POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Edile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione delle prestazioni di malte per interventi di manutenzione, conservazione, restauro



Relatore

Prof. Arch. Marco Zerbinatti

Candidato

Federico Vecchio

Scaletta

Introduzione	1
1. Le malte	3
1.1 Cenni storici	5
1.2 Applicazioni	8
2. Composizione delle malte	13
2.1 Gli aggregati	15
2.1.1 Sabbia	20
2.1.2 Cocciopesto	24
2.1.3 Pozzolana	25
2.1.4 Altri aggregati	27
2.2 I leganti	30
2.2.1 Calci aeree	32
2.2.2 Altri leganti	36
2.3 Additivi - aggiunte	41
2.3.1 Acqua	45
3. Produzione delle malte	46
3.1 Processo produzione dei campioni	48
3.2 Descrizione delle malte formulate	56
3.2.1 Malte di sabbia e calce idrata in polvere	56
3.2.2 Malte di sabbia e grassello di calce	60
3.2.3 Malte di sabbia/cocciopesto e calce idrata in polvere	63
3.2.4 Malte di sabbia/trass e calce idrata in polvere	66
4. Prove sperimentali	69
4.1 Prova a impulsi ultrasonici	69
4.1.1 Procedura operativa	73
4.1.2 Risultati	77
4.2 Prova a flessione	82
4.2.1 Procedura operativa	83
4.2.2 Risultati	84
4.3 Prova a compressione	88
4.3.1 Procedura operativa	89
4.3.2 Risultati	90

APPENDICE A: Schede prova a impulsi ultrasonici	95
APPENDICE B: Schede prova a flessione	114
APPENDICE C: Schede prova a compressione	123
Bibliografia	133



(Con il seguente QR code si ha accesso a tutte le schede in formato Excel)

Introduzione

I materiali ed in particolare la loro scelta rappresenta una parte fondamentale per un intervento di recupero di un bene edilizio. Scegliere il materiale adeguato è quindi la chiave per interventi volti a garantire la conservazione di un manufatto nel tempo. La scelta è quindi subordinata alla verifica di due condizioni necessarie, la compatibilità dal punto di vista estetico/storico (rispettando i principi sanciti dalla Carta del Restauro del 1972 ad opera di Cesare Brandi) e la compatibilità dal punto di vista meccanico e chimico.

Nel caso specifico le malte, largamente utilizzate nell'edilizia storica (ma anche attuale), necessitano di reintegri materici o una totale sostituzione, a causa del naturale degrado nel corso del tempo oppure a causa di un evento straordinario come ad esempio un sisma. Nel seguente elaborato si andranno a valutare le caratteristiche meccaniche (in particolare il modulo elastico dinamico e statico) di determinate formulazioni di malte prodotte presso il laboratorio DISET del Politecnico di Torino, cercando quindi di risolvere il problema della scelta dal lato della compatibilità meccanica.

Nel primo capitolo del seguente elaborato, con approccio teorico, vengono trattate le malte in generale, la loro origine, come vengono realizzate e poste in opera.

Nel secondo capitolo vengono descritti gli elementi che compongono una malta (aggregati, leganti e additivi) specificando e approfondendo in particolare quelli utilizzati per la realizzazione delle malte successivamente analizzate.

Il terzo capitolo, di natura sperimentale, tratta delle operazioni effettuate in laboratorio per la produzione dei campioni, andando poi a descrivere nel dettaglio ciascuna formulazione realizzata.

Il quarto capitolo prevede con approccio teorico prima la descrizione delle prove e poi con approccio sperimentale la procedura operativa e il successivo calcolo del modulo elastico dinamico, della resistenza a flessione e compressione per ogni formulazione.

Nel quinto e ultimo capitolo si confronteranno i risultati delle due prove e si trarranno le conclusioni sull'esperienza maturata. In allegato inoltre sono presenti le schede con i dati delle prove e le schede tecniche dei materiali.

L'obiettivo finale di questa Tesi è infatti quello di fornire dati fondamentali per la realizzazione di un atlante che si ponga come strumento di valutazione e controllo delle malte e che quindi aiuti gli operatori del settore (dai progettisti, le sovraintendenze alle maestranze) nel processo decisionale per l'intervento in essere.

Il seguente rappresenta quindi soltanto una delle tappe, che segue quelle già precedentemente percorse da due altre Tesi di Laurea Magistrale nel 2015¹ e nel 2018², con il dipartimento sempre in corsa per raggiungere l'obiettivo finale.

¹ Trimarchi Alessia, Caratterizzazione di malte per interventi di manutenzione e conservazione. Criteri di formulazione e miscelazione, confronto tra caratteristiche meccaniche, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Luglio 2015.

 ² Bellocci Benedetta, Malte per interventi di manutenzione, conservazione, restauro. Determinazione del modulo elastico mediante prove di laboratorio, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Marzo 2018.

1. Le malte

La malta ("mortar" in inglese) è un conglomerato composto da una miscela di acqua, sabbia, legante e eventuali additivi. Dosando bene il tutto si forma un impasto a comportamento plastico, che attraverso reazioni chimiche irreversibili indurisce con il passare del tempo.

Dalle normative estrapoliamo le seguenti definizioni:

"Si definisce malta una miscela di leganti inorganici, aggregati prevalentemente fini, acqua ed eventuali componenti organici e/o inorganici (o una miscela di solo legante ed acqua) in proporzioni tali da conferire alla miscela, allo stato fresco, un'opportuna lavorabilità e, allo stato indurito, adeguate caratteristiche fisico-meccaniche (resistenza, deformabilità, aderenza, porosità, permeabilità all'acqua in fase vapore e all'acqua in fase liquida, ecc.), di aspetto, di durabilità, ecc." (NorMaL -23/86) ³

"Una miscela di uno o più leganti inorganici, aggregati, acqua ed eventuali additivi e/o aggiunte [...]". (UNI EN 998-1:2016) 4

È importante inoltre, mettere in evidenza le differenze tra le malte, le paste, gli intonaci e i calcestruzzi, che seppur simili in svariati aspetti differiscono nella composizione (tabella 1.1). Le paste sono semplicemente una miscela di acqua e uno o più leganti, mancano quindi degli aggregati, e quindi delle proprietà di resistenza meccanica conferita dalla loro presenza. Una tipologia di paste sono le boiacche, caratterizzate da una elevata fluidità dovuta ad un impasto con acqua molto eccedente rispetto a quella necessaria per la presa. L'esempio più comune di paste sono gli stucchi, composti in genere da gesso cotto macinato, acqua ed eventuali additivi. Possiamo quindi asserire che, una malta non è altro che una pasta a cui viene aggiunto un aggregato fine (ad esempio sabbia).

Gli intonaci, rientrano a tutti gli effetti nella famiglia delle malte, con però l'unica differenza di avere nell'impasto solo aggregati molto fini dal diametro massimo di 0,5 mm. La composizione degli intonaci differisce da quelle delle malte ordinarie, perché la quantità di legante è notevolmente superiore. In genere l'intonaco civile è composto da sabbia con granulometria da 0,1 a 0,2 mm.

I calcestruzzi (abbreviato in cls) pur essendo anche essi dei conglomerati, differiscono dalle malte per la presenza nell'impasto di aggregati di granulometria superiore. In particolare, si distinguono in ghiaietto (da 4,00 a 8,00 mm), ghiaia media (da 8,0 a 31,5 mm) e ghiaia grossa (da 31,5 a 65 mm), distribuite a seconda della curva granulometrica scelta (che comunque deve essere ben assortita) determinando svariate destinazioni d'uso del calcestruzzo. Le quantità di acqua in gioco per una ottimale lavorabilità sono inoltre notevolmente superiori rispetto ad una

³ Raccomandazioni NorMaL – 23/86: Terminologia tecnica: definizione delle malte.

⁴ UNI EN 998-1:2016 - Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni.

malta. I calcestruzzi nel senso moderno del termine si intendono impasti con legante cemento, sebbene ad esempio gli Antichi Romani erano soliti utilizzare anche calce viva con pozzolana.

Tabella 1.1: Differenze composizionali tra pasta, intonaco, malta e calcestruzzo

Pasta	Intonaco	Malta	Calcestruzzo	
Acqua	Acqua	Acqua	Acqua	
Leganti	Leganti	Leganti	Legante	
Eventuali additivi	Aggregati fini	Aggregati	(Cemento)	
	(Max 0,5 mm)	(Max 4 mm)	Sabbia	
	Eventuali additivi	Eventuali additivi	(Max 4 mm)	
			Ghiaietto (Max 8 mm)	
			Ghiaia (Max 65 mm)	
			Eventuali additivi	

Le malte inoltre vengono definite in base al rapporto tra aggregato e legante in:

- Malte grasse, in cui il rapporto aggregato-legante è inferiore a 3:1, in genere (2:1 e 2,5:1), la quantità di legante, a parità di massa, è superiore ad una malta standard.
- Malte standard, in cui il rapporto aggregato-legate è pari a 3:1, rapporto che consentirebbe il riempimento dei vuoti creati dall'impacchettamento dell'aggregato (pari al 33% del volume).
- **Malte magre**, in cui il rapporto aggregato-legante è superiore a 3:1, in genere (3,5:1 e 4:1), la quantità di legante, a parità di massa, è inferiore ad una malta standard.

1.1 Cenni storici

La malta è un materiale da costruzione di cui si è sempre presupposto l'esistenza. Seppur di stupefacente articolazione composita, una malta è sostanzialmente composta da materiali comuni e di ridotto costo, che opportunamente miscelati creano un materiale da costruzione eccellente e versatile. Questi fattori hanno influito notevolmente alla diffusione di questo materiale in ambito edile.

La prima malta ad essere utilizzata risale alla nascita dell'uomo, si andavano a realizzare degli impasti formati da argilla e fango, tutto ciò in maniera molto rudimentale e ben lontano dalla perfezione delle miscele attuali.

La nascita vera e propria delle malte è però dovuta all'uso della calce, che viene considerato il legante "standard" per la creazione di una malta. Per molto tempo quindi l'utilizzo delle malte è stato influenzato dalla reperibilità e dal processo di produzione di questo materiale fondamentale per la miscela.

I primi usi delle malte sono quindi direttamente collegati alla scoperta del processo di cottura, spegnimento e indurimento della calce, che come per quasi tutte le grandi scoperte nel corso della storia avvenne probabilmente in maniera aleatoria.

Recenti scavi archeologici a Mallaha (Palestina) hanno riportato alla luce un villaggio di circa 15 mila anni, le cui pareti furono rivestite da una malta a base proprio di calce, rappresentando il più antico manufatto ad avere questo materiale.

Durante il mesolitico un altro legante è stato scoperto e utilizzato per la creazione di malte, il gesso. Questo richiede temperature di cottura inferiori e una posa in opera più semplice, avendo un tempo di presa inferiore, a discapito però di una pessima resistenza in condizioni umide. Il gesso veniva (e viene) usato quindi in ambienti secchi, per gli interni o per la costruzione di archi in mattoni e volte.

Nel corso dei millenni dal neolitico in poi, i vari popoli civilizzati di quelle epoche hanno affinato le tecniche produttive della calce aerea rendendo l'uso delle malte comune. L'uso delle malte è aumentato a tal punto da diventare un materiale fondamentale per l'edilizia di grandi popoli come ad esempio, i Babilonesi, gli Egizi, i Maya, i Cinesi e i Fenici.

I Babilonesi a causa della mancanza di pietra e alla simultanea abbondanza di argilla erano soliti costruire gli edifici in mattoni cotti legati con malte di calce o pece. L'utilizzo però non era confinato alla sola Mesopotamia, un esempio è il Mehrgarh (figura 1.1.1) del Baluchistan (Pakistan) costruzione in mattoni essiccati al sole risalente al 6500 a.C.



Figura 1.1.1: Mehrgarh in Pakistan

Anche nelle civiltà della valle dell'Indo prima tra tutte gli Harappa, terzo millennio a.C. costruivano con l'utilizzo di mattoni e malta di gesso.

Gli antichi Egizi costruirono le prime piramidi durante l'Antico Regno (tra il 2600 e il 2500 a.C.) con blocchi di calcare legati con malte di fango e argilla oppure di argilla e sabbia. Le piramidi successive invece vennero realizzate con malte a base di calce o gesso e sabbia.

I Fenici furono i primi a scoprire un legante capace di far presa e indurire anche a contatto con l'acqua (comportamento idraulico). Prepararono delle malte idrauliche artificiali mescolando calce aerea e sabbia vulcanica appartenente all'isola Thera (Santorini).

Nello stesso periodo storico nel subcontinente Indiano, in particolare nell'insediamento urbano di Mohenjo-daro si utilizzò per la prima volta un cemento gessoso di color grigio chiaro, che conteneva sabbia, argilla, tracce di carbonato di calcio e percentuali di calce. Queste malte cementizie venivano usate per costruire pozzi o condotto di drenaggio, ad esempio la Grande Vasca di Mohenjo-daro.

Gli antichi Greci, utilizzavano malte pozzolaniche, cioè malte a base di calce con additivata della cenere vulcanica, che veniva prelevata dalle isole greche di Thira e Nisiros oppure dalla colonia in Italia vicino Napoli, Dicaearchia (Pozzuoli). Un esempio di recente scoperta è un serbatoio a Megara rivestito con 12 mm di malta pozzolanica risalente al 500 a.C.

È proprio con la civiltà classica che si ebbe l'apice dello sviluppo tecnologico e la prima vera e propria "letteratura scientifica" riguardò la produzione e l'uso delle malte. La fonte scritta più antica è il *De architectura* di Vitruvio⁵, al cui interno, si trovano numerose formulazioni e indicazioni tecniche riferite alle malte con calce e sabbia.

Ricetta Vitruviana

"Dopo aver parlato dei materiali sabbiosi vediamo ora quanta attenzione si debba usare nel trattamento della calce. La si ottiene dalla cottura di pietra bianca o di selce; quella ricavata da una pietra compatta e dura è adatta per la struttura muraria, mentre quella ottenuta da una pietra porosa va bene per l'intonaco. Una volta raffreddata la si mescola con sabbia nel rapporto di uno a tre se questa è di cava, di uno a due se invece è di fiume; cosi si ottiene un dosaggio ben equilibrato. Ma il risultato sarà ancora migliore se alla sabbia di fiume o di mare si aggiungerà la terza parte di frammenti di coccio pestato e setacciato. [...]"

"De harenae copiis cum habeatur explicatum, tum etiam de calce diligentia est adhibenda, uti de albo saxo aut silice coquatur; et quae erit ex spisso et duriore, erit utilis in structura, quae autem ex fistuloso, in tectoriis. Cum ea erit extincta, tunc materia ita misceatur, ut, si erit fossicia, tres harenae et una calcis infundatur; si autem fluviatica aut marina, duo harenae una calcis coiciatur. Ita enim erit iusta ratio mixtionis temperaturae. Etiam in fluviatica aut marina si qui testam tunsam et succretam ex tertia parte adiecerit, efficiet materiae temperaturam ad usum meliorem. [...]"

All'interno di *Naturalis Historia*, Plinio il Vecchio⁶, riconobbe la validità delle indicazioni di Vitruvio e si focalizzò sullo studio del legante calce, sulla manipolazione e stagionatura. Secondo Plinio il Vecchio una malta è tanto più efficace quanto più la calce utilizzata è stagionata. Oltre queste due opere anche Catone⁷ nel suo *De agricoltura* approfondì queste tematiche.

_

⁵ Marco Vitruvio Pollione, architetto e scrittore romano, attivo nella seconda metà del I secolo a.C.

⁶ Plinio il Vecchio, scrittore, naturalista e filosofo romano.

⁷ Marco Porcio Catone, politico e scrittore romano.

Queste tre opere furono la base per le trattazioni elaborate durante il rinascimento, che avevano come scopo la trasmissione teorica delle pratiche del costruire e il desiderio di emulare la perfezione dal punto di vista tecnico e la longevità delle malte Romane.

Gli autori rinascimentali tra i quali si annoverano, Leon Battista Alberti⁸, Francesco di Giorgio Martini⁹, Andrea Palladio¹⁰, Vincenzo Scamozzi¹¹, fecero proprie le indicazioni romane in riferimento alle proporzioni degli ingredienti da adoperare negli impasti e le tecniche di lavorazione, discostandosi però a riguardo della qualità delle materie prime utilizzabili.

Al tramonto del XVI secolo, Philibert Delorme¹² fu il primo a indicare proporzioni differenti da quelle Vitruviane, e direttamente collegate non al luogo di provenienza delle sabbie ma alla loro qualità.

Nei testi settecenteschi, le disposizioni classiche non vengono abbandonate, sebbene vengono sottolineate le difficoltà nel reperire una calce di qualità per permettere ad esempio malte con rapporto legante-aggregato (1:3). Francesco Griselini¹³ e Francesco Milizia¹⁴ affermarono però che fosse impossibile mantenere un rapporto costante tra sabbia e calce, e che questo dipendeva dalla qualità della calce, maggiore qualità significava maggiore quantità di sabbia.

Dall'Ottocento in poi tutte le trattazioni riguardanti le malte riportavano non più indicazioni assolute, ma riferibili a qualità di sabbia e calci specifiche reperibili nelle regioni di provenienza degli autori.

Per quasi due millenni, dalla fine dell'età classica fino alla rivoluzione industriale, si fabbricarono esclusivamente malte a base calce, malte aeree, abbandonando l'arte di fabbricare malte idrauliche e cementizie, perfezionate e di ampio uso nella civiltà greca e romana. Questa importante assenza è dovuta al fatto che, i materiali a comportamento pozzolanico naturale non erano molto diffusi, la difficoltà nei trasporti e il costo elevato hanno favorito la ricerca e l'uso di malte prive di componenti idraulicizzanti.

Con l'avvento della rivoluzione industriale, con la necessità di sviluppare porti, canali e ponti, si ritornò a creare queste malte utilizzando materiali artificiali come il cocciopesto, le scorie di ferro (loppa) oppure i cementi naturali e/o artificiali.

Ad oggi nel Ventunesimo secolo, seppur mantenendo la forte impronta della tradizione, il mondo della ricerca scientifica avanza speditamente, coinvolgendo anche questo settore, con processi di produzione industriale sempre più efficienti (ottenendo quindi materiali di qualità via via superiore) e tramite la scoperta e l'uso di additivi che garantiscono prestazioni e proprietà impensabili in passato.

Conoscere la storia è fondamentale, però nell'ambito del restauro è praticamente una necessità. Conoscere e capire i modi di costruire del passato e i materiali usati, sono le basi per poter conservare e/o restaurare un manufatto a regola d'arte.

⁸ Leon Battista Alberti (Genova, 18 febbraio 1404 – Roma, 25 aprile 1472) è stato un architetto e scrittore italiano.

⁹ Francesco di Giorgio Martini (Siena, settembre 1439 – Siena, 29 novembre 1501) è stato un architetto e ingegnere italiano.

¹⁰ Andrea Palladio (Padova, 30 novembre 1508 – Maser, 19 agosto 1580), è stato un architetto e teorico dell'architettura italiano.

¹¹ Vincenzo Scamozzi (Vicenza, 2 settembre 1548 – Venezia, 7 agosto 1616) è stato un architetto italiano.

¹² Philibert Delorme (Lione, giugno 1514 – Parigi, 8 gennaio 1570), esponente dell'architettura francese del Rinascimento.

¹³ Francesco Griselini (Venezia, 12 agosto 1717 – Milano, 5 settembre 1787), è stato un naturalista italiano.

¹⁴ Francesco Milizia (Oria, 15 novembre 1725 – Roma, 7 marzo 1798) è stato un teorico dell'architettura italiano.

1.2 Applicazioni

Grazie al progresso tecnologico si è reso possibile produrre malte con composizioni specifiche, ciò ha espanso incredibilmente il campo di applicazione delle malte, portando a un loro impiego per funzioni differenti da quella originaria (strutturale). Visti i numerosi impieghi è infatti possibile classificare le malte in base all'uso nell'ambito dell'edilizia.

Malte per restauro

Le malte utilizzate per il restauro, ad esempio di monumenti sono in genere delle malte speciali con formulazioni ad hoc, che variano caso per caso, spesso infatti vengono confezionate da ditte specializzate in restauro. L'aspetto fondamentale nella scelta del prodotto più idoneo è che ad indurimento avvenuto, la malta deve avere caratteristiche analoghe o comunque compatibili a quelle del materiale su cui viene posata, compatibilità dal punto di vista chimico, ma soprattutto da quello fisico. Per questo utilizzo delle malte vanno quindi attenzionate le seguenti proprietà: modulo elastico, resistenza a compressione, resistenza a flessione, coefficiente di dilatazione termica, porosità e permeabilità.

Caratteristiche fondamentali:

- aderenza e compatibilità al supporto;
- assenza o controllo del ritiro;
- assenza di segregazione;
- assenza di essudazione;
- elevate resistenze meccaniche;
- caratteristiche idrofughe;
- resistenza all'aggressione ambientale;
- durabilità.

Le malte utilizzate per il restauro devono inoltre rispettare le prescrizioni delle raccomandazioni NorMaL 26/87 "Caratteristiche delle Malte da Restauro" e le norme (UNI 11088:2003)¹⁵, (UNI 11089:2003)¹⁶, (UNI EN 990-1:2004)¹⁷ e (UNI EN 990-2:2004)¹⁸.

¹⁵ UNI 11088:2003, Beni culturali – Malte storiche da restauro: Caratterizzazione chimica di una malta. Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di specie solubili.

¹⁶ UNI 11089:2003, Beni culturali – Malte storiche da restauro: Stima della composizione di alcune tipologie di malte.

¹⁷ UNI EN 990-1:2004, Specifiche per malte per opere murarie: Malte da intonaco.

¹⁸ UNI EN 990-2:2004, Specifiche per malte per opere murarie: Malte da muratura.

Malte per risanamento

Sono così definite tutte quelle malte che servono a negare la penetrazione di acqua attraverso le murature interrate e fuori terra, le malte che garantiscono una sigillatura istantanea e le malte subacquee. Vengono utilizzate in serbatoi, canalizzazioni, fognature, fondazioni, canali, gallerie, condotte, dighe, e per perdite e il riempimento di cavità. È quindi necessario un indurimento rapido e una elevata e immediata resistenza meccanica.

