



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**Studio di sistemi di rinforzo innovativi
FRCM con matrice ibrida polimero-cementizia.**

**Study of innovative FRCM reinforcing systems
with hybrid polymer–cement based matrix.**

Relatore:
Prof. ssa Valeria Corinaldesi

Tesi di:
Paola Corallini

Correlatori:
Ing. Jacopo Donnini
Ing. Francesca Luzi

A.A. 2021/2022

Indice

Introduzione	6
Capitolo 1	
FRCM(Fiber Reinforced Cementitious Matrix)	7
1.1 Definizione e cenni storici.....	7
1.2 Composizione	8
1.2.1 La matrice	8
1.2.2 Le fibre	8
1.3 Comportamento meccanico dei sistemi FRCM.....	12
1.4 Classificazione.....	17
1.5 Applicazioni	21
1.5.1 Applicazioni su strutture in muratura	21
1.5.2 Applicazioni su strutture in c.a.	26
Capitolo 2	
Matrice polimero-cementizia utilizzata nelle prove	33
2.1 Materiali utilizzati.....	35
2.2 Mix design dei provini.....	40
2.3 Preparazione dei provini.....	43
2.3.1 Provini FRCM	44
2.3.2 Provini 4x4x16 cm ³	47
2.4 Catalogazione dei provini.....	49
2.5 Prove.....	56
2.5.1 Prove di spandimento	56
2.5.2 Prove di flessione	58
2.5.3 Prove di compressione.....	61
2.5.4 Prove di pundit	62
Capitolo 3	
Risultati sperimentali	64
3.1 Risultati prova di spandimento	64
3.1.1 Prodotto commerciale di riferimento.....	64
3.1.2 Malta cementizia con emulsioni di lattice polimerico.....	66
3.2 Risultati prove di flessione provini 4x4x16 cm ³	69

3.2.1	Provini 4x4x16 cm ³ prodotto commerciale di riferimento.....	71
3.2.2	Riepilogo dei risultati	74
3.2.3	Provini 4x4x16 cm ³ matrice cementizia con diverse percentuali di lattice...	76
3.2.4	Risultati a 7 giorni	76
3.2.5	Risultati a 28 giorni	81
3.3	Risultati prova a flessione sui provini FRCM	88
3.3.1	Provini FRCM matrice cementizia con diverse percentuali di lattice e con rete di basalto.....	89
3.3.2	Riepilogo risultati	98
3.4	Risultati prova a compressione.....	104
3.4.1	Provini 4x4x16 cm ³ prodotto commerciale di riferimento.....	106
3.4.2	Riepilogo risultati	109
3.4.3	Provini 4x4x16 cm ³ matrice cementizia con diverse percentuali di lattice.	111
3.4.4	Risultati a 7 giorni	111
3.4.5	Risultati a 28 giorni	119
3.5	Risultati prova di Pundit.....	129
3.5.1	Riepilogo risultati	131
	Conclusioni.....	133
	Bibliografia e sitografia.....	136
	Elenco delle tabelle.....	138
	Elenco delle figure.....	139

Introduzione

Nel presente lavoro di tesi è stato affrontato lo studio di una matrice ibrida polimero-cementizia utilizzata per sistemi di rinforzo FRCM(Fiber Reinforced Cementitious Matrix) atti alla conservazione del patrimonio storico-artistico italiano che in buona parte è stato realizzato in muratura.

L'impiego dei sistemi di rinforzo va a colmare la fragilità del nostro patrimonio edilizio e monumentale con lo scopo di poterlo tramandare alle generazioni future. L'adeguamento sismico e il risanamento delle strutture in muratura tramite sistemi fibrorinforzati risulta di grande interesse. Si è passati dall'utilizzo di materiali come gli FRP(Fiber Reinforced Polymers) agli FRCM ed infine allo studio di matrici innovative contenenti sia una parte organica che una inorganica.

Nella sperimentazione presentata di seguito si noti l'impiego di matrici con diverse percentuali di lattici polimerici commerciali e l'applicazione di fibre di rinforzo in basalto. Sono state effettuate prove di flessione sul composito e prove di compressione e flessione sulla matrice. Infine, tramite i risultati ottenuti in seguito alle prove sperimentali, è stata valutata la risposta meccanica di ognuno di essi e confrontate tra loro.

Capitolo 1

FRCM(Fiber Reinforced Cementitious Matrix)

1.1 Definizione e cenni storici

Gli FRCM sono materiali compositi a matrice fragile inorganica contenente pasta cementizia e rinforzo fibroso continuo.

L'uso di elementi resistenti in una matrice cementizia risale al 1840 quando Joseph- Louis Lambot, fonte del crescente interesse per il cemento armato, propose di utilizzare fibre di ferro immerse in una matrice di cemento per rinforzare scafi di barche, serbatoi d'acqua, ecc. Successivamente questa idea fu ripresa da Pierluigi Nervi con l'introduzione del ferrocemento (brevetto registrato nel 1943). Il ferrocemento era costituito da strati di reti in ferro con piccolo diametro sulle quali veniva applicato un sottile strato di cemento, la combinazione di questi materiali garantiva duttilità e resistenza alla fessurazione.

La tecnologia dei materiali compositi ha avuto un progressivo sviluppo negli ultimi decenni, basato sulla sperimentazione di diversi conglomerati uniti a materiali polimerici sotto diverse forme e tipologie.

1.2 Composizione

Gli FRCM sono composti da una matrice inorganica a base di cemento e un rinforzo costituito da fibre continue.

1.2.1 La matrice

La matrice degli FRCM è inorganica fragile (BMC- Brittle Matrix Composites) a base di cemento Portland con l'aggiunta di fumo di silice o cenere volante e una frazione organica massima del 5% con uno spessore intorno ai 10 mm. Ha un ruolo fondamentale nella distribuzione delle tensioni e, un ruolo secondario nella tenuta del carico, svolge altri compiti come la protezione delle fibre dagli agenti atmosferici.

Conferisce e mantiene un adeguato livello di adesione tra l'elemento rinforzato e le fibre, in modo tale da resistere alle sollecitazioni di taglio nell'interfaccia matrice-fibra.

1.2.2 Le fibre

Le fibre utilizzate per la tipologia FRCM, sono caratterizzate da fibre lunghe organizzate in un tessuto bidirezionale composto da trama e ordito. Le fibre lunghe vengono impiegate nel campo del rinforzo strutturale per la necessità di avere la massima risposta alle sollecitazioni seconde direzioni

preferenziali, con la possibilità di sovrapporre più strati di tessuto nel caso si renda necessario per il dimensionamento del rinforzo. Le fibre lunghe conferiscono al composito un comportamento anisotropo. Le proprietà meccaniche delle fibre hanno una grande influenza sulle caratteristiche del sistema FRCM ed hanno il compito di assorbire le tensioni di trazione lungo l'asse di sforzo, per questa ragione le fibre sono disposte all'interno della matrice parallelamente alle tensioni. Per garantire le prestazioni del composito, le fibre sono caratterizzate da un'alta tenacità, un ottimo allungamento a rottura ed un modulo elastico molto più alto rispetto a quello della matrice cementizia. Tra le qualità di queste fibre vanno evidenziate la buona e costante capacità adesiva tra il rinforzo e la matrice e il ridotto rilassamento sotto carichi permanenti.

Il parametro principale che definisce le caratteristiche di un rinforzo fibroso è il modulo elastico; infatti, più tale valore è elevato, maggiore sarà il contributo irrigidente che il rinforzo potrà fornire all'elemento strutturale sul quale è applicato. Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche.

Le tipologie di fibre che compongono gli FRCM sono prevalentemente due:

- le fibre lunghe costituenti l'armatura, il cui dimensionamento si determina allo Stato Limite Ultimo considerando una modalità di crisi per scorrimento della fibra nella matrice cementizia (delaminazione intermedia);

- le fibre disperse nella matrice, impiego ristretto solo ad una frazione in peso dell'1% e una frazione in volume del 0,5-2,5% in base al tipo di fibra.

Essendo costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono descritte in seguito e riportate in Figura 1:

- filamento (monofilament): elemento base con dimensioni di circa 10 μm di diametro;

- cavo di filatura (tow): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;

- filo o filato (spun yarn): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;

- filo assemblato (roving): fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Combinando insieme alcune centinaia di tows o yarns si ottiene il tape, in cui i tows o gli yarns possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto. Oltre che in forma di yarn o di roving, le fibre sono anche disponibili commercialmente in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (fabric). In tal caso, la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (warp), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (weft).

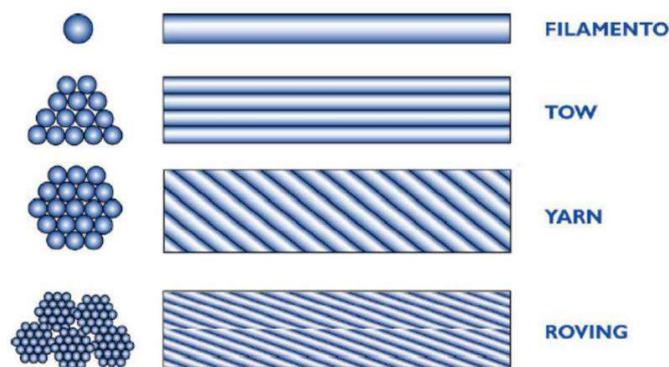


Figura 1 - Tipologia di fibre

1.3 Comportamento meccanico dei sistemi FRCM

Il comportamento meccanico di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica risulta molto complesso a causa della disomogeneità e dell'anisotropia del materiale. Anche i meccanismi di crisi sono molto complessi e ciò rende difficile sia la previsione delle tensioni di crisi, sia l'interpretazione dei risultati sperimentali. In letteratura, infatti, si evidenzia che le rotture generalmente riscontrate con sistemi FRCM avvengono per scorrimento del tessuto all'interno della matrice, all'interfaccia rinforzo-matrice e all'interfaccia matrice-supporto, generando così un comportamento duttile.

Analizzando il comportamento a trazione, si distinguono tre fasi:

- la prima in cui entrambe matrice e fibra contribuiscono alla resistenza, graficando le tensioni e le deformazioni, in questa fase può essere considerata come una sezione equivalente dove la fibra e la matrice sono perfettamente connesse.

- la seconda fase inizia con la formazione della prima fessura nella matrice e termina quando questa diventa completamente non reagente, in questa fase le fibre iniziano a scorrere all'interno della matrice. Questo particolare fenomeno è generato dalle fibre che sono raggruppate in piccoli

fasci separati l'uno dall'altro e ordinatamente distribuiti nello strato di matrice cementizia. Questa configurazione permette di trasferire le tensioni tra fibra e matrice lungo il perimetro del singolo fascio come avviene normalmente nel cemento armato tra armatura e calcestruzzo.

- alla fine della seconda fase, la matrice è completamente fessurata e l'unica parte che reagisce è la fibra, infatti la sezione post-elastica ha una pendenza paragonabile a quella della fibra mentre la deformazione ultima è funzione della massima resistenza della fibra e la sua area effettiva come mostrato in Figura 2.

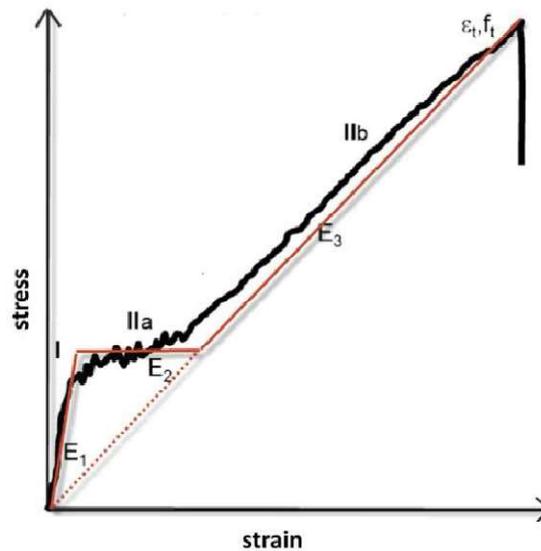


Figura 2 - Legame costitutivo tipo a trazione uniassiale di un provino di FRCM

Questa legge costitutiva, tuttavia, non riesce a rappresentare pienamente il comportamento dell'FRCM, il quale può arrivare a collasso a causa dell'istituzione di vari meccanismi, come mostrato nella Figura 2.

Gli FRCM sono caratterizzati da tessuti a rete che possono essere parzialmente impregnati o non con resine. In presenza di rete non rivestita la malta è in grado di impregnare parzialmente le fibre esterne del singolo fascio. La presenza di coating protettivo, applicato all'esterno del fascio, ne impedisce invece l'impregnazione da parte della malta. In entrambi i casi, comunque, è presente un nucleo di fibre non impregnate. Risulta pertanto importante investigare il legame di aderenza tra le fibre esterne del fascio e la malta e anche il legame di attrito tra le fibre che costituiscono il nucleo del fascio. Nella Figura 3 vengono rappresentate le tipiche modalità di rottura. La modalità di rottura A di solito si verifica quando una matrice forte è legata a un substrato debole. Il collasso secondo la modalità B di solito si svolge su superfici relativamente lisce e/o può essere associata a preparazione del supporto limitata o condizioni di stagionatura sfavorevoli. La modalità di rottura C è influenzata dalla quantità di malta presente nei vuoti tra fasci di fibre ed è spesso mostrato in sistemi FRCM comprendenti tessuti con una piccola spaziatura griglia/cavo. La modalità di rottura D di solito si verifica quando vengono utilizzate fasci di fibre asciutte (non

provvisi di rivestimento o impregnazione) o fibre lisce, caratterizzate da un legame/incastro relativamente debole con la matrice. Infine, i sistemi FRCM comprendenti tessuti relativamente deboli con spessori equivalenti ridotti possono mostrare la modalità di rottura E1 (generalmente quando i fasci di fibre sono dotati di pre-impregnazione) o modalità di rottura E2 (quando i tessuti usati sono asciutti).

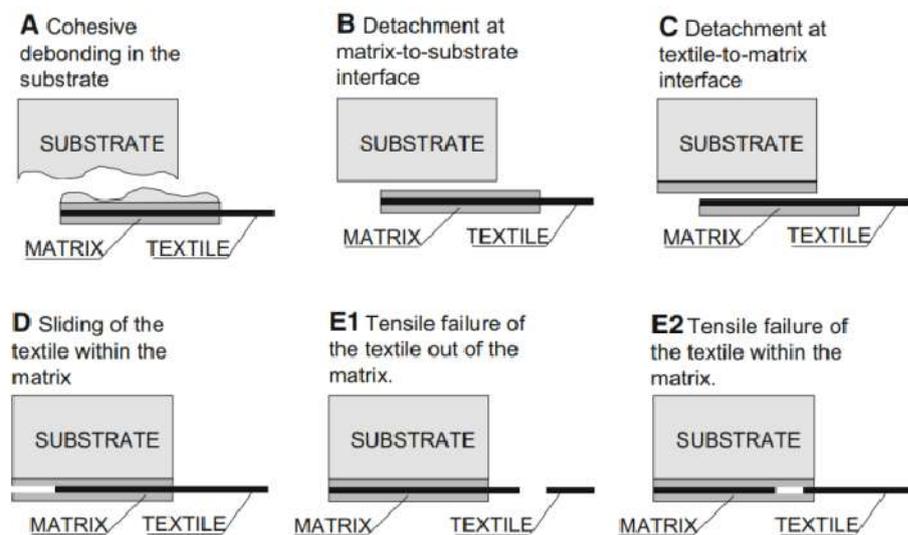


Figura 3 - Meccanismi di crisi

Si possono distinguere quindi due modalità di scorrimenti: tra le fibre e la matrice o nel nucleo di fibre non impregnate. Il primo è generalmente imputabile a una scarsa impregnazione da parte della matrice, delaminazione o incompatibilità chimica e può essere localizzato nelle aree fessurate. Il secondo invece è dovuto al comportamento “telescopico” del fascio di fibre. La diversità del meccanismo di scorrimento è dovuta al fatto

che le fibre esterne, sia in diretto contatto con la matrice che in contatto indiretto per la presenza di coating protettivo, sono saldamente legate alla matrice, mentre le fibre interne del nucleo non lo sono e dunque possono scorrere più facilmente a causa di un minore attrito tra le fibre.

Le modalità di crisi delle fibre nella porzione esterna del fascio avvengono per rottura dovuta al superamento della resistenza a trazione, mentre le fibre interne scorrono per effetto della forza di pull out. Il meccanismo è combinato nelle regioni intermedie. Il comportamento telescopico che si determina è influenzato pertanto dalla penetrabilità della matrice, la geometria del tessuto di rinforzo, la presenza di eventuali coating e le forze di attrito tra le fibre di ogni fascio. La perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo maggiore dissipazione energetica, manifestando un comportamento pseudo-duttile.

1.4 Classificazione

I materiali fibrorinforzati si possono classificare nel seguente modo:

- **Fiber Reinforced Concrete o FRC:** è un calcestruzzo fibrorinforzato, materiale composito, costituito da una matrice di calcestruzzo ordinario ed elementi fibrosi dispersi nella matrice. L'aggiunta di fibre in forma dispersa in un conglomerato cementizio ne modifica le proprietà meccaniche e fisiche e, in particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure.

- **Composite Reinforced Mortar o CRM:** sono fibrorinforzati a matrice inorganica realizzati mediante una rete preformata in composito (FRP) inserita in una malta ad uso strutturale di spessore compreso tra 30 e 50 mm e applicata sulla superficie dell'elemento strutturale in muratura da rinforzare.

- **Fiber Reinforced Polymer o FRP:** sono materiali utilizzabili per realizzare sistemi di rinforzo esterno (placcaggio) di strutture esistenti in muratura o in conglomerato cementizio armato, con modalità di posa rapide e meno invasive. Sono impiegati nelle situazioni in cui è necessario garantire elevate prestazioni meccaniche senza appesantire la struttura, infatti, si compongono di una matrice organica rinforzata mediante un

tessuto in fibra molto sottile, disponibile nel mercato sotto diverse forme e materiali come fibre aramidiche (AFRP), di vetro (GFRP) o di carbonio (CFRP), combinati in genere con adesivi strutturali polimerici.

Per superare i limiti del FRP, negli ultimi anni è stato introdotto il sistema FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). Fanno parte anch'essi della grande famiglia dei compositi e come tutti i compositi derivano dalla combinazione di una fase fibrosa resistente a trazione inglobata in una matrice in grado far aderire il sistema di rinforzo al supporto da consolidare. La differenza principale riguarda la sostituzione della resina polimerica con una matrice inorganica, generalmente a base minerale, cementizia o di calce, che pur avendo minor potere adesivo e un comportamento fragile, permette una permeabilità al vapore e una compatibilità fisico/chimica con supporti in muratura, oltre alla quasi totale reversibilità dell'intervento, caratteristiche fondamentali per edifici monumentali e soggetti a tutela.

Di seguito vengono descritti i quattro diversi approcci maggiormente utilizzati per l'applicazione di sistemi di rinforzo FRCM in edilizia:

- **Textile Reinforced Concrete (TRC):** questa tecnica prevede l'utilizzo di un tessuto come materiale di rinforzo e di una malta cementizia

a grana fine e matrice ad alta resistenza. È un tipo di rinforzo che può lavorare sia a flessione che a taglio.

- **Textile Reinforced Mortar (TRM):** questo sistema di rinforzo è simile al sistema TRC. I tessuti utilizzati sono in fibra di carbonio e il legante è una malta modificata con polimeri.

- **Mineral Based Composites (MBC):** questo sistema contiene tre componenti il legante cementizio, la rete e il primer. Il metodo prevede la preparazione della superficie di calcestruzzo al fine di migliorare l'adesione fra i materiali e l'applicazione del primer per impedire il trasporto di umidità dalla malta al substrato. Il primo strato di malta viene applicato direttamente sulla superficie di calcestruzzo impregnata, successivamente viene posata la rete seguita da un ulteriore strato di malta. Con il rinforzo MBC si possono effettuare sia rinforzi a taglio che a flessione.

La differenza fra FRCM e CRM è ad esempio nelle tipologie delle reti, che in FRCM sono costituite da fili di piccolo diametro posti a piccoli interassi in modo da costituire un tessuto in cui si riconosce trama e ordito, mentre le reti dei CRM sono preformate, cioè rigide, e con diametri e passi superiori.

L'innovazione dei materiali compositi fibro-rinforzati si basa sui concetti come l'adattabilità, l'affidabilità, la versatilità, la reversibilità, la leggerezza e la conservazione dell'identità architettonica. Infatti, questi materiali si adattano alla variabilità delle condizioni di esercizio e alla conformazione geometrica dell'edificio, riducono l'impatto degli interventi di rinforzo e mantengono inalterate le caratteristiche generali architettoniche del manufatto.

1.5 Applicazioni

Si riportano di seguito alcune applicazioni significative di rinforzo di strutture murarie e in c.a. mediante compositi FRCM utili per una maggiore compressione delle applicazioni e dei supporti più utilizzati.

1.5.1 Applicazioni su strutture in muratura

Nell'ambito di rinforzi di pannelli murari, la capacità portante a taglio e a pressoflessione di un maschio murario può essere incrementata applicando sulle superfici murarie il rinforzo con FRCM, che può prevedere la stesura del tessuto sia con continuità che per fasce (Figura 4).

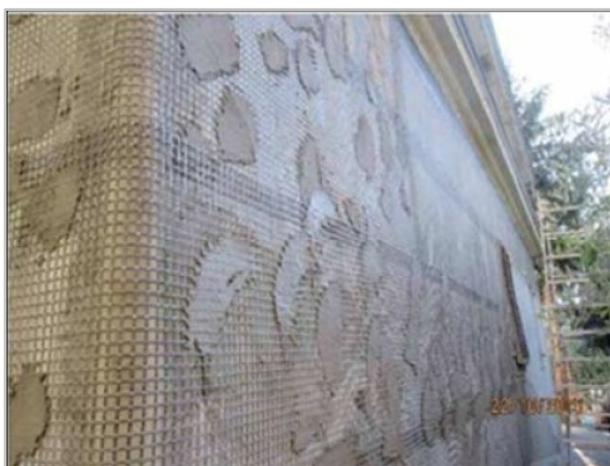


Figura 4 Rinforzo di pannelli murari con rete di basalto

Volte ed archi murari possono essere rinforzati applicando gli FRCM sia al loro estradosso che all'intradosso come riportato in Figura 5 e Figura 6.

In entrambi i casi l'obiettivo è quello di sopperire alla mancanza di resistenza a trazione dell'apparecchio murario contrastando l'apertura di cerniere.

Il rinforzo può essere disposto in modo continuo o per fasce, e può essere collegato alle murature d'ambito e alla volta stessa oltre che per adesione, con particolari connettori(Figura 7 e Figura 8).

Quando è possibile, tale tipo di rinforzo viene comunque in genere abbinato alla costruzione di frenelli in murature di mattoni e all'inserimento di catene in acciaio.



Figura 5 - Rinforzo estradossale di volta in foglio mediante placcaggio diffuso con rete in fibra di basalto installata con malta a base di calce idraulica.



Figura 6 - Applicazione di fasce di tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie.



Figura 7 - (a) Rinforzo intradossale di volta a padiglione mediante placcaggio di fasce di tessuto unidirezionale in fibra di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza installate con malta a base di calce idraulica naturale; (b) Rinforzo estradossale di volte a crociera mediante placcaggio di fasce di tessuto unidirezionale in fibra di

acciaio galvanizzato ad altissima resistenza installate con malta a base di calce idraulica.



Figura 8- Rinforzo intradossale di volta muraria con rete di fibra di vetro AR e malta

Per aumentare i moltiplicatori di collasso associati a cinematismi di ribaltamento di macroelementi murari è possibile realizzare una cordolatura esterna realizzata con fasce di tessuto che cingono l'edificio(Figura 9). È inoltre possibile realizzare dei cordoli sommitali in muratura armata inserendo nei giunti orizzontali di malta dei tessuti di rinforzo(Figura 10).



Figura 9 - Cordolature di piano realizzate con tessuti di PBO e acciaio.



Figura 10 - Cordolo sommitale realizzato con tessuti a base di reti di acciaio (a sx) e di vetro (a dx).

Il rinforzo di pilastri ed elementi sottoposti a compressione centrata può avvenire tramite fasciatura degli elementi; in presenza di piccole eccentricità permette di aumentare la duttilità dell'elemento ed aumentarne la capacità portante. Gli avvolgimenti possono essere realizzati in continuo o con fasce fra loro discontinue come in Figura 11.



Figura 11 - Confinamento di pilastro di muratura con rete di vetro AR

1.5.2 Applicazioni su strutture in c.a.

Il rinforzo a flessione per travi, pilastri e travetti di solaio, viene eseguito applicando strisce di tessuto al lembo teso dell'elemento di cui si vuole incrementare la capacità flessionale (Figura 12 e Figura 13). L'intervento consente inoltre la riduzione delle deformazioni sotto i carichi di servizio, anche se spesso in modo non sostanziale, e la limitazione degli stati fessurativi.



