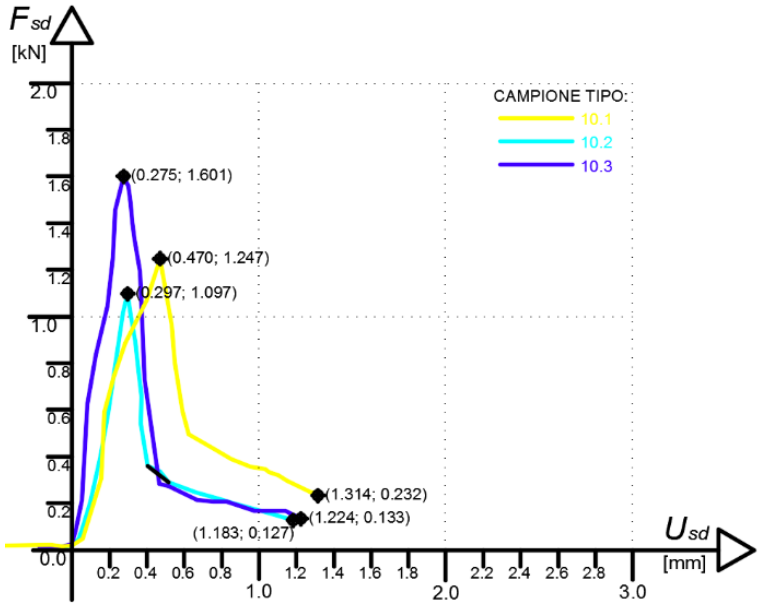


Figura 20:Prova a flessione su campione 10 – $(A/C)_{eff}$=21.5% - %F=0.5%

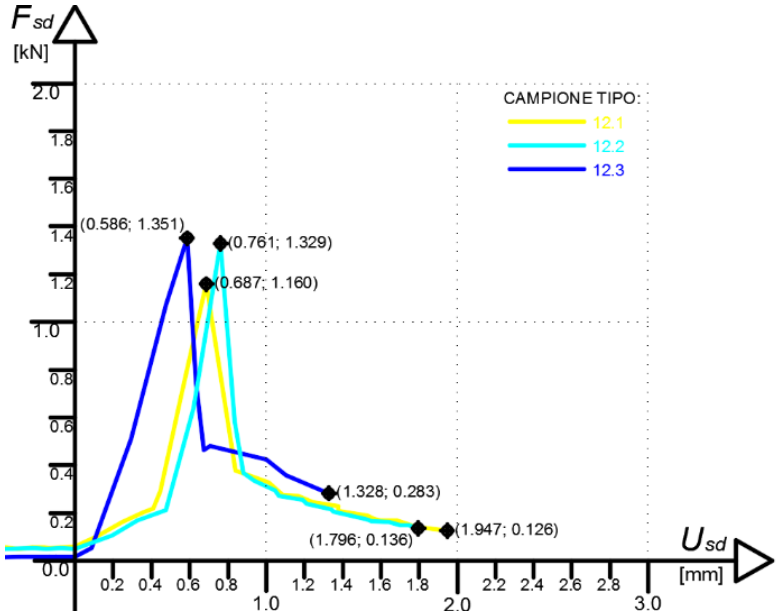


Figura 21:Prova a flessione su campione 12 – $(A/C)_{eff}$=21.5% - %F=0.75%

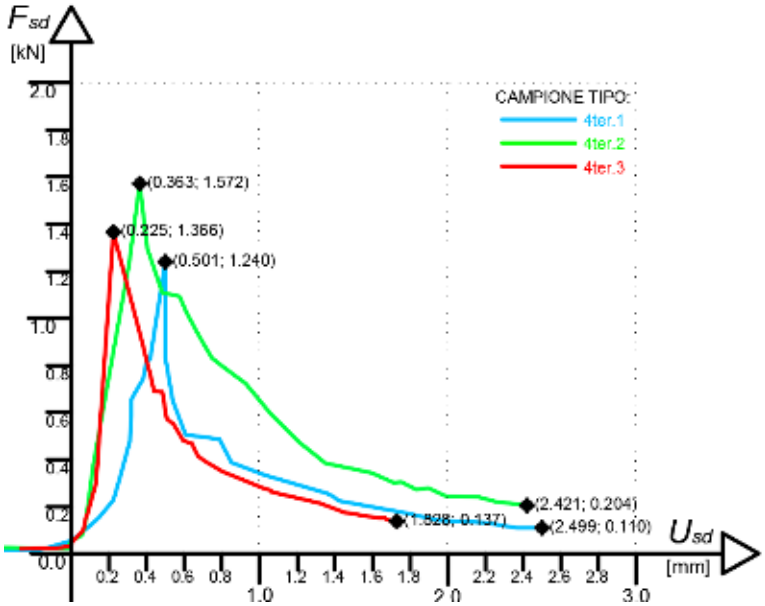


Figura 22:Prova a flessione su campione 4ter – $(A/C)_{eff}$=21.5% - %F=1.0%

Figura23:Effetto di cucitura della lesione durante la prova di rottura a flessione

La presenza delle fibre ha reso difficoltosa la separazione delle due metà del provino al termine della prova (Figura 24), richiedendo necessariamente in alcuni casi il taglio con cesoie delle fibre stesse.

Figura 24:Effetto di cucitura della lesione dopo la prova di rottura a flessione

Si osserva infine che per i provini 4ter.1 e 4ter.2 la prova si è conclusa per il raggiungimento della posizione limite della dima di carico della pressa.

5. INTERPRETAZIONE CRITICA DEI RISULTATI

5.1 Acqua di imbibizione della fibra di juta