Caratteristiche fondamentali:

- rapidità di presa;
- capacità di penetrazione cavità supporto;
- assenza di ritiro;
- tixotropicità;
- plasticità;
- resistenza agli attacchi dei solfati;
- resistenza agli attacchi dei cloruri.

Malte consolidanti

Nell'ambito del restauro edilizio si adoperano malte per il consolidamento, per riempire lesioni o macro-porosità e per effettuare degli ancoraggi fissando ad esempio dell'armatura ad un paramento murario. Tra queste malte rientra il cosiddetto betoncino di consolidamento, che non è altro che una malta espansiva. Il betoncino viene impiegato riempiendo le cavità della muratura per colatura o anche tramite iniezione. Questa malta si presta quindi, anche per l'ancoraggio di zanche o tirafondi di strutture metalliche, creare dei basamenti/appoggi, e come collegamento rigido tra elementi in calcestruzzo.

Caratteristiche fondamentali:

- elevate caratteristiche meccaniche con breve stagionatura;
- elevata lavorabilità (fino ad 8h);
- assenza di ritiro;
- espansività.

Malte per ripristini

Il ripristino strutturale consiste nel riparare e quindi riportare in efficienza una struttura ammalorata. Per questa tipologia di interventi si adoperano malte sintetiche ad alta resistenza chimica e meccanica, questo perché devono essere capaci di resistere a sollecitazioni impegnative. In queste particolari malte è comune trovare additivate sottilissime fibre ad esempio, fibre di vetro o fibre poliammidiche, che servono a creare una "armatura" diffusa. Rientrano in questa categoria anche le malte che servono a ricostruire il copriferro di un'opera in calcestruzzo armato.

Caratteristiche fondamentali:

- elevata resistenza a compressione;
- elevata resistenza a trazione;
- resistenza agli attacchi chimici;
- resistenza agli agenti atmosferici;
- spiccata tixotropicità;
- lunga lavorabilità;
- assenza di ritiro.

Malte per demolizioni

Grazie all'utilizzo di formulati speciali, alcune malte sono in grado di consentire una demolizione (circoscritta) di strutture o rocce isolate. Questo processo avviene a causa dell'espansione di volume che il prodotto subisce in fase di consolidamento (*spinte di circa 6000-8000 t/m* 2). Queste malte sono in grado quindi di tagliare, rompere e demolire perfino opere in cemento armato, e si prestano ad essere usate in luoghi in cui per specifiche prescrizioni ambientali o di sicurezza le esplosioni non sono consentite (il fenomeno chimico in esame infatti non genera lancio di detriti o polvere e avviene in maniera silenziosa). Queste particolari malte consentono: scavi per fondazioni o per trincee, rimozione di massi, il taglio di blocchi di pietra (ad esempio il marmo) e demolizioni di pilastri/travi/muri.

Caratteristiche fondamentali:

- elevate capacità di rigonfiamento;
- non emanano gas;
- non contengono agenti nocivi;
- tempi di reazione medio/lunghi (15-30 ore).

Malte per murature (portanti e non)

Vengono anche definite malte di allettamento, questa tipologia di malte è legata alle costruzioni di murature in mattoni o in pietra, e serve a garantire la corretta posa in opera e legatura degli elementi di muratura. Per questo utilizzo si possono utilizzare tutte o quasi le tipologie di malte, l'aspetto fondamentale però è la compatibilità con la natura e le caratteristiche meccaniche del supporto. Occorrerà inoltre prestare notevole attenzione al rapporto tra legante e acqua d'impasto.

Caratteristiche fondamentali:

- compatibilità meccanica con il supporto;
- facilità di applicazione (presa rapida);
- spessore ridotto;
- discreta impermeabilità;
- resistenza agli agenti atmosferici;
- presa in ambienti umidi;
- assenza di ritiro.

Malte per finiture

In questa categoria si intendono tutte quelle malte che servono per svariati impieghi, come ad esempio la creazione di uno strato di rasatura turapori su una superficie in calcestruzzo, in modo da consentire l'applicazione di rivestimenti e verniciature, possono essere quindi considerate come ponte adesivo per la successiva intonacatura. Servono inoltre per impermeabilizzare vasche o canali di limitata pressione idraulica, per l'incollaggio di elementi non strutturali come piastrelle o pannelli isolanti oppure per la sigillatura di giunti o fughe.

Caratteristiche fondamentali:

- facilità di posa;
- tixotropicità;
- elevata resistenza meccanica;
- impermeabilità;
- resistenza ai cicli gelo/disgelo;
- non infiammabile;
- non corrosivo;
- non tossico.

Malte per sottofondi

Le malte in questione servono per creare un collegamento tra la struttura da rivestire (solaio o parete) con il materiale di rivestimento. Affinché ciò avvenga occorre che la malta formi un piano di posa omogeneo, regolare e con stabile aderenza. È di fondamentale importanza considerare la rigidezza degli elementi di rivestimento, ad esempio le piastrelle richiedono in genere una malta bastarda formata da calce aerea e calce idraulica, mentre ad esempio una malta cementizia è ideale per rivestimenti più flessibili come il linoleum o la moquette.

Caratteristiche fondamentali:

- rapidità di completo indurimento (circa 3 giorni);
- ottima lavorabilità:
- elevate resistenze meccaniche;
- assenza di porosità;
- impermeabilità;
- resistenza agli agenti chimici.

In questa categoria rientrano inoltre malte con particolari caratteristiche:

Le malte autolivellanti, al cui interno sono presenti degli additivi superfluidificanti che riescono a garantire una perfetta complanarità della superficie, prestandosi quindi a rivestimenti anche di spessore ridotto.

Le malte per massetti isolanti, nella cui composizione sono presenti inerti super leggeri come ad esempio il polistirene, atti a ridurre il coefficiente di trasmissione del calore. L'inerte occorre che non sia reattivo a livello chimico, sia perfettamente impastabile con il legante e sia inoltre distribuito in maniera omogenea nell'impasto.

Le malte epossidiche, nate dalla miscelazione di resine sintetiche e inerti nell'impasto, sono in grado di creare dei rivestimenti continui dallo spessore compreso tra i 4 e i 10 mm con elevate resistenze meccaniche, costituendo quindi un rivestimento al finito.

2. Composizione delle malte

Essendo le malte dei conglomerati costituiti da una miscela di vari elementi, a seconda della composizione di tale impasto possiamo distinguere svariate tipologie di malte. Ciascuna di queste tipologie può avere un dosaggio degli elementi costituente diverso pur appartenendo alla stessa tipologia di malta. Capiamo quindi che, le malte formulabili sono un numero elevato che dipende quindi sia dalla composizione, ma anche dalle dosi utilizzate.

Per semplicità possiamo classificare le malte in base alla loro composizione (tabella 2.1) nelle seguenti cinque macro-famiglie:

• Malte aeree

Sono quelle malte formate da acqua, sabbia e un legante aereo che può essere calce aerea (nella forma di viva in zolle, idrata in polvere o grassello di calce) oppure gesso. La caratteristica principale di queste malte è che sono in grado di indurire solo a contatto con l'aria. Servono quindi per intonaci e murature in elevazione sollecitate in maniera ridotta ed esposte all'aria. Le malte di gesso se non opportunamente modificate vengono utilizzate all'interno, a riparo dagli agenti atmosferici. Vista la nota solubilità del gesso a contatto con l'acqua, godono inoltre di una presa estremamente rapida.

• Malte idrauliche

Sono quelle malte che godono di proprietà idrauliche, ovvero sono in grado di indurire anche a contatto con l'acqua, si prestano quindi per lavori in ambienti umidi e freddi. Sono composte da acqua, sabbia e calce idraulica naturale oppure da calce idrata in polvere (aerea) con aggiunta di aggregati con proprietà pozzolaniche di origine naturale (ad es. pozzolana) oppure artificiale (ad es. cocciopesto). Quest'ultime si possono trovare in commercio premiscelate con la dicitura "calci idrauliche artificiali".

La loro resistenza a compressione in media è nettamente inferiore se paragonata alle malte cementizie, ma comunque superiore alle malte aeree.

• Malte cementizie

Fanno parte di questa famiglia le malte che utilizzano come legante il cemento. Il cemento è un legante idraulico e quindi queste malte potrebbero essere assimilate a una sottocategoria delle malte idrauliche, però nella prassi comune, viste le notevoli resistenze (rispetto a una malta idraulica standard) vengono considerate separate.

Lo sviluppo delle resistenze (meccaniche e chimiche) è rapido, sono impermeabili e hanno una notevole durata.

• Malte composte o bastarde

Sono le malte costituite da una miscela di due o più differenti tipologie di leganti. Ad esempio, a una malta di calce idraulica viene aggiunto del cemento per conferire una resistenza meccanica superiore oppure a una malta cementizia si aggiunge della calce aerea per migliorarne la lavorabilità. La calce unita al gesso garantisce una presa rapida, al contrario invece elevate quantità di gesso aggiunte a una malta cementizia provocano fessurazioni. Occorre sempre prestare notevole attenzione al *mix design* di queste malte e tenere sempre in considerazione le compatibilità e l'eventuale reattività tra i componenti.

• Malte speciali o additivate

All'interno di questa categoria ricadono le malte delle altre quattro categorie, che a seguito dell'aggiunta di una o più sostanze reattive nell'impasto o di qualche aggregato particolare (come ad esempio degli aggregati termoisolanti), possono essere utilizzate per impieghi speciali. In genere si tratta di malte premiscelate in fabbrica, con l'introduzione di additivi direttamente nel ciclo produttivo e quindi sotto stretto controllo. Rientrano in questa categoria tutte le nuove formulazioni che la ricerca scientifica produce in questo settore. Grazie all'uso di additivi le malte standard sono portate a un livello successivo offrendo agli impasti proprietà ben precise e quindi possibilità di uso innovative.

Tabella 2.1: Classificazione malte in base ai componenti

		LEG	ANTI		AG	GREG	ATI	AGGI	UNTE
	AE	REI	IDRA	ULICI	K				
MALTE	OSS3D	CALCE A	CALCE (IDRAULICA)	CEMENTO	POZZOLANICI	SPECIALI	SABBIE	ACQUA	ADDITIVI
AEREE		X					X	X	
AEREE	X						X	X	
IDD 414 IGHE		X			X		X	X	
IDRAULICHE			X				X	X	
CEMENTIZIE				X			X	X	
		X		X			X	X	
COMPOSTE O			X	X			X	X	
BASTARDE		X	X	X			X	X	
	Altre combinazioni tra due o più leganti				X	X			
SPECIALI O	Tu	tte le malt	e preced	enti		X	X	X	
ADDITIVATE	Tu	tte le malt	e preced	enti			X	X	X

2.1 Gli aggregati

È definito aggregato (aggregate) quel materiale, di origine naturale o artificiale, che costituisce l'ossatura fondamentale del conglomerato. È di fondamentale importanza scindere il concetto di inerte e aggregato, il termine inerte è stato spesso utilizzato come sinonimo di aggregato, ma in realtà l'essere inerte rappresenta una caratteristica dell'aggregato, che può quindi anche non esserlo. Ad esempio, una sabbia pulita, lavata e ben setacciata può essere considerata un inerte, un materiale pozzolanico vista la sua reattività nell'impasto è un aggregato (reattivo) e non un inerte.

Altro aspetto importante per l'ottimale produzione di un conglomerato è, oltre le qualità dell'aggregato, la sua distribuzione granulometrica, individuata tramite una attenta analisi.

Analisi granulometrica

La distribuzione granulometrica, cioè le dimensioni dei grani di sabbia e la loro percentuale peso, è di fondamentale importanza. Per ogni partita di sabbia che arriva in laboratorio si determina la così detta "curva granulometrica" tramite il processo di vagliatura, usando una serie di setacci con aperture diverse e formate da maglie quadrate.

Per il tracciamento di queste curve vengono adoperati dei setacci che seguono la norma UNI EN 933-2:1997¹⁹, con la seguente serie 0.063, 0.125, 0.250, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125 (dimensioni espresse in mm), ovviamente essendo le sabbia di granulometria massima pari a 4 mm, il resto dei setacci per questa tipologia di aggregato è superflua.

Precedentemente anche in Italia veniva adoperata (a volte tutt'ora) la serie americana ASTM che ha valori leggermente diversi.

Per eseguire quindi l'analisi granulometrica, si sovrappongono i setacci con apertura crescente verso l'alto, viene disposta all'interno una massa nota di sabbia e successivamente si procede con la setacciatura manuale oppure con una setacciatrice che genera scosse e vibrazioni in maniera meccanizzata (figura 2.1.1).

_

¹⁹ UNI EN 933-2:1997 - Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. - Parte 2: Determinazione della distribuzione granulometrica - Stacci di controllo, dimensioni nominali delle aperture.



Figura 2.1.1: Setacciatrice automatica

A setacciatura ultimata, si determinano le percentuali in massa dell'aggregato rimasto nei vari setacci, questi dati vengono rappresentati tramite tabelle oppure curve che riportano la percentuale del passante o del trattenuto in funzione dell'apertura delle maglie (tabella 2.1.1).

Tabella 2.1.1: Risultati setacciatura sabbia FG3

	Apertura vagli [mm]	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Passante [%]
С	4	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
A	2	0,2	0,1%	0,1%	99,9%
M	1	163,7	67,4%	67,4%	32,6%
P	0,5	77,3	31,8%	99,3%	0,7%
0 0	0,25	1,5	0,6%	99,9%	0,1%
N	0,125	0,2	0,1%	100,0%	0,0%
E	0,063	0,1	0,0%	100,0%	0,0%
	< 0,063	0,0	0,0%	100,0%	0,0%
1	Totale	243,0			
С	4	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
A	2	0,4	0,2%	0,2%	99,8%
M	1	174,8	65,9%	66,0%	34,0%
P	0,5	86,3	32,5%	98,6%	1,4%
0 0	0,25	3,3	1,2%	99,8%	0,2%
N	0,125	0,4	0,2%	100,0%	0,0%
E	0,063	0,1	0,0%	100,0%	0,0%
	< 0,063	0,0	0,0%	100,0%	0,0%
2	Totale	265,3			
С	4	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
A	2	0,4	0,2%	0,2%	99,8%
M	1	175,0	68,1%	68,2%	31,8%
P	0,5	78,7	30,6%	98,8%	1,2%
0	0,25	2,2	0,9%	99,7%	0,3%
N	0,125	0,6	0,2%	99,9%	0,1%
E	0,063	0,2	0,1%	100,0%	0,0%
	< 0,063	0,0	0,0%	100,0%	0,0%
3	Totale	257,1			
С	4	0,0	0,0%	0,0%	100,0%
A	2	0,4	0,2%	0,2%	99,8%
M	1	165,4	70,7%	70,9%	29,1%
P I	0,5	66,8	28,6%	99,5%	0,5%
0	0,25	1,0	0,4%	99,9%	0,1%
N	0,125	0,2	0,1%	100,0%	0,0%
E	0,063	0,1	0,0%	100,0%	0,0%
	< 0,063	0,0	0,0%	100,0%	0,0%
4	Totale	233,8			

Questa operazione segue i dettami della norma UNI EN 933-1:2012²⁰.

Effettuare questa procedura è importante poiché consente di differenziare i vari lotti di sabbia presenti in laboratorio e rende più agevole la scelta del lotto da setacciare se occorre una specifica classe granulometrica per un impasto.

²⁰ UNI EN 933-1:2012- Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura.

Ad esempio, il lotto FG3 ha circa il 68% in massa di aggregato compreso tra 1 mm e 2 mm (grafico 2.1.1), e quindi se setacciato fornirà una maggiore quantità in quel determinato range, rendendo più efficienti le operazioni di vagliatura.

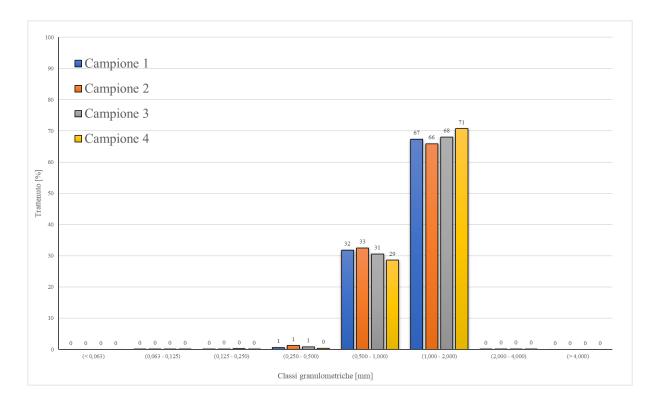


Grafico 2.1.1: Distribuzione granulometrica sabbia FG3

Per la formulazione di una malta si prende in considerazione una curva granulometrica degli aggregati di riferimento.

Questa distribuzione di riferimento ha diversi obiettivi:

- garantire la massima lavorabilità della malta;
- contrastare la segregazione dell'impasto;
- rendere minima la richiesta di pasta, minimizzando il volume dei vuoti tra le particelle, ottenendo quindi la massima densità in mucchio.

Le condizioni di massima scorrevolezza delle particelle non corrispondono a quelle di massi densità, è quindi necessario stabilire un compromesso fra queste due esigenze.

Adoperando una granulometria assortita è possibile riempire i vuoti tra le particelle di sabbia di dimensioni maggiori. Sulla base di questo principio Fuller nel 1907, supponendo aggregati sferici, ha proposto una distribuzione di riferimento che porta alla minima percentuale di vuoti:

$$P = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}$$

In cui:

P è il passante del setaccio con apertura d e D è il diametro massimo dell'aggregato.

Ci si rese conto che un impasto, che segue questa distribuzione granulometrica presenta una lavorabilità pessima e richiede mezzi per la posa in opera troppo onerosi. Bolomey ha modificato la distribuzione di Fuller, garantendo un maggiore contenuto di fini attraverso una equazione, che tiene conto del tipo di aggregato e della lavorabilità richiesta. Il parametro A rappresenta la misura dell'eccesso di fini (tabella 2.1.2).

$$P = A \cdot (100 - A) \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}$$

Tabella 2.1.2: Valori indicativi del parametro A

Valori indicativi parametro A				
Tipologia aggregato	Lavorabilità richiesta			
Tipologia aggiegato	Bassa	Media	Alta	
Frantumato	8%	10%	12%	
Tondeggiante	10%	12%	14%	

Il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi Edilizi e Territoriali (DISET) del Politecnico di Torino nel corso di anni di ricerca in questo settore ha sperimentato vari fasci di curve granulometriche per la produzione di provini sperimentali, usando come aggregato principale sabbie locali provenienti dal Piemonte e dalla Valle d'Aosta.

Questa serie di curve denominate DISET ricadono all'interno dei fusi granulometrici proposti da normative ed enti come l'ASTM (*American Society for Testing Materials*), il *British Standards* e l'ACI (*American Concrete Institute*).

Le curve DISET sono state tracciate tenendo in considerazione i seguenti requisiti²¹:

- "Di congruenza della distribuzione delle varie classi di granuli, per evitare ritiri eccessivi in fase di indurimento."
- "Di congruenza verso i caratteri morfologici degli intonaci prelevati in situ, principalmente caratterizzanti nell'aspetto e nella tessitura superficiale delle classi granulometriche maggiori."

²¹ Scarzella P., Zerbinatti M., Superfici murarie dell'edilizia storica. Conservazione e manutenzione, Firenze, Alinea Editrice, 2010, pp. 178.

Per la produzione dei provini di questo elaborato è stata utilizzata la curva granulometrica di riferimento denominata DISET 2 (grafico 2.1.2).

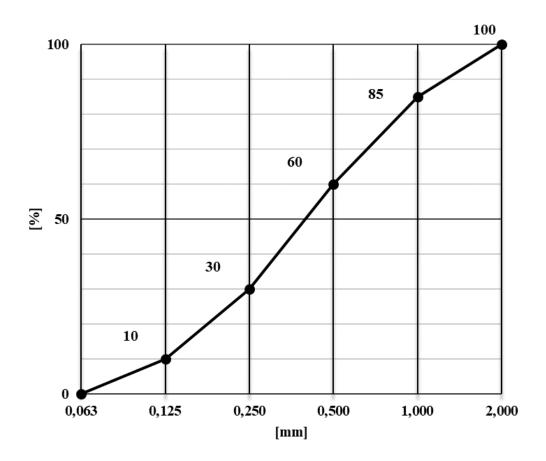


Grafico 2.1.2: Curva DISET 2

2.1.1 Sabbia

Per la produzione delle malte l'aggregato principale è la sabbia. La sabbia utilizzata può avere diametro massimo di 4 mm. Per la realizzazione degli impasti per i provini per questo elaborato, il diametro massimo della sabbia utilizzata è di 2 mm (fig.2.1.1.1). Questo poiché il legante non è un elemento di riempimento bensì di collegamento tra i granelli. Nelle malte standard la sabbia occupa una frazione rilevante del volume (tra il 65% e il 70%), rappresentando il vero e proprio scheletro portante della malta.

L'elevata quantità in volume di sabbia consente di ridurre la quantità di pasta (legante + acqua) utilizzata, questo non è solo un vantaggio dal punto di vista economico (attualmente le sabbie hanno un prezzo notevolmente inferiore rispetto un legante), ma è appunto essenziale per la stabilità dimensionale della malta prevenendo o attenuando ad esempio i problemi di fessurazione causati dal calore di idratazione oppure dal ritiro della pasta. La sabbia inoltre, ha il compito di facilitare il passaggio dell'anidride carbonica, favorendo quindi il processo di carbonatazione, essenziale nel processo di presa e indurimento. In definitiva una malta con uno scheletro equilibrato di sabbia porta:

- vantaggio economico: economia del legante;
- vantaggio qualitativo: consente di realizzare una malta resistente e omogenea;
- vantaggio tecnico: diminuisce le contrazioni da ritiro e facilita presa/indurimento.