Figura 12 - Rinforzo flessionale di una trave e di un pilastro con rete di PBO.



Figura 13 - Rinforzo a flessione di trave mediante placcaggio con strisce di tessuto unidirezionale realizzate con rete di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza e malta cementizia.

Il rinforzo a taglio di travi e pilastri viene realizzato applicando strisce di tessuto alla superficie dell'elemento di cui si vuole incrementare la resistenza. Il rinforzo può essere continuo, applicando ogni striscia di tessuto in adiacenza alla precedente, o discontinuo, intervallando con spazi vuoti le strisce di rinforzo, Figura 14.

Inoltre, il rinforzo può essere realizzato avvolgendo completamente la sezione o con una configurazione ad U, eventualmente utilizzando connettori.



Figura 14 - Rinforzo a taglio di una trave con rete di PBO

Il confinamento di pilastri, come per le murature, avviene attraverso la fasciatura di elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità permette di aumentare la duttilità dell'elemento ed aumentarne la capacità portante. Gli avvolgimenti possono essere realizzati in continuo o con fasce fra loro discontinue(Figura 15 e 16).



Figura 15 - Cerchiatura di pilastro mediante tessuto unidirezionale realizzato con rete di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza e malta cementizia.



Figura 16 - Confinamento di pilastro con tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta.

Anche la duttilità dei nodi travi-pilastri può essere incrementata avvolgendo in continuo le estremità degli elementi che vi convergono come in Figura 17 e 18.



Figura 17 - Rinforzo di nodi travi-pilastro



Figura 18 - Rinforzo di nodi travi-pilastro con tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta



Figura 19 - Rinforzo a taglio di setti di calcestruzzo armato



Figura 20 - Rinforzo di un solaio (antisfondellamento)

Gli interventi antiribaltamento delle tamponature attraverso il collegamento delle tamponature al telaio strutturale può essere realizzato applicando la rete alla muratura di tamponamento e collegandola al telaio con dei connettori, oppure applicando strisce di tessuto a cavallo fra il telaio e la tamponatura(Figura 21 e 22).



Figura 21- Rinforzo antiribaltamento di pareti con un sistema FRCM, costituito da rete di fibra di vetro, malta, promotore di adesione e fiocchi di fibra di vetro.



Figura 22 - Presidio antiribaltamento delle tamponature con diversi tipi di reti e connettori

Applicazioni di rinforzo strutturale possono infine ottenersi anche su opere civili quali i ponti come si mostra in Figura 23.



Figura 23 - Rinforzo intradossale di un ponte ad archi in calcestruzzo con reti di PBO.

Capitolo 2

Matrice polimero-cementizia utilizzata nelle prove

A seguire verrà descritta l'attività sperimentale svolta nel Laboratorio dei Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) e nel Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematica dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Il lavoro svolto prevede una prima fase di scelta dei materiali e di definizione degli impasti, ed è stato eseguito tramite due metodologie differenti.

In una prima fase l'impiego del prodotto commerciale di riferimento come costante, con differenti quantità di matrice cementizia; solo successivamente l'impiego di due tipologie di emulsioni di lattice polimerico differenti incorporati in percentuali diverse, in una matrice cementizia di riferimento.

Sono stati creati diversi provini, adeguatamente misurati, classificati e portati a maturazione, funzionali all'esecuzione di una serie di prove

fisico-meccaniche. Sui vari tipi di provini sono state condotte prove di caratterizzazione meccanica previste dalla norma UNI EN 1015-11, oltre ad altre prove non esplicitamente previste dalla norma UNI, garantendo così una miglior precisione nella successiva fase di analisi ed elaborazione dei risultati.

2.1 Materiali utilizzati

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini.

- Il cemento utilizzato (Figura 24), CEM 42,5 R prodotto dalla ditta COLACEM S.p.A., è un cemento Portland di tipo II ad alta resistenza normalizzata, avente requisiti in accordo alla norma UNI EN 197-1. Il presente cemento contiene una percentuale di Clinker Portland compresa tra 80 e 94%, una percentuale di calcare (LL) compresa tra 6 e 20% ed eventuali costituenti secondari in quantità non superiore al 5%. Il calcare LL contiene un tenore di carbonio organico totale (TOC) $\leq 0,20\%$.



Figura 24 - CEM II 42,5 R, COLACEM S.p.A.

- Il prodotto commerciale di riferimento è una malta bicomponente a base di leganti cementizi, inerti selezionati a grana fine, additivi speciali e polimeri sintetici in dispersione acquosa.

Il prodotto in commercio viene fornito in due componenti separati e pre-dosati che devono essere miscelati, senza aggiungere acqua o altri ingredienti. Questa malta si applica con la spatola direttamente sulle superfici pulite e si possono eseguire rasature anche di 2 mm di spessore con una singola applicazione di prodotto.

Grazie all'elevato contenuto di resine sintetiche presenti, lo strato superficiale indurito non subisce l'aggressione chimica di sali disgelanti, solfati, cloruri e anidride carbonica. L'adesione di questo materiale risulta compatibile con tutte le superfici in calcestruzzo, muratura, ceramica e marmo, purché solide ed adeguatamente pulite.

Possiede un elevato valore di traspirabilità grazie agli ottimi valori di permeabilità al vapore acqueo e mantiene una notevole flessibilità in tutte le condizioni ambientali registrando ottimi valori di crack-bridging statico e dinamico.

- La calce NHL 3,5 è una Calce Idraulica Naturale Pura di colore bianco, prodotta mediante l'impiego di calcari silicei selezionati e

priva di materiali pozzolanici, scorie d'altoforno, ceneri volanti, conforme alla Norma UNI EN 459-1.

- Il Carbonato di calcio (CaCO_3), inerte di granulometria $400\ \mu$ e $600\ \mu$ è un prodotto proveniente dal processo di lavorazione di inerti di natura alluvionale, mediante essiccazione, frantumazione e classificazione granulometrica effettuata con vagli dedicati.
- Le emulsioni di lattice polimerico utilizzati sono lattice adesivo a base di resine acriliche micronizzate in soluzione acquosa della Draco Collacem e un modificante a base di resine in dispersione acquosa di un copolimero stirolo butadiene della Latisin. Queste emulsioni presentano molti vantaggi nelle normali miscele di calcestruzzo e malta, selezionando il polimero appropriato e considerando i parametri di progettazione appropriati. Questi vantaggi riguarda la facilità di applicazione, il miglioramento della resistenza alla flessione, la riduzione della suscettibilità alle crepe e le prestazioni elevate di adesione sulla sottostruttura. Le emulsioni di lattice polimerico contengono particelle polimeriche molto piccole ($0,05\text{-}5\ \mu\text{m}$) che sono sospese in acqua. Il vantaggio più importante delle emulsioni di lattice polimerico rispetto alle polveri polimeriche è la loro facilità di applicazione,

essendo allo stato liquido, si disperdono facilmente in modo omogeneo negli impasti cementizi. Le emulsioni di lattice polimerico possono essere preparate come copolimeri di due monomeri con tecniche di polimerizzazione in emulsione e la stabilità dell'emulsione è mantenuta da un emulsionante.

- Il sistema di rinforzo Glasstex Struktura BA 420 (Figura 26), è una rete strutturale biassiale bilanciata in fibra di basalto e acciaio apprettata con un coating a base di poliestere alcali resistente, prodotto adatto per il rinforzo e consolidamento strutturale di volte e murature. Le fibre di basalto sono fibre inorganiche di origine naturale, quindi eco-sostenibili. Presentano proprietà meccaniche costanti anche a basse temperature e buona resistenza alla corrosione e agli acidi. Hanno elevata resistenza al taglio, all'impatto e all'abrasione dovuto al basalto in fibre e ai microfilati di acciaio Inox ed eccellenti prestazioni meccaniche per il trattamento con resina a base acquosa. In Figura 25 si riportano le caratteristiche geometriche.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
PESO TESSUTO APPRETTATO	420 g/m ²	+/- 5 %	EN 12127:1997
PESO TESSUTO GREGGIO	365 g/m ²	+/- 5 %	EN 12127:1997
SPESSORE MEDIO TESSUTO APPRETTATO	1,15 mm	-	-
COLORE	BRONZO	-	-
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	< 5 %	-	-
NUMERO FILI IN ORDITO	50	0,5	-
NUMERO FILI IN TRAMA	50	0,5	-
ALTEZZA ROTOLO	100 cm	-	-
LUNGHEZZA ROTOLO	50 m	-	-
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito)	132 kN/m	-	-
RESISTENZA A TRAZIONE (trama)	120 kN/m	-	-
PESO DEL ROTOLO	10,5 Kg	-	-

Figura 25 - Caratteristiche geometriche della rete in fibra di basalto

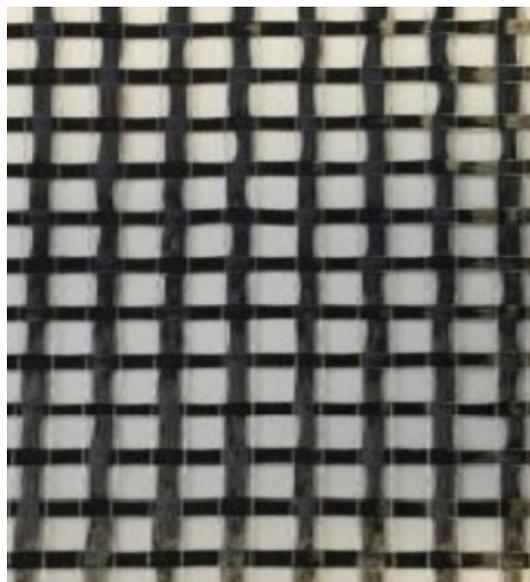


Figura 26 – Rete in basalto

2.2 Mix design dei provini

Dopo la definizione dei materiali costituenti la miscela, è necessario procedere alla determinazione delle combinazioni degli stessi, in termini di tipologia e proporzioni, in ciò che viene definito Mix design. Per Mix design si intende il “progetto della miscela”, più precisamente il “calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili”. Non esiste un codice di calcolo esatto per ottenere la miscela ottimale, dunque il mix-design si basa per lo più su correlazioni sperimentali. Nel caso in esame, come illustrato nella Tabella 1, inizialmente sono stati effettuati tre impasti, utilizzando il prodotto commerciale di riferimento denominato MP composto dalla componente A (parte inorganica), dalla componente B (parte polimerica) con rapporto costante 3:1; miscelato con differenti dosaggi di sabbia e cemento con un rapporto acqua/cemento di 0.42 e un rapporto sabbia/cemento 3:1.

Tuttavia, stante la difficoltà nella determinazione della composizione della malta bi componente e considerato il contenuto polimerico troppo elevato, nonché impattante dal punto di vista ambientale, si è optato per un differente approccio.

Le nuove miscele, riepilogate in Tabella 2, hanno previsto cinque diversi impasti, aventi stessa composizione ma diverso dosaggio di polimeri. Come esposto nel paragrafo precedente sono stati utilizzati due differenti emulsioni di lattice polimerico presenti in commercio, lattice adesivo a base di resine acriliche denominato con la sigla ACR e modificante a base di resine in dispersione acquosa di un copolimero Stirolo-Butadiene denominato nei provini con la sigla SB, rispettivamente con dosaggi 10, 20 e 30% in peso di cemento. Si noti che la quantità di acqua di impasto è stata calcolata tenendo conto del contenuto di acqua dell'emulsione di lattice, ovvero essendo la sua composizione costituita da metà polimero e metà di acqua, quindi considerando un rapporto acqua/cemento costante a 0,42, si è sottratto a quest'ultima metà del peso del lattice polimerico.

Infine, un provino non ha previsto nessun tipo di lattice polimerico nell'impasto, così da valutare il comportamento associabile alla sola matrice cementizia.

Si riportano in Tabella 1 e in Tabella 2 le caratteristiche degli impasti realizzati e i nomi identificati che vengono assegnati ad ogni singolo provino.

Tabella 1 – Mix design prodotto di riferimento commerciale

Materiali	MP_100		MP_80		MP_70	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
MP_componente A	100	5000	80	1800	70	1575
MP_componente B		1667		600		525
Sabbia			15	450	22,5	675
Cemento 42,5			5	150	7,5	225
Totale	100	6667	100	3000	100	3000
Acqua			42	63	42	94,5

Tabella 2 – Mix design provini con diversi dosaggi di emulsioni polimeriche

Materiali	RIF_0	ACR_10	ACR_20	ACR_30	SB_10	SB_20	SB_30
Calce NHL 3,5	120	120	120	120	120	120	120
Cemento 42,5	300	300	300	300	300	300	300
CaCO ₃ 400	480	480	480	480	480	480	480
CaCO ₃ 600	720	720	720	720	720	720	720
Acqua	288	262,8	237,6	212,4	262,8	237,6	212,4
Collacem (acrilico)	-	42	84	126	-	-	-
Latisint (stirolo- butadiene)	-	-	-	-	42	84	126

Parte solida	1620	1620	1620	1620	1620	1620	1620
Parte liquida	288,00	304,80	321,60	338,40	304,80	321,60	338,40
Rapporto liquido/solido	0,18	0,19	0,20	0,21	0,19	0,20	0,21
Rapporto liquido/legante	0,69	0,73	0,77	0,81	0,73	0,77	0,81
Rapporto acqua/legante	0,69	0,63	0,57	0,51	0,63	0,57	0,51
Rapporto lattice/legante	0,00	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30
Rapporto inerte/legante	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86

2.3 Preparazione dei provini

Il procedimento per la realizzazione di tutti i provini è comune e segue la stessa procedura, l'unica cosa che li differenzia come detto nel capitolo precedente è la combinazione dei diversi materiali componenti. Nel seguito si descrivono le operazioni per la preparazione del seguente numero di provini per ogni tipologia di impasto:

- 2 provini Fiber-Renforced Cement Matrix (FRCM)
- 3 provini parallelepipedi 4x4x16 cm³

Il numero dei provini confezionati è stato scelto col fine di ottenere risultati sperimentali significativi, che permettessero un confronto delle differenti proprietà sviluppate da ciascuno.

2.3.1 Provini FRCM

La prima fase consiste nel realizzare delle casseforme con dimensioni idonee e specifiche per le successive prove sperimentali che verranno eseguite. Avvalendosi di una tavola in legno, si procederà col fissaggio di diversi listelli dello stesso materiale (con spessore 10 mm e lunghezza 400 mm) in direzione parallela l'uno con l'altro, come in Figura 27. Successiva sarà la preparazione del rinforzo da introdurre nel provino. Le fibre di basalto utilizzate (Glasstex Struktura BA 420) sono fornite sottoforma di rotoli di lunghezze variabili. Dunque, è necessario tagliarle per poterle adattare alle caratteristiche dimensionali dei provini. In accordo a tutto ciò la dimensione in larghezza dei rinforzi è di tre yarn (all'incirca 6 cm) e in lunghezza 39 cm.



Figura 27 - Predisposizione delle casseformi per i provini.

Una volta predisposta la cassaforma, si procede con una leggera applicazione di disarmante per non danneggiare la superficie e di conseguenza il provino stesso durante la fase del disarmo. Come descritto nei capitoli precedenti, la matrice funge da involucro alle fibre, pertanto si cercherà di posizionarle in una zona intermedia. In relazione allo spessore di 10 mm, si predispose un primo strato di 0,5 mm di malta sulla quale verranno posizionate le fibre di basalto inizialmente preparate, e poi ricoperte da un ulteriore strato fino al raggiungimento dello spessore prefissato(Figura 28 e 29).





Figura 28 - Applicazione delle fibre di basalto nei provini in esame

Una volta eseguito il tutto, è necessario attendere il completamento della fase di presa e di indurimento dei provini. In genere il tempo di attesa è di tre o quattro giorni per poterli disarmare, rimuovendoli dalle casseformi. Prima di sottoporli alle prove sperimentali e valutare il loro comportamento in esercizio devono trascorrere 28 giorni dalla loro realizzazione o messa in opera.



Figura 29 – Provini tipo FRCM

2.3.2 Provini 4x4x16 cm³

Sono stati realizzati 3 provini per ogni tipo di impasto secondo le proporzioni indicate in Tabella 1 e in Tabella 2. In base alla procedura dopo aver pesato i vari componenti, si miscelano con un miscelatore elettrico per malte fino al raggiungimento di un impasto uniforme e omogeneo.

Dopodiché si esegue il getto all'interno degli appositi casseri (Figura 30) precedentemente rivestiti con disarmante, per facilitare la successiva scasseratura dei provini, rendendo la superficie liscia attraverso la rasatura ed eliminando i vuoti d'aria con la compattazione mediante tavola vibrante.



Figura 30 - Preparazione provini 4x4x16 cm³

Infine, si coprono i provini con uno strato di pellicola impermeabile in modo tale da limitare il fenomeno di essudazione dell'acqua come illustrato nella Figura 31.

Come già detto nel paragrafo precedente, anche questi provini possono essere scasserati dopo l'avvenuta maturazione e l'esecuzione delle prove meccaniche saranno effettuate a 7 e 28 giorni.

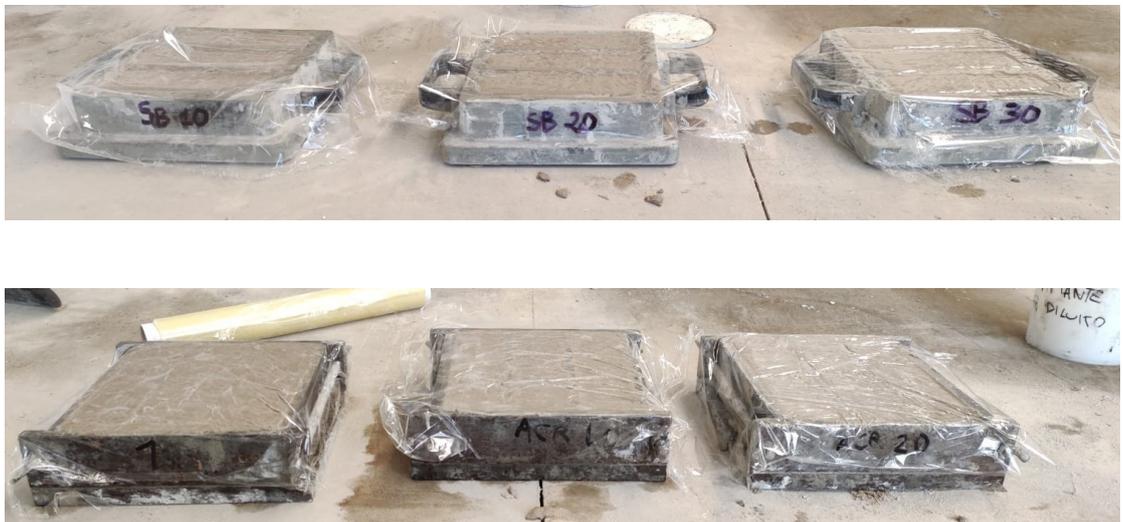


Figura 31 - Provini 4x4x16 cm³

2.4 Catalogazione dei provini

Una volta terminata la maturazione dei provini, quest'ultimi sono stati pesati al fine di sottoporli successivamente, alle prove meccaniche di flessione e compressione.

Dalle pesate effettuate, come si mostra nella Tabella 3 e in Figura 32, i provini dopo la maturazione avvenuta a 7 giorni hanno mostrato delle differenze, ovvero provini SB e ACR rispetto al provino di riferimento RIF_0, all'aumentare dell'aggiunta dell'emulsioni di lattice polimerico, sia con l'acrilico e sia con lo stirolo-butadiene, risultano una miscela più leggera.

Tabella 3 - Peso dei provini a 7 giorni

Denominazione	Peso [g]
RIF_0	540,49
SB_10	476,41
SB_20	433,22
SB_30	410,48
ACR_10	480,95
ACR_20	480,06
ACR_30	465,10

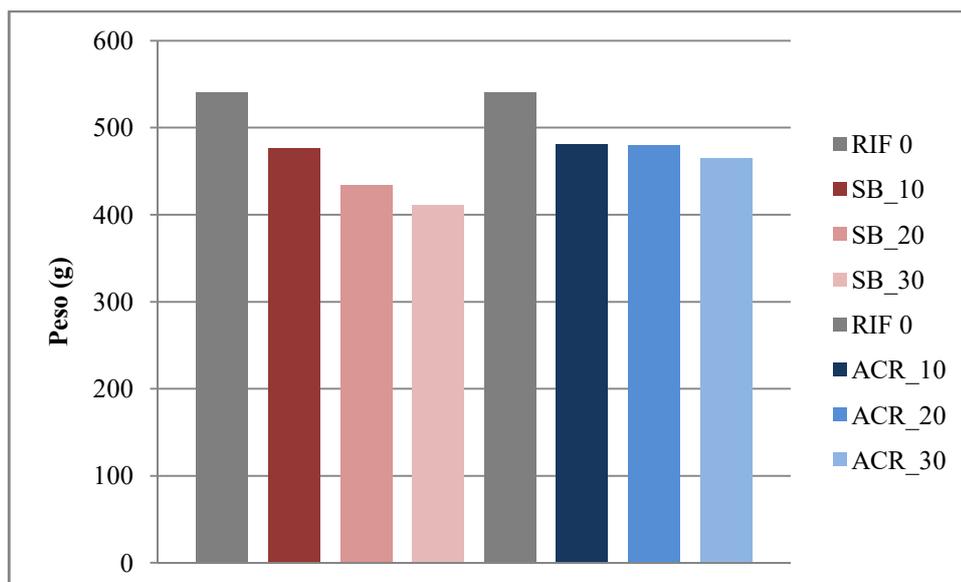


Figura 32-Peso dei provini maturati a 7 giorni

Un'ulteriore differenza è stata rilevata dopo la maturazione avvenuta a 28 giorni, dove entrambe le due tipologie di impasti hanno diminuito il loro peso rispetto all'impasto di riferimento di sola matrice inorganica.

Nei provini SB, illustrati nella Tabella 4 all'aumentare della percentuale del modificante stirol-butadiene fino al 30%, si ottiene una riduzione del peso di circa il 25%; mentre nei provini ACR, come si evince nella Tabella 5 e come rappresentato dal grafico in Figura 33, all'aumentare dell'aggiunta del lattice acrilico il peso risulta costante.