La prova ha evidenziato l'elevato potere assorbente delle fibre naturali grezze di juta aventi lunghezze medie variabili fra 5 e 15 mm. Dalla prova si evidenzia che dopo circa 30 minuti la juta imbibisce completamente, incrementando il suo peso di circa il 188%. Al termine della prova non sono stati condotti studi per valutare l'instabilità dimensionale delle fibre, detta "swelling", o prove meccaniche sulle singole fibre imbibite di acqua.

5.2 Lavorabilità e consistenza dell'impasto

È possibile rappresentare l'andamento dello spandimento in funzione dei rapporti A/C, osservando una legge di variazione lineare tra i due parametri(Figura 25). Il valore limite trovato per il rapporto $(A/C)_{tot}$ è risultato pari al 21.5% (Figura 25). Per $(A/C)_{tot} = 22.0\%$, infatti, lo spandimento supera i limiti indicati nella norma UNI 998-1/2.

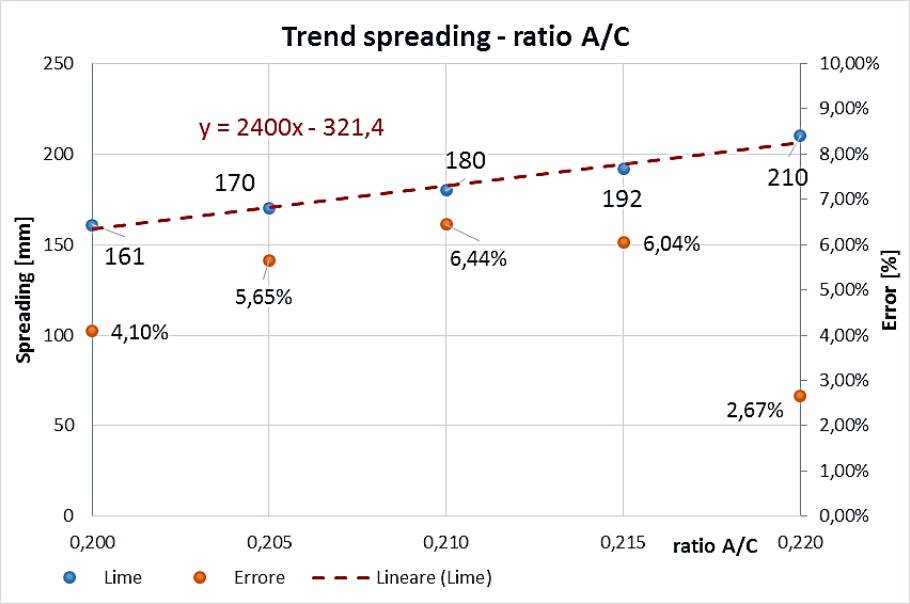


Figura 25: Trend tra la consistenza ed il rapporto A/C della malta priva di fibre di rinforzo