Figura 2.1.1.1: Particolare della sabbia utilizzata per i provini

Origine

Le sabbie utilizzate per le malte possono essere naturali provenienti cioè da fiumi, laghi, mari e cave oppure artificiali prodotte cioè dalla frantumazione di rocce o scorie industriali, queste però non devono avere grani piatti e spigolosi ma di forma più tondeggiante possibile. Le sabbie naturali sono le più utilizzate e posso essere di varia natura, quarzose, silicee, granitiche, micacee, gessose, calcaree ecc. In merito alle sabbie Vitruvio considerava migliori quelle di cava o *fossicia*, che se sfregate tra le dita producevano un lieve crepitio, se però queste non fossero disponibili si poteva virare setacciando la sabbia dalla ghiaia dei fiumi oppure dalle spiagge marine. Lo stesso Vitruvio fu però il primo a sconsigliare fortemente la sabbia marina, poiché aveva una presa più lenta, era meno resistente e disgregava gli intonaci con i sali. Successivamente nella letteratura alcuni autori ammettevano l'uso della sabbia marina, previa una lavatura con acqua dolce oppure con calci forti per creazioni di malte molto grasse, ma comunque l'uso della stessa è altamente sconsigliato.

Il dibattito tra quale sabbia sia migliore per le malte, tra quelle di fiume e quelle di cava è proseguito per secoli, fino alla metà dell'Ottocento in cui si capì che l'accento non era da porre sulla provenienza delle sabbie in sé, ma sulla loro natura, forma e distribuzione dei grani.

Dall'osservazione delle opere realizzate nel corso dei secoli (edifici con malte ed intonaci), si è resa evidente una costante connessione all'interno delle località tra le sabbie locali e le opere ivi realizzate. L'uso di aggregati disponibili nella località in cui è prodotta la malta (o l'opera) costituisce, al di là degli stili e dei riferimenti culturali, una invariante attraverso i secoli (anche oggi giorno è una pratica usuale adoperare materie prime del loco).

Essenzialmente questo è dovuto a motivazioni puramente economiche e di comodità/convenienza, in passato infatti il trasporto avveniva o per spalla o a traino, e tali spostamenti erano lunghi esclusivamente per materiali da rivestimento di pregio e non di quelli necessari alla "vita di cantiere".

Conoscere questo aspetto è di fondamentale importanza, ad esempio nella progettazione e realizzazione di una malta da restauro o comunque da utilizzare su manufatti storici.

Il DISET del Politecnico di Torino per anni si è occupato dello studio delle sabbie locali (Piemonte e Valle d'Aosta) e della loro correlazione con le malte finalizzate al restauro. Di seguito è riportata una pianta delle regioni Piemonte e Valle d'Aosta con indicata la provenienza delle sabbie analizzate dal DISET (figura 2.1.1.2).

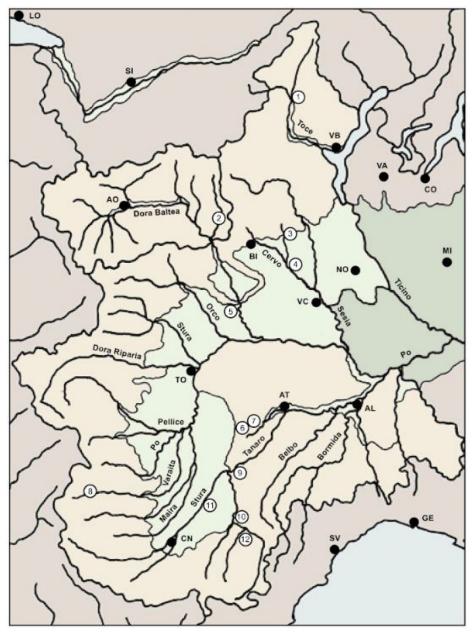


Figura 2.1.1.2: Sabbie del Piemonte e della Valle d'Aosta analizzate presso il DISET

- (1) Sabbie dal Toce (Crevola d'Ossola)
- (2) Sabbie dal Lys (Issime)
- (3) Sabbie dall'Ostola (Masserano)
- (4) Sabbie dal Cervo (Buronzo)
- (5) Sabbie dalla Dora Baltea (Rondissone)
- (6) Sabbie d'Alba (Alba)
- (7) Sabbie dai sedimenti pliocenici (Cisterna d'Asti)
- (8) Sabbie dal Varaita (Fontanile)
- (9) Sabbie dal Tanaro (Pollenzo)
- (10) Sabbie dal Tanaro (Santa Maria del Laghetto)
- (11) Sabbie dalla Stura di Demonte (Sant'Albano)
- (12) Sabbie dalla Corsaglia (Lesegno)

Proprietà

La sabbia all'interno di una malta deve considerarsi a tutti gli effetti un inerte, pertanto le sabbie utilizzate devono essere lavate e prive di sali e successivamente setacciate, inoltre devono essere di natura silicea, senza quindi calcarei teneri o chimicamente instabili. Le sabbie devono inoltre essere prive di materia organica e in generale prive di qualsiasi impurità come ad esempio: cloruri di sodio e di magnesio, acido umico, solfati di calcio e sodio, particelle di carbone, cenere, composti del ferro ecc.

La presenza di questi elementi estranei e reattivi, danneggia non solo l'effetto estetico/decorativo finale, ma anche l'indurimento dei leganti e la resistenza finale della malta.

L'argilla è una delle impurità più frequenti, trovandosi naturalmente appiccicata ai grani di sabbia. La presenza di argilla a causa della sua finezza aumenta il fenomeno del ritiro e inoltre rende difficoltosa l'aderenza tra granello e legante, sostanzialmente quindi la sua presenza è negativa, sebbene taluni la reputano favorevole in quantità controllata per la conseguente miglioria alla lavorabilità dell'impasto.

Nel De Architectura Vitruvio definiva sabbia idonea solo quella che, dopo essere stata lavorata, posta su un telo bianco, successivamente battuta e poi gettata non lo sporcava ne lasciava residui di terra; questa prova empirica potrebbe essere usata ancora oggi.

Sabbia utilizzata

Per la realizzazione dei campioni di questo elaborato sono state utilizzate delle sabbie locali provenienti dal Piemonte, in particolare dalla cava *Simar* località Bricco Toni (Cisterna d'Asti) originarie da un fondo marino pliocene, di natura litologica rappresentata nella tabella sottostante (tabella 2.1.1.1).

Tabella 2.1.1.1: Composizione litologica sabbia cava Simar

	7	Tenori in massa per classi granulometriche (%)					
Tipo litologico	4,750-2,360 (mm)	2,360-1,180 (mm)	1,180-0,600 (mm)	0,600-0,300 (mm)	0,300-0,150 (mm)	0,150-0,075 (mm)	
	subarrotondati	subarrotondati	debolmente arrotondati	spigolosi	spigolosi	scheggiosi	
quarzo e feldspato	70%	75%	80%	80%	79%	82%	
gneiss e micascisti	7%	6%	7%	4%	1%	/	
calcareniti	6%	2%	/	/	/	/	
arenarie	2%	1%	/	/	/	/	
carbonati	12%	12%	9%	10%	10%	8%	
pietre verdi	3%	4%	2%	2%	3%	3%	
mica	/	/	/	1%	4%	5%	
altro	/	/	2%	3%	3%	2%	

2.1.2 Cocciopesto

Il cocciopesto è un materiale per edilizia, derivato dalla frantumazione di laterizi (tegole, coppi, mattoni ecc.).

Il suo utilizzo per la creazione di malte risale ai tempi dei Fenici²², successivamente furono però i Romani a perfezionarne la tecnica come testimoniato nel De Architectura da Vitruvio. Il cocciopesto non è un inerte perché in maniera del tutto simile alle pozzolane prende parte al processo di presa ed indurimento della malta, conferendo inoltre alla malta caratteristiche idrauliche (anche se in maniera inferiore rispetto alla pozzolana).

Il grado di idraulicità dipende dalla finezza dei granuli aggiunti all'impasto e dalla temperatura di cottura (tipicamente 800 °C). Temperature troppo alte, come nel caso dei laterizi di moderna fabbricazione, causano una pozzolanicità bassa o nulla; al contrario con la macinazione di tegole cotte a temperature più basse, si ha un cocciopesto molto reattivo. Il cocciopesto è inoltre un materiale poroso, quindi nel suo utilizzo come aggregato è un aspetto da tenere in considerazione. Infatti, è buona pratica spruzzare dell'acqua e bagnare leggermente il cocciopesto prima di utilizzarlo, questo eviterà o limiterà eventuali ritiri durante la presa.

Altra caratteristica particolare è la colorazione mattone, che miscelata con la calce per la produzione della malta, assume un colore rosato che è particolarmente apprezzato infatti il cocciopesto viene utilizzato anche per gli intonaci.

Per la preparazione delle malte per il seguente elaborato, il cocciopesto è stato preventivamente setacciato per ottenere le classi granulometriche necessarie. Infatti, per la composizione dell'aggregato si è deciso di lasciare in alterata la curva DISET2 (grafico 2.1.2.1) usata per le malte di sola sabbia e sostituire solo la frazione fine (inferiore a 0,500 mm) con il cocciopesto.

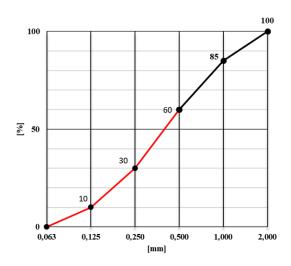


Grafico 2.1.2.1: Curva DISET 2 modificata con cocciopesto indicato in rosso

-

²² Pavimenti in cocciopesto realizzati dai Fenici e ritrovati nei siti archeologici di Selinunte e Solunto in Sicilia.

2.1.3 Pozzolana

Per pozzolana vengono indicate le piroclastiti sciolte (rocce di origini vulcanica) di varia granulometria.

La pozzolana ha struttura amorfa ed è costituita principalmente da: biossido di silicio reattivo (il cui tenore non deve essere inferire al 25%), ossido di alluminio e da altri ossidi come ad esempio l'ossido di ferro.

È da specificare che la pozzolana finemente macinata e a contatto con acqua e idrossido di calcio²³ a una temperatura ordinaria, fa presa ed indurisce fornendo all'impasto proprietà pozzolaniche (o idrauliche). Senza la presenza del legante invece non reagisce ed è per questo che viene considerata come aggregato e non come legante.

La reattività di una pozzolana con l'idrossido di calcio è definita dalla misura dell'attività pozzolanica.

L'uso della pozzolana come aggregato è molto antico, risale infatti ai popoli Fenici e Greci, ma furono gli antichi Romani a capirne l'importanza e razionalizzarne l'uso.

Tra le opere più importanti realizzate dai Romani grazie all'uso della pozzolana si evidenziano il Pantheon²⁴ a Roma (figura 2.1.3.1), che grazie alla presa rapida conferita agli impasti è stato più semplice il lavoro delle centine per la realizzazione della cupola e il *Pont du Gard*²⁵ (figura 2.1.3.2); entrambe le opere furono progettate da Agrippa²⁶.

La pozzolana venne estratta principalmente nei Campi Flegrei (Pozzuoli) da cui deriva il nome con cui oggi sono identificate le piroclastiti sciolti di origine diversa, come ad esempio dal Lazio, oppure dalla Germania o dall'Olanda (chiamato anche Trass).

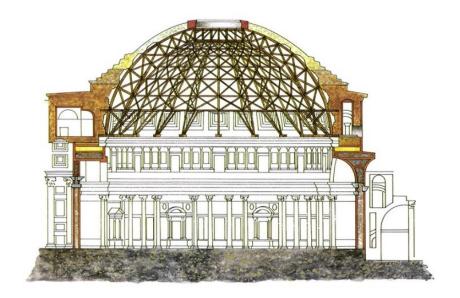


Figura 2.1.3.1: Sezione della cupola del Pantheon a Roma

²⁴ Il Pantheon attuale è una ricostruzione ad opera di Adriano, della versione di età Augustea danneggiata.

25

²³ Formula chimica idrossido di calcio: Ca(OH)₂.

²⁵ Ponte romano di 49 metri di altezza e 275 di lunghezza attraversa il fiume Gardon vicino Remoulins (Francia).

²⁶ Marco Vipsanio Agrippa, politico, militare e architetto romano.



Figura 1.1.3.2: Il Pont du Gard

Per queste differenti origini la pozzolana può assumere quattro diverse colorazioni elencate per la prima volta da Vitruvio:

- Nera
- Bianca
- Grigia
- Rossa

Per la realizzazione dei provini di questo elaborato è stato utilizzato come pozzolana il Trass di Andernach (Germania) di colore grigio. In allegato all'elaborato si troverà la relativa scheda tecnica. Di questo aggregato è stato utilizzato negli impasti, solo la granulometria molto fine (< 0,250 mm) rappresentando solo il 30% del totale degli aggregati.

La distribuzione granulometrica segue la curva DISET2 (grafico 2.1.3.1):

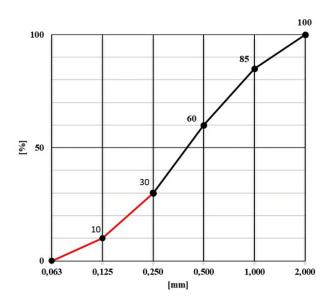


Grafico 2.1.3.1: Curva DISET 2 modificata con pozzolana indicata in rosso

2.1.4 Altri aggregati

In commercio sono disponibili svariati materiali che possono essere utilizzati come aggregati nelle malte, questi materiali sono quasi sempre reattivi e hanno l'obiettivo di soddisfare alcune esigenze particolari.

Ovviamente i materiali devono disporre di certificazioni (UNI EN 998-2:2016)²⁷ e seguire i dettami normativi in merito (UNI EN 13055-1:2003)²⁸.

Di seguito alcuni esempi di materiali utilizzabili:

Aggregati con proprietà pozzolaniche

Pomice

È un altro aggregato di natura pozzolanica di origini naturale, possiede resistenza meccanica a compressione modesta. La cosiddetta sabbia di pomice (figura 2.1.4.1) può sostituire anche totalmente la sabbia.



Figura 2.1.4.1: Pomice granulare

Metacaolino

Fa parte della famiglia delle pozzolane artificiali insieme al cocciopesto. Si presenta sotto forma di polvere bianca fine (figura 2.1.4.2). Il metacaolino è ottenuto dalla calcinazione a bassa temperatura (500-800 °C) e di argilla caolinitica. Negli impasti di malta di calce il metacaolino²⁹ e l'idrossido di calce reagiscono formando un gel di idrato di silicato di calce, che conferisce un aumento delle caratteristiche meccaniche dell'impasto e idraulicità. Le malte con questo aggregato vengono chiamate "porcellana".



Figura 2.1.4.2: Metacaolino macinato

²⁹ Formula chimica metacaolino: 2Al₂O₃·SiO₂.

 ²⁷ UNI EN 998-2:2016 - Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura.
 ²⁸ UNI EN 13055-1:2003 - Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta per iniezione.

• Loppa di alto forno

Nasce come sottoprodotto del processo di produzione industriale della ghisa, la scoria quindi dopo essere stata raffreddata bruscamente acquista caratteristiche idrauliche e si trasforma in grani porosi a struttura vetrosa chiamata loppa granulare (figura 2.1.4.3). Successivamente la loppa granulare viene macinata finemente generando l'aggregato usato per le malte. Se paragonati alla pozzolana ha la capacità di indurire in maniera molto lenta se mescolata con acqua anche in assenza di idrossido di calcio. (Assumendo quindi anche il compito di legante).

Per essere adoperata come aggregato la loppa granulata deve seguire la norma UNI EN 15167-1:2006 ³⁰.



Figura 2.1.4.3: Loppa d'alto forno granulata

• Fumo di silice

È un sottoprodotto dell'industria che produce silicio metallico e le sue leghe. Come aggregato viene utilizzato in genere al suo stato naturale cioè in polvere (figura 2.1.4.4). La microsilice di cui è composto ha proprietà pozzolaniche, conferisce all'impasto resistenza e durabilità. È un materiale dal costo relativamente elevato, e quindi destinato prevalentemente per i calcestruzzi ad alte prestazioni. Essendo la granulometria molto bassa non è consigliato usarne percentuali superiori al 15% per non compromettere la lavorabilità dell'impasto.



Figura 2.1.4.4: Fumo di silice in polvere

-

³⁰ UNI EN 15167-1:2006 - Loppa granulata d'altoforno macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.

Aggregati con proprietà termoisolanti

• Argilla espansa

È un aggregato leggero che si ottiene dalla cottura delle argille (figura 2.1.4.5). Fornisce all'impasto alta resistenza a compressione e un ottimo potere di isolamento termico. Viene usata per creare delle malte termoisolanti.



Figura 2.1.4.5: Argilla espansa

Perlite

È un aggregato appartenente alla famiglia delle rioliti, questa roccia se portata ad una temperatura elevata (oltre i 900°C) ha la proprietà di espandere il proprio volume di quasi 20 volte. Nello specifico però per confezionare le malte si utilizza la variante "cruda" e assume svariate colorazioni in genere bianca o grigia (figura 2.1.4.6).



Figura 2.1.4.6: Perlite bianca

• Vermiculite

È un minerale (figura 2.1.4.7) facente parte della famiglia dei fillosicati e deriva dall'alterazione della mica. Si presenta in piccole scaglie o cristalli. Per poter essere utilizzata in edilizia viene prima macinata e poi cotte a temperature oltre i 300°C.



Figura 2.1.4.7: Vermiculite di varia granulometria

2.2 I leganti

I leganti ("binders" in inglese) sono dei materiali che, dopo aver subito processi di cottura e macinazione fino allo stato di polvere fine, vengono impastate con acqua e sabbia (malte), formando degli impasti omogenei e plastici. Gli impasti così ottenuti, a seguito di reazioni chimico-fisiche (fase di presa) diventano resistenti e duri (fase di indurimento) formando una malta. I leganti rivestono un ruolo fondamentale negli impasti pertanto a seconda della tipologia, devono rispondere a norme specifiche per poter essere definiti tali.

"Si definisce legante un materiale che impastato con acqua forma una massa plastica che serve a collegare vari materiali usati in un manufatto e che, aderendo ad essi indurendo, forma un insieme monolitico, atto a resistere a sollecitazioni meccaniche." $(NorMaL - 36/92)^{31}$

All'interno dell'impasto di una malta sono quindi importanti per i seguenti motivi:

- Condizionano l'aderenza con il supporto e la lavorabilità nel processo di preparazione e di corretta posa in opera;
- Causano l'indurimento dell'impasto;
- Determinano e condizionano l'elasticità (modulo elastico), la porosità, l'impermeabilità, la resistenza a fenomeni di ritiro e la durabilità della malta.

Il processo chimico-fisico che avviene all'interno di una malta ad opera dei leganti avviene in due fasi salienti, tra le quali non vi è una distinzione netta.

1. Fase di presa: rappresenta il passaggio da uno stato iniziale di fluidità ad una massa di una certa consistenza, che riesce a mantenere una forma impartita. Questa fase ha una durata che dipende dal tipo di legante e più in generale da tutta la composizione della malta, ma anche dalla modalità di messa in opera. In genere questa fase può variare da pochi minuti fino a qualche giorno. Il tempo di fine presa per vari leganti (e malte) è in genere stabilito in maniera convenzionale. In laboratorio può essere misurato sperimentalmente tramite delle prove normalizzate con l'ago di Vicat³²(figura 2.2.1).



Figura 2.2.1: Ago di Vicat

32 È un dispositivo concepito dall'ingegnere francese Louis Vicat (XIX secolo) che serve per determinare il tempo di presa di una pasta.

³¹ Raccomandazioni NorMaL – 36/92: Glossario per l'edilizia storica nei trattati dal XV al XIX secolo.

2. Fase di indurimento: terminata la presa l'indurimento, rappresenta il continuo aumento di resistenza meccanica. Questa fase può protrarsi per diversi anni, più in generale in maniera indefinita, anche se una corretta formulazione in poco tempo (variabile da qualche giorno a diverse settimane) raggiunge resistenze assimilabili a quelle raggiunte in tempi lunghissimi. Questa fase garantisce alla malta una consistenza litoide e una ben determinata resistenza meccanica.

È possibile suddividere i leganti in due grandi classi (tabella 2.2.1) che però possiedo caratteristiche simili: i leganti aerei ed i leganti idraulici. La caratteristica dei leganti aerei è quella di compiere le due fasi precedentemente descritte solo se a contatto con l'aria, in realtà è più opportuno dire a contatto con l'anidride carbonica dissolta nell'aria. Inoltre, i leganti aerei subiscono aggressioni da parte dell'acqua che ne altera alcune proprietà. I leganti idraulici al contrario possono attraversare le fasi di presa e indurimento, anche in presenza di acqua senza alterarne le proprietà.

I leganti aerei utilizzati nell'edilizia sono la calce aerea (e le sue forme), il gesso (e le sue forme). Tra i leganti aerei, seppur di ridotto utilizzo, ricade inoltre il cemento magnesiaco.

I leganti idraulici utilizzati nei cantieri sono due: la calce idraulica (e le sue forme) e il cemento (e le sue formulazioni).

Tabella 2.2.1: Classi di leganti

Leganti AEREI	Leganti IDRAULICI
Calce aerea	Calce idraulica
Gesso	Cemento
Cemento magnesiaco	

2.2.1 La calce aerea

Il termine calce viene utilizzato sia per intendere l'ossido di calcio ottenuto tramite cottura ad alte temperature di rocce calcaree (*calce viva* o *calce in zolle*), sia per il suo idrato (*calce spenta* o *calce idrata in polvere*). Quest'ultimo è il materiale utilizzato in edilizia.

Prima di parlare della calce spenta è opportuno descrivere il processo di produzione della calce. La calce non si trova in natura essendo reattiva, si ottiene come anticipato dalla cottura di calcari. I calcari sono rocce di origine sedimentaria molto comuni, venivano estratte per la produzione della calce fin dall'antichità. I calcari adatti alla produzione di calce aerea devono avere almeno il 95% di CaCO₃, la restante parte contiene in genere MgCO₃ oppure argille, ossidi di ferro o silice.

A seconda della purezza del calcare utilizzato si distingue:

- calce grassa, se deriva da calcari più puri, con contenuto di CaCO₃ superiore o pari al 95%;
- calce magra, se deriva da calcari impuri, con CaCO₃ minore del 95%.