Tabella 4 - Peso dei provini RIF_0 e SB a 28 giorni

Denominazione	Peso [g]	Peso medio [g]	[%]	DevST	Cov (%)
RIF_0 A	523,82	525,54		1,72	0,33
RIF_0 B	527,26				
SB_10 A	466,24	468,26	10,90	2,02	0,43
SB_10 B	470,28				
SB_20 A	419,83	419,83	20,11		
SB_30 A	394,81	395,4	24,76	0,59	0,15
SB_30 B	395,99				

Tabella 5 - Peso dei provini RIF e ACR a 28 giorni

Denominazione	Peso [g]	Peso medio [g]	[%]	DevST	Cov (%)
RIF_0 A	523,82	525,54		1,72	0,33
RIF_0 B	527,26				
ACR_10 1	463,11	450,85	14,21	10,36	2,30
ACR_10 2	459,93				
ACR_10 A	441,10				
ACR_10 B	436,64	461,88	12,11	7,74	1,67
ACR_10 C	453,46				
ACR_20 1	465,64				
ACR_20 2	466,06	461,06	12,27	5,81	1,26
ACR_20 A	447,48				
ACR_20 B	460,67				
ACR_20 C	469,55	461,06	12,27	5,81	1,26
ACR_30 1	463,45				
ACR_30 2	464,98				
ACR_30 A	467,45	461,06	12,27	5,81	1,26
ACR_30 B	458,36				
ACR_30 C	451,07				

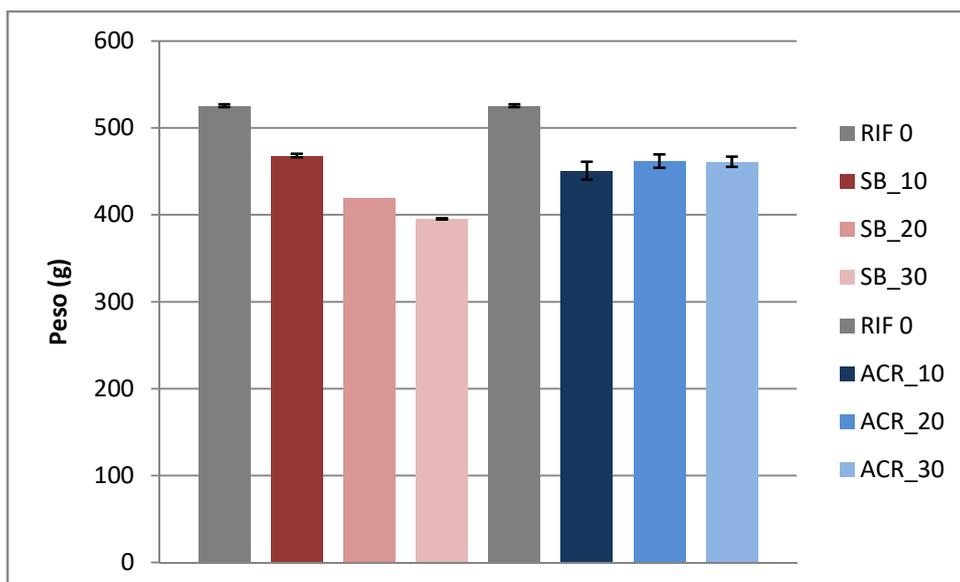
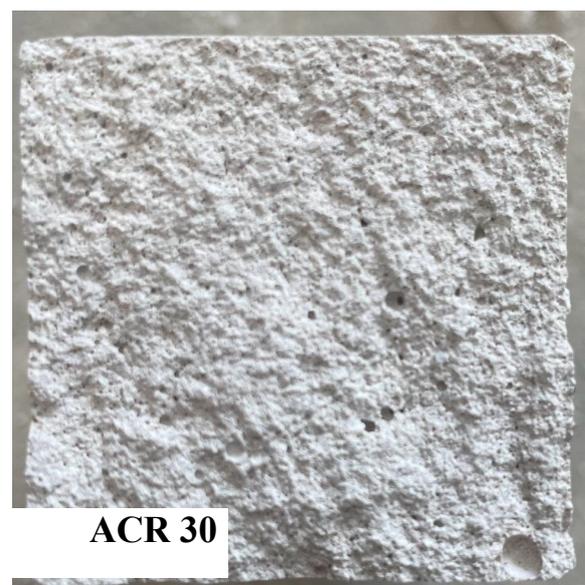
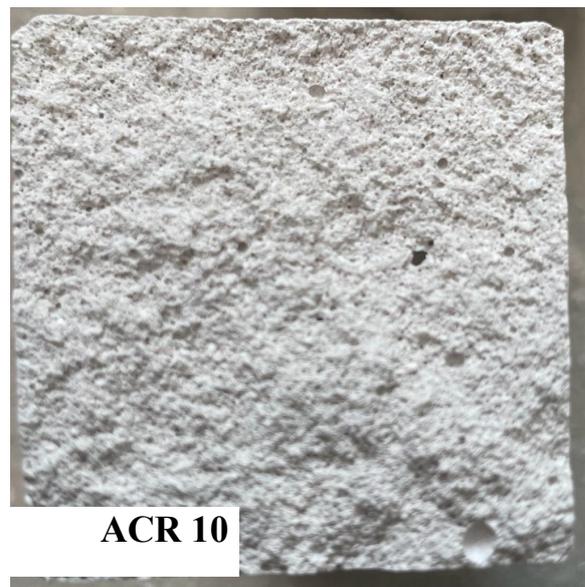


Figura 33-Peso dei provini maturati a 28 giorni (g) SB (sx) e ACR (dx)

La diminuzione di peso che si evince dai grafici, può essere attribuita a due fattori: il primo è l'effetto di trascinamento dell'aria dell'emulsione di lattice nell'impasto; Il secondo riconducibile all'aggiunta di polimero leggero .

Le emulsioni di lattice polimerico contengono particelle polimeriche molto piccole (0,05-5 μm) che sono sospese in acqua. Il vantaggio più importante delle emulsioni di lattice polimerico rispetto alle polveri polimeriche ridispersibili, è la loro facilità di applicazione. I lattici polimerici sono allo stato liquido e si disperdono facilmente in modo omogeneo negli impasti cementizi. Le emulsioni di lattice polimerico possono essere preparate come copolimeri di due monomeri con tecniche di polimerizzazione in emulsione e la stabilità dell'emulsione è mantenuta da

un emulsionante di origine anionica, cationica o non ionica. Sebbene gli emulsionanti siano utili per mantenere la stabilità della dispersione del polimero, possono comportare un effetto collaterale di un eccessivo assorbimento di aria.



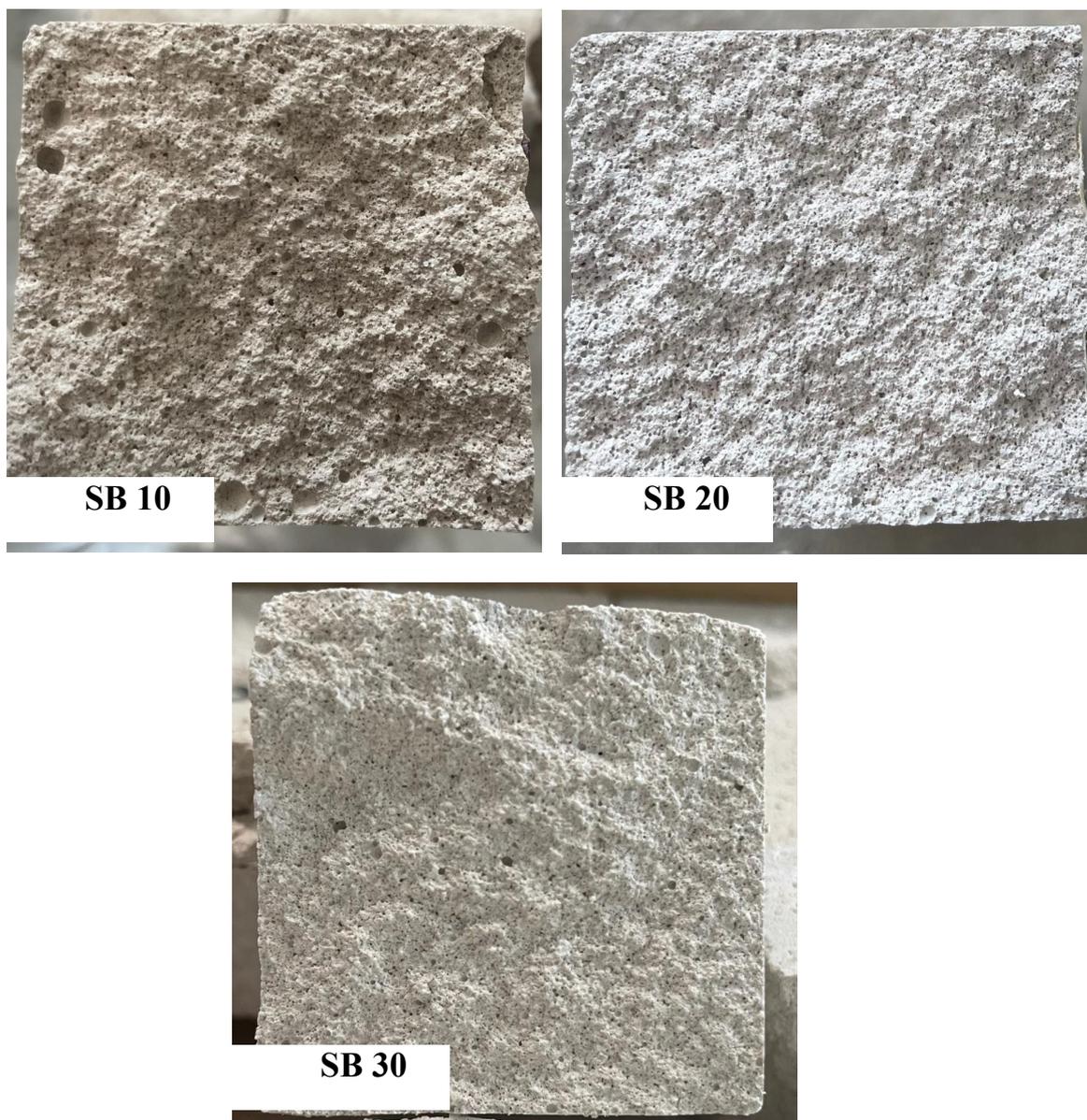


Figura 34 - Foto dei vari provini portati a rottura

Come si può vedere dalla Figura 34 notiamo un aumento della porosità negli impasti con l'aggiunta dell'emulsione polimerica rispetto al provino di riferimento composto dalla sola malta inorganica. Questo aumento della porosità è stato confermato anche dalla Prova di Pundit dove

il valore del modulo elastico dinamico è diminuito all'aumentare della percentuale del polimero.

2.5 Prove

Di seguito sono descritte la strumentazione e la modalità di esecuzione prove svolte.

2.5.1 Prove di spandimento

La prova fa riferimento alla norma UNI EN 12350:2019 e consiste nel valutare lo spandimento dei materiali fluidi.

Il test viene eseguito tramite le seguenti attrezzature:

- tavola a scosse, telaio in acciaio costituito da due parti, una fissa ed una oscillante;
- stampo a tronco di cono in acciaio inox, altezza 60 mm, diametro 70 e 100 mm. Lo spessore della parete dello stampo è di 2 mm ed è conforme alla norma UNI EN 1015-3 Metodi di prova per malte per opere murarie(Figura 35).

La procedura di prova viene eseguita su un campione di malta che, dopo la miscela, viene versata all'interno dello stampo troncoconico, precedentemente posizionato al centro della tavola a scosse. Dopo aver garantito il riempimento uniforme dello stampo, quest'ultimo viene sollevato lentamente in verticale facendo diffondere la malta sul disco mediante 15 vibrazioni a frequenza costante di circa un colpo per secondo.

Infine si misura il diametro in centimetri della malta in due direzioni perpendicolari tra loro utilizzando un calibro, calcolando la media delle due

misure. Il valore ottenuto è la stima della consistenza del campione di prova.

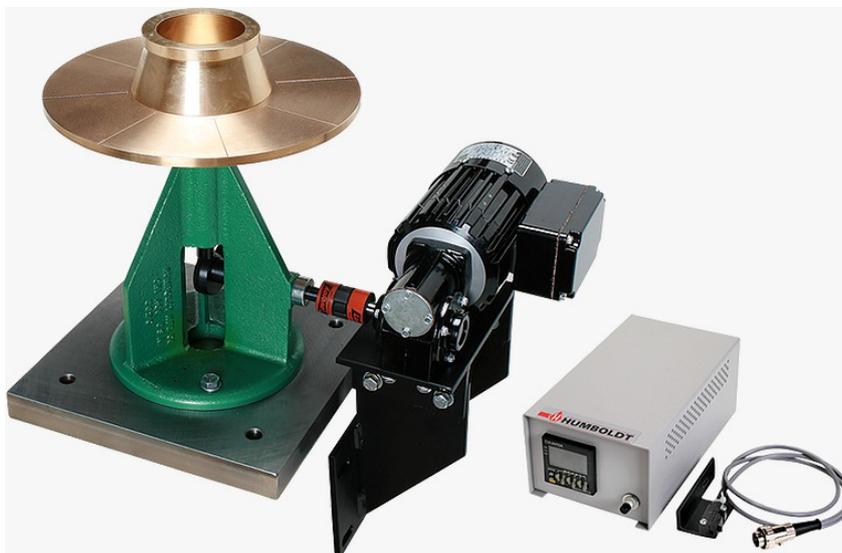


Figura 35 - Prova di Spandimento UNI EN 12350:2019

2.5.2 Prove di flessione

In accordo alla norma UNI EN 1015-11, i provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sono stati sottoposti a prova di flessione su tre punti utilizzando una pressa idraulica munita di cella di carico e collegata ad un terminale (Figura 36) presso il Laboratorio di Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell' Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Figura 36 - Pressa idraulica

La prova per la determinazione della resistenza a flessione consiste nel sottoporre il provino, appoggiato alle due estremità e disposto longitudinalmente, ad un carico concentrato applicato al centro della faccia

superiore del provino stesso e nel calcolare la forza necessaria per portarlo a rottura (Figura 37).



Figura 37 - Prova a Flessione provini 4x4x16 cm³

I provini 8x1x20 cm³ di tipo FRCM con rete di basalto sono stati sottoposti a prova di flessione su tre punti utilizzando la macchina Zwick/Roell Z050 (Figura 38) presso il Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Il setup di prova è costituito da una base in acciaio per appoggiare il provino su due punti, e un punzone centrale tramite il quale si esercita la pressione sulla faccia superiore del provino. La velocità di prova è stata

settata ad un valore costante pari a 1 mm/min. Durante il test, sono state misurate la forza applicata mediante apposito trasduttore e lo spostamento dell'elemento mobile.



Figura 38- Setup di prova a flessione provini 1x8x20 cm³

2.5.3 Prove di compressione

Sulle due estremità di ogni provino $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, precedentemente sottoposto a prova di flessione, in accordo alla norma UNI EN 1015-11, è stata eseguita una prova di compressione semplice mediante una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale (Figura 39), presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Figura 39 - Prova a compressione provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

2.5.4 Prove di Pundit

Le prove non distruttive con ultrasuoni (US) si basano sulla propagazione di onde elastiche all'interno del materiale. In questo modo è possibile avere una stima delle caratteristiche meccaniche della struttura da indagare poiché la velocità di propagazione delle onde in un materiale dipende dalla sua densità, dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson. Con l'applicazione di questa tecnica si possono ottenere informazioni sulle caratteristiche elasto-meccaniche del mezzo, ossia: il livello di omogeneità del materiale, la sua qualità ed eventuale grado di deterioramento, l'individuazione di "anomalie" quali vuoti o inclusioni.

Lo strumento utilizzato per le misure ultrasoniche è il PUNDIT (Portable Ultrasonic Not-Distrctive Digital indicatine Tester). Tale strumento è dotato di un trasduttore trasmittente, che trasmette l'impulso ultrasonico al materiale oggetto di studio e di uno ricevente, il quale capta l'impulso ultrasonico che ha attraversato il mezzo, trasformandolo in segnale elettrico(Figura 40).

La prova può essere effettuata per mezzo di tre tecniche differenti d'acquisizione dei dati:

- trasmissione diretta che consiste nell'esaminare l'elemento strutturale in tutto il suo spessore: i trasduttori sono posti sulle due superfici opposte dell'elemento.
- trasmissione semi-diretta, quando i trasduttori si posizionano, nel materiale da investigare, su due superfici adiacenti che formano tra loro un certo angolo α .
- trasmissione indiretta quando i trasduttori si posizionano sullo stesso piano d'appoggio.



Figura 40 - Prova di Pundit

Capitolo 3

Risultati sperimentali

3.1 Risultati prova di spandimento

3.1.1 Prodotto commerciale di riferimento

Nelle Figure 41 e Figura 42 si evincono i risultati della Prova di Spandimento del provino con il prodotto commerciale. Si è riscontrato che all'aumentare dell'aggiunta della matrice cementizia, ovvero sabbia e cemento, la lavorabilità rimane costante e risulta altamente fluido con uno spandimento di circa 19 cm.



Composizione impasto MP_80:

- 80 % Prodotto commerciale di riferimento
- 15 % Sabbia
- 5 % Cemento
- $a/c = 0.42$
- $D = 190 \text{ mm}$

Figura 41 - Prova di spandimento MP_80



Composizione impasto MP_70:

- 70 % Prodotto commerciale di riferimento
- 22.5 % Sabbia
- 7.5 % Cemento
- $a/c = 0.42$
- $D = 190 \text{ mm}$

Figura 42- Prova di spandimento MP_70

Questa eccessiva fluidità, deriva dal fatto che si ha una elevata presenza di polimero nell'impasto e questo risulta una nota negativa a discapito della manualità del prodotto, rispetto ad una tipica malta utilizzata nel sistema FRCM.

3.1.2 Malta cementizia con emulsioni di lattice polimerico

Tabella 6 - Risultati della Prova di Spandimento

Campione	Valore di diffusione del flusso D (mm)	Incremento della lavorabilità (%)
RIF 0	130	
SB_10	130	0,00
SB_20	153	17,69
SB_30	180	38,46
ACR_10	138	6,15
ACR_20	145	11,54
ACR_30	140	7,69



Figura 43 - Prova di spandimento RIF_0



Figura 44 - Prova di spandimento SB_10 (sx) e SB_20 (dx)

I risultati ottenuti dalla Prova di Spandimento hanno dimostrato che l'aggiunta progressiva di emulsioni di lattice nella malta cementizia a un rapporto a/c costante, ha generato un aumento dei valori di dispersione del flusso a diverse grandezze. Come illustrato nella Tabella 6, lo Stirolo-butadiene (SB) è risultato più efficace dell'acrilato (ACR) in termini di miglioramento della fluidità dell'impasto in quanto la malta cementizia preparata con diversi dosaggi di ACR è sempre risultata coesa e appiccicosa.



Figura 45- Prova di spandimento SB_30 (sx) e ACR_10 (dx)



Figura 46 - Prova di spandimento ACR_20 (sx) e ACR_30 (dx)

In conclusione l'efficacia dell'emulsione di lattice SB rispetto all'ACR sulla lavorabilità, può essere vista anche dalle fotografie di spandimento di flusso delle malte cementizie che incorporano il 10,20 e 30% (Figura 43-44-45-46).

3.2 Risultati prove di flessione provini 4x4x16 cm³

La resistenza a flessione è stata valutata sui provini prismatici di dimensioni 4x4x16 cm³ e sui provini di tipo FRCM con rete di basalto, secondo le indicazioni della normativa 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*).

In particolare è stata eseguita la prova a flessione su 1 campione per ogni tipo di impasto dopo 7 giorni di stagionatura, mentre due dei tre campioni preparati sono stati testati dopo 28 giorni di maturazione indicati con le lettere A e B, appartenenti al medesimo impasto, portati a rottura applicando il carico su tre punti (Figura 47).

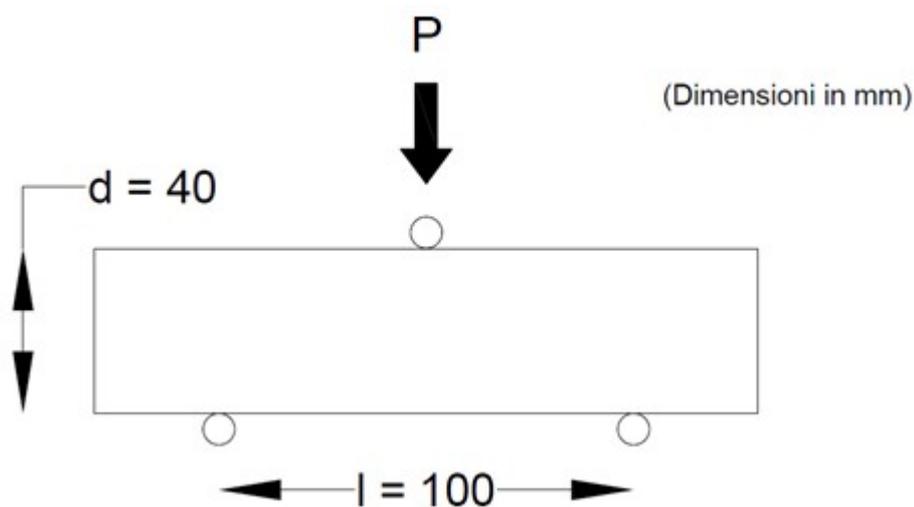


Figura 47 – Schema di carico della prova a flessione

Il valore della resistenza a flessione f , è stato calcolato con la seguente formula:

$$f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2}$$

dove F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino (pari a 40 mm entrambi nel caso specifico) e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico).

Di seguito si riportano le curve tensione σ - spostamento s derivanti dai risultati delle prove a flessione su tre punti eseguite sui provini 4x4x16 cm³. La relazione σ - s è presentata nella forma di un diagramma x-y con lo spostamento sull'asse delle ascisse x e la tensione su quello delle ordinate y .

Ogni grafico è preceduto dalla tabella nella quale, per tutti i provini, sono indicati il valore di carico massimo a rottura, espresso in KN, lo spostamento al carico massimo in mm e la resistenza a flessione f_{\max} in MPa.

3.2.1 Provini 4x4x16 cm³ prodotto commerciale di riferimento

Risultati prova a flessione MP_100 eseguite a 21 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
MP_100	1,19	2,65	2,79

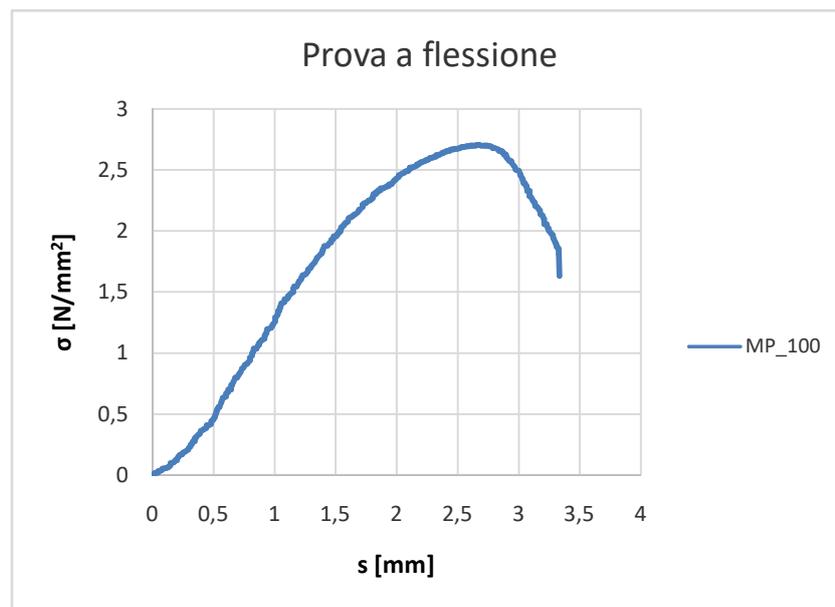


Figura 48 – Curva sforzo – spostamento a flessione e meccanismo di rottura provino MP_100

Risultati prova a flessione MP_80 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{\max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{\max} (MPa)
MP_80 (A)	1,15	1,61	2,70
MP_80 (B)	0,96	1,32	2,25
MP_80 (C)	0,98	1,26	2,30
Media	1,03	1,40	2,42
DevST	0,09	0,15	0,20
CoV (%)	8,28	10,94	8,33

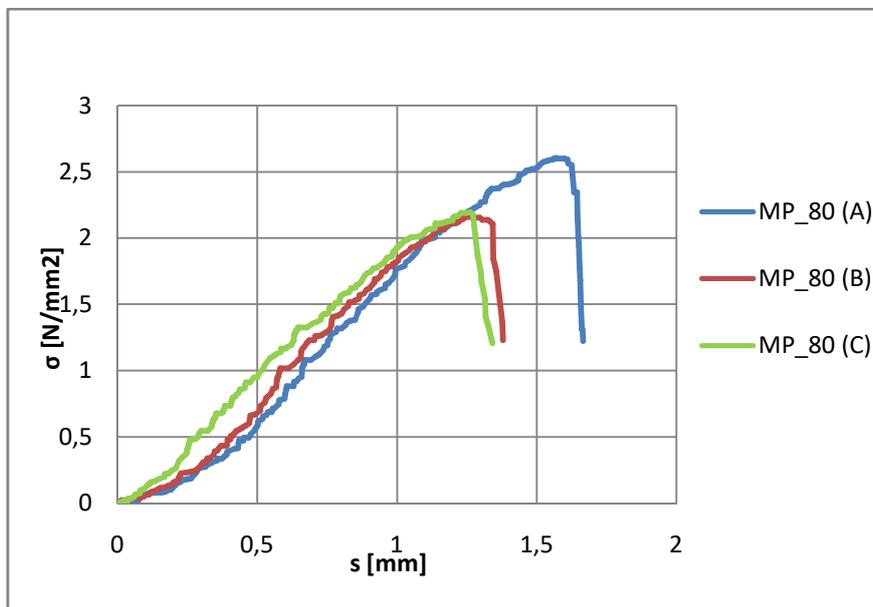


Figura 49 – Curva sforzo - spostamento a flessione provini MP_80 a 7 giorni

Risultati prova a flessione MP_70 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
MP_70 (A)	1,08	0,69	2,52
MP_70 (B)	1,15	0,74	2,69
MP_70 (C)	1,19	0,92	2,78
Media	1,14	0,78	2,66
DevST	0,05	0,10	0,11
CoV (%)	3,99	12,61	4,05

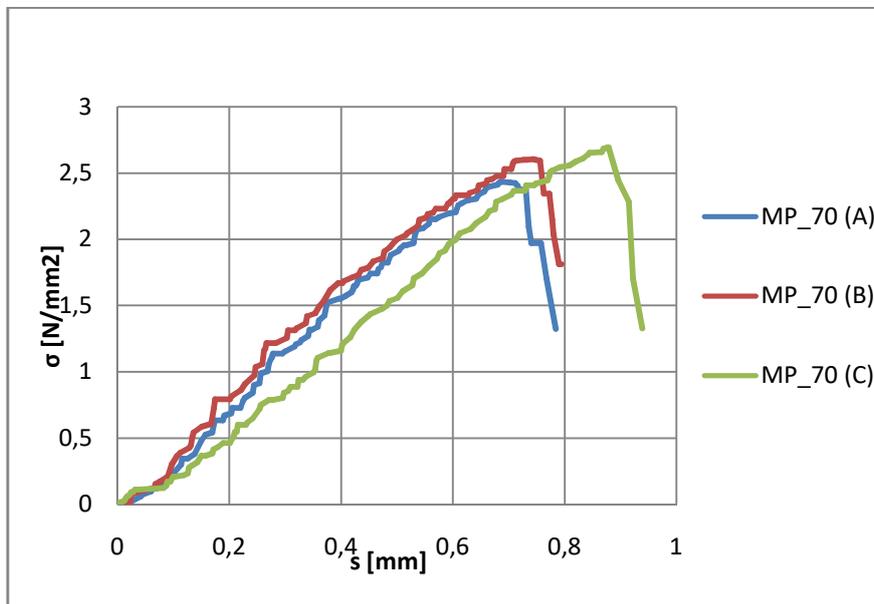


Figura 50 - Curva sforzo - spostamento a flessione provini MP_70 a 7 giorni

3.2.2 Riepilogo dei risultati

Tabella 7 - Risultati dei test a flessione

Campione	Carico massimo medio F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a flessione media f_{max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
MP_100	1,19	2,65	2,79	
MP_80	1,03	1,40	2,42	-13,26
MP_70	1,14	0,78	2,66	-4,66

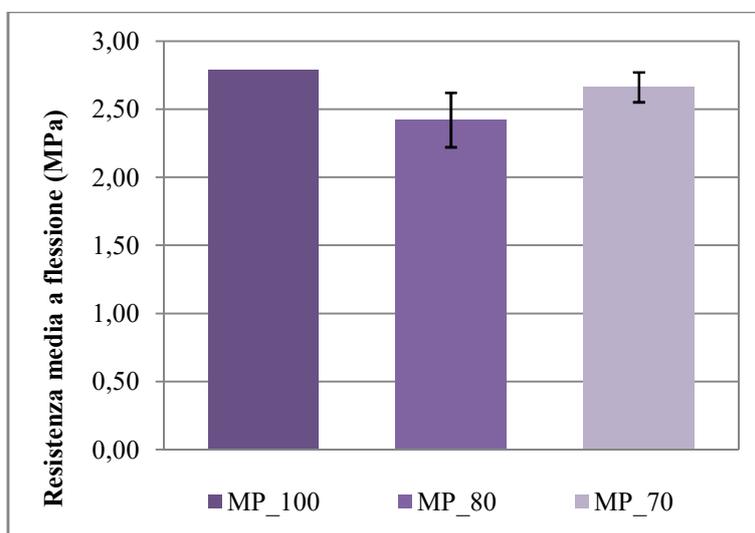


Figura 51- Resistenza media a flessione f_{max} (MPa)

I risultati ottenuti dalla prova a flessione sul provino di cui la miscela commerciale è composta da un rapporto 3:1 di parte inorganica e una parte polimerica sintetica in dispersione acquosa, ha ottenuto un certo valore di resistenza a flessione pari a 2,8 MPa.