Rispetto all'inviluppo lineare, il massimo errore e_{max} che si riscontra è in valore assoluto pari al 6.04%, mentre l'errore medio e_{med} è uguale al 4.98%. Analizzando i dati delle prove di lavorabilità con tavola a scosse, si osserva, com'era naturale aspettarsi, una relazione di diretta proporzionalità tra la percentuale di acqua $(A/C)_{eff}$ impiegata e la percentuale di fibra %F (Figura 26). Fissando il valore %F = 1.0% si osserva un andamento pressoché lineare tra il rapporto $(A/C)_{eff}$ e lo spandimento, con un errore medio e_{med} = 0.05% ed un errore massimo e_{max}=1.79%, entrambi considerati in valore assoluto.

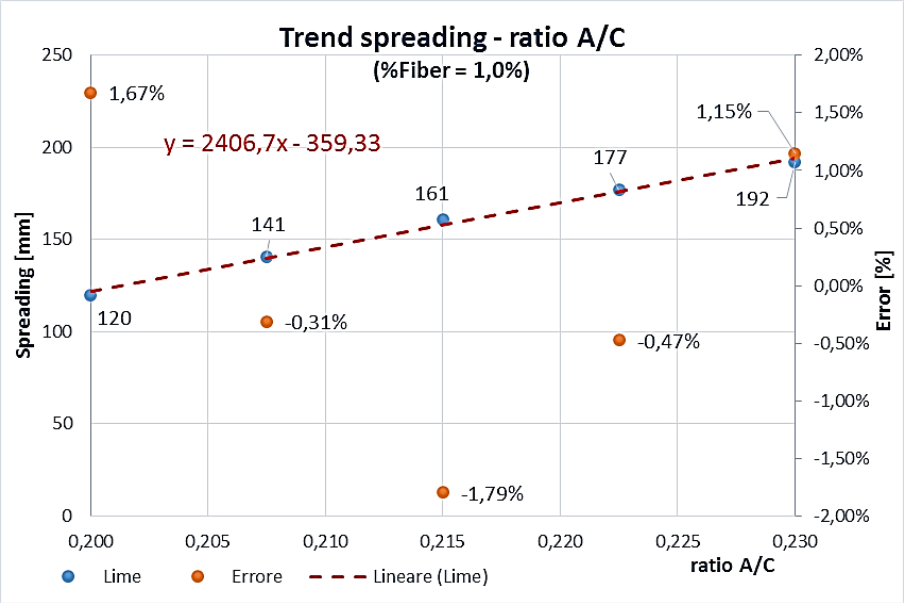


Figura 26: Trend tra la consistenza ed il rapporto A/Ccon percentuale di fibre (%F) =1.0%

Assumendo costante il rapporto $(A/C)_{eff}$ = 21.5%, l'inviluppo lineare dei dati tra lo spandimento e le percentuali di fibre %F si presenta linearmente decrescente (Figura 27), con errore medio in valore assoluto e_{med} = 0.14% ed errore massimo in valore assoluto e_{max}=5.74%.