I calcari estratti in natura vengono raffinati per renderli ricchi di carbonato di calcio e rimuovere le impurità.

Una volta effettuata questa raffinazione il calcare viene frantumato nella pezzatura richiesta dai forni.

La cottura dei calcari macinati avviene in forni di varia tipologia, si distinguono forni rotativi orizzontali o fornaci verticali (figura 2.2.1.1).

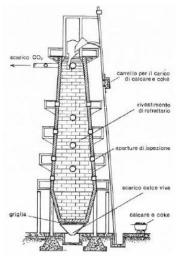


Figura 2.2.1.1: Schema di funzionamento fornace verticale

I forni vengono portati alla temperatura di 900-950C° al fine di ottenere la dissociazione del carbonio con la formazione di ossido di calcio CaO e CO₂ secondo la reazione:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

La completa dissociazione si ottiene a 895°C alla pressione di 1 atm. Operando a pressioni inferiori si potrebbe diminuire la temperatura, questo avviene ad esempio favorendo l'uscita della CO₂ per mantenere la pressione parziale del forno più bassa.

A cottura terminata si ottiene la calce viva, che è una massa porosa capace di assorbire grandi quantità di acqua e di reagire con la stessa. La calce viva può essere commercializzata, in zolle o macinata in polvere, all'interno di recipienti ermetici a causa della igroscopicità della stessa. Ad oggi si tende a non idratare la calce viva in cantiere o manualmente essendo una reazione esotermica pericolosa.

A contatto con l'acqua la calce viva si spegne secondo la seguente reazione:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

La calce viva viene spenta con due modalità principali:

1. **Per aspersione**: se il processo avviene con una quantità d'acqua leggermente superiore a quella stechiometricamente necessaria. In genere viene realizzata all'interno di impianti industriali, in cui la calce viva finemente macinata scorre su dei nastri su cui viene idratata tramite degli ugelli. Da questo processo si ottiene la calce idrata in polvere.

A seconda della finezza la normativa descrive due tipologie di calce idrata in polvere:

- **fiore di calce**, calce idrata in polvere più pregiata e più fine (figura 2.2.1.2);
- calce da costruzione, di minore pregio e finezza.



Figura 2.2.1.2: Fiore di calce utilizzato

2. **Per immersione**: se le zolle di calce viva vengono gettate in apposite vasche piene d'acqua. In genere si hanno due vasche comunicanti, una per il vero e proprio spegnimento e una per la stagionatura (che può richiedere diversi mesi). Questa modalità di spegnimento avviene quindi in eccesso di acqua. È importante che nelle vasche di stagionatura (e nei contenitori per la commercializzazione) sia presente un film di acqua di qualche centimetro, che impedisce all'idrossido di calcio di reagire con l'anidride carbonica.

Con questo processo si forma quindi il grassello di calce (figura 2.2.1.3), che viene utilizzato per confezionare le malte.

Il sottile film che ricopre il grassello di calce durante la stagionatura è una sostanza lattiginosa, chiamata *latte di calce* (figura 2.2.1.4) e ha diversi utilizzi anche nel settore del restauro.



Figura 2.2.1.3: Grassello di calce utilizzato



Figura 2.2.1.4: Latte di calce

Il grassello di calce viene ottenuto anche tramite l'idratazione successiva di calce idrata in polvere ottenuta per aspersione, non avendo una stagionatura la qualità rispetto al grassello prodotto per immersione sarà nettamente inferiore.

Sostanzialmente quindi calce idrata e grassello sono due diverse forme dello stesso prodotto. La presa della calce idrata in polvere (con aggiunta di acqua) o del grassello avviene inizialmente per l'evaporazione dell'acqua e continua con la carbonatazione della calce per opera dell'anidride carbonica presente in atmosfera con la seguente reazione:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Il composto finale a indurimento completato ritorna quindi alla stessa composizione di partenza. La parte più importante del processo di carbonatazione, è l'assorbimento di CO₂, infatti praticamente tutta l'anidride carbonica emessa in ambiente durante la fase di produzione viene riassorbita dal prodotto finale. Questo processo fa si che la calce spenta e quindi le malte a base di calce aerea sono dei prodotti ad impatto quasi 0, avendo una *ecological footprint*, notevolmente più bassa di quella del cemento. Secondo il *Carbon Discloure Project*, la produzione del cemento causa il 6% delle emissioni globali di anidride carbonica. La produzione mondiale di cemento supera i 3000 milioni di tonnellate all'anno, di cui circa 45 milioni prodotte in Italia.

La produzione mondiale di calce invece è di poco inferiore alle 100 milioni di tonnellate/anno, in Italia circa 6000 tonnellate/anno.

Se si riuscisse ad invertire questo trend prediligendo, ad esempio l'uso di malte a base di calce aerea e non malte cementizie, si avrebbe un abbattimento delle emissioni e un miglioramento delle condizioni globali.

2.2.2 Altri leganti

Gesso

Il gesso (figura 2.2.2.1) è stato utilizzato fin dall'antichità per la preparazione di lastre per rivestimenti murari o per intonaci. Chiamato internazionalmente Gesso o con il nome latino *Gypsum*.

Il gesso impiegato nell'edilizia (gesso d'opera) è costituito da solfato di calcio che può presentarsi in due diverse forme:

• Emidrato: CaSO₄ · ½ H₂O;

• Anidrite: CaSO₄.

Il gesso essendo un materiale naturale viene estratto dalle cave in blocchi e successivamente macinato. La polvere di gesso viene quindi poi cotta in forni diventando il legante che conosciamo. Il gesso emidrato si forma alla temperatura di 130°, l'anidrite solubile a circa 180°C.

Il gesso in queste due forme se mescolato con H_2O consente di realizzare un impasto, che indurisce a causa della formazione di cristalli di gesso biidrato (aumento di volume del 0,3-1,5%). In genere la quantità di acqua necessaria per il l'idratazione è pari al 18,7% in peso per il gesso emidrato e 24% per l'anidrite, anche se nella pratica l'acqua utilizzata è di gran lunga maggiore.

Il processo di presa del gesso inizia dopo pochi minuti e termina dopo un'ora. Pertanto, le malte confezionate con gesso vanno confezionate in quantità limitata per poter utilizzare il materiale in stato plastico.

Da precisare che l'indurimento non avviene ad opera della CO₂ presente nell'aria, ma ad opera dell'acqua. Essendo però questa operazione reversibile a contatto con l'acqua, il gesso entra a far parte dei leganti aerei.

Le malte a base di gesso sono utilizzate principalmente per intonaci o sottofondi di pavimenti. Ad oggi viene utilizzato anche come aggiunta in piccole quantità nelle malte a base di cemento per regolare il fenomeno di presa.



Figura 2.2.2.1 Gesso

Cemento magnesiaco

Il cemento magnesiaco (figura 2.2.2.2) chiamato anche *Sorel* è un legante aereo che viene ricavato mescolando una soluzione acquosa di cloruro di magnesio con dell'ossido di magnesio in polvere. Per la sua creazione possono essere usati anche soluzioni acquose di solfato di magnesio.

L'ossido di magnesio in polvere viene ricavato dalla calcinazione (a temperature non molto elevate) del carbonato.

È considerato un legante aereo perché a contatto con l'acqua subisce una lenta idrolisi, che causa l'asportazione di ioni di cloro e magnesio. Questo fenomeno causa una alterazione delle proprietà meccaniche. L'uso di questo legante fornisce agli impasti una presa piuttosto rapida (qualche ora) ed elevata resistenza a compressione (fino a 500-600 kg/cm²).



Figura 2.2.2.2: Cemento magnesiaco

Calce idraulica

Ad oggi la produzione di calce idraulica (figura 2.2.2.3) è modesta ed è disponibile solo in pochi paesi. È considerata l'antesignana del cemento moderno.

Questa calce si distingue dall'aerea, perché consente agli impasti di indurire anche a contatto con l'acqua. Rientra quindi nella famiglia dei leganti idraulici.

La calce idraulica deriva dalla cottura di calcari argillosi o da miscele di calcari e argille (dal 5-6% al 22-25% di argilla). La cottura avviene a temperature comprese tra i 900°C e i 1200°C. Successivamente vengono spente tramite un lungo contatto con l'acqua e infine macinate in polvere.

Il prodotto della cottura contiene principalmente ossido di calcio (CaO) e altri elementi come SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO, che conferiscono all'impasto le proprietà idrauliche.

Per le calci idrauliche viene definito indice di idraulicità i il seguente rapporto di componenti:

$$i = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Le calci idrauliche possono essere suddivise al variare di questo rapporto in:

• Debolmente idrauliche: $0,10 \le i \le 0,16$;

• Mediocremente idrauliche: $0,16 \le i \le 0,31$;

• Idrauliche: 0.31 < i < 0.42;

• Eminentemente idrauliche: $0,42 \le i \le 0,52$.

In genere all'aumentare dell'indice di idraulicità la presa è più rapida e la resistenza meccanica è superiore.



Figura 2.2.2.3: Calce idraulica

La norma UNI EN 459-1:2015³³ ci definisce le caratteristiche e la nomenclatura per le calci idrauliche da costruzione con la seguente tabella 2.2.2.1:

T 1 11 0 0	0 1	C1 'C' '	1 1 1 1
Tabella 2.2.	. / :	Classificazione	calci idrauliche

TIPO DI CALCE	Sigla	Sigla SO ₃ (%)	Calce libera	R _{cm₂₈} (N/mm ²)		uo (%) a:	H ₂ O libera	Sta	oilità	Presa	Aria
	e iko			ndicae	0.09 mm	0.20 mm		5.3.2.1	5.3.2.2	AMINITO SHATISH GEORGIA	
CALCE IDRAULICA 2	HL 2	< 3	> 8	2 ÷ 7	<15	< 5	< 2	< 2	< 20	> 1 h < 15 h	≤ 20
CALCE IDRAULICA 3.5	HL2	< 3	> 6	3.5 ÷ 10	<15	< 5	< 2	< 2	< 20	> 1 h < 15 h	≤ 20
CALCE IDRAULICA 5	HL 5	< 3	>3	5 ÷ 15	<15	< 5	< 2	<2	< 20	> 1 h < 15 h	≤ 20
CALCE IDRAULICA NATURALE 2	HL2	< 3	> 15	2 ÷ 7	<15	< 5	<2	<2	< 20	> 1 h < 15 h	≤ 20
CALCE IDRAULICA NATURALE 3.5	NHL3.5	< 3	>9	3.5 ÷ 10	<15	< 5	< 2	<2	< 20	>1 h <15 h	≤ 20
CALCE IDRAULICA NATURALE 5	NHL5	< 3	>3	5 ÷ 15	<15	< 5	<2	< 2	< 20	> 1 h < 15 h	≤ 20

³³ UNI EN 459-1:2015 – Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.

_

Vengono considerate anche calci idrauliche, *le calci aeree* con aggiunte di aggreganti a comportamento *pozzolanico o idraulicizzante*.

Le calci idrauliche naturali vengono indicate dalla sigla NHL, con in genere indicato a lato il valore della resistenza a compressione (NHL2, NHL3,5 e NHL5). Le calci artificiali vengono indicare con la sigla HL (HL2, HL3 e HL5).

Cemento

Il cemento *Portland*³⁴ è il più conosciuto e rappresenta la base per la realizzazione dei cementi utilizzati oggi. Viene ottenuto dalla macinazione del prodotto di cottura di una miscela di calcare, argilla e sabbia. A questa miscela, chiamata *clinker*, viene aggiunta una piccola quantità di gesso ed eventualmente materiali pozzolanici, loppa d'alto forno ecc. Il *clinker* viene cotto a temperature elevate, tra i 1400 e i 1450°C.

Oltre nella temperatura più elevata la differenza con le calci idrauliche risiede nella percentuale superiore di argilla, 21-27% contro il 10-21% delle calci idrauliche.

La normativa UNI EN 197-1:2011³⁵ classifica i cementi comuni in 5 tipologie, 27 sottotipi, 3 classi di resistenza, ciascuna con altre 3 sottoclassi.

- CEM I Cemento Portland;
- CEM II Cemento Portland composito;
- CEM III Cemento d'altoforno;
- CEM IV Cemento pozzolanico;
- CEM V Cemento composito.

Ogni cemento deve essere individuato dalla sigla CEM, il numero romano che indica la tipologia, una eventuale lettera che individua il sottotipo e un numero che identifica la classe di resistenza. Le classi di resistenza sono tre: 32.5, 42.5 e 52.5, ciascuna divisa in 3 sottoclassi in modo da distinguere i cementi con bassa resistenza iniziale (L), ordinaria (N) e quelli con resistenza iniziale elevata (R). Il numero che indentifica le classi di resistenza si riferisce alla resistenza a compressione a 28 giorni, su provini di malta normalizzati con rapporto sabbia/cemento di 3:1 e rapporto acqua/cemento di 0,5.

Ad esempio, un cemento portland di classe 32,5 e resistenza iniziale ordinaria viene indicato con la sigla: CEM I 32,5 R.

Di seguito il prospetto della norma UNI EN 197-1:2011 con tutte le tipologie di cemento (tabella 2.2.2.2):

³⁴ Il nome Portland deriva dal fatto che al suo creatore, Joseph Aspdin che lo brevettò nel 1824, ricordava la pregiata pietra da costruzione dell'isola di Portland (Regno Unito).

³⁵ UNI EN 197-1:2011 - Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

Tabella 2.2.2.2: Classificazione cementi

Tipi	Denominazione d					Com	posizione	(percent	tuale in ma	assa ^{a)})			
principali	(tipi di cemento	comune)					Costituent	i principa	di				Costituent
			Clinker	Loppa di	Fumo	Pozz	olana	Cenere	volante	Scisto	Cal	care	secondari
				altoforno	di silice	naturale	naturale calcinata	silicea	calcarea	calcinato			
			K	S	D _p)	Р	Q	V	W	Т	L	LL	1
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	alla loppa	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-		-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-		-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	alla pozzolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	alle ceneri volanti	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-		-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	allo scisto calcinato	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	(*)	-	-	21-35	-	3+3	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	al calcare	CEM II/B-L	65-79		-			-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-		-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland	CEM II/A-M	80-88	4				12-20				-	0-5
	composito ^{c)}	CEM II/B-M	65-79	4				21-35				-	1
CEM III	Cemento	CEM III/A	35-64	36-65	-			-	-	-	-	-	0-5
	d'altoforno	CEM III/B	20-34	66-80	-	-			-		-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-		-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento	CEM IV/A	65-89		4		- 11-35				-	-	0-5
	pozzolanico ^{c)}	CEM IV/B	45-64	-	4		- 36-55			-	-	-	0-5
CEM V	Cemento	CEM V/A	40-64	18-30	-	◄ -	- 18-30 -		-	-		-	0-5
	composito ^{c)}	CEM V/B	20-38	31-49	-	◀-	- 31-49		-		-	-	0-5

I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi compositi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto 8).

2.3 Additivi

Fin dalla loro formulazione le malte e gli intonaci sono stati additivati con varie sostanze naturali. Queste additivazioni erano poi tramandate da maestro ad apprendista, pensiamo ad esempio alla malta con latte e zafferano oppure alla malta con grasso animale e latte o polpa di fichi, riportate da Plinio il Vecchio e che lo stesso Vitruvio denominerà "Malthe" inserendo una h come per sottolinearne la specialità. Ad oggi possiamo tranquillamente affermare che, praticamente tutte le malte industriali (o premiscelate) contengono degli additivi.

Gli additivi hanno lo scopo di migliorare le prestazioni dell'impasto o fornire determinate proprietà alla malta. Il settore degli additivi chimici per merito del costante progresso scientifico è in continua evoluzione pertanto la norma vigente sancisce dei requisiti minimi UNI EN 934-1:2008 ³⁶, delle conformità necessarie UNI EN 934-3:2012 ³⁷ e dei dettami su come poter controllare tali conformità UNI EN 934-6:2007 ³⁸.

Possono essere di natura organica od inorganica. Da sottolineare che essi vengono aggiunti all'impasto in piccolissime quantità (non maggiore del 5% in massa del contenuto di legante e comunque secondo le modalità fornite dal produttore), quantità minime che comunque fanno nascere importanti fenomeni di natura fisico e/o chimica. Inoltre, è fondamentale che gli additivi siano compatibili con tutti gli altri elementi del composto, nella maggior parte dei casi gli additivi utilizzati in edilizia sono compatibili con i leganti idraulici, se però si ha a che fare con malte aeree o bastarde occorre effettuare delle prove preventive secondo le norme UNI EN 480-1:2014 ³⁹, UNI EN 480-2:2007 ⁴⁰, UNI EN 480-13:2015 ⁴¹.



Figura 2.3.1: Parte della collezione di additivi e aggiunte presso il laboratorio del DISET

³⁶ UNI EN 934-1:2008 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Requisiti comuni.

³⁷ UNI EN 934-3:2012 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 3: Additivi per malte per opere murarie - Definizioni, requisiti, conformità e marcatura ed etichettatura

³⁸ UNI EN 934-6:2007 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 6: Campionamento, controllo e valutazione della conformità.

³⁹ UNI EN 480-1:2014 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 1: Calcestruzzo e malta di riferimento per le prove.

 ⁴⁰ UNI EN 480-2:2007 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 2: Determinazione del tempo di presa.
 41 UNI EN 480-13:2015 - Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 13: Malta da muratura di riferimento per le prove sugli additivi per malta.

Visto l'enorme campionario di additivi in commercio (figura 2.3.1) e le politiche di alcuni produttori di non rivelare facilmente i contenuti delle proprie formulazioni è impossibile in questa sede approfondire tale argomento, però possiamo portare degli esempi e classificare gli additivi in base alle caratteristiche fornite alla malta:

• Acceleranti di presa e indurimento (BE – Accelerators)

Vengono impiegati quando per qualche ragione è necessario accelerare i tempi di inizio e fine presa, sono utilizzati principalmente con le malte cementizie e i calcestruzzi. Sono costituiti in genere da una soluzione satura (stato liquido) di sali inorganici, che reagiscono da catalizzatori nella reazione di indurimento. In passato veniva utilizzato il cloruro di calcio⁴², ad oggi vietato a causa dei fenomeni di corrosione tra cloruri e acciaio (nel caso di malte/calcestruzzi armati).

La norma UNI EN 934 precedentemente citata differenzia gli acceleranti di presa con gli acceleranti di indurimento.

Esempi: formiato di calcio⁴³, trietanolammina⁴⁴, sali inorganici.

• Ritardanti di presa e indurimento (VZ – Retarders)

Gli additivi ritardanti vengono spesso impieganti quando si manifesta la necessità di mantenere a lungo l'impasto con buona lavorabilità. Nei prodotti premiscelati viene spesso utilizzato se, ad esempio l'impasto deve essere trasportato per lunghe distanze per ovviare all'aggiunta di acqua successiva che potrebbe ledere le caratteristiche della malta o calcestruzzo. Sono costituiti prevalentemente da prodotti organici a base di zuccheri e non dovrebbero modificare le resistenze finali dell'impasto. Esempi: gluconato⁴⁵, glucosio⁴⁶.

• Aeranti (AEA - Air Entraining Agents)

Questi additivi hanno la funzione di creare un sistema di micro-bollicine d'aria (diametri compresi tra i 20 e i 100 micron) all'interno dell'impasto, migliorando la durabilità al gelo e permettendo all'impasto di ritenere maggiore acqua e limitare i fenomeni di essudazione. Nelle malte bastare (per intonaci) ad esempio possono sostituire il grassello di calce. L'inglobamento delle bolle d'aria però, comporta una conseguente diminuzione della resistenza meccanica (circa il 20%) ed è quindi necessario verificare se l'aumento di durabilità vale questo costo. Può inoltre essere abbinato all'uso di aggregati leggeri per creare degli impasti termo-isolanti. Esempio: abietato sodico.

⁴² Formula chimica cloruro di calcio: CaCl₂.

⁴³ Formula chimica formiato di calcio: Ca(HCOO)₂.

⁴⁴ Formula chimica trietanolammina: C₆H₁₅NO₃.

⁴⁵ Formula chimica gluconato: C₆H₁₂O₇.

• Stabilizzanti o viscosizzanti (VMA - Viscosity Modifiyng Admixtures)

Conferiscono all'acqua dell'impasto una considerevole viscosità, che quindi viene trattenuta dalla malta che è conseguentemente più lavorabile e compatta sviluppando inoltre un'adesione considerevole con il materiale di supporto.

Esempi: eteri di cellulosa.

• Fluidificanti e superfluidificanti

(P- Plasticizers and SP/SF – Superplasticizers)

Consentono di migliorare la lavorabilità degli impasti e di ridurre la quantità di acqua all'interno della malta. I superfluidificanti o definiti anche super riduttori di acqua (*HRWR - High-range water reducer*). Nella pratica i ritardanti di presa e fluidificanti sono identici. Il dosaggio ideale viene espresso nella scheda tecnica del produttore, in genere non supera l'1% del contenuto in peso di legante.

Esempi: naftalensolfonati sodici, resine melamminiche, gluconato, glucosio, poliacrilati e policarbossilati.

• Espansivi o antiritiro (SRA - Shrinkage Reducing Admixtures)

Questi prodotti sono in grado di compensare gli effetti del ritiro igrometrico. L'agente espansivo induce una precompressione che impedisce che le sollecitazioni di trazione indotte dal ritiro superino quella che è la resistenza a trazione della malta.

Esempi: solfoalluminati di calcio e ossido di calcio (polvere), etere propilenglicolico e neopentilglicole (liquidi)

Antigelo

Servono per accelerare i processi di presa e indurimento alle basse temperature, forniscono alle malte maggiore adesione, resistenza al graffio, compattezza ed elasticità. Consentono quindi il confezionamento di malte anche in periodo invernale o in climi rigidi.

Esempio: Metilmetacrilato⁴⁷.

• Migliorativi delle resistenze meccaniche

Grazie a questi additivi si possono ottenere malte e intonaci più flessibili e tenaci. Esempi: Resine epossidiche.

-

⁴⁷ Formula chimica metacrilato di metile: C₅H₈O₂.

• Adesivi

Servono a migliorare l'aderenza della malta al supporto, migliorare il *grip* dell'intonaco e nel caso dei calcestruzzi per le riprese di getto.