Aumentando il dosaggio di sabbia e cemento, con un rapporto a/c di 0,42 ottimale per l'idratazione del cemento aggiuntivo all'interno del

prodotto commerciale di riferimento, si è assistito ad un decremento della resistenza a flessione(Figura 51).

Questo fenomeno è a dimostrazione del fatto che mantenendo costante le proporzioni del prodotto commerciale, la presenza eccessiva del polimero nell'impasto, non permette la corretta idratazione del cemento e di conseguenza il possibile sviluppo della resistenza a flessione di quest'ultimo.

3.2.3 Provini 4x4x16 cm³ matrice cementizia con diverse percentuali di lattice

3.2.4 Risultati a 7 giorni

Risultati prova a flessione SB eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
RIF 0	2,35	0,53	5,51
SB_10	1,83	-	4,29
SB_20	1,54	-	3,61
SB_30	1,52	-	3,56

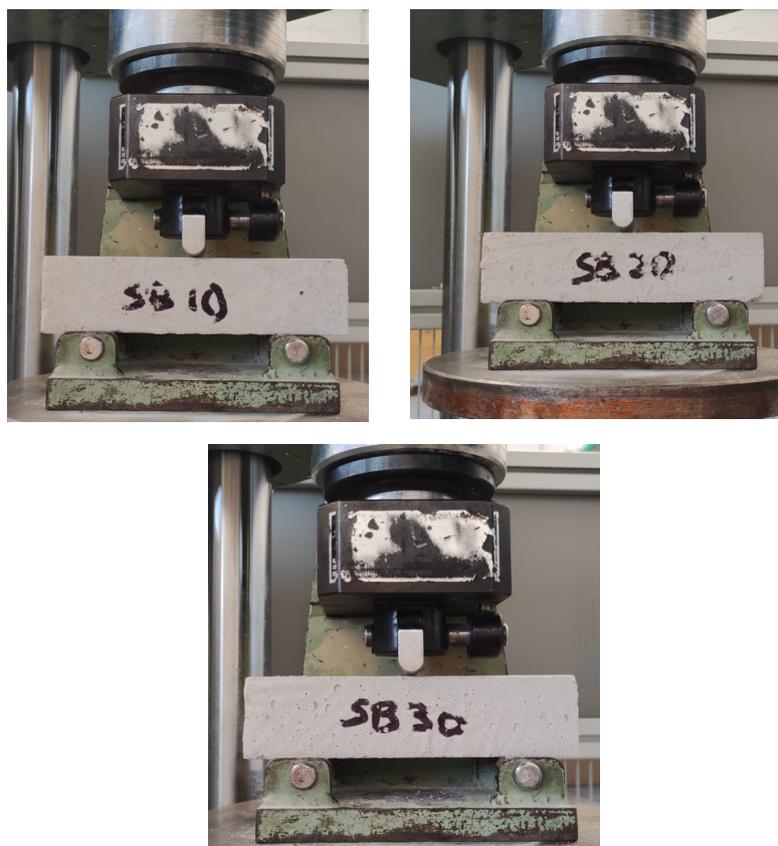


Figura 52 – Prova a flessione su tre punti provini con Stirolo-butadiene a 7 giorni

Nei provini SB con le diverse percentuali di polimero, andando ad effettuare la prova a flessione su tre punti(Figura 52), la macchina di prova non è riuscita a registrare i dati forza – spostamento, causa di piccoli spostamenti, quindi non si ha disponibilità dello spostamento al carico massimo.

Risultati prova a flessione ACR eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
RIF 0	2,35	0,53	5,51
ACR_10	1,51	0,25	3,54
ACR_20	1,76	0,26	4,13
ACR_30	2,00	0,31	4,69

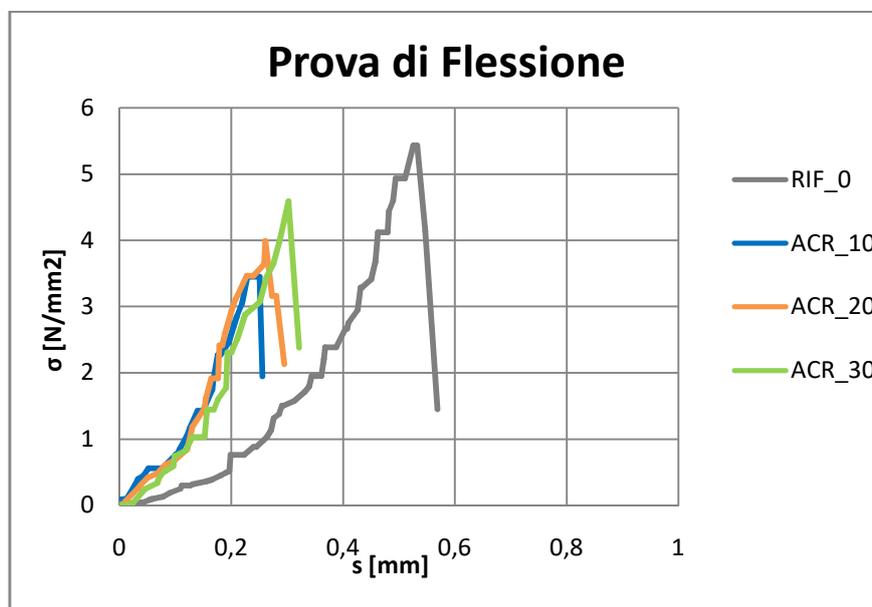




Figura 53 – Curva sforzo-spostamento prova a flessione su tre punti provini a base di resine acriliche a 7 giorni



Figura 54 - Meccanismi di rottura provini ACR

Di seguito sono riportate le tabelle riassuntive delle prove e la successiva discussione dei risultati.

Tabella 8 - Risultati dei test a flessione eseguite a 7 giorni

Campione	Carico massimo medio F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a flessione media f_{max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
RIF_0	2,35	0,53	5,51	
SB_10	1,83		4,29	-22,14
SB_20	1,54		3,61	-34,48
SB_30	1,52		3,56	-35,39
ACR_10	1,51	0,25	3,54	-35,75
ACR_20	1,76	0,26	4,13	-25,05
ACR_30	2,00	0,31	4,69	-14,88

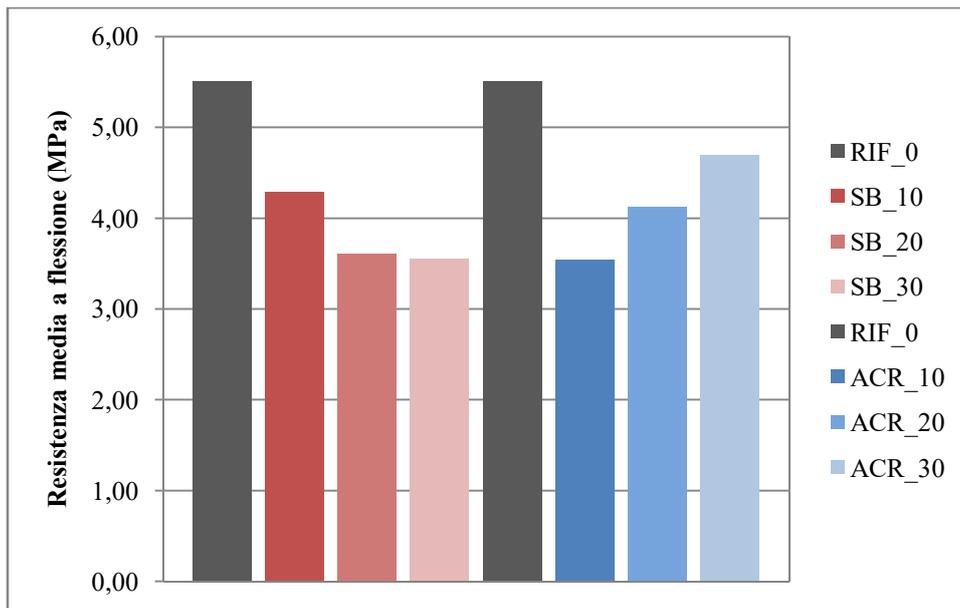


Figura 55- Resistenza media a flessione (MPa) a 7 giorni

Nella Tabella 8 si riportano i risultati della prova a flessione effettuata a 7 giorni su un campione per ogni tipologia di impasto.

L'aggiunta del 10% di emulsione polimerica con stirolo-butadiene e con acrilico confermano un decremento della resistenza media a flessione rispetto al valore ottenuto nel campione di riferimento composto da sola matrice inorganica.

Si nota una diversa risposta della resistenza (Figura 55) tra i provini ACR e SB, ovvero nei provini ACR l'aumento del polimero comporta un recupero della resistenza a flessione, mentre nel provino SB con l'aggiunta dello stirolo-butadiene si nota una continua diminuzione della resistenza a flessione fino al 35%.

3.2.5 Risultati a 28 giorni

Risultati prova a flessione RIF_0 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{\max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{\max} (MPa)
RIF 0 A	3,01	0,30	7,05
RIF 0 B	2,49	0,29	5,85
Media	2,75	0,30	6,45
DevST	0,26	0,01	0,60
CoV (%)	9,45	1,69	9,30

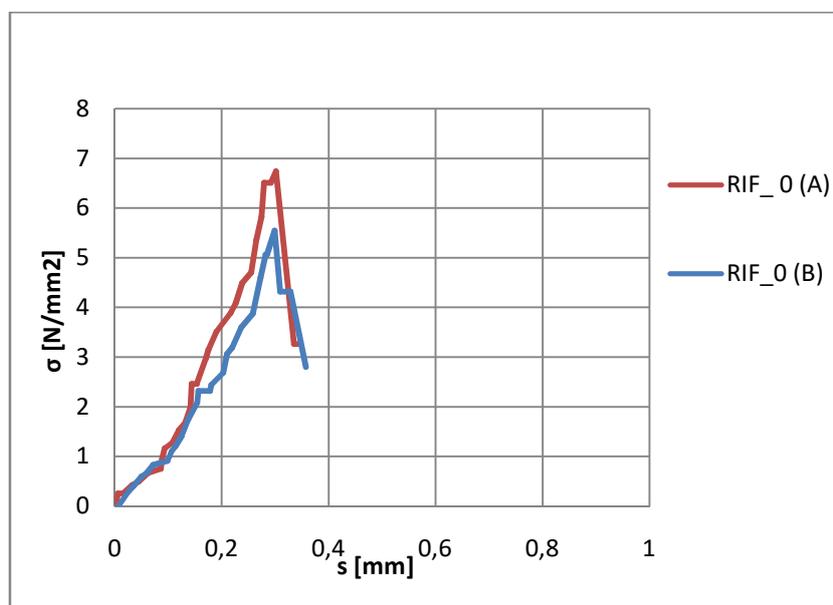


Figura 56 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino RIF_0 a 28 giorni

Risultati prova a flessione SB_10 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
SB_10 A	2,76	0,3	6,46
SB_10 B	2,61	0,29	6,11
Media	2,69	0,30	6,29
DevST	0,075	0,01	0,18
CoV (%)	2,79	1,69	2,78

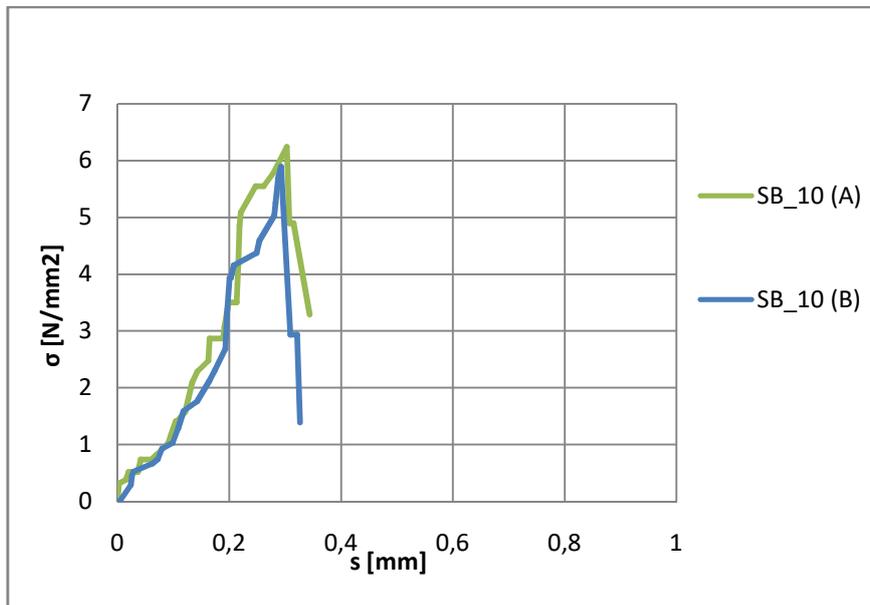


Figura 57 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino SB_10 a 28 giorni

Risultati prova a flessione SB_20 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
SB_20	2,3	-	5,39

Risultati prova a flessione SB_30 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
SB_30 A	2,31	-	5,41
SB_30 B	2,24	-	5,25
Media	2,28	-	5,33
DevST	0,03	-	0,08
CoV (%)	1,54	-	1,50

Nei provini SB con le diverse percentuali di polimero, andando ad effettuare la prova a flessione su tre punti, la macchina di prova non è riuscita a registrare i dati forza- spostamento, causa di piccoli spostamenti, quindi non si ha disponibilità dello spostamento al carico massimo.

Risultati prova a flessione ACR_10 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
ACR_10 (1)	2,91	0,30	6,82
ACR_10 (2)	2,47	-	5,79
ACR_10 (A)	1,99	0,29	4,66
ACR_10 (B)	1,73	0,25	4,04
ACR_10 (C)	2,47	0,26	5,78
Media	2,31	0,28	5,42
DevST	0,41	0,02	0,97
CoV (%)	17,82	7,50	17,91

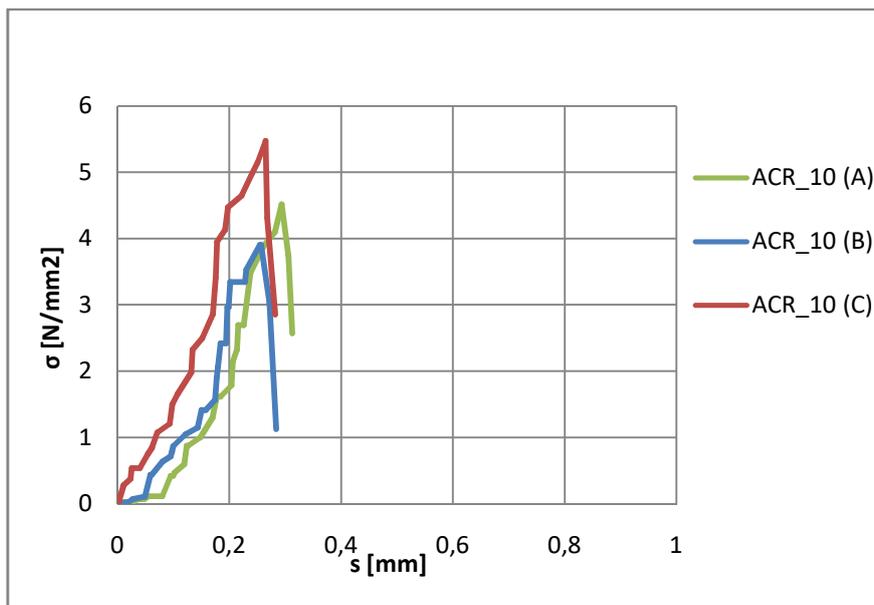


Figura 58 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_10 a 28 giorni

Risultati prova a flessione ACR_20 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
ACR_20 (1)	2,64	0,31	6,19
ACR_20 (2)	2,39	-	5,60
ACR_20 (A)	2,99	0,37	7,02
ACR_20 (B)	2,40	0,25	5,63
ACR_20 (C)	2,45	0,26	5,73
Media	2,57	0,30	6,03
DevST	0,23	0,05	0,54
CoV (%)	8,81	16,01	8,90

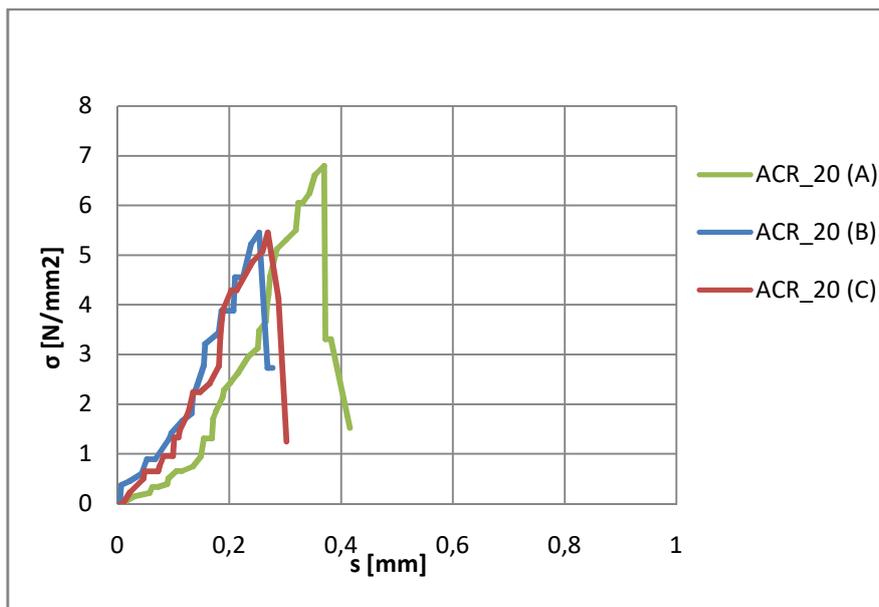


Figura 59 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_20 a 28 giorni

Risultati prova a flessione ACR_30 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Resistenza a flessione f_{max} (MPa)
ACR_30 (1)	3,04	0,36	7,13
ACR_30 (2)	3,36	0,38	7,88
ACR_30 (A)	-	-	-
ACR_30 (B)	3,55	0,37	8,33
ACR_30 (C)	3,25	0,33	7,61
Media	3,30	0,36	7,74
DevST	0,18	0,02	0,43
CoV (%)	5,59	5,20	5,62

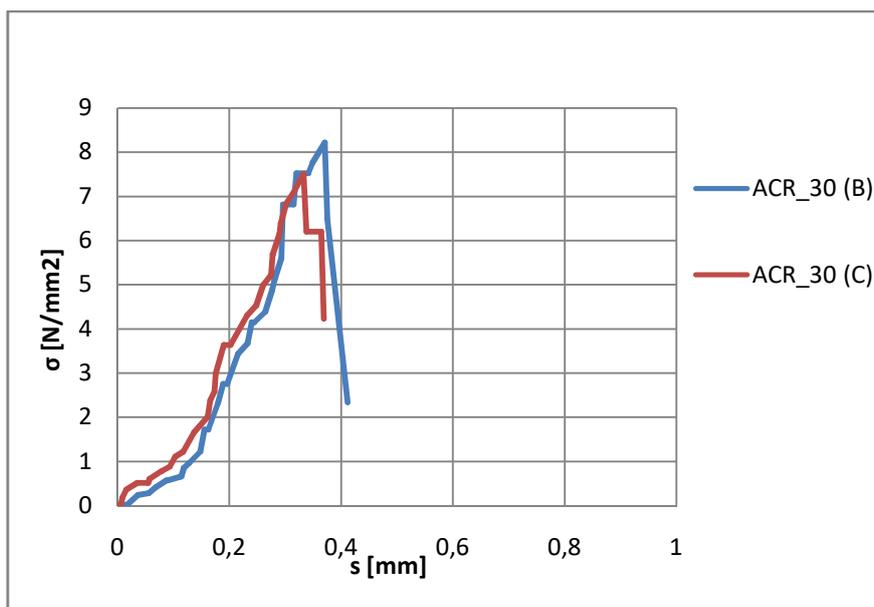


Figura 60 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_30 a 28 giorni

Di seguito sono riportate le tabelle riassuntive delle prove e la successiva discussione dei risultati.

Tabella 9 - Risultati dei test a flessione eseguite a 28 giorni

Campione	Carico massimo medio F_{\max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a flessione media f_{\max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
RIF_0	2,75	0,30	6,45	
SB_10	2,69	0,3	6,29	-2,48
SB_20	2,30		5,39	-16,43
SB_30	2,28		5,33	-17,36
ACR_10	2,31	0,28	5,42	-15,97
ACR_20	2,57	0,30	6,03	-6,51
ACR_30	3,30	0,36	7,74	20,00

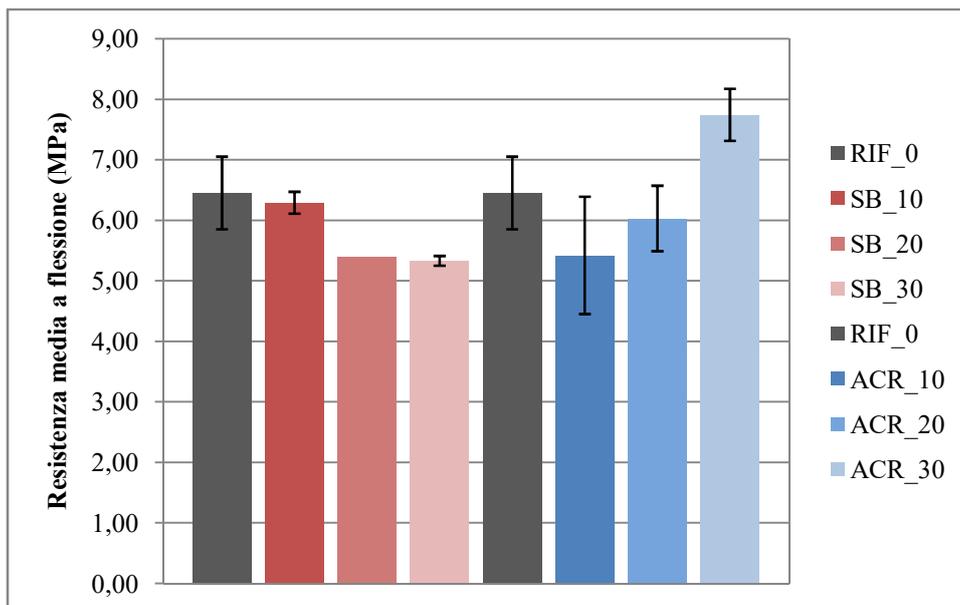


Figura 61- Resistenza media a flessione f_{max} (MPa) a 28 giorni dei provini SB e ACR

Nella Tabella 9 si riportano i risultati della prova a flessione effettuata a 28 giorni sui campioni per ogni tipologia di impasto realizzato.