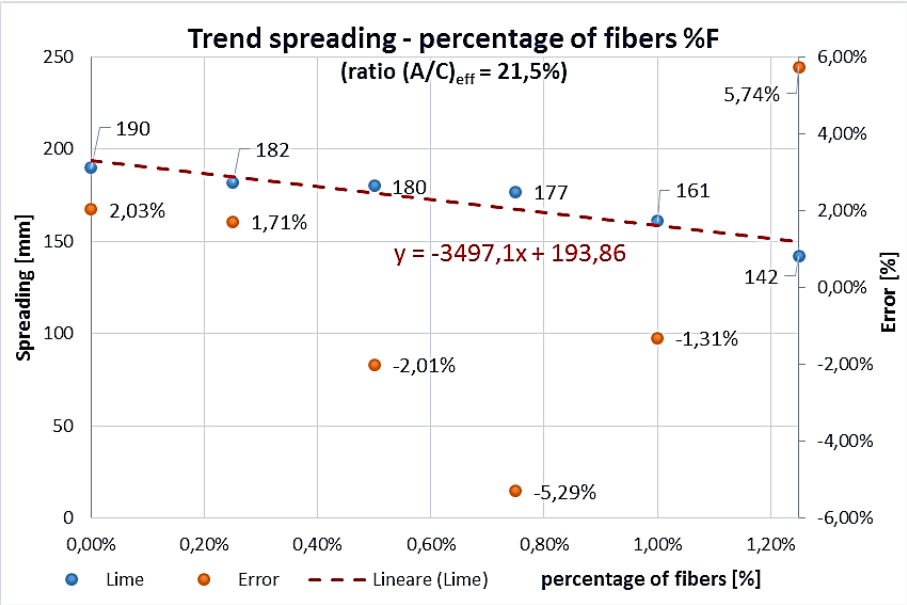


Figura 27:Andamento tra lo spandimento e la percentuale di fibre con rapporto $(A/C)_{eff}$=21.5%

4.2 Risultati delle prove di rottura a flessione

Analizzando i dati delle prove di rottura a flessione, all'aumentare della percentuale di fibre, si osserva una riduzione media della forza di collasso dei provini di circa il 10.14% ed un decremento massimo del 15.7% riscontrato nel caso del provino 12. Effettuando un inviluppo lineare (Figura 28) si osserva,in valore assoluto,un errore medio percentuale e_{med}pari allo 0.01% ed un errore massimo e_{max}=21.4%.

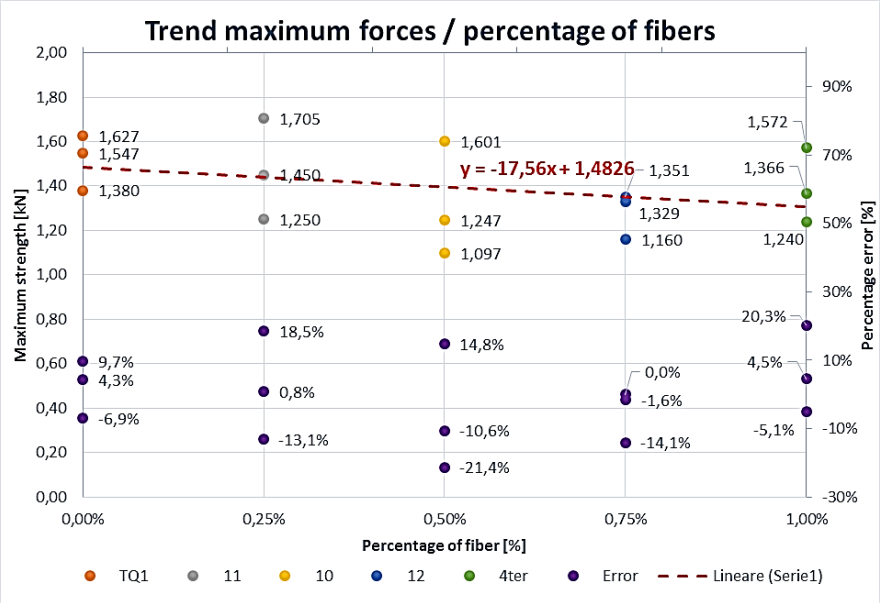


Figura 28:Andamento tra la forza di rottura a flessione e la percentuale di fibre

Analizzando tali dati dal punto di vista statistico (Tabella 10), sono state ricavate per le diverse classi di provini fibro-rinforzati analizzati le distribuzioni normali illustrate in Figura 29, dalla quale si evince che i provini con %F=0.75% forniscono i risultati più affidabili.