Esempi: collanti in emulsione vinilici e acrilici.

• Impermeabilizzanti

Conferisce alle malte e agli intonaci l'impermeabilizzazione alla pioggia battente e le protegge dal vapore.

Esempi: Sali di acido stereatico (liquidi o in polvere).

• Battericidi o fungicidi

In genere si trattano di trattamenti superficiali quindi a presa già avvenuta e servono a rendere una superficie preventivamente lavata e pulita, repellente alla crescita di alghe e funghi.

Esempi: silossani, benzonato sodico, fenoli polialogenati, sali di rame, arsenico.

• Coloranti

Si utilizzano spesso negli intonaci o nelle malte da restauro per dare una precisa e adeguata colorazione.

Esempi: ossidi minerali.

2.3.1 Acqua

Sebbene l'acqua non è un additivo per esigenze di trattazione viene inserito all'interno di questo capitolo.

L'acqua rappresenta uno dei componenti chiave di una malta, conferisce all'impasto le fondamentali caratteristiche reologiche e di lavorabilità, consente l'idratazione del legante e gioca un ruolo fondamentale nella fase di indurimento.

La qualità dell'acqua utilizzata per l'impasto è importantissima, perché impurezze, sali solubili, sostanze organiche o estranee possono interferire con le fasi di presa e indurimento, causare macchie o efflorescenze superficiali e influenzare in maniera negativa la resistenza meccanica finale. L'acqua deve essere quindi pura e limpida, se disponibile l'acqua potabile è la migliore scelta. La norma UNI EN 1008:2003⁴⁸ sancisce che le acque dichiarate potabili possono essere utilizzare per gli impasti senza controlli preventivi.

Nel caso l'acqua potabile non fosse disponibile si possono utilizzare acque di origine sotterranea o acque naturali di superficie con l'obbligo di effettuare delle analisi chimiche per verificarne l'idoneità.

Le acque reflue (industriali e civili) sono particolarmente dannose a causa di residui oleosi, grassi o zuccherini (disturbano la presa e l'indurimento) ed insieme alle acque salmastre e marine sono vietate, se non dopo costosi e speciali trattamenti di depurazione.

La norma vigente UNI 11201:2017⁴⁹ che regola il contenuto di acqua all'interno del calcestruzzo può essere applicata anche per il dosaggio nelle malte.

In generale se il contenuto di acqua è:

- sufficiente: l'idratazione del legante avviene in maniera completa, e si ha con rapporto acqua/legante in peso di circa 0,4;
- insufficiente: si ha una idratazione incompleta, a meno di un vigoroso costipamento, le resistenze finali dell'impasto diminuiscono;
- eccessivo: si ha una diminuzione della resistenza e/o della densità della malta, questo può provocare cedimenti e aumentare il ritiro del legante.

-

⁴⁸ UNI EN 1008:2003 - Acqua d'impasto per il calcestruzzo - Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di ricupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo.

⁴⁹ UNI 11201:2017 - Prove sul calcestruzzo fresco – Determinazione del contenuto di acqua.

3. Produzione delle malte

Il lavoro di questa tesi è stato suddiviso in due fasi, la prima di produzione dei provini di malta e la seconda di sperimentazione sui provini creati. Come già anticipato nell'introduzione, il seguente elaborato è la continuazione di altri due elaborati di tesi. Per omogeneità e possibile confrontabilità dei risultati si è cercata di applicare ove possibile la medesima metodologia sia per la produzione che per la sperimentazione.

Le malte realizzate per questo elaborato appartengono a due famiglie differenti, malte aeree e malte idrauliche, pur condividendo la tipologia di legante ovvero una calce aerea.

Per ciascuna delle formulazioni realizzate per questa tesi, sono stati prodotti 9 provini normalizzati (40x40x160) mm, dei quali soltanto 3 verranno rotti come indicato da normativa. I restanti 6 provini entreranno a far parte dell'archivio del laboratorio DISET in modo da consentire possibili confronti o verifiche future.

Le malte realizzate e analizzate per questo elaborato sono codificate dalle lettere M, N, O e P e sono le seguenti (tabella 3.1):

Tabella 3.1: Malte realizzate per questo elaborato

Provini UNI 40 x 40 x 160 [mm]	Codice	Rapporto aggregato/legante
	M1	2,5 : 1
M-MALTA DI SABBIA E CALCE IDRATA IN POLVERE	M2	3:1
	M3	3,5 : 1
N-MALTA DI SABBIA E GRASSELLO DI CALCE	N1	2,5 : 1
IN-MALIA DI SADDIA E GRASSELLO DI CALCE	N2	3:1
O- MALTA DI SABBIA + COCCIOPES TO E CACLE	01	2,5 : 1
IDRATA	O2	3:1
P-MALTA DI SABBIA + TRASS E CALCE IDRATA	P1	2,5 : 1
II-MALIA DI SADDIA TI RASSE CALCE IDRATA	P2	3:1

La tabella successiva rappresenta tutte le formulazioni di malta realizzate al fine della ricerca sperimentale nel Laboratorio DISET del Politecnico di Torino. (tabella 3.2).

								COMPOSIZIONE	SIZIO NE						INFO RMAZIONI	N.
ELEN	ELENCO MALTE REALIZZATE	_		AGGREGATI	пас					LEGANTI	ШИ					
	[FFOVIIII UNI (40X40X100) IIIIII]	SAB	VAJORIS SIBBAS		POZZOLANA		CALCEAEREA	VEREA	9	CALCEIDRAULICA		CEMENTO	OLA	ALTRO	Data di confezionamento	TESISTA
# FAMIGLIA	NOME ECODIFICA		DICAVA	OCCIOPESTO	GRIGIA	PERLIE	CALCEIDRATA IN POLVERE	GRASSELLO DI CALCE	CALCE IDRAULICA (NHL 2)	CALCE IDRAULICA (NHL3.5)	CALCE IDRAULICA (NHL 5)	CEMENTO PORTLAND (32.5)	CEMENTO PORTLAND (42.5)	ARGILLA		
STELVE OF THE STATE	MAITA INDALLICA GARDIA, CALCEINDALLICA AND SA	B1	3						-						04-24/03/2015	
MALIA IDRAULIC.	A SABBIA: CALCEIDRACLICA (MILZ)	B2	2,5						1						04-05/03/2015	
D MALTA COMPOST	MALTA COMPOSTA SABBIA: CALCEIDRAULICA (NHL 2) + GRASSELLO DI CALCE	B4	7,5					-	3						19/03/2015	
_	MALTA COMPOSTA SABBIA: CALCEIDRAULICA (NHL 5) + GRASSELLO DI CALCE	B6	12					-			3				29/04/2015	
Of the day of the same	A TIME COLUMN AND THE COLUMN OF	BS	3								-				22-23/04/2015	F
MALIA IDRAULIC.	MALIA IDRAULICA SABBIA: CALCEIDRAULICA (NILES)	B7	2,5								-				27/04/2015	. ~
D MALTA SPECIALE	D MALTA SPECIALE SABBIA: ARGILIA	IQ	3											-	27/04/2015	- ;
		E2	12				3					1			27/02/2015	Σ <
E MALTA COMPOST	E MALTA COMPOSTA SABBIA: CALCEIDRATA IN POLVERE + CEMENTO	E4	12				1					3			03/03/2015	~
		ES	12				2					2		. 1	28/02/2015	0:
F MALTA IDRAULIC,	F MALTA IDRAULICA SABBIA + POZZOLANA GRIGIA : GRASSELLO DI CALCE	FI	3		30% DISET 2			1							08/05/2015	= -
		l9	3							1					22/11/2017	
G MALTA IDRAULIC.	G MALTA IDRAULICA SABBIA: CALCEIDRAULICA (NHL 3,5)	C5	2,5							1					27/11/2017	ઝ
		63	12					1		3				. 1	06/12/2017	В
MALTA CEMENTIZA	MALTA CEMENIZIA SABBIA: CEMENTO PORTIAND (32,5)	H	3									1			18/12/2017	ш
		H2	12					2				2			25/01/2018	,, r
MALTA COMPOST	MALTA COMPOSTA SABBIA: CEMENTO PORTLAND (32,5) + GRASSELLO DI CALCE	Н3	12					1				3			25/01/2018	10
		H4	12					3				1			26/01/2018	O
	MALTA CEMENIIZIA SABBIA: CEMENTO PORTIAND (42,5)	HS	3										1		05/12/2017	υ.
		9Н	12					2					2		14-18/12/2017	-
MALTA COMPOST	MALTA COMPOSTA SABBIA: CEMENTO PORTIAND (42,5) + GRASSELLO DI CALCE	Н7	12					-					3		11/12/2017	
		H8	12					3					_		11/12/2017	
I MALTA IDRAULIC.	MALTA IDRAULICA SABBIA + COCCIOPESTO : GRASSELLO DI CALCE	11	3	60% DISET 2				1							30/11/2017	
L MALTA IDRAULIC.	L MALTA IDRAULICA SABBIA+ PERLITE: GRASSELLO DI CALCE	L1	3			60% DISET2		-							14/12/2017	
		MI	2,5				1								04/12/2018	
M MALTA ABREA	SABBIA: CALCEIDRATA IN POLVERE	M2	3				1								14/12/2018	
		M3	3,5				1								19/12/2018	> 11
N MALTA AEDEA	SARBIA : CPASSMIO DICALCE	N	2,5					1							08/01/2019	ı O
VI VI		N2	3					-							14/01/2019	0 :
O MALTA IDRALIC	MALTA IDRAIL ICA SABRIA + COCCIO PESTO - CALCE IDRATA IN POLIVEDE	01	2,5	60% DISET 2			_								24/01/2019	= -
		02	3	60% DISET2			_								01/02/2019	. 0
D MALTA IDRAILIC	D MALTA IDRAILICA SABBIA + POZZOLANA GRIGIA : CALCE IDRATA IN POLIVERE	P1	2,5		30% DISET 2		-								23/02/2019	
I	SALES OF THE CALCULATION OF THE	P2	3		30% DISET 2		_								22/02/2019	

Tabella 3.2: Elenco malte formulate e analizzate presso il laboratorio del DISET

3.1 Processo di produzione dei campioni

1. Preparazione dell'aggregato

Come descritto nel capitolo 2.1 l'aggregato gioca un ruolo fondamentale all'interno di una malta, costituendone un vero e proprio scheletro solido.

I provini per questo elaborato sono stati realizzati seguendo la curva granulometrica DISET 2 (grafico 3.1.1), utilizzando aggregati di diametro massimo di 2 mm e minimo di 0,063 mm.

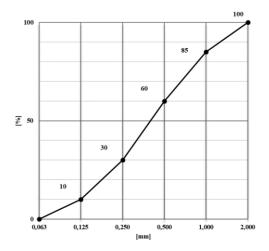


Grafico 3.1.1: Curva DISET2

Per la realizzazione di 2000 g di aggregato sono necessari:

- 200 g di aggregati compresi tra 0,063 e 0,125 mm. (10%)
- 400 g di aggregati compresi tra 0,125 e 0,250 mm. (20%)
- 600 g di aggregati compresi tra 0,250 e 0,500 mm. (30%)
- 500 g di aggregati compresi tra 0,500 e 1,000 mm. (25%)
- 300 g di aggregati compresi tra 1,000 e 2,000 mm. (15%)

Come aggregato principale sono state utilizzate delle sabbie locali provenienti dal Piemonte, in particolare dalla cava *Simar* località Bricco Toni (Cisterna d'Asti).

Le sabbie in questione sono state prima separate in varie famiglie (FG7, FG6, FG5 ecc.) e successivamente analizzate per tracciare per ciascuna una curva granulometrica (aggiornata periodicamente). La suddivisione in famiglie con curva granulometrica nota, consente di poter ricavare facilmente maggiori quantità di una apposita classe granulometrica. Questo processo avviene mediante l'utilizzo di una setacciatrice automatica (figura 3.1.1) su cui è stata disposta una pila di setacci con apertura delle maglie conformi alla norma UNI EN 933-2:1997, definiti anche *stacci UNI* per distinguerli dagli *stacci ASTM* le cui maglie permetto una suddivisione in classi granulometriche leggermente differenti.

La procedura di setacciatura viene fatta avanzare per circa 10 minuti.

La quantità di sabbia setacciata è in genere inferiore a 1500 g, questo per evitare una ingente occlusione delle maglie.

Terminata questa fase, le frazioni di aggregato trattenute da ciascun staccio vengono conservati in recipienti diversi. Infine, si passa alla composizione dell'aggregato da utilizzare per l'impasto della malta (seguendo la curva DISET 2) in base alle quantità necessarie preparando n Campioni.

Per realizzare le malte M1, M2, M3, N1 e N2 sono stati realizzati 3 campioni di aggregato da 1500 g ciascuno. Per la malta O1, 2 campioni da 1500 g ciascuno (risultando però una quantità a limite) invece per le formulazioni O2, P1 e P2 sono stati realizzati 2 campioni da 2000 g ciascuno.

Quest'ultima quantità si è rivelata ottimale per la produzione di 9 campioni normalizzati, in modo da non avere elevate quantità di materiale in eccesso.

La suddivisione in più campioni ha permesso un più accurato calcolo delle masse volumiche e ha inoltre semplificato la procedura di miscelazione manuale dovendo impastare una quantità ridotta di materiale.



Figura 3.1.1: Setacciatrice automatica e stacci utilizzati

2. Calcolo delle masse volumiche

Una volta assemblata la quantità di aggregato necessaria, si passa al calcolo della massa volumica apparente dell'aggregato e del legante.

Questa operazione serve per poter calcolare in maniera accurata la quantità in peso di legante da aggiungere all'impasto, in base al rapporto volumetrico aggregato-legante desiderato.

Questa procedura è concettualmente uguale sia per aggregato che per legante ed è stata realizzata nelle seguenti fasi:

- a) Un recipiente di volume noto, vuoto, pulito e asciutto viene pesato, determinando quindi la sua massa che verrà appuntata con la dicitura "tara".
 Per gli aggregati è stato utilizzato un recipiente di volume pari a 200 cm³ dal peso di 165,7 g.
 - Per i leganti invece si è utilizzato un recipiente più piccolo dal volume di 64 cm³ e dal peso di 3,2 g.
- b) Il materiale di cui si vuole calcolare la massa volumica apparente viene miscelato, ed è posto su una superficie orizzontale pulita dove si effettua l'operazione denominata quartatura al fine di ottenere una miscela omogena. Questa fase è stata realizzata esclusivamente per l'aggregato.
- c) Il recipiente pesato nella fase a) viene collocato su una superficie orizzontale e riempito tramite un cucchiaio fino all'orlo o comunque fino ad un volume noto. Il materiale in eccesso viene eliminato facendo in modo creare una superficie regolare e stando attenti a non compattare in maniera eccessiva il materiale. Compattare eccessivamente il materiale in questa frase potrebbe comportare un aumento del peso e un conseguente aumento della densità volumica apparente.
- d) Successivamente il recipiente viene a questo punto pesato determinandone la nuova massa che verrà appuntata con la dicitura "Pesata 1".
- e) Il recipiente viene svuotato e pulito, il materiale che conteneva viene posto in altro contenitore, vengono quindi ripetute le operazioni c), d) ed e) con altro materiale.
- f) Terminata l'ultima pesata si calcola la massa volumica apparente (o densità apparente ρ) mediante la seguente formula:

$$\rho = \frac{\left(\frac{\sum_{i}^{n} Pesata_{i}}{n_{pesate}}\right) - Tara}{Volume\ recipente}$$

Di seguito sono riportati i valori di massa volumica apparente dei materiali utilizzati per ogni formulazione (tabella 3.1.1):

Tabella 3.1.1: Calcolo massa volumica

Materiale	Tara [g]	Volume [cm ³]	Pesata 1 [g]	Pesata 2 [g]	Pesata 3 [g]	Pesata 4 [g]	ρ [g/cm3]		
		, ,	CODICE MALTA	- M1					
Sabbia (Campione 1)	165,9	200	482,4	466,6	480,1	494,6	1,58		
Sabbia (Campione 2)	165,9	200	493,2	491,7	492,0	487,0	1,63		
Sabbia (Campione 3)	165,9	200	490,1	484,0	480,0	494,0	1,61		
Sabbia (Valore medio)		•	l		l		1,60		
Calce idrata in polvere	3,2	64	44,1	44,5	43,3	44,7	0,64		
			CODICE MALTA	- M2	,	,	,		
Sabbia (Campione 1)	165,9	200	488,2	500,9	474,3	492,8	1,62		
Sabbia (Campione 2)	165,9	200	504,0	488,1	489,7	502,4	1,65		
Sabbia (Campione 3)	165,9	200	499,0	479,3	492,1	506,3	1,64		
Sabbia (Valore medio)		1		•	•		1,64		
Calce idrata in polvere	3,2	64	39,5	38,9	38,2	39,1	0,56		
			CODICE MALTA	- M3					
Sabbia (Campione 1)	165,9	200	497,3	498,2	495,2	500,3	1,66		
Sabbia (Campione 2)	165,9	200	498,5	501,5	496,3	499,7	1,67		
Sabbia (Campione 3)	165,9	200	506,3	502,9	498,2	497,0	1,68		
Sabbia (Valore medio)							1,67		
Calce idrata in polvere	3,2	64	41,3	37,5	39,4	40,7	0,57		
			CODICE MALTA	- N1					
Sabbia (Campione 1)							1,63		
Sabbia (Campione 2)	1	E stato preso	un valore medio ir	base alle precedent	ti misurazioni.		1,63		
Sabbia (Campione 3)	1			1			1,63		
Sabbia (Valore medio)									
Grassello di calce	33.4	40	80,9	100.1	87.9	88.4	1,63		
			CODICE MALTA	- N2			, ,		
Sabbia (Campione 1)							1,63		
Sabbia (Campione 2)	1	E stato preso	un valore medio ir	base alle precedent	ti misurazioni.		1,63		
Sabbia (Campione 3)	i	1		•			1,63		
Sabbia (Valore medio)							1,63		
Grassello di calce	33,4	40	85,2	83,7	102,5	86,4	1,40		
			CODICEMALTA	-01		,			
Sabbia+Cocciopesto (Campione 1)	165,9	200	413,7	418,8	416,2	409,8	1,24		
Sabbia+Cocciopesto (Campione 2)	165,9	200	423,8	405,3	412,5	415,4	1,24		
Sabbia+Cocciopesto (Val. medio)				/-	,-	- /	1,24		
Calce idrata in polvere		E stato preso	un valore medio ir	base alle precedent	ti mis urazioni.		0,57		
•			CODICE MALTA				-7		
Sabbia+Cocciopesto (Campione 1)							1,24		
Sabbia+Cocciopesto (Campione 2)	1	E stato preso un	valore medio in ba	se alle precedenti mi	isurazioni per O1.		1,24		
Sabbia+Cocciopesto (Val. medio)							1,24		
Calce idrata in polvere		E stato preso	un valore medio ir	base alle precedent	ti mis urazioni.		0,57		
			CODICE MALTA	•			.,=.		
Sabbia+Pozzolana (Campione 1)	165,9	200	487,3	490,8	493,5	491,2	1,62		
Sabbia+Pozzolana (Campione 2)	165,9	200	493,5	485,7	496,3	487,7	1,62		
Sabbia+Pozzolana (Valore medio)					1		1,62		
Calce idrata in polvere		E stato preso	un valore medio ir	base alle precedent	ti misurazioni.		0,57		
	1		CODICE MALTA	•			-,-		
Sabbia+Pozzolana (Campione 1)							1,63		
Sabbia+Pozzolana (Campione 2)		E stato preso un	valore medio in ba	se alle precedenti mi	isurazioni per O1.		1,63		
Sabbia+Pozzolana (Valore medio)							1,63		
(1,05		

3. Preparazione stampi metallici normalizzati

Per il confezionamento di tutti i provini sono stati utilizzati degli appositi stampi metallici normalizzati. La norma di riferimento è la UNI EN 1015-11:2007 ⁵⁰. Questi stampi (figura 3.1.2) sono "costituiti da un telaio aperto di elementi removibili formati, quando assemblati, tre scomparti", inoltre la norma specifica alcuni parametri da rispettare:

- Ciascuno dei tre stampi deve avere profondità (o altezza) e larghezza interna pari a 40 ± 0.1 mm, mentre la lunghezza pari a 160 ± 0.4 mm.
- Le pareti divisorie spesse almeno 8 mm, occorre che siano abbastanza rigide da prevenire distorsioni o danni ai campioni al momento della rimozione dagli stessi.
- Occorre che il telaio dello stampo assemblato sia fissato tramite viti di ritegno ad una piastra base rigida, crei insieme all'agente lubrificante un sistema a tenuta d'acqua.
- Le superfici interne devono essere pulite e avere una rugosità superficiale non superiore a 3,2 Ra [μm] secondo la misurazione normata dalla UNI EN ISO 4287:2009 ⁵¹.

Gli stampi (figura 3.1.3) prima di ogni utilizzo sono stati puliti e lubrificati in tutte le superfici interne con olio minerale, operazione fondamentale per impedire l'adesione della malta e per proteggere la superficie interna dello stampo.

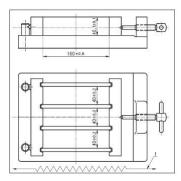


Figura 3.1.2: Stampi norma UNI



Figura 3.1.3: Stampi utilizzati, a destra lo stampo nuovo

UNI EN 1015-11:2007 – Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita
 UNI EN ISO 4287:2009 – Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) – Stato della superficie: Metodo del profilo – Termini, definizioni e

⁵¹ UNI EN ISO 4287:2009 – Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) – Stato della superficie: Metodo del profilo – Termini, definizioni e parametri dello stato della superficie.

4. Preparazione della miscela

Una volta stabilita la formulazione da realizzare e concluse le tre fasi precedenti, si procede alla vera e propria preparazione della malta. Per ogni formulazione sono stati realizzati nove provini.