In questo caso con la maturazione dei provini a 28 giorni(Figura 61), si riscontrano che rispetto al provino di riferimento, il campione SB, all'aumentare dell'aggiunta del polimero fino al 30%, la resistenza diminuisce.

I provini ACR hanno riportato un incremento della resistenza a flessione rispetto al campione di riferimento, aggiungendo il 30% dell'emulsione polimerica a base di resine acriliche si è visto un incremento della resistenza a flessione del 20%.

3.3 Risultati prova a flessione sui provini FRCM

I provini FRCM di dimensioni 8x1x20 cm³, sono stati caratterizzati meccanicamente con prove a flessione.

In particolare le prove a flessione sono state eseguite su ognuno dei tre provini indicati con i numeri 1,2 e 3 appartenenti al medesimo impasto, portati a rottura applicando il carico su tre punti (Figura 62).

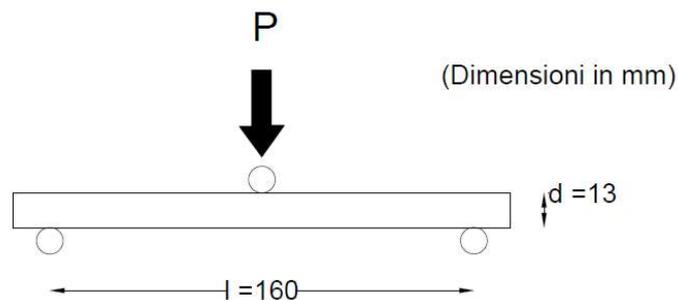


Figura 62 - Schema di carico della prova a flessione

Il valore della resistenza a flessione f , è stato calcolato con la seguente formula:

$$f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2}$$

dove F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino (pari a 80 mm e 13 mm) e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 160 mm nel caso specifico).

La prova è stata finalizzata alla determinazione della curva forza – spostamento. Ogni grafico è preceduto da una tabella nella quale, per tutti i provini, sono indicati il valore di carico massimo a rottura (F_{max}), espresso in N, lo spostamento al carico massimo, in mm e la resistenza a flessione f_{max} in MPa.

3.3.1 Provini FRCM matrice cementizia con diverse percentuali di lattice e con rete di basalto

Risultati prova a flessione RIF_0

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
RIF_0 (1)	364,24	0,33	745,49	6,63
RIF_0 (2)	338,75	0,33	853,95	7,53
RIF_0 (3)	375,04	0,33	694,24	6,86
Media	359,34	0,33	764,56	7,01
DevST	15,21	0,00	66,58	0,38
CoV (%)	4,23	0,00	8,71	5,45

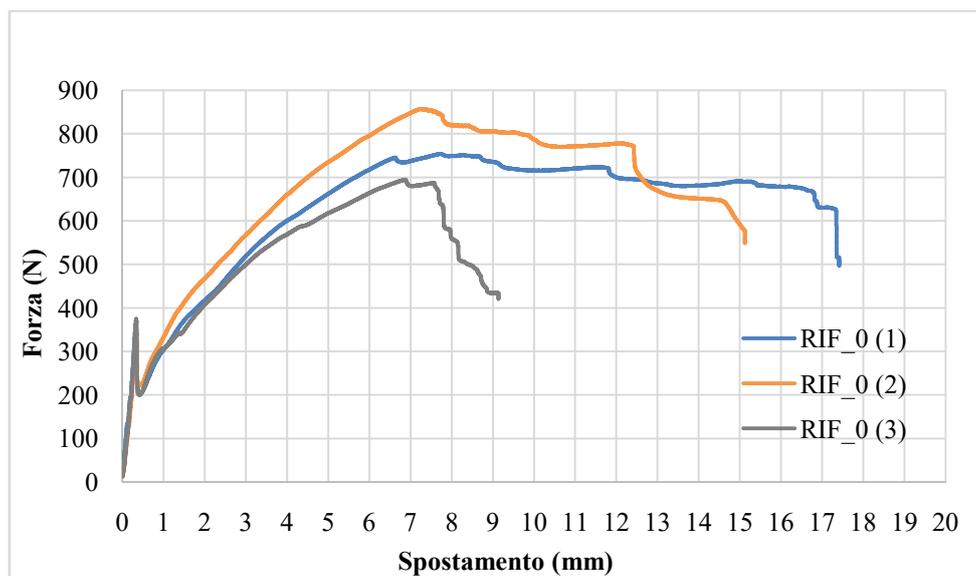


Figura 63 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino RIF_0

Risultati prova a flessione SB_10

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
SB_10 (1)	266,88	0,35	295,12	13,73
SB_10 (2)	277,06	0,34	345,41	12,90
SB_10 (3)	308,36	0,35	261,63	14,54
Media	284,10	0,35	300,72	13,72
DevST	17,65	0,00	34,43	0,67
CoV (%)	6,21	1,36	11,45	4,88

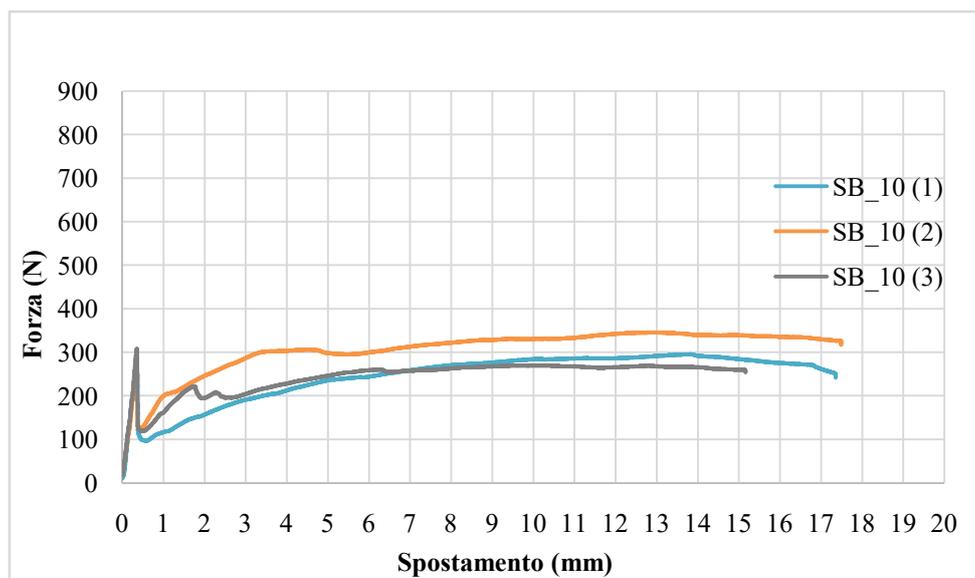
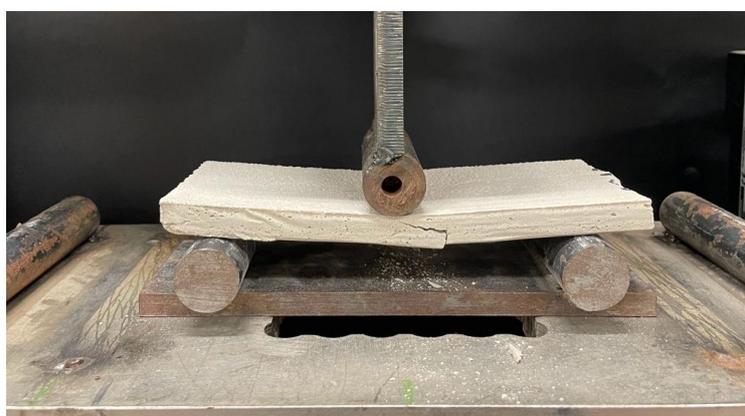




Figura 64 –Curva di forza - spostamento e rottura a flessione del provino SB_10

Risultati prova a flessione SB_20

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
SB_20 (1)	337,44	0,30	495,45	18,00
SB_20 (2)	328,39	0,36	712,13	20,86
SB_20 (3)	382,49	0,37	627,38	16,68
Media	349,44	0,34	611,65	18,51
DevST	23,66	0,03	89,16	1,74
CoV (%)	6,77	9,00	14,58	9,42



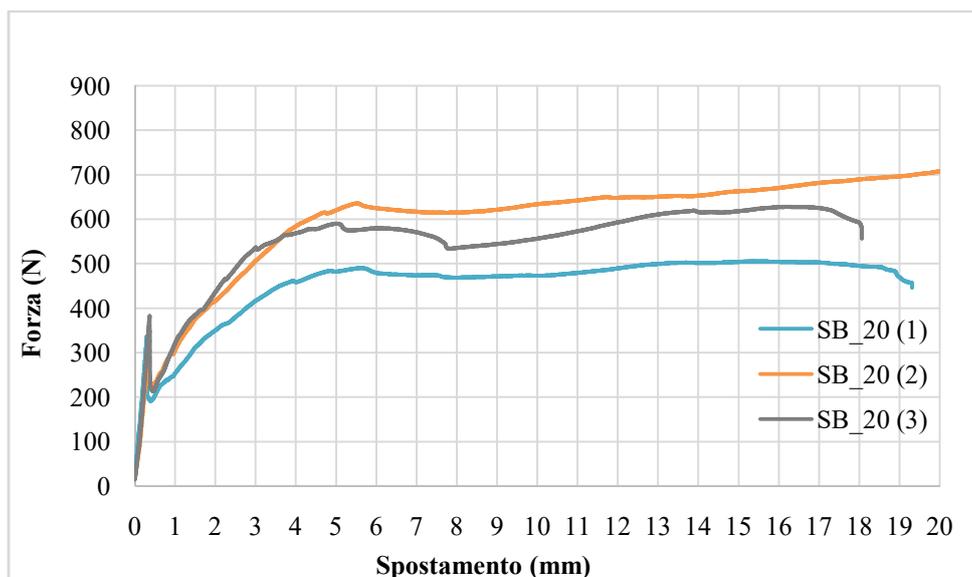


Figura 65 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino SB_20

Risultati prova a flessione SB_30

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
SB_30 (1)	359,27	0,40	327,69	20,55
SB_30 (2)	388,09	0,52	381,38	15,00
SB_30 (3)	302,19	0,42	388,77	14,62
Media	349,85	0,45	365,95	16,72
DevST	35,70	0,05	27,22	2,71
CoV (%)	10,20	11,75	7,44	16,21

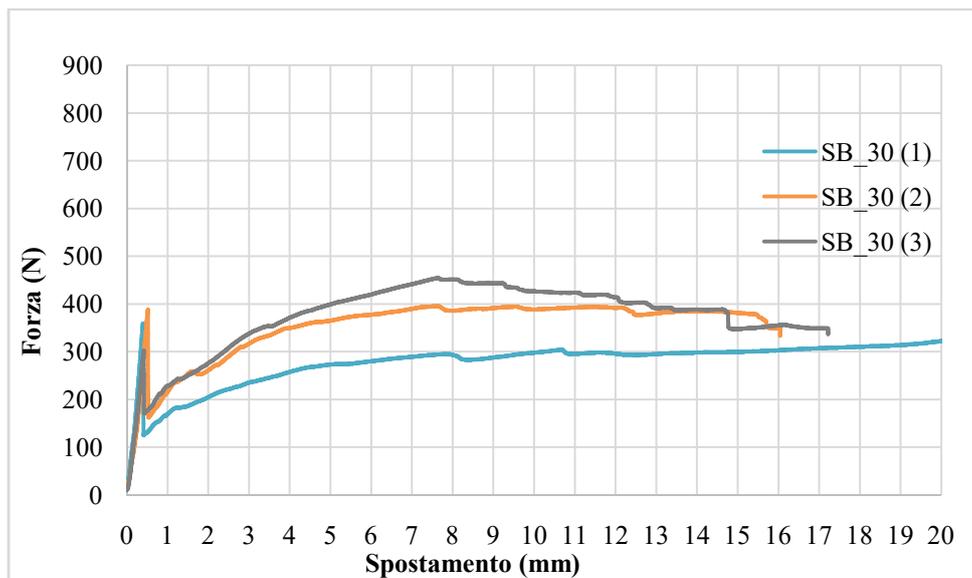


Figura 66 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino SB_30

Risultati prova a flessione ACR_10

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
ACR_10 (1)	384,62	0,46	506,00	20,92
ACR_10 (2)	303,41	0,26	646,34	14,55
ACR_10 (3)	310,91	0,42	602,86	19,39
Media	332,98	0,38	585,07	18,29
DevST	36,64	0,09	58,66	2,72
CoV (%)	11,00	22,74	10,03	14,85

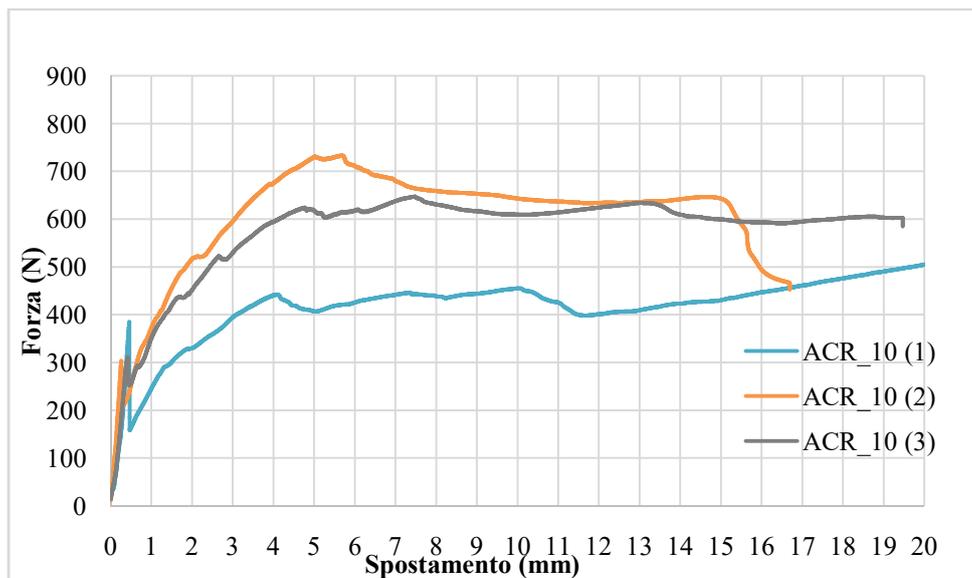


Figura 67 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_10

Risultati prova a flessione ACR_20

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
ACR_20 (1)	299,30	0,28	441,18	15,08
ACR_20 (2)	304,73	0,40	450,69	18,34
ACR_20 (3)	339,14	0,26	430,09	16,68
Media	314,39	0,32	440,65	16,70
DevST	17,64	0,06	8,42	1,33
CoV (%)	5,61	19,19	1,91	7,97

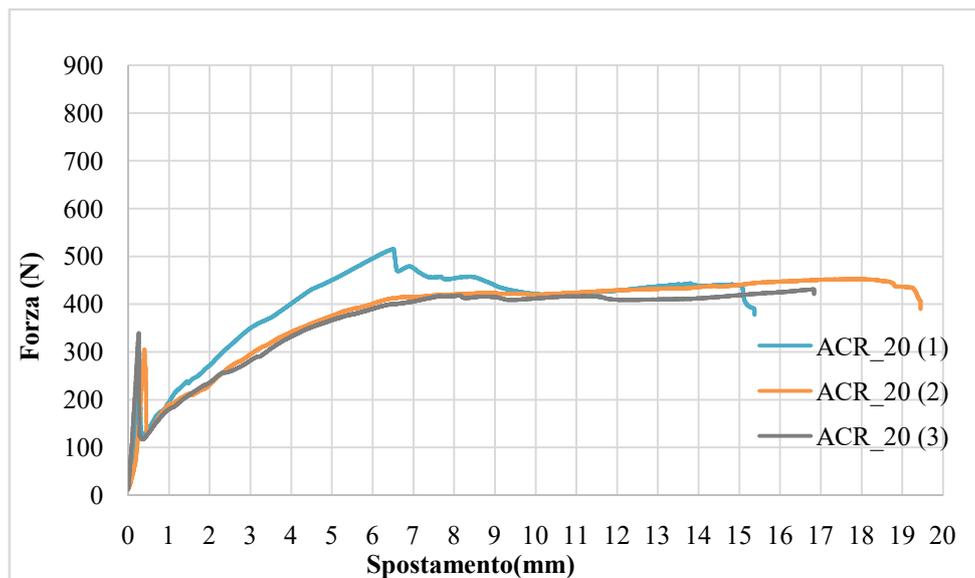


Figura 68 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_20

Risultati prova a flessione ACR_30

Campione	Carico Massimo 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 1° fessurazione s (mm)	Carico Massimo 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo 2° fessurazione s (mm)
ACR_30 (1)	418,90	0,44	458,14	13,42
ACR_30 (2)	351,84	0,32	462,39	14,11
ACR_30 (3)	376,06	0,38	453,23	14,97
Media	382,27	0,38	457,92	14,17
DevST	27,73	0,05	3,74	0,63
CoV (%)	7,25	12,69	0,82	4,48

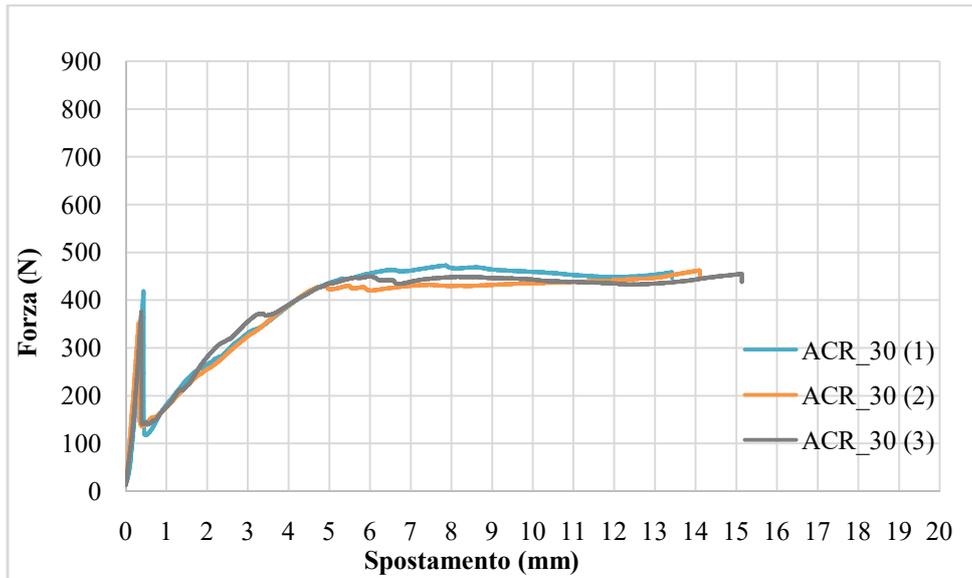


Figura 69 - Curva di forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_30

3.3.2 Riepilogo risultati

I risultati ottenuti dalla prova a flessione eseguita sui provini FRCM possono essere descritti in due fasi:

- Prima fessurazione
- Seconda fessurazione

Tabella 10 - Risultati prova a flessione valori medi di 1° fessurazione

Campione	Carico massimo medio 1° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Incremento Forza massima (%)
RIF_0	359,34	0,33	
SB_10	284,10	0,34	-20,94
SB_20	349,44	0,34	-2,76
SB_30	349,85	0,43	-2,64
ACR_10	332,98	0,39	-7,34
ACR_20	314,39	0,30	-12,51
ACR_30	382,27	0,37	6,38

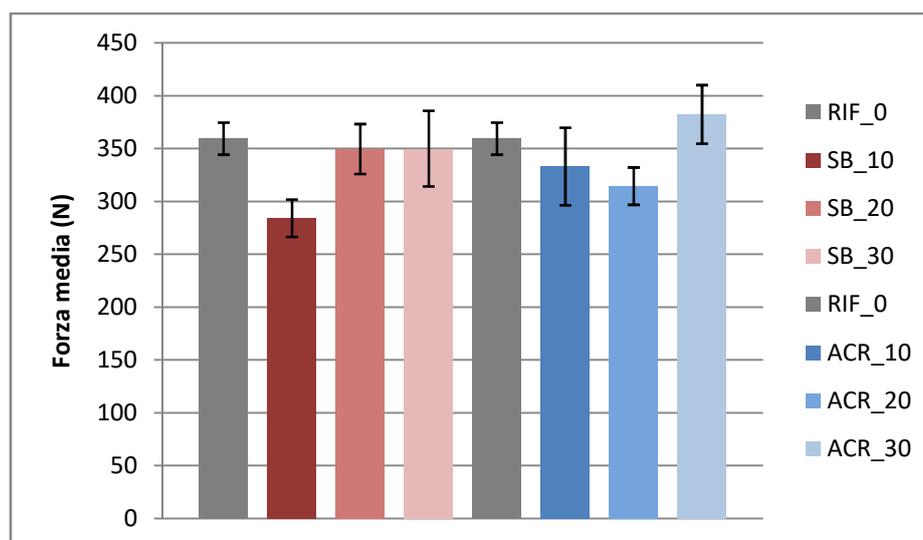


Figura 70 - Carico massimo medio di 1° fessurazione F (N) dei provini SB e ACR a 28 giorni

Nella Tabella 10 sono sintetizzati i risultati della prima fessurazione.

Si può notare che al carico massimo di prima fessurazione, ciò che viene portato a rottura è la sola malta.

Analizzando in maniera indipendente i provini notiamo in Figura 70 che, con l'aggiunta del 10 % di stirolo-butadiene la forza massima a flessione diminuisce di un 20% rispetto al valore del provino di riferimento; mentre all'aumentare dell'aggiunta dell'emulsione polimerica fino al 30% si ha un recupero del carico massimo a flessione che raggiunge quella del provino di riferimento.

Per quanto riguarda l'emulsione di lattice a base di resina acrilica notiamo che l'aggiunta fino al 20%, da una risposta in termini di carico massimo con un decremento in media del 10%; mentre con l'aggiunta del 30% si ha un ridotto aumento della forza massima a flessione di circa 20 N rispetto al provino di riferimento.

Tuttavia, i risultati derivati dalla prova a flessione eseguita sul sistema FRCM hanno seguito lo stesso andamento dei risultati ottenuti nella prova a flessione effettuata sui provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

Tabella 11 - Risultati prova a flessione valori medi di 2° fessurazione

Campione	Carico massimo medio 2° fessurazione F_{max} (N)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Incremento Forza massima (%)
RIF_0	764,56	7,01	
SB_10	300,72	13,72	-60,67
SB_20	611,65	18,51	-20,00
SB_30	365,95	16,72	-52,14
ACR_10	585,07	18,29	-23,48
ACR_20	440,65	16,70	-42,37
ACR_30	457,92	14,17	-40,11

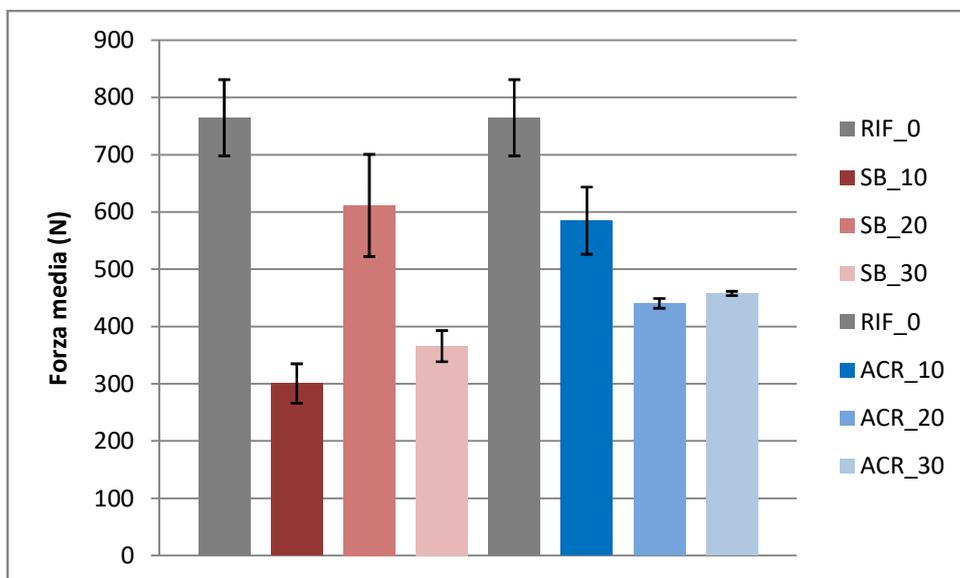


Figura 71 - Carico massimo medio di 2° fessurazione F (N) dei provini SB e ACR a 28 giorni

Nella Tabella 11 sono sintetizzati i risultati della seconda fase di fessurazione.