Massima forza applicata [kN] – Percentuale di fibre					
	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%	1,00%
max	1,627	1,705	1,601	1,351	1,572
intermedio	1,547	1,45	1,247	1,329	1,366
min	1,38	1,25	1,097	1,16	1,24
Valore medio	1,52	1,47	1,315	1,28	1,39

Deviazione standard					
med-max	7,71%	16,73%	20,22%	5,02%	12,68%
med-min	9,76%	15,44%	15,41%	8,49%	10,80%
dev. Standard	12,60%	22,81%	25,88%	10,45%	16,76%

Tabella 10:Parametri per l'analisi della distribuzione statistica dei dati

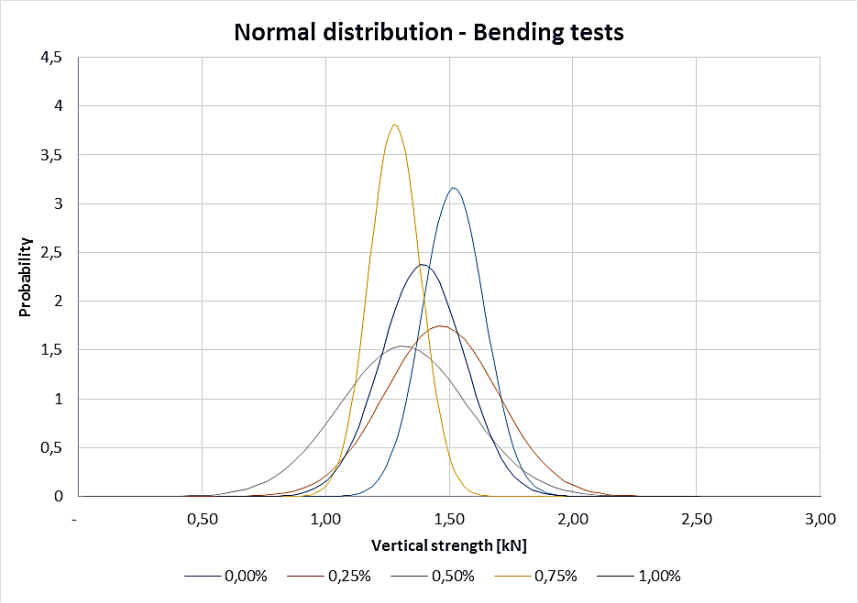


Figura 29:Distribuzione normale gaussiana dei provini testati

Analizzando i dati relativi allo spostamento ultimo dei provini, si osserva in primo luogo una variazione del comportamento meccanico del materiale, che da fragile diventa duttile. La presenza delle fibre al suo interno attiva,infatti, degli effetti di cucitura della matrice, incrementando la deformabilità del sistema. Si osserva inoltre, un incremento di spostamento verticale medio a rottura del 14.8%, con incremento medio massimo del 66.9% (provino 4ter). Effettuando l'inviluppo lineare dei dati (Figura 30), si ottiene in valore assoluto un errore medio percentuale e_{med} = 0.35%, a fronte di un valore massimo e_{max}=31.3%.

Non è stato possibile infine confrontare i dati dei provini fibro-rinforzati con quelli di sola malta, date le differenti tipologie di rotture osservate.