Di seguito verrà illustrato il procedimento utilizzato per la malta M2 (composta da 3 parti di sabbia e 1 parte di calce idrata in polvere) a titolo d'esempio:

- Per realizzare 9 provini UNI dal volume ciascuno di 256 cm³, basandosi sulla curva DISET 2 sono necessari dai 4000 ai 4500 g di aggregato. Nel caso specifico sono stati realizzati 3 campioni di sabbia da 1500 g ciascuno.
- Avendo calcolato per ciascun campione il valore della densità apparente al punto (2.) possiamo calcolare il volume di ciascun campione utilizzando la formula inversa:

$$V_{aggregato} = \frac{m_{aggregato}}{\rho_{aggregato}}$$

Dove:

V: è il volume [cm³]

M: è la massa misurata [g]

 ρ : è la massa volumica apparente (o densità) [g/cm³]

Si sarebbe potuto anche utilizzare un valore di ρ media e avere cosi i tre volumi uguali.

- Calcolato il volume di ciascun campione di aggregato e sapendo di voler realizzare una malta con rapporto aggregato legante 1:3, per determinare il volume del legante basta semplicemente dividere il volume appena calcolato per 3 (nel caso di rapporto 1:2,5 andrà diviso per 2,5 e così via...).
- Noto il volume del legante e nota la densità dello stesso, utilizzando la formula inversa possiamo calcolare la massa [g] di legante da aggiungere all'aggregato:

$$m_{legante} = V_{legante} \cdot \rho_{legante}$$

• Calcolate le quantità di legante da unire a ciascun campione di aggregato, non rimane che riporli all'interno di un contenitore e iniziare a miscelarli. Dapprima si può agire a secco con una cazzuola in modo da distribuire omogeneamente il legante, successivamente tramite piccole aggiunte di acqua si inizia ad impastare.

Durante questa fase si annotano esattamente i valori di acqua aggiunti per quel campione.

La miscelazione per questo elaborato è stata realizzata manualmente tramite un una cazzuola e un mixer elettrico rendendo questa procedura difficoltosa (anche per questa ragione si è optato per realizzare 2/3 campioni di impasto per volta).

Occorre aggiungere acqua all'impasto fino a renderlo plastico e omogeneo.

• Per verificare l'opportuna consistenza e quindi terminare questa fase, occorre effettuare una verifica empirica con la tavola "americana". Questa tavola di legno o plastica va preventivamente sporcata con un po' di impasto in modo da creare maggiore *grip*. Se la malta è facilmente spalmabile e al contempo ha la consistenza per rimanere aderente alla tavola anche in seguito a dei movimenti sussultori, allora può considerarsi pronta per la fase successiva.

Attenzione ad aggiungere troppa acqua all'impasto, questo genererà subito il cosiddetto fenomeno dell'essudazione, con presenza di acqua in eccesso sulla superfice della malta. Come già descritto nel capitolo 2.3.1, un impasto con un eccesso di acqua comporta minori resistenze e possibili fessure da ritiro.

• L'operazione di miscelazione viene ripetuta per i tre campioni che vengono miscelati insieme tramite cazzuola e mixer all'interno di un altro recipiente. Si crea così un impasto unico e omogeneo e a questo punto si è pronti per la fase successiva di colatura.

5. Colata nello stampo

Questa operazione seppur semplice all'apparenza può presentare delle difficoltà.

La malta deve raggiungere ogni angolo dello stampo, riducendo al massimo i possibili vuoti d'aria all'interno. Per questo motivo la malta viene versata a poco a poco con la cazzuola e di volta in volta tramite un piccolo mortaio si compatta strato per strato. Questa operazione viene ripetuta singolarmente per ciascuno dei 9 provini.

Inoltre, è importante lisciare il più possibile la superficie esposta del provino, quest'ultima operazione, a seconda della formulazione della malta, può essere difficoltosa o impossibile da realizzare. È importante avere una superficie liscia oltre che per una certa pulizia estetica serve per avere una superficie liscia su cui scrivere i dettagli del campione.

6. Compattazione

Ultimata la colata della malta in tutti e tre gli stampi normalizzati si procede alla compattazione tramite vibrazione.

Questa operazione si effettua tramite la tavola a scosse, macchinario che serve a determinare la consistenza delle malte seguendo la norma UNI EN 1015-3:2007 ⁵².

Nel caso si dispone lo stampo sulla lastra di vetro e si procede con delle scosse continue per circa 1 minuto.

L'operazione viene ripetuta quindi per gli altri due stampi.

Durante questa operazione è possibile che parte dell'olio, utilizzato durante la fase (3.) per la lubrificazione delle forme, riaffiori o fuoriesca.

Ultimata questa fase i provini sono pronti per asciugare.

52 UNI EN 1015-3:2007 – Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)

54

7. Fase di presa e rimozione dagli stampi

Terminata la fase di compattazione le forme vanno riposta in un ambiente sufficientemente areato, con temperatura controllata e lontano da eventuali fonti che potrebbero compromettere il processo di presa.

A seconda della formulazione questa fase può durare da 24h a 1-2 settimane. In questo caso i provini che hanno richiesto più tempo sono stati quelli a base di sabbia e grassello di calce (1 settimana circa).

È di fondamentale importanza aspettare che la presa sia completa, anche se da una analisi superficiale il provino potrebbe apparire asciutto (perfino tramite la prova con ago di Vicat) il *core* dello stesso potrebbe ancora essere umido.

Attenzione, rimuovere dallo stampo dei provini non asciutti comporta ingenti perdite di materiale. Occorre essere cauti in questa fase e aspettare anche 24h in più del previsto.

L'operazione di rimozione dagli stampi è comunque un'operazione delicata essendo le malte non ancora mature.

8. Fase di indurimento/maturazione

Rimossi i campioni asciutti dagli stampi vanno prontamente catalogati.

La fase di indurimento ha durata variabile a seconda della formulazione scelta, in media comunque dopo 28 giorni una malta ha raggiunto quasi la massima resistenza. Per velocizzare il processo di indurimento si possono bagnare lievemente i campioni con dell'acqua nebulizzata, questo perché all'interno dell'acqua è contenuto ossigeno, componente chiave nel processo di indurimento delle malte.

3.2 Descrizione delle malte formulate

Nei paragrafi successivi verranno descritte le malte formulate per questo elaborato, indicandone una sintetica descrizione, la composizione e le eventuali singolarità nel processo produttivo. Per ogni tipologia di miscela sono stati realizzati 9 provini di dimensioni normalizzate (40x40x160) mm, prevedendone 3 aggiuntivi rispetto ai 6 indicati dalla già citata norma UNI EN 1015-11:2007.

3.2.1 Malte di sabbia e calce idrata in polvere – M

Questa tipologia di malte rappresenta il più antico e rappresentativo esempio di calce aerea. All'interno di questo elaborato sono identificate dalla lettera M.

L'unico aggregato è la sabbia, composta seguendo la curva granulometrica DISET 2 precedentemente descritta nel capitolo 2.1 la tipologia di sabbia utilizzata è quella riportata nel capitolo 2.1.1. L'unico legante utilizzato è la calce idrata in polvere descritta nel capitolo 2.2.1. Sono state realizzate tre formulazioni con rapporti aggregato-legante differenti:

- M1, con rapporto aggregato-legante (2,5:1), quindi una malta aerea grassa;
- M2, con rapporto aggregato-legante (3:1), quindi una malta aerea standard;
- M3, con rapporto aggregato-legante (3,5:1), quindi una malta aerea magra.

Per la produzione di queste tre formulazioni si è proceduto come descritto nel capitolo 3.1, Si sono realizzati tre "campioni" per ciascuna tipologia e ciò è stato dovuto esclusivamente ad una esigenza pratica e non interferente sul risultato finale.

Tabella 3.2.1.1: Tabella 3 campioni di malta M1

CAMBIONE 1		CODICEM	IALTA - M1	
CAMPIONE 1	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	2,5	952	1,58	1500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	381	0,64	244
ACQUA				363
CAMPIONE 2		CODICEN	IALTA - M1	
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	2,5	923	1,63	1500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	369	0,64	236
ACQUA				329
CAN (DIONE 2		CODICE	IALTA - M1	
CAMPIONE 3	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	2,5	935	1,61	1500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	374	0,64	239
ACQUA				341

Tabella 3.2.1.2: Tabella riassuntiva malta M1

D (D) CTO EDIA I E		CODICE M	IALTA - M1	
IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	2,5	2810	1,60	4500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	1124	0,64	719
ACQUA				1033



Figura 3.2.1.1: Provini M1 realizzati

Tabella 3.2.1.3: Tabella 3 campioni di malta M2

CAMDIONE 1		CODICEM	IALTA - M2					
CAMPIONE 1	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]				
SABBIA	3	928	1,62	1500				
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	309	0,56	173				
ACQUA				363				
CAMPIONE 2	CODICE MALTA - M2							
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]				
SABBIA	3	909	1,65	1500				
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	303	0,56	170				
ACQUA				345				
CAMBIONE 2		CODICE M	IALTA - M2					
CAMPIONE 3	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]				
SABBIA	3	914	1,64	1500				
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	305	0,56	171				
ACQUA				365				

Tabella 3.2.1.4: Tabella riassuntiva malta M2

IMDA CTO EDIA LE		CODICE M	IALTA - M2	
IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	2751	1,64	4500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	917	0,56	513
ACQUA				1073

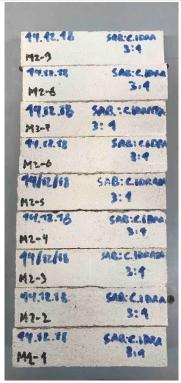


Figura 3.2.1.2: Provini M2 realizzati

Tabella 3.2.1.5: Tabella 3 campioni di malta M3

CAMPIONE 1		CODICEN	IALTA - M3						
CAMPIONE I	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]					
SABBIA	3,5	900	1,67	1500					
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	257	0,57	147					
ACQUA				366					
CAN (DIONE)		CODICE MALTA - M3							
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]					
SABBIA	3,5	898	1,67	1500					
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	257	0,57	146					
ACQUA				358					
CAN (DIONE 2		CODICEN	IALTA - M3						
CAMPIONE 3	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]					
SABBIA	3,5	892	1,68	1500					
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	255	0,57	145					
ACQUA				364					

Tabella 3.2.1.6: Tabella riassuntiva malta M3

IMDA CTO EDIA LE		CODICEM	IALTA - M3	
IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3,5	2690	1,67	4500
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	769	0,57	438
ACQUA				1088

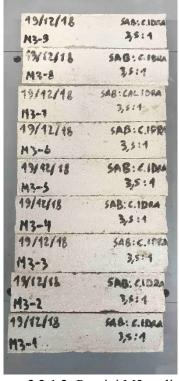


Figura 3.2.1.3: Provini M3 realizzati

3.2.2 Malte di sabbia e grassello di calce -N

Questa tipologia di malta è una variante della precedente, quindi nella famiglia delle malte aeree.

All'interno di questo elaborato sono identificate dalla lettera N.

L'unico aggregato è la sabbia, composta seguendo la curva granulometrica DISET 2 precedentemente descritta nel capitolo 2.1 la tipologia di sabbia utilizzata è quella riportata nel capitolo 2.1.1. L'unico legante utilizzato è il grassello di calce (figura 3.2.2.1) descritto nel capitolo 2.2.1.

Sono state realizzate due formulazioni con rapporti aggregato-legante differenti:

- N1, con rapporto aggregato-legante (2,5:1), quindi una malta aerea grassa.
- N2, con rapporto aggregato-legante (3:1), quindi una malta aerea standard.

In fase preliminare si è vagliata l'ipotesi di formulare una variante N3 con rapporto aggregatolegante (3,5:1), poi accantonata per il rischio di generare una malta eccessivamente magra e quindi con basse proprietà meccaniche.

È importante sottolineare che per queste due formulazioni l'acqua aggiunta all'impasto è stata minima. Questo perché il grassello non è altro che una calce idrata con un eccesso d'acqua, quindi aggiungere quantità maggiori di acqua sarebbe stato inutile e controproducente.

Per la produzione di queste tre formulazioni si è proceduto come descritto nel capitolo 3.1, Si sono realizzati tre "campioni" per ciascuna tipologia e ciò è stato dovuto esclusivamente ad una esigenza pratica e non interferente sul risultato finale.



Figura 3.2.2.1: Grassello di calce utilizzato

Tabella 3.2.2.1: Tabella 3 campioni di malta N1

CAMBIONE 1	CODICE MALTA - N1					
CAMPIONE 1	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA	2,5	920	1,63	1500		
GRASSELLO DI CALCE	1	368	1,40	515		
ACQUA		50				
CAN (DIONE 2		CODICEMALTA - N1				
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA	2,5	920	1,63	1500		
GRASSELLO DI CALCE	1	368	1,40	515		
ACQUA		•		30		
CAMPIONE 2		CODICEM	IALTA - N1			
CAMPIONE 3	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA	2,5	920	1,63	1500		
GRASSELLO DI CALCE	1	368	1,40	515		
ACQUA		23				

Tabella 3.2.2.2: Tabella riassuntiva malta N1

DADA CTO EDIA LE		CODICEM	CODICE MALTA - N1		
IMPASTO FINALE	PARTI	MASSA [g]			
SABBIA	2,5	2761	1,63	4500	
GRASSELLO DI CALCE	1	1104	1,40	1546	
ACQUA				103	

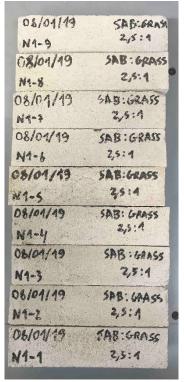


Figura 3.2.2.2: Provini N1 realizzati

Tabella 3.2.2.3: Tabella 3 campioni di malta N2

CAMPIONE 1		CODICEM	IALTA - N2	
CAMITIONE I	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	920	1,63	1500
GRASSELLO DI CALCE	1	307	1,40	429
ACQUA		83		
CAMDIONE 2		CODICE MALTA - N2		
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	920	1,63	1500
GRASSELLO DI CALCE	1	307	1,40	429
ACQUA				112
CAMBIONE 2		CODICEM	IALTA - N2	
CAMPIONE 3	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	920	1,63	1500
GRASSELLO DI CALCE	1	307	1,40	429
ACQUA				57

Tabella 3.2.2.4: Tabella riassuntiva malta N2

IMDA CTO EDIA LE	IMPASTO FINALE CODICE MALTA - N2			
IMPASIOFINALE	PARTI	MASSA [g]		
SABBIA	3	2761	1,63	4500
GRASSELLO DI CALCE	1	920	1,40	1288
ACQUA				252

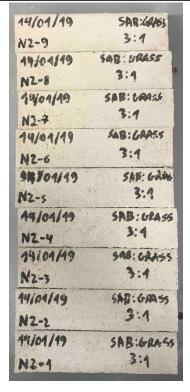


Figura 3.2.2.3: Provini N2 realizzati

3.2.3 Malte di sabbia/cocciopesto e calce idrata in polvere - O

Con questa tipologia di malta entriamo all'interno della famiglia delle malte idrauliche, questo grazie all'aggiunta nell'impasto di cocciopesto (figura 3.2.3.1) capitolo 2.1.2, che è un aggregato idraulicizzante di origine artificiale.

All'interno di questo elaborato sono identificate dalla lettera O.

In questo caso abbiamo due aggregati, la sabbia della stessa tipologia utilizzata per le altre formulazioni ed il cocciopesto. L'aggregato è stato composto seguendo sempre la curva granulometrica DISET 2, utilizzando però il cocciopesto per le classi di aggregato indicate nel grafico DISET 2 sottostante (grafico 3.2.3.1).

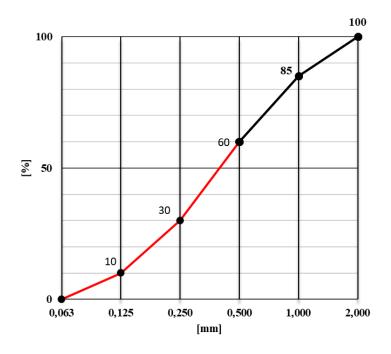


Grafico 3.2.3.1: Curva DISET 2 modificata con cocciopesto (indicato in rosso)

A titolo d'esempio per la realizzazione di 2000g di aggregato sono state utilizzati:

- 200 g di cocciopesto compreso tra 0,063 e 0,125 mm. (10%);
- 400 g di cocciopesto compreso tra 0,125 e 0,250 mm. (20%);
- 600 g di cocciopesto compreso tra 0,250 e 0,500 mm. (30%);
- 500 g di sabbia compresa tra 0,500 e 1,000 mm. (25%);
- 300 g di sabbia compresa tra 1,000 e 2,000 mm. (15%).

L'aggregato così composto è stato inoltre preventivamente bagnato con dell'acqua, tenuta in conto nel computo totale di acqua aggiunta, questo perché il cocciopesto essendo poroso tende ad assorbire acqua dall'impasto. L'aggregato quindi prima della miscelazione deve presentarsi nella condizione di saturo a superficie asciutta (*saturated and surface dry*).

L'acqua aggiunta in fase preliminare viene quindi totalmente assorbita dai pori del cocciopesto e non prende parte al processo di idratazione della malta.

La quantità di acqua utilizzata per questa operazione è di circa 25g per ciascun campione.



Figura 3.2.3.1: Cocciopesto utilizzato (SINOPIA)

Sono state realizzate due formulazioni con rapporti aggregato-legante differenti:

- O1, con rapporto aggregato-legante (2,5:1), quindi una malta idraulica grassa.
- O2, con rapporto aggregato-legante (3:1), quindi una malta idraulica standard.

Per la produzione di queste tre formulazioni si è proceduto come descritto nel capitolo (3.1), Si sono realizzati due "campioni" per ciascuna tipologia e ciò è stato dovuto esclusivamente ad una esigenza pratica e non interferente sul risultato finale.

Tabella 3.2.3.1: Tabella 2 campioni di malta O1

CAMPIONE 1		CODICE MALTA - O1				
CAMPIONE I	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA + COCCIOPESTO	2,5	1210	1,24	1500		
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	273				
ACQUA				458		
	CODICE MALTA - O1					
CAMDIONE 2		CODICEM	IALTA - O1			
CAMPIONE 2	PARTI		DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
CAMPIONE 2 SABBIA + COCCIOPESTO	PARTI 2,5			MASSA [g] 1500		
		VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	101		

Tabella 3.2.3.2: Tabella riassuntiva malta O1

IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA + COCCIOPESTO	2,5	2419	1,24	3000
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	968	0,57	547
ACQUA				890

Tabella 3.2.3.3: Tabella 2 campioni di malta O2

CAMPIONE 1	CODICE MALTA - O2			
CAMPIONE 1	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA + COCCIOPESTO	3	1613	1,24	2000
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	538	0,57	304
ACQUA				510
CAMPIONE 2		CODICEM	IALTA - O2	
CAMPIONE 2	PARTI	CODICE M VOLUME [cm ³]	ALTA - O2 DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
CAMPIONE 2 SABBIA + COCCIOPESTO	PARTI 3			MASSA [g] 2000
	PARTI 3 1	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	

Tabella 3.2.3.4: Tabella riassuntiva malta O2

IMDA CTO EDIA LE		CODICEM	IALTA - O2	
IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA + COCCIOPESTO	3	3226	1,24	4000
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	1075	0,57	608
ACQUA				1035

0402/19	SABALOC : C.IDAA	29/04/19	SABHOC: E ISMA 2,5:1	24/01/19	Sabout Cidal
01/02/49	588+006:C.IDRA 3:4	24/01/13	MARACOC: CIBRA 25:4	29/03/19	ideeex: Ciona 2,5:4
04/02/49	SAB +OF : C.IDAA 3 : A	24/01/19	Sabicac : eldra 2,5:4	24/01/49	2,5:4
0110219	SABACOE: Z.IDM 3:4	01/02/19	SAB+COC: C.IDRA	24/09/1	9 SAMACOR: CUDRA
02-2	SABHEDET CLIDAA	01/02/19	SAB+COC: C.IDRA	24/04/19	SAB+coc:CiPa
04/02/19	SABELOGICIONA 3:4	0402/49	SAB+COC: C.HORA	24/01/19	

Figura 3.2.3.2: Provini O1 e O2 realizzati

3.2.4 Malte di sabbia/pozzolana e calce idrata in polvere -P

Con questa tipologia di malta siamo ancora all'interno della famiglia delle malte idrauliche, in questo caso però viene aggiunta nell'impasto pozzolana (trass). Ovvero un aggregato idraulicizzante di origine naturale trattato nel capitolo 2.1.3.

All'interno di questo elaborato sono identificate dalla lettera P.

In questo caso abbiamo due aggregati, la sabbia della stessa tipologia utilizzata per le altre formulazioni, riportata nel capitolo 2.1.1 e la pozzolana (trass). L'aggregato è stato composto seguendo sempre la curva granulometrica DISET 2 utilizzando però la pozzolana per le classi di aggregato indicate nel grafico DISET 2 sottostante (grafico 3.2.4.1).

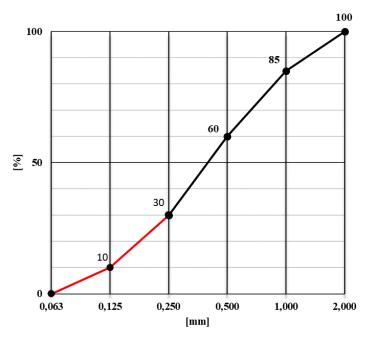


Grafico 3.2.4.1: Curva DISET 2 modificata con pozzolana (indicato in rosso)

A titolo d'esempio per la realizzazione di 2000g di aggregato sono state utilizzati:

- 200 g di pozzolana compresa tra 0,063 e 0,125 mm. (10%)
- 400 g di pozzolana compresa tra 0,125 e 0,250 mm. (20%)
- 600 g di sabbia compresa tra 0,250 e 0,500 mm. (30%)
- 500 g di sabbia compresa tra 0,500 e 1,000 mm. (25%)
- 300 g di sabbia compresa tra 1,000 e 2,000 mm. (15%)

L'unico legante utilizzato è la calce idrata in polvere descritta nel capitolo 2.2.1. Sono state realizzate due formulazioni con rapporti aggregato-legante differenti:

- P1, con rapporto aggregato-legante (2,5:1), quindi una malta idraulica grassa.
- P2, con rapporto aggregato-legante (3:1), quindi una malta idraulica standard.