Successivamente alla prima fase di fessurazione, dopo la rottura della sola malta avvenuta per taglio e flessione, l'andamento della curva descrive

il comportamento sotto l'applicazione del carico, dell'aderenza della rete all'interno della malta.

Si riportano tre diverse tipologie di comportamento dei provini sottoposti a flessione.

Si nota che nel provino di riferimento abbiamo un valore di forza che raggiunge in media 700 N con un limitato spostamento di circa 7 cm, dove avviene la rottura del sistema rete e matrice.

Nel provino SB con l'aggiunta del 10% di emulsione polimerica si ha un comportamento differente; ovvero il valore di forza raggiunto è sui 300 N, minore rispetto alla forza del provino di riferimento ma con uno spostamento maggiore.

All'aumentare dell'emulsione polimerica non notiamo un sostanziale cambiamento nel valore dello spostamento raggiunto, quindi mantiene il suo comportamento duttile, ma influenza solo il valore della forza massima raggiunta.

Per quanto riguarda il provino ACR, con l'aumentare della quantità dell'emulsione polimerica acrilica si nota un decremento progressivo della forza massima raggiunta dall'aderenza della rete con la malta, ma in

termini di spostamento raggiungiamo un valore che è il doppio di quello del provino di riferimento e che si mantiene costante.

Da ciò si deduce che l'aggiunta progressiva di polimero aumenta il comportamento duttile del sistema FRCM(Figura 71).

Sempre dalle curve F-s ottenute dai test a flessione sui provini $8 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$, è stato calcolato un altro importante parametro che rappresenta l'energia assorbita dal provino prima di giungere a rottura, la tenacità. Essa è stata valutata calcolando l'area sottesa ad ognuna delle curve F – s precedenti, calcolata fino allo spostamento relativo alla F_{\max} .

Nella Tabella 12 sono riportati i valori della tenacità relativi ad ogni serie di provini.

I risultati mostrano un benefico effetto sulla duttilità in termini di spostamento che da 7 cm del provino di riferimento si arriva con l'aggiunta progressiva di polimero nelle miscele ad uno spostamento di 18 cm, mentre non si ha un aumento della tenacità nell'aggiunta del 30% sia dello stirolo butadiene che dell'acrilico ma si riduce di circa la metà di quella rilevata nel provino di riferimento. Ad eccezione del provino con il 20% di SB e del provino con il 10% ACR si nota un leggero aumento della tenacità,

coerente al carico massimo misurato nella seconda fase di prova dove entra in gioco l'aderenza tra la rete e la malta.

Tabella 12- Risultati prova a flessione provini FRM

Campione	Tenacità [Nmm]	Media [Nmm]
RIF_0	10899,6	8585,5
RIF_0	10161,2	
RIF_0	4695,6	
SB_10	4249,6	4422,0
SB_10	5345,3	
SB_10	3671,0	
SB_20	8794,0	10958,6
SB_20	14166,7	
SB_20	9915,3	
SB_30	5719,7	5936,4
SB_30	5655,4	
SB_30	6434,2	
ACR_10	9021,2	10103,9
ACR_10	10090,4	
ACR_10	11200,0	
ACR_20	6114,1	6581,6
ACR_20	7493,3	
ACR_20	6137,3	
ACR_30	5308,0	5563,1
ACR_30	5409,7	
ACR_30	5971,5	

3.4 Risultati prova a compressione

I provini di dimensioni 4x4x16 cm³, sono stati caratterizzati meccanicamente con prove a compressione secondo le indicazioni della normativa 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*).

La cella di carico utilizzata, è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione che ci ha permesso di ottenere i valori relativi alla forza applicata (kN). Successivamente la forza è stata trasformata in una tensione espressa in MPa dividendo la forza F , espressa in N, per la superficie S sulla quale essa è stata applicata pari a 40x40 mm² secondo la formula:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Di seguito si riportano le curve sforzo (σ) - spostamento (s) derivanti dai risultati delle prove a compressione eseguite sui provini 4x4x16 cm³. La relazione σ - s è presentata nella forma di un diagramma x-y con lo spostamento sull'asse delle ascisse x e lo sforzo su quello delle ordinate y.

Ogni grafico è preceduto da una tabella nella quale per tutti i provini, indicati con le lettere, appartenenti al medesimo impasto, sono indicati il valore di carico massimo a rottura, espresso in kN, lo spostamento al carico massimo, in mm e la tensione σ_{max} in MPa.

3.4.1 Provini 4x4x16 cm³ prodotto commerciale di riferimento

Risultati prova a compressione MP eseguite a 21 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
MP_100 (A)	6,74	5,07	4,21
MP_100 (B)	6,49	4,24	4,06
MP_100 (C)	6,78	5,64	4,24
Media	6,67	4,98	4,17
DevST	0,13	0,57	0,08
CoV (%)	1,92	11,53	1,89

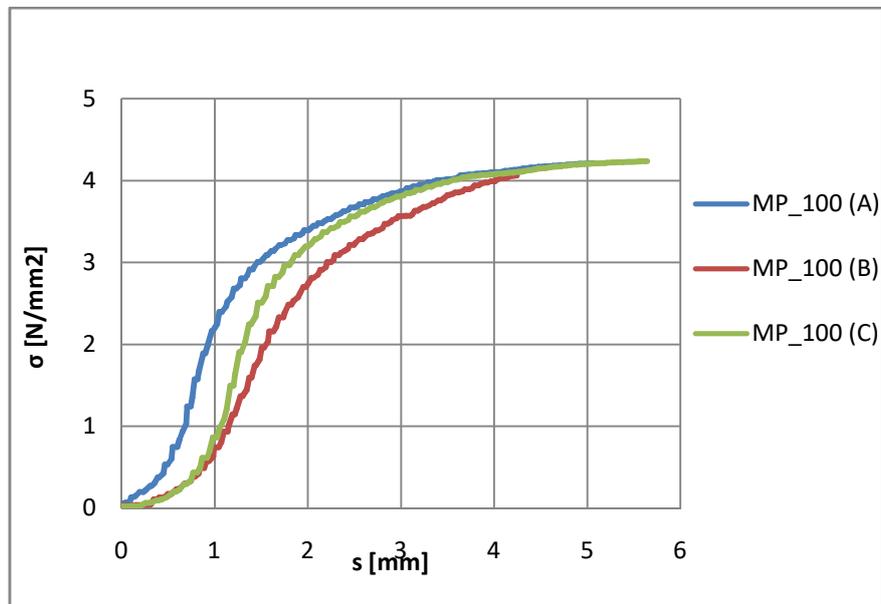


Figura 72 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_100 a 21 giorni

Risultati prova a compressione MP_80 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
MP_80 (D)	5,24	3,02	3,28
MP_80 (E)	5,32	2,45	3,33
MP_80 (F)	5,27	3,08	3,29
MP_80 (G)	5,23	2,49	3,27
MP_80 (H)	5,18	2,46	3,24
MP_80 (I)	5,02	2,74	3,14
Media	5,21	2,71	3,26
DevST	0,09	0,26	0,06
CoV (%)	1,82	9,69	1,82

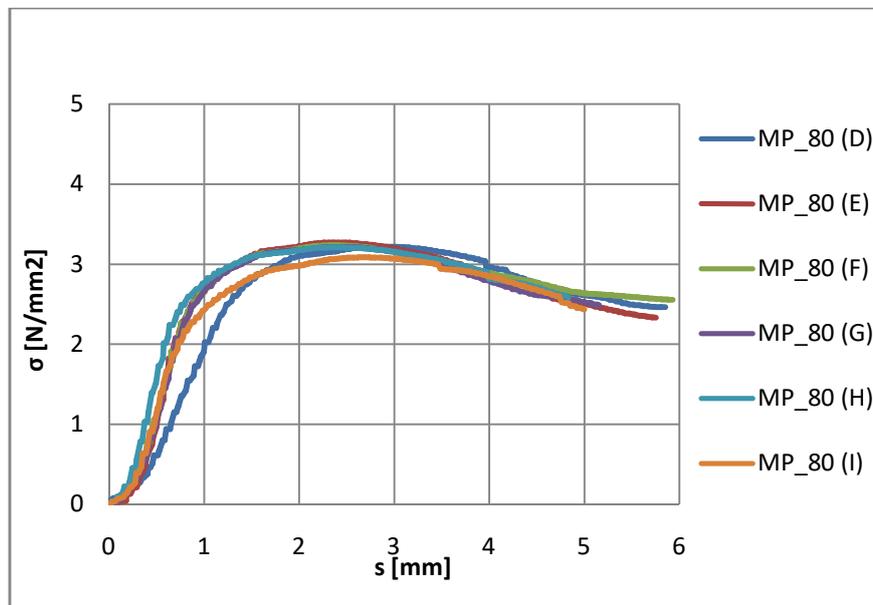


Figura 73 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_80 a 7 giorni

Risultati prova a compressione MP_70 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
MP_70 (D)	6,41	1,53	4,01
MP_70 (E)	6,46	1,56	4,04
MP_70 (F)	6,26	1,45	3,91
MP_70 (G)	6,39	1,53	3,99
MP_70 (H)	6,62	1,61	4,14
MP_70 (I)	6,46	1,45	4,04
Media	6,43	1,52	4,02
DevST	0,11	0,06	0,07
CoV (%)	1,66	3,76	1,71

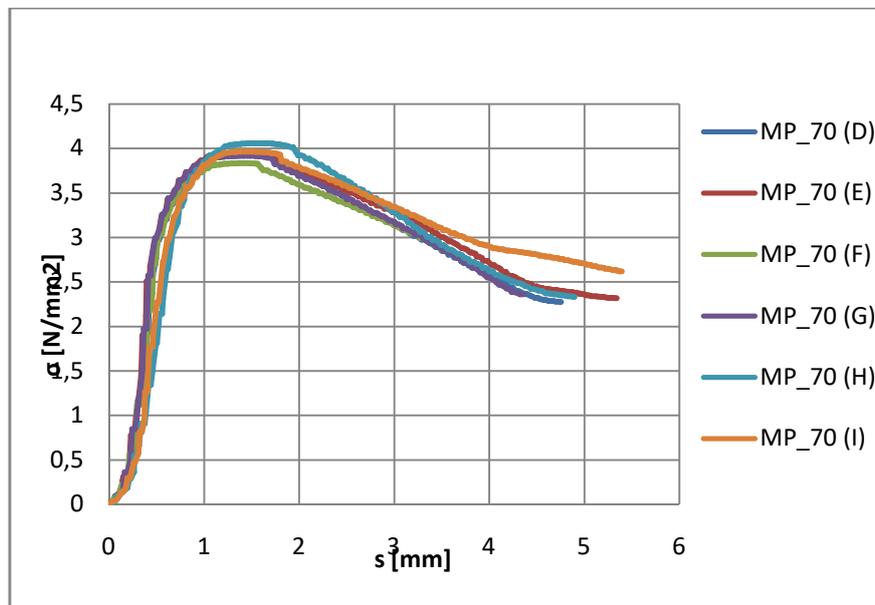


Figura 74 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_70 a 7 giorni

3.4.2 Riepilogo risultati

Tabella 13- Risultati dei test a compressione provini MP

Campione	Carico massimo medio F_{\max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a compressione media σ_{\max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
MP_100	6,67	4,98	4,17	
MP_80	5,21	2,71	3,26	-21,82
MP_70	6,43	1,52	4,02	-3,60

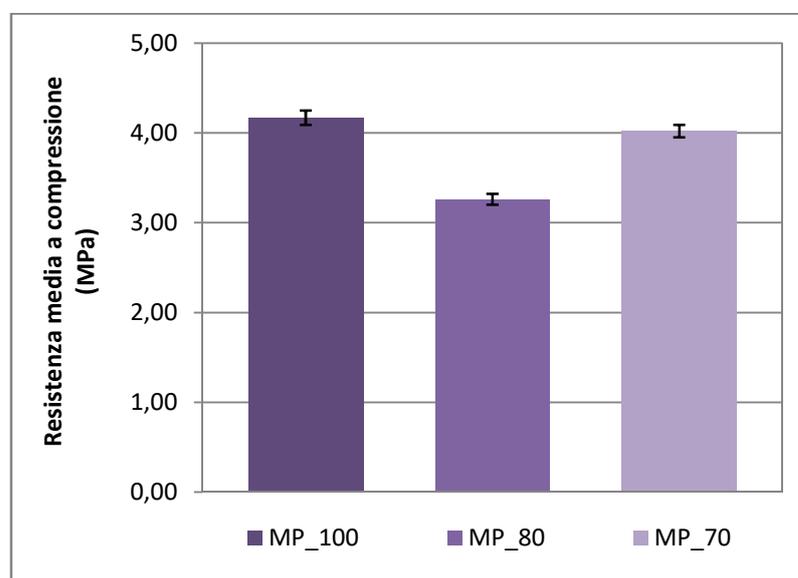


Figura 75 - Resistenza media a compressione (MPa) provini MP

I risultati ottenuti dalla prova a compressione sul provino di cui la miscela commerciale è composta da un rapporto 3:1 di parte inorganica e una parte polimerica sintetica in dispersione acquosa, ha ottenuto un certo valore di resistenza pari a 4,2 MPa.

Aumentando il dosaggio di sabbia e cemento, con un rapporto a/c di 0,42 ottimale per l'idratazione del cemento aggiuntivo all'interno del prodotto commerciale di riferimento, si è assistito inizialmente ad un decremento della resistenza a compressione e infine un recupero, come riportato in Figura 75.

Anche in questo caso come visto nel paragrafo precedente nella prova a flessione, mantenendo costante le proporzioni del prodotto commerciale, la presenza eccessiva del polimero nell'impasto, non permette la corretta idratazione del cemento e di conseguenza il possibile sviluppo della resistenza a compressione di quest'ultimo.

3.4.3 *Provini 4x4x16 cm³ matrice cementizia con diverse percentuali di lattice*

Di seguito si riportano i risultati delle prove a compressione eseguite prima con provini a 7 giorni e poi a 28 giorni.

3.4.4 *Risultati a 7 giorni*

Risultati prova a compressione RIF eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
RIF_0 (D)	39,85	0,81	24,91
RIF_0 (E)	38,58	1,16	24,11
Media	39,22	0,99	24,51
DevST	0,63	0,18	0,40
CoV (%)	1,62	17,77	1,63

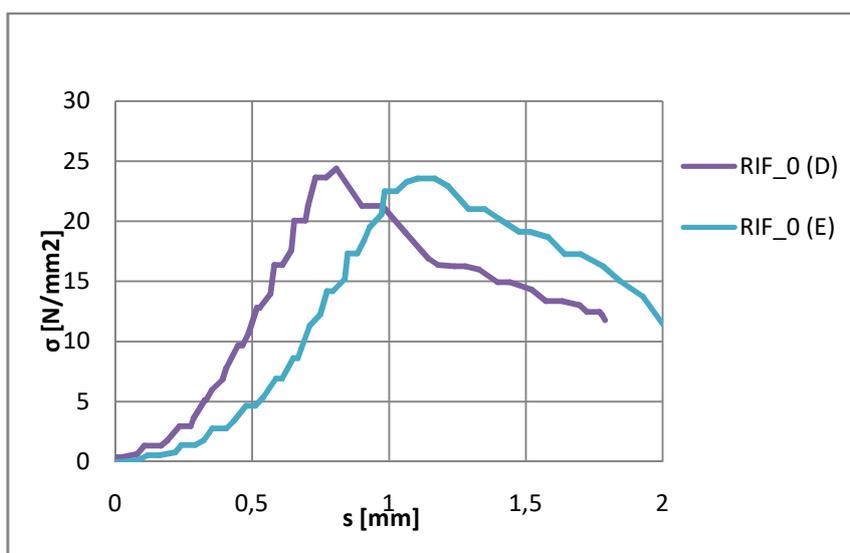


Figura 76 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini RIF_0 a 7 giorni

Risultati prova a compressione SB_10 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_10 (D)	24,71	0,76	15,44
SB_10 (E)	23,42	0,83	14,64
Media	24,07	0,80	15,04
DevST	0,64	0,04	0,40
CoV (%)	2,68	4,40	2,66

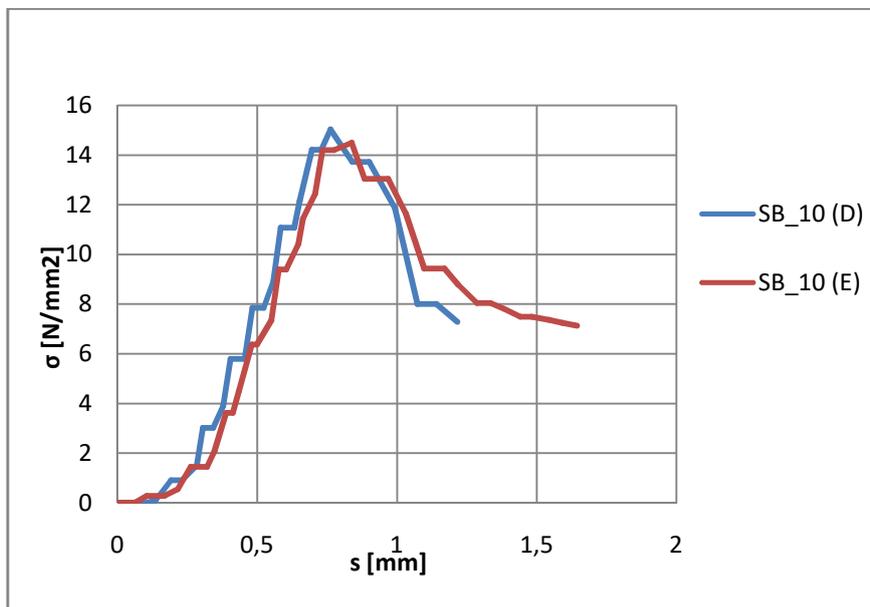


Figura 77 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_10 a 7 giorni

Risultati prova a compressione SB_20 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_20 (D)	16,51	0,71	10,32
SB_20 (E)	14,96	0,58	9,35
Media	15,74	0,65	9,835
DevST	0,78	0,06	0,48
CoV (%)	4,93	10,08	4,93

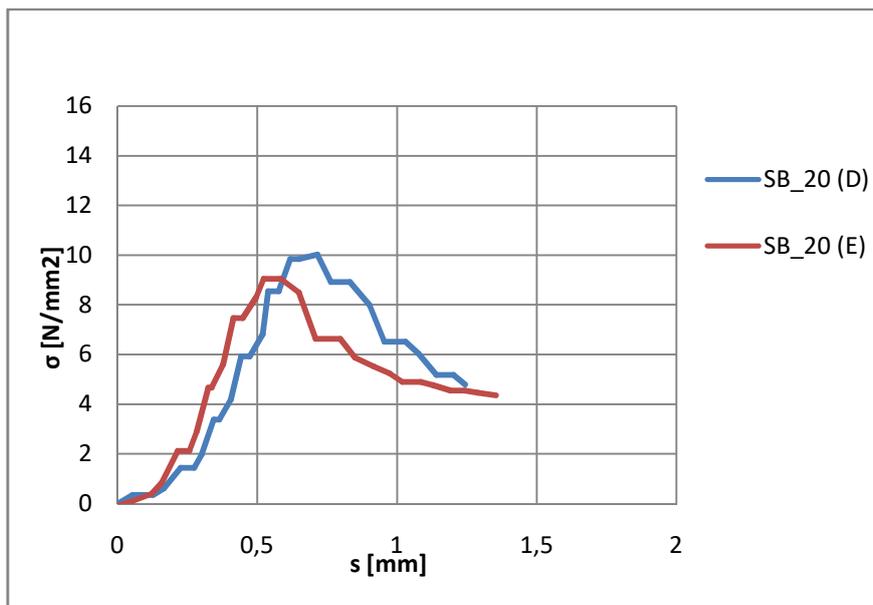


Figura 78 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_20 a 7 giorni

Risultati prova a compressione SB_30 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_30 (D)	12,08	0,77	7,55
SB_30 (E)	11,69	0,91	7,30
Media	11,89	0,84	7,43
DevST	0,20	0,07	0,13
CoV (%)	1,64	8,33	1,68

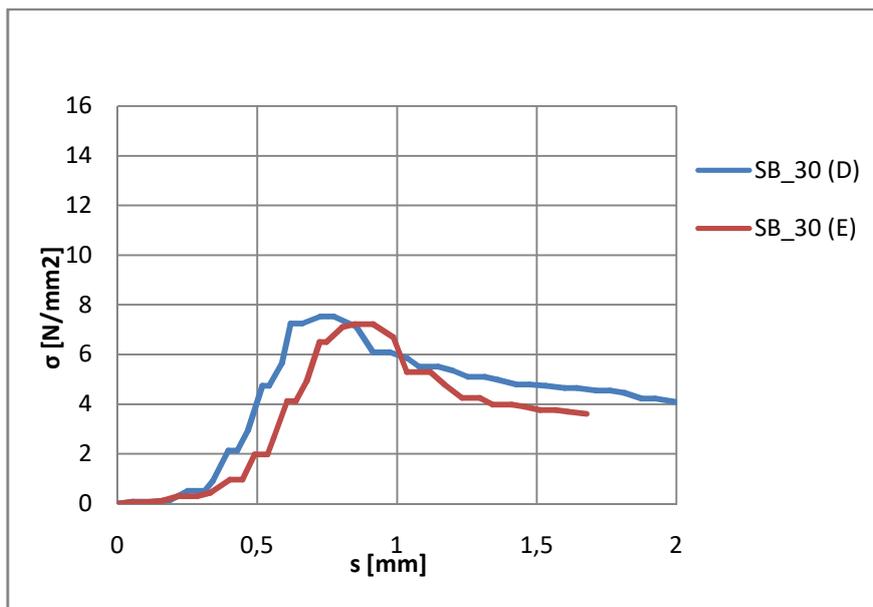


Figura 79 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_30 a 7 giorni

Risultati prova a compressione ACR_10 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_10 (D)	26,3	1,02	16,44
ACR_10 (E)	26,42	1,04	16,51
Media	26,36	1,03	16,48
DevST	0,06	0,01	0,04
CoV (%)	0,23	0,97	0,21

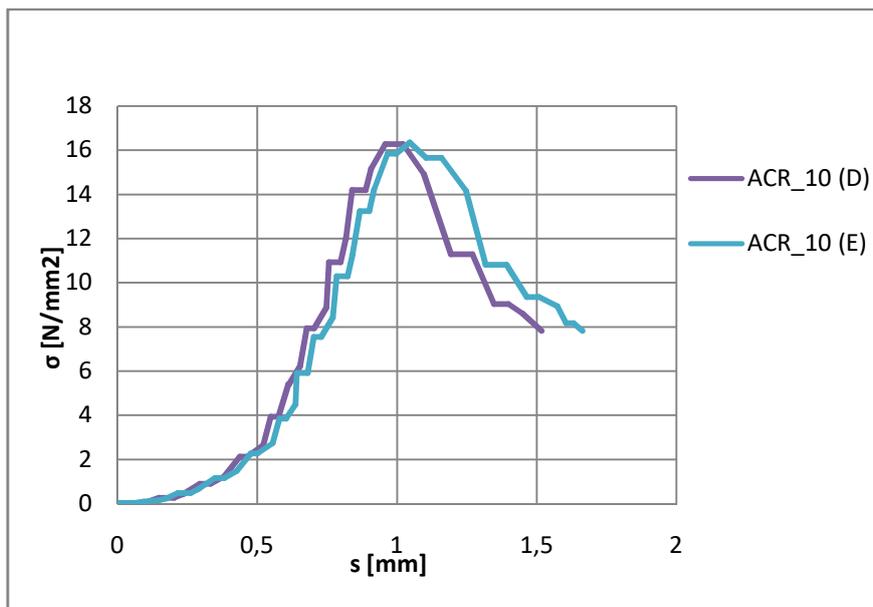


Figura 80 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_10 a 7 giorni

Resultati prova a compressione ACR_20 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_20 (D)	24,78	0,80	15,49
ACR_20 (E)	22,47	1,45	14,05
Media	23,63	1,13	14,77
DevST	1,16	0,33	0,72
CoV (%)	4,89	28,89	4,87

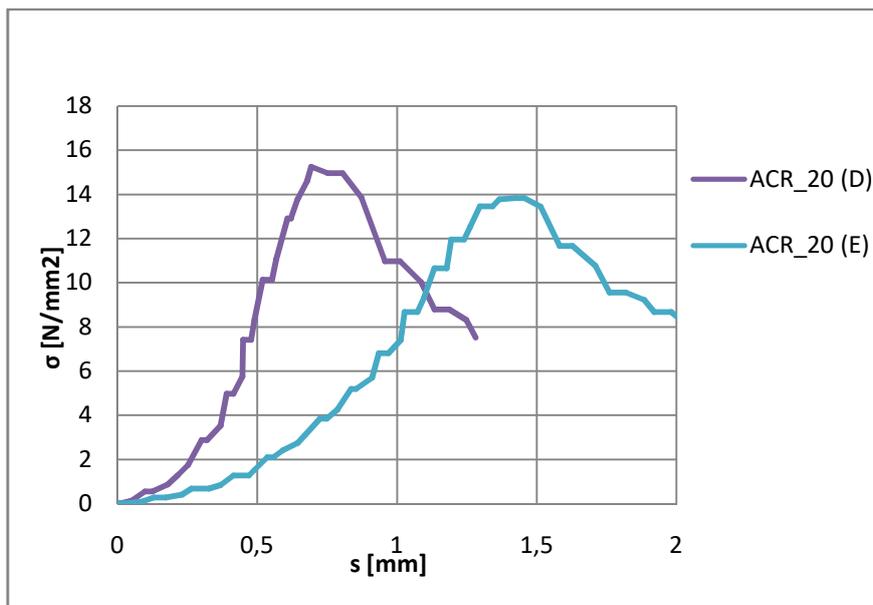


Figura 81 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_20 a 7 giorni

Risultati prova a compressione ACR_30 eseguite a 7 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_30 (D)	24,05	0,81	15,03
ACR_30 (E)	23,20	0,75	14,50
Media	23,63	0,78	14,77
DevST	0,42	0,03	0,26
CoV (%)	1,80	3,85	1,79

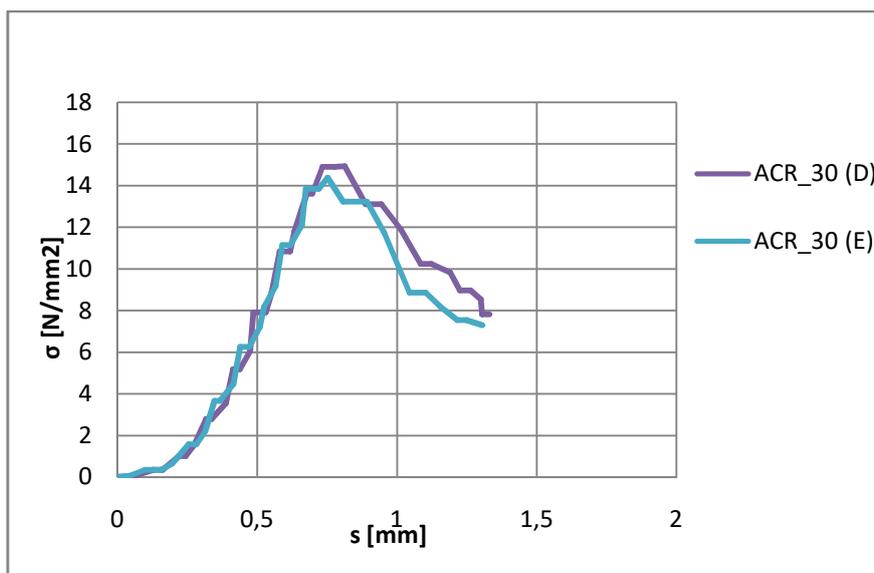


Figura 82 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_30 a 7 giorni

Si andranno ora a commentare i risultati ottenuti dalle prove per ogni tipologia di provini.