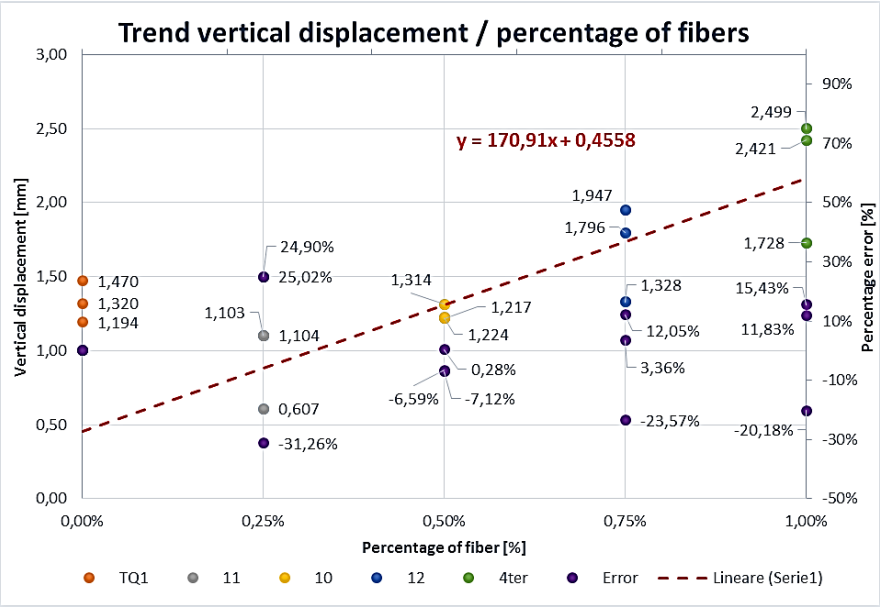


Figura 30:Andamento tra gli spostamenti verticali e le percentuali di fibre

6. CONCLUSIONI

Con riferimento alla caratterizzazione fisica delle malte investigate, dalle prove eseguite si evince la natura fortemente igroscopica delle fibre naturali. Come evidenziato, le fibre di juta, ridotte a fibre medie con lunghezza non superiore a 15mm, assorbono per imbibizione completa acqua avente peso circa tre volte il loro peso originario. La malta di calce idrata Geocalce® Kerakoll M15 usata nelle prove presenta una limitazione di impiego per un rapporto $(A/C)_{eff}$ = 21.5%. Oltre tale valore, essa perde le caratteristiche per impieghi strutturali e si comporta come una malta autolivellante, per la quale cambiano impiego e riferimenti normativi. Adottando come valore limite il predetto rapporto A/C ed impiegando una percentuale di fibre in peso pari all'1.0%, si è osservato che si attingono i limiti di lavorabilità della malta. Analogamente, fissata la quantità di acqua da impiegare nel rispetto del rapporto A/C=21.5% e facendo variare la percentuale delle fibre, si è osservata l'influenza diretta delle fibre stesse sulla lavorabilità e posa in opera della malta rinforzata.

Per quanto concerne invece la caratterizzazione meccanica delle malte, le prove hanno previsto il confezionamento di provini standard 40x40x160mm con $(A/C)_{eff}$ = 21.5% e percentuali in peso di fibra variabile fra lo 0.25 e l'1.0%. Sono stati inoltre preparati, a scopo di confronto con i predetti provini, anche campioni di malta non rinforzati con fibre. Dal controllo dei campioni a seguito della stagionatura a 28 giorni, non si rilevano variazioni dimensionali dovute a fenomeni di ritiro della malta. Dai risultati ottenuti dalle prove a flessione non si evidenzia un miglioramento in termini di forza massima di rottura a flessione fra i provini di sola malta e quelli rinforzati con juta. Osserviamo però che, rispetto alle indicazioni del produttore, si è reso necessario aumentare il contenuto di acqua da inserire nella miscela calce-fibre vegetali per far fronte all'assorbimento iniziale richiesto dalle fibre. Si osserva, infatti, una riduzione media del 10.1% della forza di collasso a flessione, a fronte però di una modifica nel comportamento di collasso, che da fragile diventa duttile, e di un sensibile miglioramento degli spostamenti ultimi. In assenza di fibre il campione presenta una rottura tipica delle matrici cementizie, con l'apertura di una lesione in mezzeria che di fatto comporta il collasso del campione.La presenza delle fibre attiva, dopo l'apertura della prima lesione, un effetto di cucitura. Le fibre, poste a ridosso della lesione ed ancorate nella matrice di calce, lavorano a trazione contribuendo ad escursioni significative in campo plastico, con incrementi medio e massimo dello spostamento ultimo rispettivamente del 14.8% e del 66.9%.

Bibliografia:

[1] UNI EN 998-1. Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni. 2010
[2] UNI EN 998-2. Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura. 2016
[3] UNI EN 196-1.Metodi di prova dei cementi - Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche. 2005
[4] UNI EN 1015-3.Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse). 2007
[5] UNI EN 1350-1-1. Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco. 2009.
[6] UNI EN 1015-11. Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita. 2007