Per la produzione di queste tre formulazioni si è proceduto come descritto nel capitolo 3.1, Si sono realizzati due "campioni" per ciascuna tipologia e ciò è stato dovuto esclusivamente ad una esigenza pratica e non interferente sul risultato finale.

Tabella 3.2.4.1: Tabella 2 campioni di malta P1

CAMPIONE 1	CODICE MALTA - P1				
CAMPIONE I	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]	
SABBIA + POZZOLANA	2,5	1231	1,63	2000	
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	492	0,57	278	
ACQUA				500	
CAMPIONE 2	CODICE MALTA - P1				
CAMPIONE 2	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]	
SABBIA + POZZOLANA	2,5	1231	1,63	2000	
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	492	0,57	278	
ACQUA		_		494	

Tabella 3.2.4.2: Tabella riassuntiva malta P1

IMPASTO FINALE		CODICEM	IALTA - P1	
IMPASIOFINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA + POZZOLANA	2,5	2462	1,63	4000
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	985	0,57	556
ACQUA				994

Tabella 3.2.4.3: Tabella 2 campioni di malta P2

CAMPIONE 1	CODICEMALTA - P2					
CAMPIONE I	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA + POZZOLANA	3	1231	1,63	2000		
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	410	0,57	232		
ACQUA				544		
CAMBIONE 2		CODICEM	IALTA - P2			
CAMPIONE 2	PARTI		IALTA - P2 DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
CAMPIONE 2 SABBIA + POZZOLANA	PARTI 3			MASSA [g] 2000		
	PARTI 3 1	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	101		

Tabella 3.2.4.4: Tabella riassuntiva malta P2

DADA CTO EDIA LE	CODICE MALTA - P2					
IMPASTO FINALE	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITA [g/cm ³]	MASSA [g]		
SABBIA + POZZOLANA	3	2462	1,63	4000		
CALCE IDRATA IN POLVERE	1	821	0,57	464		
ACQUA				1081		



Figura 3.2.3.1: Provini P1 e P2 realizzati

4. Prove sperimentali

4.1 Prova con ultrasuoni

Il rilievo microsismico con impulsi d'onde vibrazionali, definita più comunemente come prova con ultrasuoni, è una metodologia di prova non distruttiva. Una prova non distruttiva non comporta l'alterazione materica, l'asportazione di campioni o la distruzione della struttura analizzata. Il rilievo mediante onde ultrasoniche ha lo scopo di individuare anomalie nei materiali (fessure, porosità o cavità). Sono utilizzate inoltre per la determinazione indiretta di alcune proprietà dei materiali.

Cenni teorici

Prima di entrare nel merito della prova è bene definire alcuni concetti teorici.

Il suono è una vibrazione meccanica elastica, prodotta dall'espansione e dalla compressione delle particelle che compongono un mezzo di propagazione. L'assenza di un mezzo, come ad esempio nel vuoto assoluto, comporta l'impossibilità di propagazione dell'onda sonora.

Le onde che si sviluppano in natura possono essere divise in due macro-categorie, in funzione di come il materiale perturbato viene percorso.

1) Onde di volume o di corpo (body waves)

Questa famiglia di onde si propaga da una determinata sorgente attraversando il volume del mezzo di propagazione in tutte le direzioni.

Le onde di corpo a loro volta si differenziano in due categorie:

- Onde primarie (P): definite anche longitudinali. Questa tipologia di onde è quanto più si avvicina ad un'onda acustica. Le particelle di materiale attraversato si muovono di moto oscillatorio nel verso della propagazione dell'onda. Hanno una propagazione veloce calcolabile tramite la seguente equazione.
- Onde secondarie (S): definite anche trasversali. Causano oscillazioni nel mezzo in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. Queste onde inoltre non si propagano nei materiali con modulo di rigidità nullo (ad es. i fluidi). Sono più lente delle onde longitudinali, la velocità di propagazione è calcolabile con la seguente formula.

Per le onde primarie:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

Per le onde secondarie:

$$V_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Dove:

V_p: velocità di propagazione dell'onda.

K: modulo di compressibilità.

G: modulo di rigidità o di taglio.

ρ: densità del mezzo.

2) Onde superficiali (surface waves)

Queste onde sono una composizione delle onde P ed S, Si originano a causa dell'intersezione delle onde di volume con una superficie discontinua a livello fisico. Avvengono in genere nei pressi della superficie di separazione tra due mezzi differenti. A loro volta le onde superficiali si suddividono in onde di Rayleigh e onde di Love.

I parametri fondamentali che caratterizzano un'onda sono i seguenti:

- lunghezza d'onda (λ): distanza tra due picchi dell'onda [mm];
- frequenza (f): numero di cicli nell'unità di tempo [Hz];
- periodo (T): tempo che impiega l'onda a compiere un ciclo [s];
- velocità di propagazione (V_p): spazio percorso dal fronte d'onda nell'unità di tempo[m/s].

Gli ultrasuoni sono quindi delle onde sonore (longitudinali) con una frequenza elevata, oltre la soglia dell'udibile. Convenzionalmente gli ultrasuoni vanno dalla frequenza di 20 kHz ad 1 GHz.



Le onde ultrasoniche presenti anche in natura (es. i pipistrelli) sono state replicate artificialmente tramite sorgenti apposite.

La propagazione di un'onda ultrasonica in un mezzo dipende essenzialmente dalla densità e dalle caratteristiche elastiche del materiale. Gli ultrasuoni applicati ad un materiale in un punto alterano gli equilibri sollecitando il corpo. Il corpo di conseguenza si deformerà in base al tipo di sollecitazione e alle proprie caratteristiche elastiche. Questa deformazione si propaga ai punti circostanti sotto forma di onda.

Nella pratica viene misurato il tempo necessario affinché un'onda attraversi un materiale. Il tempo così misurato è detto tempo di volo.

Se durante il suo percorso un'onda ultrasonica incontra uno strato di vuoto o un materiale diverso, subisce delle alterazioni.

Descrizione della prova

La prova ad ultrasuoni è descritta dalla norma UNI EN 12504-4:2005 ⁵³.

Lo scopo della prova è quello di determinare la velocità di propagazione dell'onda ultrasonica. Tale valore verrà poi utilizzato per il calcolo del modulo elastico dinamico $E_{\rm d}$.

Le prove sono state realizzate due volte utilizzando due diversi modelli di apparecchiature:

• RP 4000 CSM della Sirio

Apparecchiatura storica del laboratorio del DISET (figura 4.1.1), con cui sono stati misurati i tempi di volo per le malte formulate in precedenza.



Figura 4.1.1: RP 4000 CSM della Sirio utilizzata

• Pundit 200 della Proceq

Apparecchiatura di ultima generazione (figura 4.1.2), utilizzabile sia in laboratorio che in situ.



Figura 4.1.2: Pundit 200 della Proceq utilizzata

⁵³ UNI EN 12504-4:2005 – Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici

La scelta di effettuare la prova con due apparecchiature è nata dalla volontà di avere uno spettro di dati, anche contrastanti, da verificare e discutere.

Ad entrambi questi apparecchi sono quindi stati collegati due cavi coassiali e due sonde. I cavi coassiali sono dei particolari cavi schermati che permettono la connessione tra sonda e apparecchiatura.

Le sonde ultrasoniche sono costituite da:

- un involucro metallico o plastico di protezione laterale (*external housing*) e uno strato metallico atto a proteggere la parte attiva (*wear plate*);
- un elemento attivo (*active element*), che è in genere un sottile elemento di ceramica piezoelettrica che serve a convertire l'energia elettrica in energia meccanica (onde) e viceversa;
- un blocco di smorzamento (backing) protetto da armature metalliche (inner sleeve);
- la componente elettrica con i cavi e il connettore.

Ogni sonda è accompagnata da una determinata frequenza di targa. La normativa suggerisce per percorsi di lunghezza inferiore ai 50 mm l'utilizzo di frequenze da 50kHz a 200kHz. Per lunghezze superiori (fino a 15m) suggerisce l'uso di trasduttori a bassa frequenza da 10kHz a 40 kHz.

Per le prove eseguite con la *RP 4000 CSM* della *Sirio* sono stati utilizzati trasduttori da 120 kHz, mentre le misurazioni realizzate con la *Pundit 200* della *Proceq* sono stati impiegati trasduttori da 50 kHz (figura 4.1.3).



Figura 4.1.3: Sonde utilizzate

4.1.1 Procedura operativa

Di seguito sono elencati gli step che hanno consentito il calcolo del modulo elastico dinamico E_d. La normativa prevede un numero minimo di 6 provini da testare.

In questo caso la seguente procedura è stata ripetuta per ciascun provino realizzato, 9 provini per ognuna delle 9 formulazioni presentate.

1. Calcolo densità dei provini

La prima operazione pur non essendo attinente alla prova ad ultrasuoni è necessaria per poter calcolare il modulo elastico dinamico.

Il volume dei provini normalizzati (4x4x16) cm è pari a 256 cm³ o 0,256 m³.

Per ogni provino si è proceduto alla pesatura.

Noto il peso e il volume standard è bastato applicare la formula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

In cui:

 ρ , è la densità del provino. [kg/m³] m,è la massa [kg].

V, è il volume del singolo provino [m³].

Infine, per uniformare il risultato per ogni formulazione è stata calcolato prima il peso medio e successivamente la densità media (tabella 4.1.1.1).

IMPASTO		MASSA [g]								VOLUME	DENSITA	À MEDIA	
IMPASTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MEDIA	[cm ³]	[g/cm ³]	[kg/m ³]
M1	424,74	430,12	420,90	415,13	421,32	423,90	429,91	420,21	426,93	423,68	256	1,655	1655
M2	418,19	414,85	415,27	418,23	414,78	409,23	397,75	411,42	414,58	412,70	256	1,612	1612
М3	403,70	403,05	409,13	409,83	405,17	408,18	411,28	404,39	410,32	407,23	256	1,591	1591
NI	400,24	389,95	391,81	388,02	394,70	373,59	375,71	380,98	403,33	388,70	256	1,518	1518
N2	380,95	379,26	390,74	395,23	396,93	387,48	389,33	383,33	384,36	387,51	256	1,514	1514
O1	400,64	400,68	392,75	400,80	392,90	391,60	390,83	395,40	360,91	391,83	256	1,531	1531
<i>O2</i>	410,15	409,26	406,92	410,83	414,33	417,59	413,91	414,60	414,07	412,41	256	1,611	1611
P1	408,18	413,89	414,00	420,39	416,31	417,78	418,70	413,64	421,39	416,03	256	1,625	1625
P2	411,92	409,37	409,46	410,73	410,97	413,92	411,19	410,89	412,01	411,16	256	1,606	1606

Tabella 4.1.1.1: Tabella calcolo densità media

2. Preparazione della superficie

Le superfici su cui poggiano le sonde devono essere pulite, regolari e lisce. Si è proceduto quindi tramite levigatura a rendere idonea le superfici di testa dei provini.

3. Calibrazione dell'apparecchiatura ad ultrasuoni

Prima di procedere con la prova occorre collegare le sonde scelte tramite i cavi coassiali all'apparecchiatura ed effettuare la calibrazione dello strumento. Normalmente le sonde in dotazione sono identiche pertanto è indifferente scambiare quella ricevente con quella emittente purché abbiano la stessa frequenza

La calibrazione si effettua accoppiando le sonde ad un blocco di calibrazione, cioè un cilindro di cui è noto il tempo di propagazione degli impulsi ultrasonici.

Il blocco va posto in contatto con le sonde tramite un mezzo accoppiante fornito in dotazione. Per la *RP 4000 CSM* della *Sirio* la calibrazione è stata effettuata con un blocco di calibrazione di 53,5 µs e come materiale accoppiante la plastilina. La calibrazione per questo apparecchio è manuale, pertanto si è agito con un gira-trimmer sul regolatore fino a far comparire sul display la misura corretta.

Per la *Pundit 200* della *Proceq* è bastato accoppiare le sonde con il blocco di calibrazione da 23,4 µs e utilizzare come materiale accoppiante il liquido in dotazione. La procedura di calibrazione è gestita dal software e dura pochi istanti.

La calibrazione è stata ripetuta ogni qualvolta si è acceso/spento lo strumento o dopo cambiato o scollegato le sonde. Per la Sirio si effettuata la calibrazione anche a ogni sostituzione totale del materiale accoppiante tra le prove.

4. Applicazione delle sonde

Ultimata la calibrazione si procede con l'applicazione delle sonde sulla due facce (40x40) mm dei provini in modo da effettuare una misura diretta per l'intera lunghezza del provino (160 mm). È di fondamentale importanza che tra la superfice del provino e la sonda vi sia un materiale accoppiante. Il materiale accoppiante (analogo a quello usato per la fase 3) ha lo scopo di assicurare il miglior contatto possibile tra le superfici. Occorre che sia un materiale viscoso a bassa impedenza acustica. Lo strato accoppiante occorre inoltre che non sia eccessivamente spesso. Con entrambi macchinari è stata adoperata della plastilina. La plastilina è ideale per i materiali porosi come le malte.

Il materiale accoppiante è stato inoltre sistemato e pulito dopo ogni misurazione. Ogni 9 provini (1 formulazione) si è proceduto alla sostituzione totale della plastilina.

5. Misurazione tempo di volo

Applicate le sonde ai capi del provino occorre applicare una modesta forza in modo da garantire una completa adesione. La pressione delle sonde è stata mantenuta fino allo stabilizzarsi della misura. Per la Sirio il tempo di volo è stato annotato manualmente.

Tabella 4.1.1.2: Tempi di volo RP 4000 CSM della Sirio con sonde da 120 kHz

IMDACTO	TEMPO DI VOLO (SIRIO) [μs]									
IMPASTO	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9	MEDIA
M1	108,50	107,70	111,10	117,90	121,80	109,60	104,80	120,50	109,90	112,42
M2	103,90	103,30	104,10	103,80	104,90	112,50	106,30	106,50	102,70	105,33
M3	114,60	116,80	109,40	110,10	114,90	107,80	115,70	111,80	108,20	112,14
NI	139,10	142,10	159,60	142,70	143,10	135,70	142,10	139,10	131,40	141,66
N2	145,60	152,60	132,30	131,50	133,60	135,80	141,70	139,50	145,70	139,81
01	82,20	79,00	79,70	78,20	78,80	80,10	83,00	79,90	84,60	80,61
<i>O2</i>	72,20	72,70	71,20	73,90	73,40	69,80	73,80	72,60	70,80	72,27
P1	120,30	126,80	119,20	116,70	121,60	118,60	117,90	125,20	122,90	121,02
P2	137,30	135,10	135,60	132,50	144,70	141,30	134,40	139,20	145,70	138,42

Tabella 4.1.1.3: Tempi di volo *Pundit 200* della *Proceg* con sonde da 50 kHz

IMPASTO	TEMPO DI VOLO (PUNDIT) [μs]									
IMPASTO	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9	MEDIA
MI	98,2	99,1	100,5	100,4	107,2	100,2	96,2	103,3	101,1	100,69
M2	94,6	94,8	94,7	96,0	95,1	96,8	94,5	95,8	93,8	95,12
M3	102,5	104,8	99,4	97,2	104,9	97,0	105,9	102,1	95,7	101,06
NI	91,1	104,3	95,6	98,5	91,7	98,2	107,4	96,4	97,1	97,81
N2	98,3	94,1	93,0	91,1	92,0	91,5	93,2	94,7	89,4	93,03
01	81,0	78,7	78,5	76,5	77,0	78,9	77,6	79,0	81,0	78,69
O2	70,9	71,4	70,3	72,3	71,8	69,7	72,1	71,9	69,2	71,07
PI	104,9	110,1	104,3	105,5	109,8	105,5	104,2	108,6	103,6	106,28
P2	119,0	118,8	118,8	117,6	125,9	124,5	113,2	116,7	110,4	118,32

6. Misurazione tempo di volo

Dopo aver misurato tutti i tempi di volo e aver calcolato la media per ciascuna formulazione, si è proceduto in vari step con il calcolo del modulo elastico dinamico.

Nota la lunghezza di ogni provino (160 mm) ed il tempo di volo medio si è calcolato la velocità di propagazione media dell'onda.

$$v_m = \frac{L}{t_m}$$

In cui:

v_m è la velocità di propagazione media [m/s];

L è la lunghezza del percorso tra sonda emittente e ricevente [m];

t_m è il tempo di volo medio [μs]. (Convertire il tempo di volo da μs a s)

A partire dalla velocità media e dalla densità media calcolata al punto 1 si è calcolato il modulo elastico dinamico con la seguente formula:

$$v_m = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_m}} \qquad E_d = v_m^2 \cdot \rho_m$$

In cui:

v_m è la velocità di propagazione media [m/s].

ρ è la densità media della formulazione. [kg/m³]

E_d è il modulo elastico dinamico [Pa]. (Normalmente espresso in MPa)

Tabella 4.1.1.4: Tabella calcolo modulo elastico dinamico (Sirio)

	(SIRIO)								
IMPASTO	T. VOLO [μs]	PERCORSO [m]	VELOCITÀ [m/s]	DENSITÀ [kg/m³]	Mod.Elastico [MPa]				
MI	112,42	0,160	1423,21	1655	3352				
M2	105,33	0,160	1518,99	1612	3720				
М3	112,14	0,160	1426,73	1591	3238				
N1	141,66	0,160	1129,50	1518	1937				
N2	139,81	0,160	1144,40	1514	1982				
01	80,61	0,160	1984,84	1531	6030				
<i>O2</i>	72,27	0,160	2214,02	1611	7897				
P1	121,02	0,160	1322,07	1625	2841				
P2	138,42	0,160	1155,88	1606	2146				

Tabella 4.1.1.5: Tabella calcolo modulo elastico dinamico (Pundit)

	(PUNDIT)							
IMPASTO	T. VOLO [μs]	PERCORSO [m]	VELOCITÀ [m/s]	DENSITÀ [kg/m³]	Mod.Elastico [MPa]			
M1	100,69	0,160	1589,05	1655	4179			
M2	95,12	0,160	1682,05	1612	4561			
M3	101,06	0,160	1583,29	1591	3988			
NI	97,81	0,160	1635,81	1518	4063			
N2	93,03	0,160	1719,81	1514	4477			
O1	78,69	0,160	2033,32	1531	6328			
O2	71,07	0,160	2251,41	1611	8166			
P1	106,28	0,160	1505,49	1625	3683			
P2	118,32	0,160	1352,24	1606	2937			

4.1.2 Risultati

Le prove per la determinazione del tempo di volo sono state eseguite con due apparecchiature differenti: RP 4000 CSM della Sirio e Pundit 200 della Proceq.

Ai due dispositivi sono state collegate due sonde di frequenza diverse, 120 kHz per la Sirio mentre 50 kHz per la Pundit.

Nel grafico 4.1.2.1 sono riportati i tempi di volo registrati con la Sirio.

Come si può notare, per ogni formulazione (M1, M2, ecc.) i tempi hanno valori simili tra di loro. Questo fa sì che la misura può essere considerata riproducibile con le stesse modalità di prova precedentemente descritte.

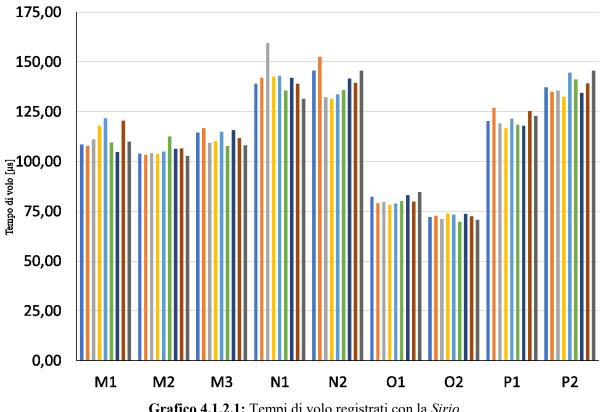


Grafico 4.1.2.1: Tempi di volo registrati con la Sirio

Come si può osservare nel grafico 4.1.2.2, nel quale vengono riportate le velocità medie per ciascuna formulazione di malte, il set di provini che ha presentato il valore di velocità media maggiore è O2.

I campioni O2 sono quelli realizzati con sabbia, cocciopesto e calce idrata in polvere con il rapporto aggregato/legante 3 a 1.

L'elevata velocità di questa formulazione è dovuta al fatto che i provini presentano una porosità ridotta.

Gli impasti N1 e N2 presentano tempi di volo simili tra loro, ma notevolmente inferiori rispetto ad O2, ciò è dovuto all'elevata porosità intrinseca del grassello di calce loro unico legante.

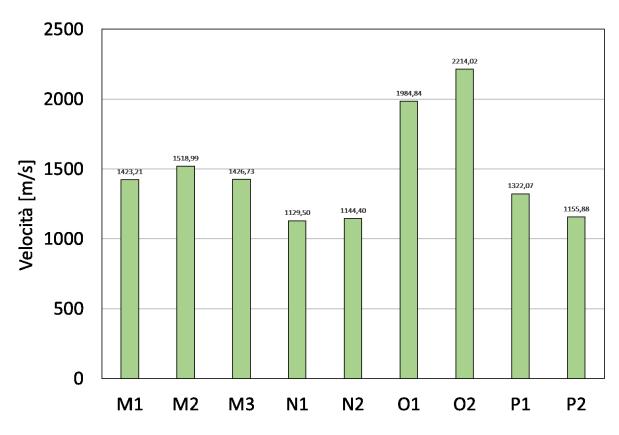


Grafico 5.1.2.2: Velocità medie con la Sirio

I moduli elastici dinamici medi per ciascuna formulazione vengono riportati nel grafico 4.1.2.3.

Dato che il modulo elastico è direttamente proporzionale alla velocità di transito degli impulsi ultrasonici, le formulazioni che presentano maggiori velocità hanno anche maggiori valori di $E_{\rm d}$.

In assoluto, i valori più elevati di E_d sono riferibili ai provini realizzati con aggregato di sabbia e cocciopesto. Al contrario, i valori più bassi di E_d vengono registrati dai provini realizzati con grassello di calce.