Tabella 14 - Risultati dei test a compressione eseguite a 7 giorni

Campione	Carico massimo medio F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a compressione media σ_{max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
RIF_0	39,22	0,99	24,51	
SB_10	24,07	0,8	15,04	-38,64
SB_20	15,74	0,65	9,84	-59,85
SB_30	11,89	0,84	7,43	-69,69
ACR_10	26,36	1,03	16,48	-32,76
ACR_20	23,63	1,13	14,77	-39,74
ACR_30	23,63	0,78	14,77	-39,74

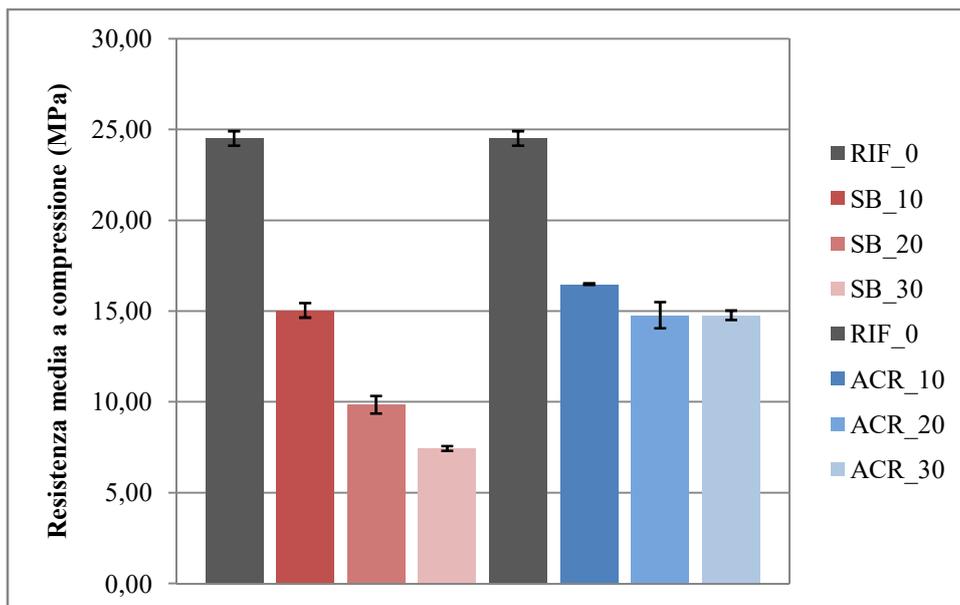


Figura 83- Resistenza media a compressione (MPa) dei provini a 7 giorni

Nella Tabella 14 si riportano i risultati della prova a compressione effettuata a 7 giorni su tre campioni per ogni tipologia di impasto.

L'aggiunta dell'emulsione polimerica con stirolo-butadiene e con resina acrilica contribuiscono ad un notevole decremento della resistenza media a compressione rispetto al valore ottenuto nel campione di riferimento composto da sola matrice inorganica.

In particolare l'aggiunta del 30% del polimero stirolo-butadiene penalizza la resistenza a compressione della malta fino al 70%.

3.4.5 Risultati a 28 giorni

Risultati prova a compressione RIF eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
RIF_0 (F)	50,14	1,02	31,34
RIF_0 (G)	45,86	0,98	28,67
RIF_0 (H)	40,12	1,63	25,07
RIF_0 (I)	50,15	1,25	31,34
Media	46,57	1,22	29,11
DevST	4,11	0,26	2,57
CoV (%)	8,83	21,16	8,84

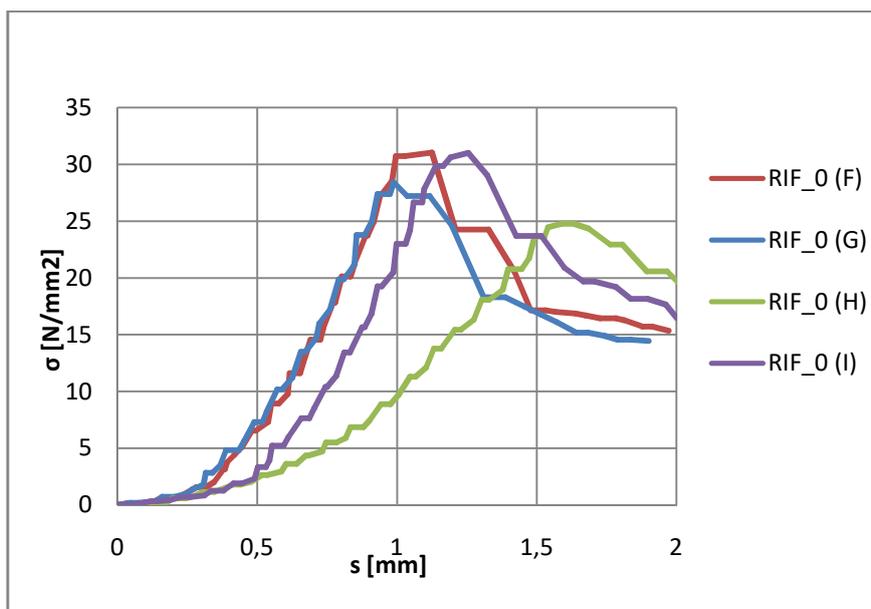


Figura 84 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini RIF_0 a 28 giorni

Risultati prova a compressione SB_10 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_10 (F)	33,23	0,73	20,77
SB_10 (G)	33,40	0,93	20,87
SB_10 (H)	25,84	0,85	16,15
SB_10 (I)	31,68	0,79	19,80
Media	31,04	0,83	19,40
DevST	3,07	0,07	1,92
CoV (%)	9,91	8,97	9,90

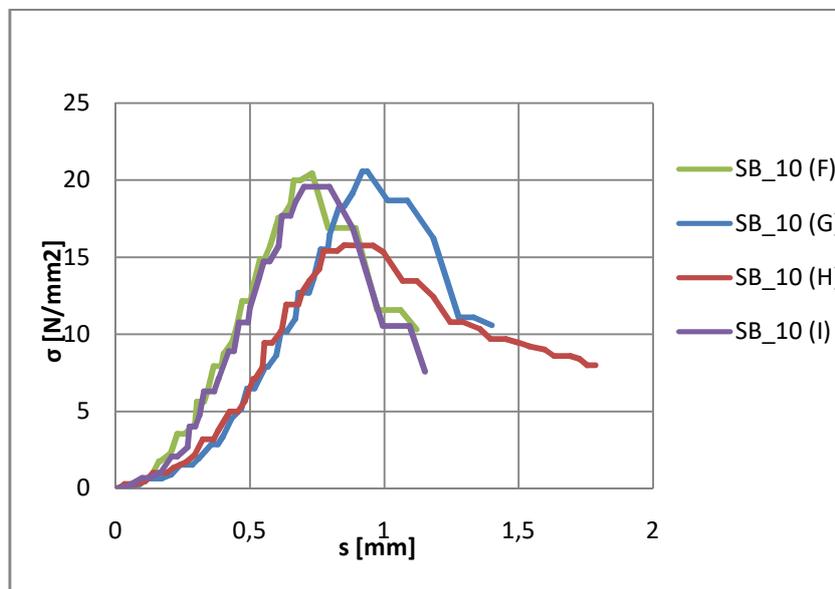


Figura 85 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_10 a 28 giorni

Risultati prova a compressione SB_20 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_20 (F)	24,07	0,73	15,04
SB_20 (G)	23,38	1,01	14,61
Media	23,73	0,87	14,83
DevST	0,34	0,14	0,21
CoV (%)	1,45	16,09	1,45

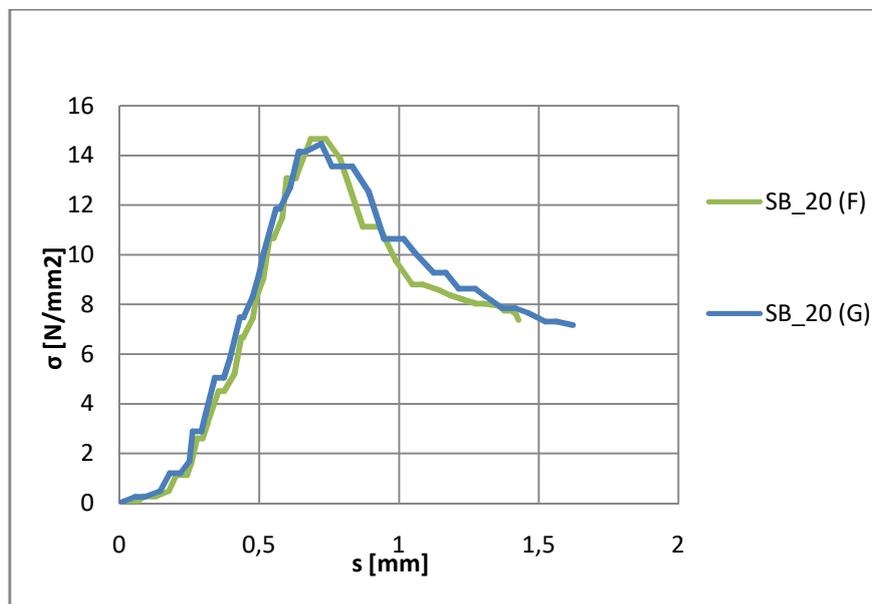


Figura 86 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_20 a 28 giorni

Risultati prova a compressione SB_30 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
SB_30 (F)	17,79	0,79	11,12
SB_30 (G)	17,81	0,80	11,13
SB_30 (H)	19,11	0,66	11,94
SB_30 (I)	16,84	0,81	10,53
Media	17,89	0,77	11,18

DevST	0,81	0,06	0,50
CoV (%)	4,51	7,98	4,49

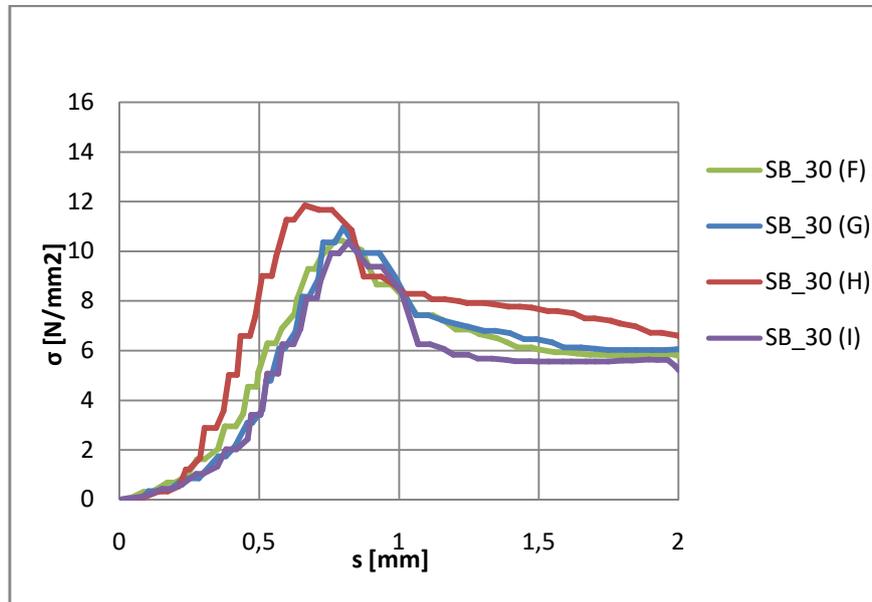


Figura 87 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_30 a 28 giorni

Risultati prova a compressione ACR_10 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_10 (3)	31,71	0,88	19,82
ACR_10 (4)	29,78	1,04	18,61
ACR_10 (5)	33,87	1,16	21,17
ACR_10 (6)	35,40	0,93	22,12
ACR_10 (D)	28,40	0,66	17,75
ACR_10 (E)	29,23	0,97	18,27
ACR_10 (F)	28,51	0,76	17,82
ACR_10 (G)	25,95	0,67	16,22
ACR_10 (H)	30,08	0,76	18,8
ACR_10 (I)	30,64	0,75	19,15
Media	30,36	0,86	18,97
DevST	2,61	0,16	1,63
CoV (%)	8,59	18,35	8,59

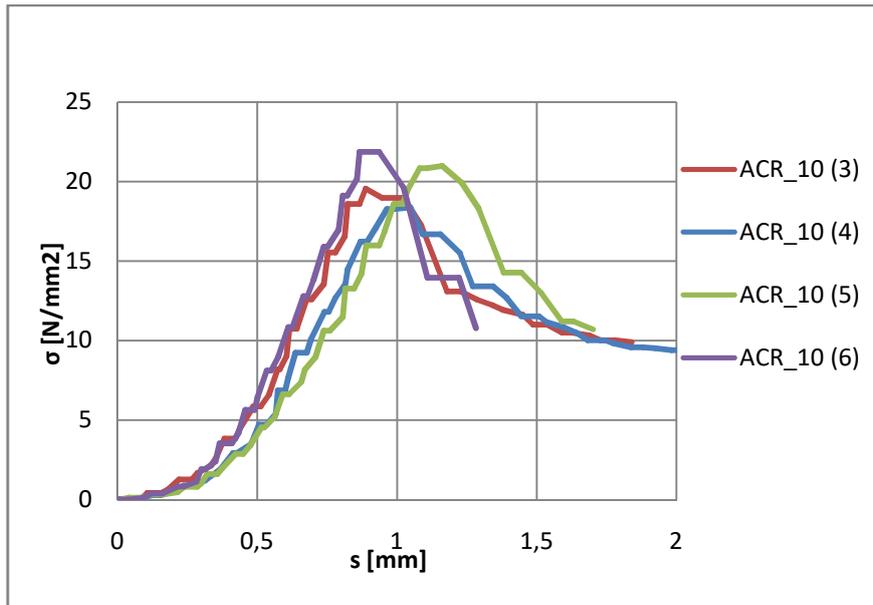


Figura 88 – (a)

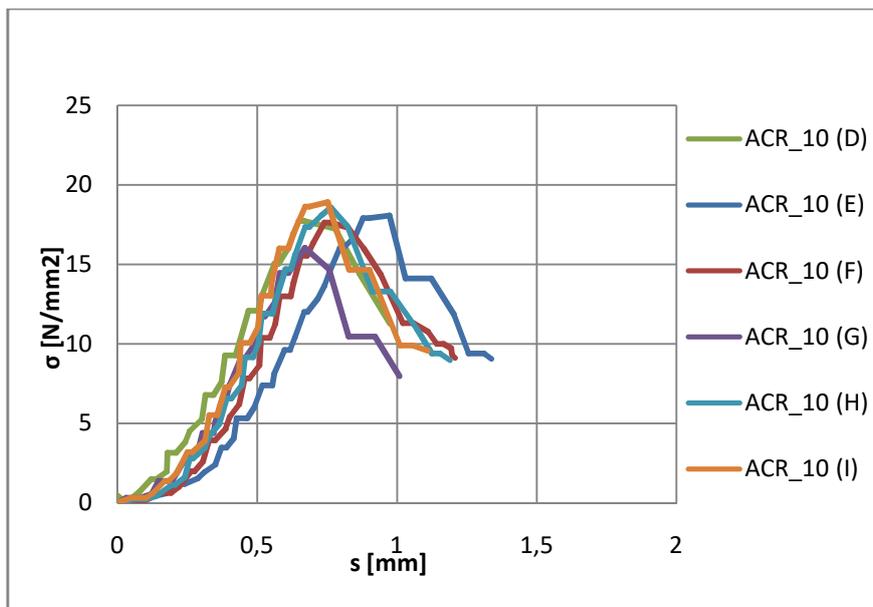
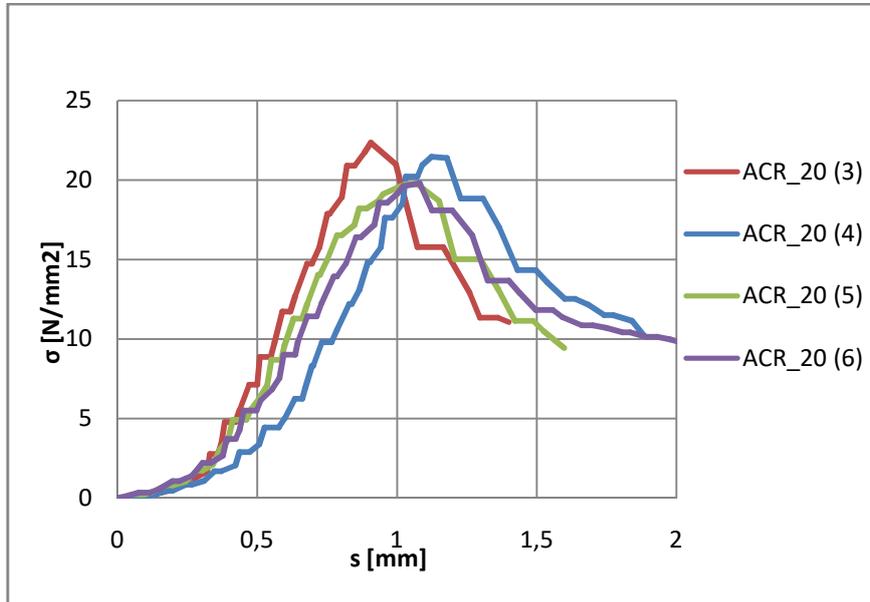


Figura 88 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_10 a 28 giorni (a) e (b)

**Risultati prova a compressione ACR_20 eseguite a 28
giorni**

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_20 (3)	36,13	0,91	22,58
ACR_20 (4)	34,62	1,12	21,64
ACR_20 (5)	31,95	1,07	19,97
ACR_20 (6)	32,04	1,08	20,02
ACR_20 (D)	33,25	0,80	20,78
ACR_20 (E)	35,37	1,13	22,11
ACR_20 (F)	31,37	0,74	19,6
ACR_20 (G)	35,73	1,35	22,33
ACR_20 (H)	34,77	1,06	21,73
ACR_20 (I)	36,14	1,09	22,59
Media	34,14	1,04	21,34
DevST	1,74	0,17	1,09
CoV (%)	5,10	16,17	5,11



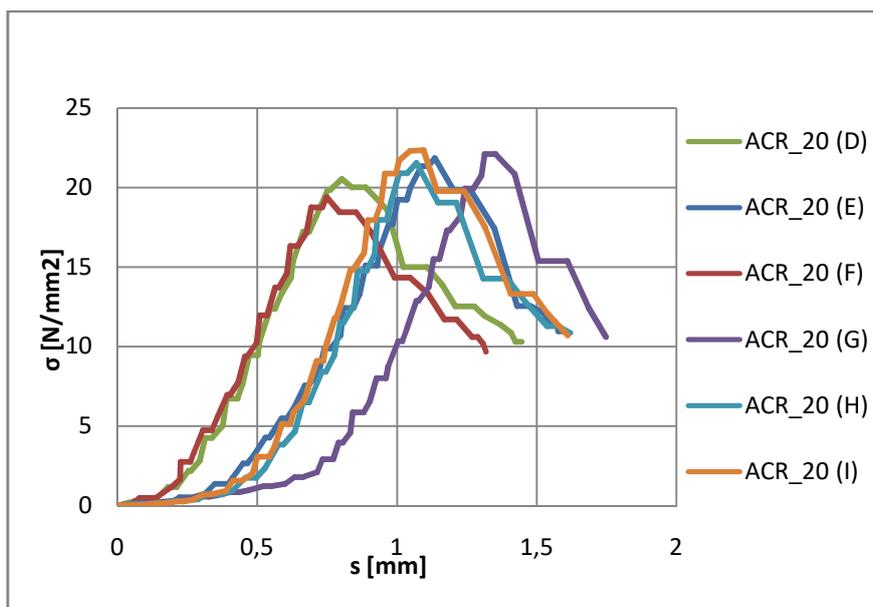


Figura 89 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_20 a 28 giorni (a) e (b)

Risultati prova a compressione ACR_30 eseguite a 28 giorni

Campione	Carico Massimo F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo s (mm)	Tensione massima σ_{max} (MPa)
ACR_30 (3)	33,95	0,84	21,22
ACR_30 (4)	35,73	0,94	22,33
ACR_30 (5)	33,69	1,12	21,05
ACR_30 (6)	35,99	1,26	22,49
ACR_30 (D)	35,17	1,12	21,98
ACR_30 (E)	36,50	0,79	22,81
ACR_30 (F)	32,75	0,82	20,47
ACR_30 (G)	36,24	0,81	22,65
ACR_30 (H)	33,12	0,88	20,70
ACR_30 (I)	35,15	0,80	21,97
Media	34,83	0,94	21,77
DevST	1,28	0,16	0,80
CoV (%)	3,69	17,00	3,68

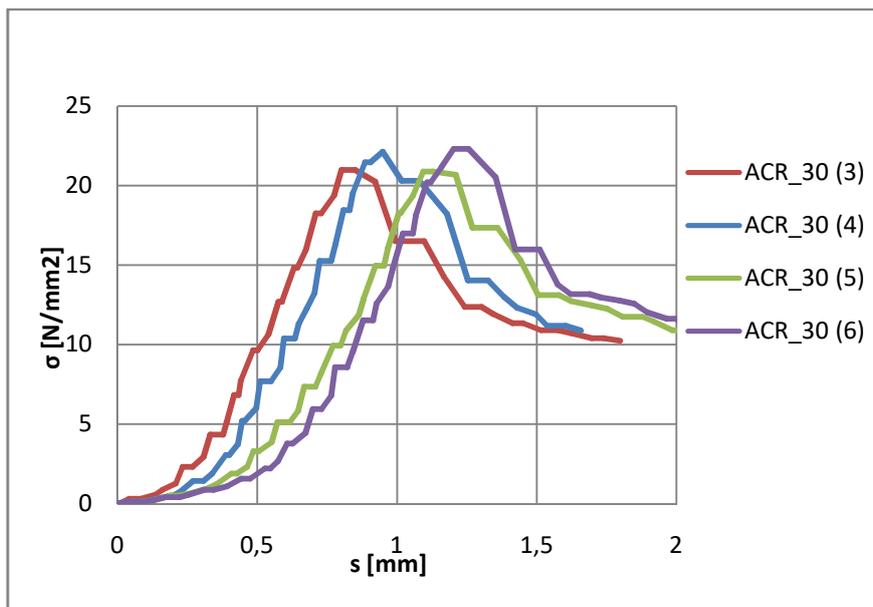


Figura 90 – (a)

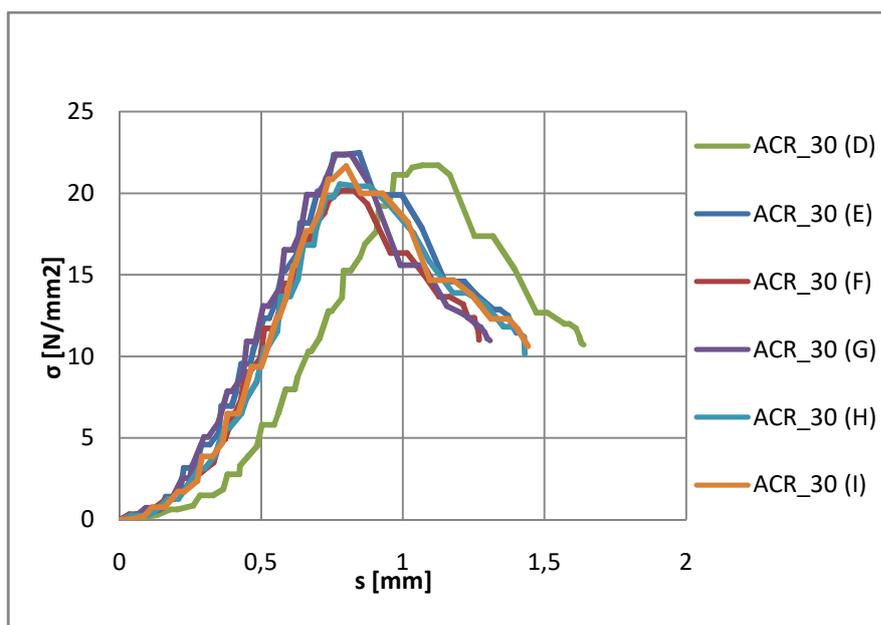


Figura 90 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_30 a 28
giorni (a) e (b)

Si andranno ora a commentare i risultati ottenuti dalle prove per ogni tipologia di provini.

Tabella 15 - Risultati dei test a compressione eseguite a 28 giorni

Campione	Carico massimo medio F_{max} (KN)	Spostamento al carico massimo medio s (mm)	Resistenza a compressione media σ_{max} (MPa)	Incremento tensione massima (%)
RIF_0	46,57	1,22	29,11	
SB_10	31,04	0,83	19,40	-33,36
SB_20	23,73	0,87	14,83	-49,06
SB_30	17,89	0,77	11,18	-61,59
ACR_10	30,36	0,86	18,97	-34,83
ACR_20	34,14	1,04	21,34	-26,69
ACR_30	34,83	0,94	21,77	-25,21

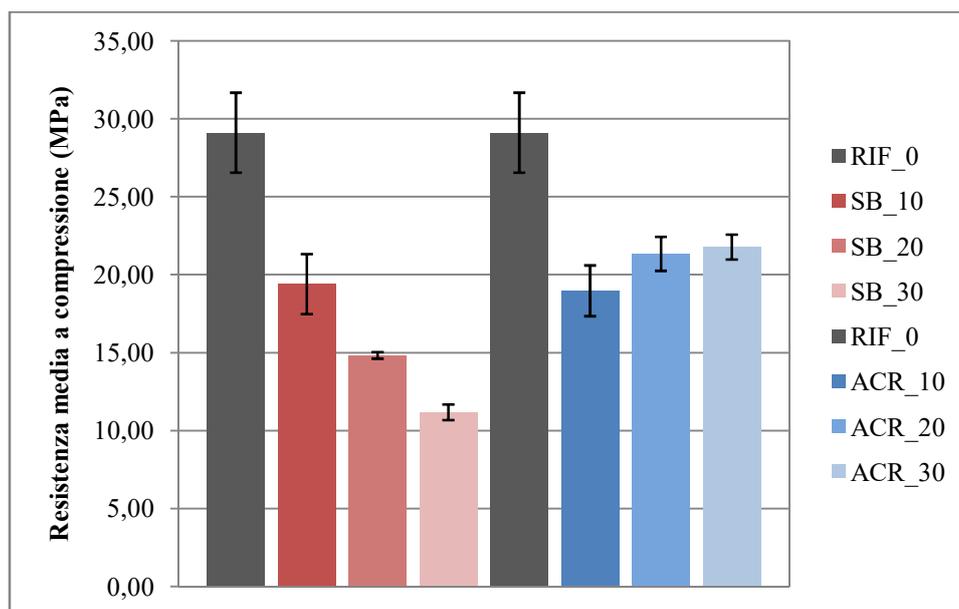


Figura 91- Resistenza media a compressione (MPa) dei provini a 28 giorni

Nella Tabella 15 si riportano i risultati della prova a compressione effettuata a 28 giorni sui campioni per ogni tipologia di impasto.

L'aggiunta dell'emulsione polimerica con stirolo-butadiene contribuisce ad un notevole decremento del 60% della resistenza media a compressione rispetto al valore ottenuto nel campione di riferimento composto da sola matrice inorganica(Figura 91).

Mentre con l'aggiunta del 30% del polimero acrilico penalizza la resistenza a compressione della malta fino al 25%, comunque sia minore a quella riscontrata nella maturazione a 7 giorni e sia quella riferita all'utilizzo del polimero stirolo-butadiene.

3.5 Risultati prova di Pundit

Prima di eseguire le prove di resistenza meccanica a flessione e quindi a compressione a 28gg sui provini 4x4x16 cm³ di matrice inorganica e con l'aggiunta di diverse percentuali di emulsioni di lattice polimerico, sono stati sottoposti a prova sonica per la determinazione del modulo elastico dinamico per avere un ulteriore parametro di riferimento e di confronto.

Il modulo elastico dinamico è stato ottenuto tramite la valutazione della velocità di attraversamento delle onde ultrasoniche effettuata sui provini prismatici di base quadrata 4x4 cm e altezza 16 cm. Tale metodo sfrutta la relazione esistente tra il modulo elastico dinamico del materiale, E_d , e la velocità, v , con la quale le onde ultrasoniche, applicate in questo caso con una frequenza di 50 kHz, lo attraversano, come espresso dalla formula:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \text{con} \quad k = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

Dove:

- v è la velocità delle onde espressa in m/s;
- E_d indica il modulo di elasticità dinamico in N/m²;

- ρ è la massa volumica del materiale espressa in kg/m^3 (valutata dividendo il peso di ciascun provino per il proprio volume apparente);
- k è una costante dipendente dal modulo di Poisson, ν , supposto pari a 0,30 per i provini di matrice inorganica.

La velocità v è stata ricavata dividendo la lunghezza del percorso compiuto dalle onde ultrasonore (in questo caso 16 cm) per il tempo impiegato (misurato in μs); ma essendo la misura influenzata dalla scabrosità della superficie del materiale, si è provveduto all'interposizione di uno strato di grasso tra le facce dei trasduttori e quelle del provino, in modo da garantire la qualità del contatto con il materiale da testare.

I dati ottenuti sono riferiti a un periodo di stagionatura di 28 giorni e ciascun valore del modulo elastico dinamico è stato ricavato mediando i risultati ottenuti da una serie di tre provini per ogni tipologia di impasto precedentemente illustrato nel Mix Design.

Tabella 16 – Dati della prova Pundit eseguita sui provini

Campione	peso [g]	peso medio [g]	t [μs]	t medio [μs]
RIF_0	523,82	525,54	44,40	44,20
RIF_0	527,26		44,00	
ACR_10	463,11	461,52	50,00	50,30
ACR_10	459,93		50,60	
ACR_20	465,64	465,85	49,70	50,00
ACR_20	466,06		50,30	
ACR_30	463,45	464,22	51,20	51,20
ACR_30	464,98		51,20	
SB_10	466,24	468,26	50,00	49,55
SB_10	470,28		49,10	

SB_20	419,83	419,83	56,10	56,10
SB_30	394,81	395,40	60,50	60,85
SB_30	395,99		61,20	

3.5.1 Riepilogo risultati

Tabella 17 – Elaborazione dati della prova Pundit provini ACR

	RIF_0	ACR_10	ACR_20	ACR_30
L [m]	0,16	0,16	0,16	0,16
T [s]	0,0000442	0,0000503	0,00005	0,0000512
v [m/s]	3619,91	3180,91	3200,00	3125,00
P [kg]	0,52554	0,46152	0,46585	0,464215
V [m ³]	0,000256	0,000256	0,000256	0,000256
r [kg/m ³]	2052,89	1802,81	1819,73	1813,34
Edin [N/mm ²]	19983269326	13550641620	13842400000	13154809134
Edin [MPa]	19983,27	13550,64	13842,40	13154,81

Tabella 18– Elaborazione dati della prova Pundit provini SB

	RIF_0	SB_10	SB_20	SB_30
L [m]	0,16	0,16	0,16	0,16
T [s]	0,0000442	0,00004955	0,0000561	0,00006085
v [m/s]	3619,91	3229,06	2852,05	2629,42
P [kg]	0,52554	0,46826	0,41983	0,3954
V [m ³]	0,000256	0,000256	0,000256	0,000256
r [kg/m ³]	2052,89	1829,14	1639,96	1544,53
Edin [N/mm ²]	19983269326	14167885774	9909529847	7932695855
Edin [MPa]	19983,27	14167,89	9909,53	7932,70

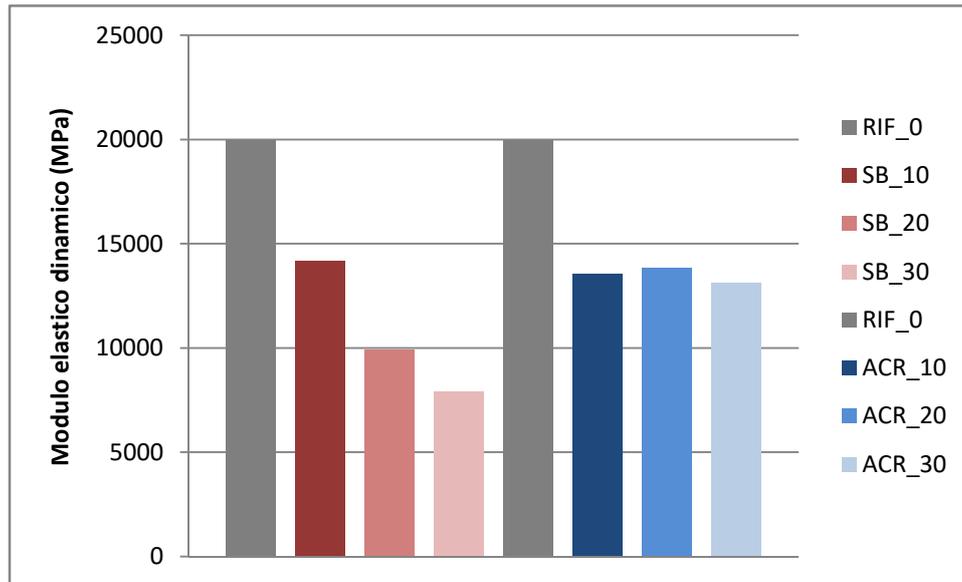


Figura 92 - Modulo elastico dinamico (GPa) dei provini Rif_0, SB e ACR

Dai risultati ottenuti dalla prova di Pundit rappresentati graficamente in Figura 92 e riepilogati nelle Tabelle 17 e 18, si può notare come l'aggiunta di polimero va a diminuire il modulo elastico dinamico rispetto al campione di sola matrice inorganica.

Nello specifico il modulo elastico dinamico dell'impasto costituito dal polimero a base di resine acriliche, rimane pressoché costante all'aumentare della percentuale di resina.

Nell'impasto costituito dal polimero stirolo-butadiene invece, il modulo elastico dinamico ha una diminuzione del valore fino al 50% con un'aggiunta del 30% di polimero nell'impasto.

Conclusioni

Il fine ultimo di questo lavoro è stato quello di investigare gli effetti dovuti all'utilizzo di due differenti tipologie di emulsioni di lattice polimerico, l'acrilico della Draco Collacem e lo stirolo-butadiene della Latisint, in una malta FRCM, in termini di prestazioni meccaniche.

Sono state eseguite prove di compressione e flessione su provini prismatici $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e prove di flessione su provini FRCM $8 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$ con rete di basalto. Tutti i provini avevano stessa composizione, ovvero costituita da calce NHL 3.5, cemento 42.5 e CaCO_3 400-600, con rapporto acqua/cemento costante di 0.42 ma contenuti di polimeri commerciali diversi.

L'effetto dell'aggiunta diretta di emulsioni di lattice SB nella malta cementizia in quantità di 10, 20 e 30% in peso di cemento ha generalmente aumentato i valori di dispersione del flusso rispetto alla sola malta, a differenza dell'ACR che non ha determinato nessun cambiamento, riportando una malta più coesa.

Sia dall'esame visivo della superficie di rottura dei vari provini che dalla Prova di Pundit si è riscontrata la diminuzione di peso per entrambi i polimeri rispetto al campione di riferimento, in gran parte con l'emulsione

polimerica SB in concomitanza con l'aumento della porosità all'interno della matrice e una riduzione del modulo elastico dinamico Ed.

Questo ha giustificato poi i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale sui provini prismatici i quali hanno comportato una riduzione della resistenza a flessione e compressione rispettivamente del 17 e 60% rispetto alla malta di riferimento con l'aggiunta dello stirolo-butadiene, al contrario un aumento del 20% a flessione nei provini maturati a 28 giorni con l'aggiunta dell'acrilato.

Per quanto riguarda la prova a flessione effettuata sui provini FRCM, sono state analizzate due fasi di rottura. La prima fessurazione riguardava la sola malta dove si è riscontrato il medesimo comportamento a flessione ottenuto nei provini prismatici, in cui l'aggiunta iniziale del 10% dell'emulsioni di lattice producevano un decremento della resistenza a flessione, mentre con un 20-30% si è riscontrato un recupero. La seconda fase illustrata nei vari grafici riportati precedentemente, hanno mostrato una maggiore duttilità, in termini di spostamento rispetto alla malta di riferimento, ma ciò a discapito della tenacità che al contrario si è dimezzata.

Sviluppi successivi potrebbero riguardare la caratterizzazione sperimentale di una malta FRCM con un mix design ottimizzato, riducendo ad esempio il rapporto acqua/cemento con l'obiettivo di mantenere costante la lavorabilità dell'impasto di riferimento. Facendo ciò sarebbe dunque possibile studiare e analizzare con i dosaggi a 10, 20 e 30% dell'emulsioni di lattice polimerico le prestazioni meccaniche, nei quali come documentato in letteratura, riducendo il contenuto d'aria, esempio con l'introduzione di additivi antibolle, dovremmo riscontrare un aumento delle resistenze a flessione e compressione.

Bibliografia e sitografia

CNR-DT 200, 2004 – “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’utilizzo di compositi fibrorinforzati”

CNR-DT 215, 2018 – “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica”

UNI EN 1015-11, 2007 – “Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione della malta indurita”

F. Soldera – “Caratterizzazione meccanica di materiali compositi a matrice cementizia per mezzo di prove di taglio diretto” Tesi di Laurea Università degli Studi di Padova, A.A. 2013-2014

P. Spiezia – “I materiali compositi fibrorinforzati nel recupero degli edifici storici” Tesi di dottorato Università degli Studi di Napoli, 2005

Kamile Tosun Felekoğlu, Burak Felekoğlu, Çağlar Yalçınkaya, Bülent Baradan – “Influence of Styrene Acrylate and Styrene Butadiene Rubber on Fresh and Mechanical Properties of Cement Paste and Mortars”

G. Barluenga, F. Hernandez-Olivares – “SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour”

Min Ook Kim - “Influence of Polymer Types on the Mechanical Properties of Polymer-Modified Cement Mortars”

Fabio Longo, Alessio Cascardi, Paola Lassandro, Alessandro Sannino and Maria Antonietta Aiello – “Mechanical and Thermal Characterization of FRCM-Matrices”

Zahra Bahranifard, Farshad Farshchi Tabrizi, Ali Reza Vosoughi – “An investigation on the effect of styrene-butyl acrylate copolymer latex to improve the properties of polymer modified concrete”

Elenco delle tabelle

- Tabella 1 – Mix design prodotto di riferimento commerciale*
Tabella 2 – Mix design provini con diversi dosaggi di emulsioni polimeriche
Tabella 3 - Peso dei provini a 7 giorni
Tabella 4 - Peso dei provini RIF_0 e SB a 28 giorni
Tabella 5 - Peso dei provini RIF e ACR a 28 giorni
Tabella 6 - Risultati della Prova di spandimento
Tabella 7 - Risultati dei test a flessione
Tabella 8 - Risultati dei test a flessione eseguite a 7 giorni
Tabella 9 - Risultati dei test a flessione eseguite a 28 giorni
Tabella 10 - Risultati prova a flessione valori medi di 1° fessurazione
Tabella 11 - Risultati prova a flessione valori medi di 2° fessurazione
Tabella 12- Risultati prova a flessione provini FRCC
Tabella 13 - Risultati dei test a compressione provini MP
Tabella 14 - Risultati dei test a compressione eseguite a 7 giorni
Tabella 15 - Risultati dei test a compressione eseguite a 28 giorni
Tabella 16 – Dati della prova Pundit eseguita sui provini
Tabella 17 – Elaborazione dati della prova Pundit provini ACR
Tabella 18 – Elaborazione dati della prova Pundit provini SB

Elenco delle figure

Figura 1 - Tipologia di fibre

Figura 2 - Legame costitutivo tipo a trazione uniassiale di un provino di FRCM

Figura 3 - Meccanismi di crisi

Figura 4 Rinforzo di pannelli murari con rete di basalto

Figura 5 - Rinforzo estradossale di volta in foglio mediante placcaggio diffuso con rete in fibra di basalto installata con malta a base di calce idraulica.

Figura 6 - Applicazione di fasce di tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie.

Figura 7 - (a) Rinforzo intradossale di volta a padiglione mediante placcaggio di fasce di tessuto unidirezionale in fibra di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza installate con malta a base di calce idraulica naturale; (b) Rinforzo estradossale di volte a crociera mediante placcaggio di fasce di tessuto unidirezionale in fibra di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza installate con malta a base di calce idraulica.

Figura 8 - Rinforzo intradossale di volta muraria con rete di fibra di vetro AR e malta

Figura 9 - Cordolature di piano realizzate con tessuti di PBO e acciaio.

Figura 10 - Cordolo sommitale realizzato con tessuti a base di reti di acciaio (a sx) e di vetro (a dx)

Figura 11 - Confinamento di pilastro di muratura con rete di vetro AR

Figura 12 - Rinforzo flessionale di una trave e di un pilastro con rete di PBO.

Figura 13 - Rinforzo a flessione di trave mediante placcaggio con strisce di tessuto unidirezionale realizzate con rete di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza e malta cementizia.

Figura 14 -- Rinforzo a taglio di una trave con rete di PBO

Figura 15 - Cerchiatura di pilastro mediante tessuto unidirezionale realizzato con rete di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza e malta cementizia.

Figura 16 - Confinamento di pilastro con tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta.

Figura 17 - Rinforzo di nodi travi-pilastro

Figura 18 - Rinforzo di nodi travi-pilastro con tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta

Figura 19 - Rinforzo a taglio di setti di calcestruzzo armato

Figura 20 - Rinforzo di un solaio (antisfondellamento)

Figura 21 - Rinforzo antiribaltamento di pareti con un sistema FRCM, costituito da rete di fibra di vetro, malta, promotore di adesione e fiocchi di fibra di vetro.

Figura 22 - Presidio antiribaltamento delle tamponature con diversi tipi di reti e connettori

Figura 23 - Rinforzo intradossale di un ponte ad archi in calcestruzzo con reti di PBO.

Figura 24 - CEM II 42,5 R, COLACEM S.p.A.

Figura 25 – Caratteristiche geometriche della rete in basalto

Figura 26 - Rete in fibra di basalto

Figura 27 - Predisposizione delle casseformi per i provini.

Figura 28 - Applicazione delle fibre di basalto nei provini in esame
 Figura 29 – Provini tipo FRCM
 Figura 30 - Preparazione provini 4x4x16 cm³
 Figura 31 - Provini 4x4x16 cm³
 Figura 32 - Peso dei provini maturati a 7 giorni
 Figura 33 - Peso dei provini maturati a 28 giorni (g) SB (sx) e ACR (dx)
 Figura 34 - Foto dei vari provini portati a rottura
 Figura 35 - Prova di Spandimento UNI EN 12350:2019
 Figura 36 - Pressa idraulica
 Figura 37 - Prova a Flessione provini 4x4x16 cm³
 Figura 38 - Setup di prova a flessione provini 8x1x20 cm³
 Figura 39 - Prova a compressione provini 4x4x16 cm³
 Figura 40 - Prova di Pundit
 Figura 41 - Prova di spandimento MP_80
 Figura 42 - Prova di spandimento MP_70
 Figura 43 - Prova di spandimento RIF_0
 Figura 44 - Prova di spandimento SB_10 (sx) e SB_20 (dx)
 Figura 45 - Prova di spandimento SB_30 (sx) e ACR_10 (dx)
 Figura 46 - Prova di spandimento ACR_20 (sx) e ACR_30 (dx)
 Figura 47 – Schema di carico della prova a flessione
 Figura 48 – Curva sforzo – spostamento a flessione e meccanismo di rottura provino MP_100
 Figura 49 – Curva sforzo - spostamento a flessione provini MP_80 a 7 giorni
 Figura 50 - Curva sforzo - spostamento a flessione provini MP_70 a 7 giorni
 Figura 51 - Resistenza media a flessione f_{max} (MPa)
 Figura 52 – Prova a flessione su tre punti provini con Stirolo-butadiene a 7 giorni
 Figura 53 – Curva sforzo – spostamento prova a flessione provini a base di resine acriliche a 7 giorni
 Figura 54 - Meccanismi di rottura provini ACR
 Figura 55 - Resistenza media a flessione (MPa) a 7 giorni
 Figura 56 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino RIF_0 a 28 giorni
 Figura 57 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino SB_10 a 28 giorni
 Figura 58 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_10 a 28 giorni
 Figura 59 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_20 a 28 giorni
 Figura 60 - Curva sforzo - spostamento a flessione provino ACR_30 a 28 giorni
 Figura 61 - Resistenza media a flessione f_{max} (MPa) a 28 giorni dei provini SB e ACR
 Figura 62 - Schema di carico della prova a flessione
 Figura 63 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino RIF_0
 Figura 64 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino SB_10
 Figura 65 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino SB_20
 Figura 66 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino SB_30
 Figura 67 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_10
 Figura 68 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_20
 Figura 69 – Curva forza – spostamento e rottura a flessione del provino ACR_30
 Figura 70 - Carico massimo medio di 1° fessurazione F (N) dei provini SB e ACR a 28 giorni

Figura 71 - Carico massimo medio di 2° fessurazione F (N) dei provini SB e ACR a 28 giorni

Figura 72 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_100 a 21 giorni

Figura 73 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_80 a 7 giorni

Figura 74 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini MP_70 a 7 giorni

Figura 75 - Resistenza media a compressione (MPa) provini MP

Figura 76 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini RIF_0 a 7 giorni

Figura 77 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_10 a 7 giorni

Figura 78 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_20 a 7 giorni

Figura 79 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_30 a 7 giorni

Figura 80 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_10 a 7 giorni

Figura 81 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_20 a 7 giorni

Figura 82 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_30 a 7 giorni

Figura 83 - Resistenza media a compressione (MPa) dei provini a 7 giorni

Figura 84 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini RIF_0 a 28 giorni

Figura 85 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_10 a 28 giorni

Figura 86 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_20 a 28 giorni

Figura 87 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini SB_30 a 28 giorni

Figura 88 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_10 a 28 giorni (a) e (b)

Figura 89 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_20 a 28 giorni (a) e (b)

Figura 90 - Curva sforzo - spostamento a compressione provini ACR_30 a 28 giorni (a) e (b)

Figura 91 - Resistenza media a compressione (MPa) dei provini a 28 giorni

Figura 92 - Modulo elastico dinamico (GPa) dei provini RIF_0, SB e ACR