Nonostante le formulazioni M1, M2, M3 abbiano tempi di volo e quindi velocità simili, presentano valori di E_d leggermente differenti.

Questa differenza è dovuta al fatto che i provini M1, M2 e M3 hanno rapporti aggregato/legante diversi, rispettivamente pari a: 2,5 a 1, 3 a 1 e 3,5 a 1.

Il rapporto aggregato/legante infatti influisce sulla densità dei provini, la quale è direttamente proporzionale ad $E_{\rm d}$.

Si nota infatti che le formulazioni con rapporto aggregato/legante 3 a 1, garantiscono densità maggiori e quindi valori di modulo elastico dinamico superiori rispetto alle formulazioni simili ma con differente rapporto.

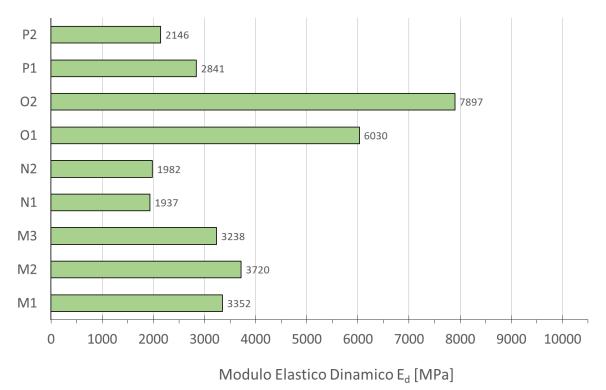
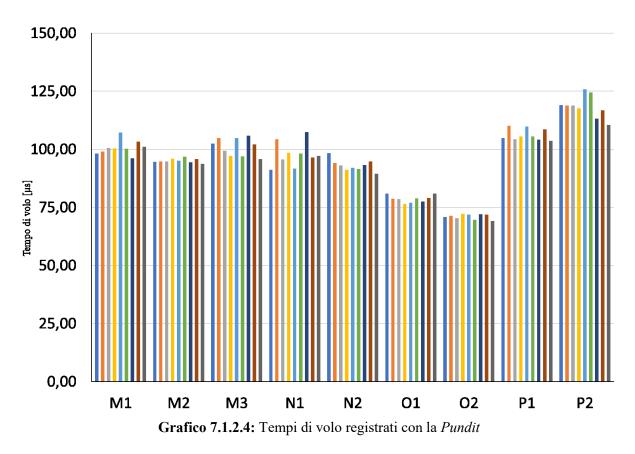


Grafico 6.1.2.3: Modulo elastico dinamico misurato con la Sirio

Analoghe considerazioni teoriche possono essere fatte per i risultati ottenuti dalle prove effettuate con l'apparecchiatura *Pundit 200*.



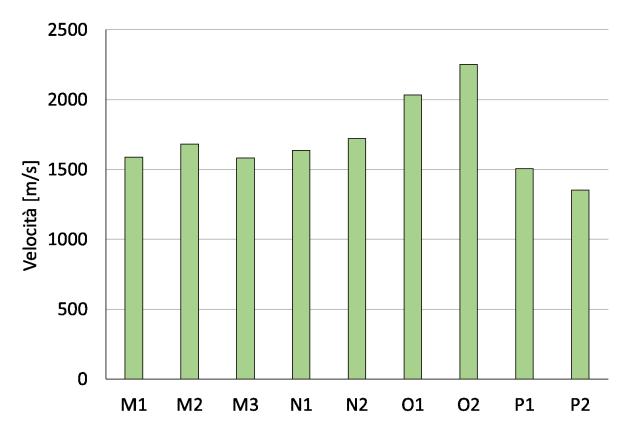


Grafico 8.1.2.5: Velocità medie con la Pundit

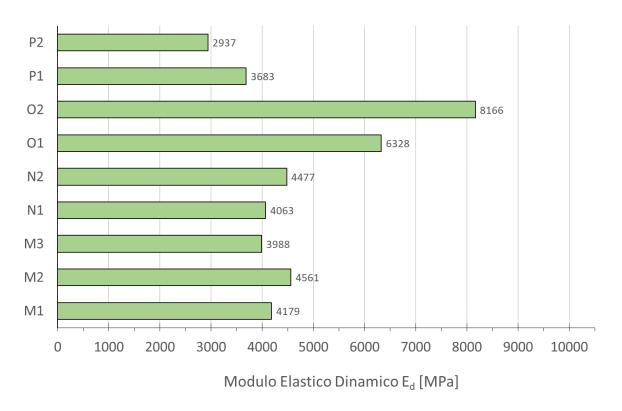


Grafico 9.1.2.6: Modulo elastico dinamico misurato con la Pundit

Confrontando i risultati ottenuti con le due apparecchiature (grafico 4.1.2.7) si osserva che i valori di modulo elastico dinamico, seppur differenti di circa il 20%, possono essere confrontati. Questo può essere dovuto, in parte, all'utilizzo di sonde con valori di frequenza differenti. Le uniche formulazioni che presentano una differenza di oltre il 50% sono le N1 e N2, questo fa intuire che una delle due misurazioni non è attendibile, e probabilmente quella realizzata con la *Pundit 200*.

Tuttavia, dato che la misurazione del modulo elastico non proviene da una misura diretta, i valori calcolati sono attendibili ma non esatti. Si può pertanto assumere come valore di modulo elastico, quello compreso nel range dei valori ottenuti con le due apparecchiature, considerando però un errore del 5% sulle misurazioni. Ad esempio, per la formulazione M1 il valore del modulo elastico è compreso circa tra 4387 MPa e 3184 MPa.

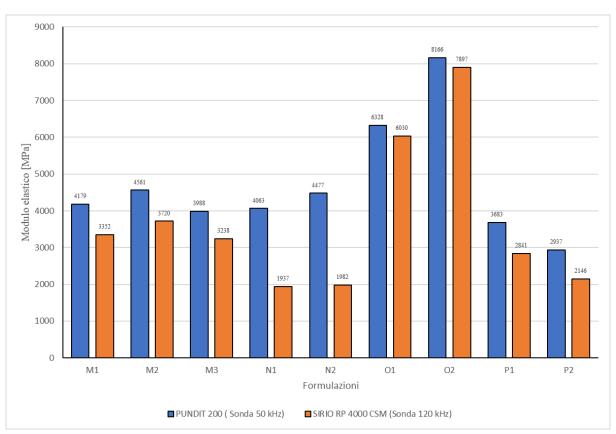


Grafico 10.1.2.7: Confronto modulo elastico dinamico

4.2 Prova a flessione

La resistenza a flessione non è l'oggetto principale di questa ricerca poiché le malte per loro natura hanno una bassa resistenza a flessione. La realizzazione di questa prova è dovuta alla norma UNI EN 1015-11:2007⁵⁴, la quale prescrive che per realizzare la prova a compressione su di un provino normalizzato di malta occorre prima effettuare la prova a flessione.

La prova a flessione è una prova distruttiva.

Può essere realizzata in due modalità: a 3 punti o a 4 punti.

La prova a 3 punti è di più semplice realizzazione rispetto a quella a 4 punti, ma durante la prova si crea un momento flettente variabile lungo l'asse del provino.

La prova a 4 punti invece consente di ottenere nella zona centrale un momento flettente costante senza generare sforzi di taglio.

È bene quindi cercare ove possibile di ridurre la freccia tra gli appoggi.

Questa prova può essere realizzata per campioni rigidi per i quali la deflessione non supera il 10% della distanza degli afferraggi.

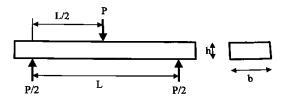
Inoltre, il provino deve essere sufficientemente lungo da evitare fenomeni di delaminazione.

Nel caso di provini normalizzati UNI (40x40x160) mm la prova può essere realizzata senza problemi.

Dalla prova a flessione si possono ricavare i seguenti valori:

$$Resistenza\ a\ flessione = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Modulo elastico
$$E_z = \frac{PL^3}{4bh^3\delta}$$



Dove P è il carico a rottura, h è lo spessore del provino, L è la luce tra gli appoggi inferiori, b è la larghezza del provino e δ è la deformazione nel punto medio.

Le relazioni di cui sopra sono considerate valide solo se il provino presenta lungo tutta la curva sforzo / spostamento un comportamento elastico.

Nel caso di deformazioni plastiche è opportuno introdurre delle correzioni.

I risultati di questa prova possono essere di difficile interpretazione, questo a causa del complesso stress interno al provino.

⁵⁴ UNI EN 1015-11:2007 - Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.

4.2.1 Procedura operativa

La prova a flessione è stata realizzata presso il MasterLAB del Politecnico di Torino all'interno di un luogo confinato. I provini sono stati trasportati nel laboratorio cercando di non causare stress meccanici agli stessi per non compromettere i risultati della prova. I provini testati inoltre avevano una stagionatura superiore a 28 giorni.

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN (figura 4.2.1).

Per i provini di malta a base aerea questa cella di carico si è rivelata più che sufficiente, raggiungendo di fatto carichi massimi di 10-12 kN.

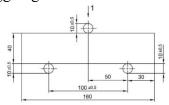


Figura 4.2.2.: Distanza rulli

Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino (figura 4.2.2). La mezzeria esatta del provino è stata preventivamente tracciata sul provino stesso.

Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce

del provino (quelle a contatto con l'acciaio degli stampi).

La prova è stata realizzata in controllo di spostamento.

La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Un carico eccessivamente veloce contro un materiale non molto resistente come le malte a base di calce aerea avrebbe causato risultati inesatti.

Lo scopo principale è quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.

Le due metà rotte ricavate dalla prova sono state conservate per essere testate successivamente a compressione.

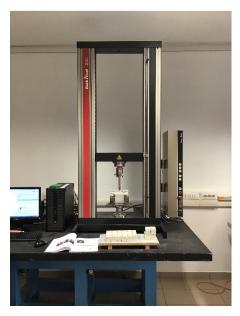


Figura4.2.1: Postazione e macchinario di prova ProLine Z050 della Zwick/Roell

4.2.2 Risultati

Nella tabella 4.2.2.1. sono riportate le dimensioni caratteristiche della prova, il valore di carico massimo F_{max} registrato dalla macchina e il valore della resistenza a flessione calcolata con la formula del capitolo 4.2.

Tabella 4.2.2.1: Risultati prova a flessione

PROVA		h ₀	b ₀	L	F _{max}	Resistenza a flessione
FLESSIC	NE	mm	mm	mm	N	MPa
	M1-2	40	40	100	229,16	0,537
	M1-3	40	40	100	249,63	0,585
M1	M1-4	40	40	100	253,65	0,595
	M2-1	40	40	100	350,48	0,821
	M2-2	40	40	100	368,61	0,864
M2	M2-3	40	40	100	306,76	0,719
	M3-1	40	40	100	187,07	0,438
	M3-2	40	40	100	189,61	0,444
M3	M3-3	40	40	100	232,38	0,545
	N1-1	40	40	100	347,30	0,814
	N1-2	40	40	100	193,17	0,453
N1	N1-4	40	40	100	276,47	0,648
	N2-1	40	40	100	233,16	0,546
	N2-2	40	40	100	195,55	0,458
N2	N2-3	40	40	100	293,61	0,688
	01-1	40	40	100	509,50	1,194
	01-2	40	40	100	530,33	1,243
01	01-3	40	40	100	512,30	1,201
	02-1	40	40	100	849,13	1,990
	02-2	40	40	100	610,23	1,430
02	02-3	40	40	100	912,46	2,139
	P1-1	40	40	100	325,24	0,762
	P1-2	40	40	100	318,03	0,745
P1	P1-3	40	40	100	330,41	0,774
	P2-1	40	40	100	262,02	0,614
	P2-2	40	40	100	263,05	0,617
P2	P2-3	40	40	100	275,91	0,647

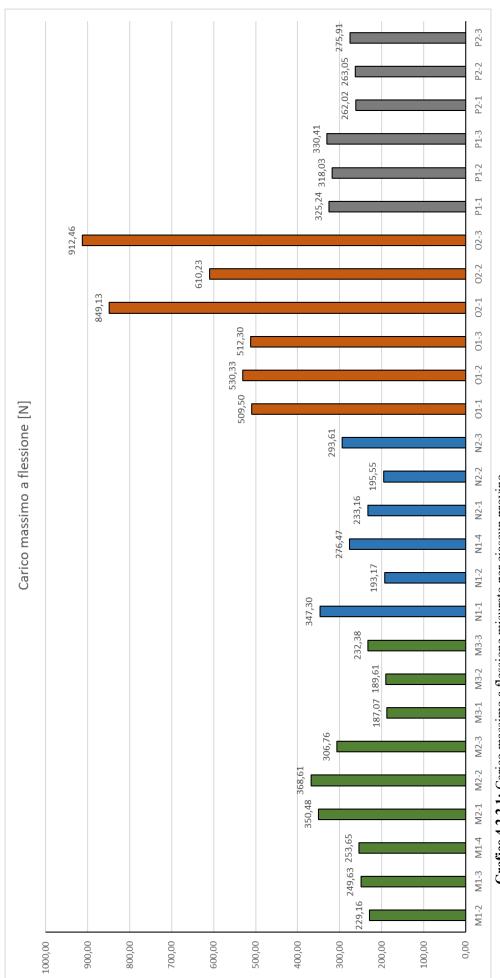


Grafico 4.2.2.1: Carico massimo a flessione misurato per ciascun provino

Come da previsione, i valori di carico massimo sono bassi, queste perché intrinsecamente le malte hanno bassa resistenza a flessione (grafico 4.2.2.1).

I valori ottenuti sono confrontabili tra di loro poiché il legante utilizzato nella formulazione è una calce aerea. Tuttavia, però le formulazioni O1 e O2 avendo come aggregato il cocciopesto, presentano valori di resistenza a flessione notevolmente maggiori.

Per maggiore chiarezza vengono riportati per ciascuna formulazione i valori medi di carico massimo e di resistenza a flessione (tabella 4.2.2.2).

Tabella 4.2.2.2: Risultati mediati per ciascuna formulazione

VALORI	F _{max}	Resistenza a flessione
MEDI	N	MPa
M1	244	0,572
M2	342	0,801
M3	203	0,476
N1	272	0,638
N2	241	0,564
01	517	1,213
02	791	1,853
P1	325	0,761
P2	267	0,626

Di seguito sono riportati i grafici con i valori medi del carico a rottura (grafico 4.2.2.2) e la resistenza a flessione media per ciascuna formulazione (grafico 4.2.2.3).

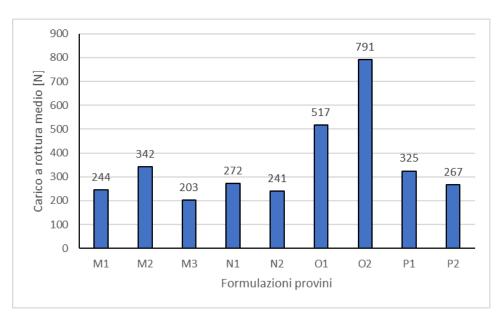


Grafico 4.2.2.2: Carico a rottura medio per formulazione

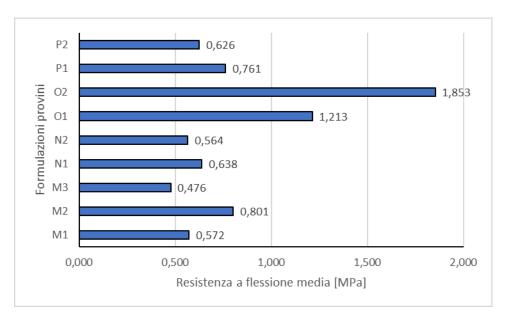


Grafico 4.2.2.3: Resistenza a flessione media per formulazione

4.3 Prova a compressione

La metodologia di prova per la realizzazione della prova a compressione sulle malte è descritta nella norma UNI EN 1015-11:2007.

La norma prescrive che la prova venga realizzata sui mezzi prismi ottenuti dalla prova a flessione.

La prova in esame è distruttiva, questo perché lo scopo della prova è il carico massimo che porta a rottura il provino.

Noto il carico massimo che è in grado di sopportare il provino e nota la superficie di contatto della pressa viene calcolata la resistenza a compressione con la seguente formula:

$$R_{c} = \frac{\text{carico massimo [N]}}{\text{sezione resistente [mm^{2}]}}$$

Tipicamente i materiali fragili, come le malte, hanno un carico di rottura a compressione nettamente superiore di quello a trazione. Le tensioni di compressione indotte tendono a chiudere fratture e difetti del materiale.

La rottura di un provino cubico è quella dalla tipica forma a clessidra.

La rottura è causata da sforzi di trazione che nascono in direzione trasversale a quella del carico e agiscono sulle pareti laterali del provino. Questa forma particolare (figura 4.3.1) è dovuta quindi alle forze tangenziali che si generano a causa dell'attrito sull'interfaccia pressa-provino, a causa della pressa che impedisce la dilatazione trasversale del provino nella zona laterale e la contemporanea espansione trasversale della zona centrale dovuta all'effetto Poisson.

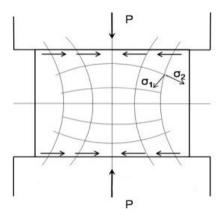


Figura 4.3.1: Andamento isostatiche di compressione in provino cubico

Il risultato delle prove è un grafico tensione-deformazione.

La prova a compressione in un'altra variante, viene effettuata per la determinazione del modulo elastico statico, la prova non è in genere distruttiva. In quel caso vanno applicati dei cicli di carico ben precisi, vengono utilizzati degli estensimetri per misurare la deformazione e inoltre il provino va testato integro e in posizione verticale.

4.3.1 Procedura operativa

La prova a compressione è stata realizzata presso il MasterLAB del Politecnico di Torino all'interno di un luogo confinato. I provini testati inoltre avevano una stagionatura superiore a 28 giorni e provenivano dalla prova a flessione precedente realizzata.

I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi.

La prova è stata realizzata con la macchina *ProLine* Z050 della *Zwick/Roell* con capacità di carico massima di 50kN.

Per i provini di malta a base aerea questa cella di carico si è rivelata più che sufficiente, raggiungendo di fatto carichi massimi di rottura pari a 10-12 kN.

Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a compressione.

Il provino è stato posizionato in maniera corretta grazie all'aiuto di tre fermi integrati nella componentistica. A contatto con i fermi (piccoli cilindretti di altezza 2 cm) venivano poste le facce lisce del provino, questo per garantire una perfetta centratura.

Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm, la sezione resistente è pertanto pari a 1600 mm².

È stato impostato un precarico di 10 N alla velocità di 8 mm/min, totalmente ininfluente ai fini del calcolo.

Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min.

Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.

Per la gestione della prova è stato utilizzato il software *TestXpert II versione 3.5*.

4.3.2 Risultati

Nella tabella 4.2.2.1. sono riportate le dimensioni caratteristiche della prova, il valore di carico massimo F_{max} registrato dalla macchina e il valore della resistenza a compressione calcolata con la formula del capitolo 4.3.

Tabella 4.3.2.1: Risultati prova a compressione

PRO	VA A	a ₀	b ₀	S ₀	F _{max}	$\sigma_{\text{Compressione}}$
COMPRI		_			N N	
	M1-2-D	mm 40	mm 40	mm²		MPa
		40	40	1600	3604	2,25
	M1-2-S	40	40	1600	3579	2,24
	M1-3-D	40	40	1600	3390	2,12
	M1-3-S	40	40	1600	3415	2,13
	M1-4-D	40	40	1600	2665	1,67
M1	M1-4-S	40	40	1600	2792	1,75
	M2-1-D	40	40	1600	2723	1,70
	M2-1-S	40	40	1600	2628	1,64
	M2-2-D	40	40	1600	2771	1,73
	M2-2-S	40	40	1600	2750	1,72
	M2-3-D	40	40	1600	2938	1,84
M2	M2-3-S	40	40	1600	2569	1,61
	M3-1-D	40	40	1600	1903	1,19
	M3-1-S	40	40	1600	1929	1,21
	M3-2-D	40	40	1600	1950	1,22
	M3-2-S	40	40	1600	2038	1,27
	M3-3-D	40	40	1600	2214	1,38
M3	M3-3-S	40	40	1600	2362	1,48
	N1-1-D	40	40	1600	3521	2,20
	N1-1-S	40	40	1600	3501	2,19
	N1-2-D	40	40	1600	3017	1,89
	N1-2-S	40	40	1600	3533	2,21
	N1-4-D	40	40	1600	2770	1,73
N1	N1-4-S	40	40	1600	3098	1,94
	N2-1-D	40	40	1600	2391	1,49
	N2-1-S	40	40	1600	2191	1,37
	N2-2-D	40	40	1600	2235	1,40
	N2-2-B	40	40	1600	2207	1,38
	N2-3-D	40	40	1600	3170	1,98
NTO	N2-3-D N2-3-S	40	40	1600	2711	
N2		_				1,69
	01-1-D	40	40	1600	7251	4,53
	O1-1-S	40	40	1600	6860	4,29
	O1-2-D	40	40	1600	7933	4,96
	O1-2-S	40	40	1600	7998	5,00
	01-3-D	40	40	1600	7658	4,79
O1	O1-3-S	40	40	1600	7273	4,55
	O2-1-D	40	40	1600	11527	7,20
	O2-1-S	40	40	1600	11257	7,04
	O2-2-D	40	40	1600	11703	7,31
	O2-2-S	40	40	1600	11325	7,08
	O2-3-D	40	40	1600	10782	6,74
O2	O2-3-S	40	40	1600	11741	7,34
	P1-1-D	40	40	1600	5891	3,68
	P1-1-S	40	40	1600	6146	3,84
	P1-2-D	40	40	1600	5540	3,46
	P1-2-S	40	40	1600	5363	3,35
	P1-3-D	40	40	1600	5885	3,68
P1	P1-3-S	40	40	1600	5978	3,74
	P2-1-D	40	40	1600	4992	3,12
	P2-1-S	40	40	1600	5442	3,40
	P2-2-D	40	40	1600	5179	3,24
	P2-2-S	40	40	1600	5070	3,17
	P2-3-D	40	40	1600	4890	3,06
P 2	P2-3-D	40	40	1600	4805	3,00
- 4	2230		.0	1000	.505	5,00

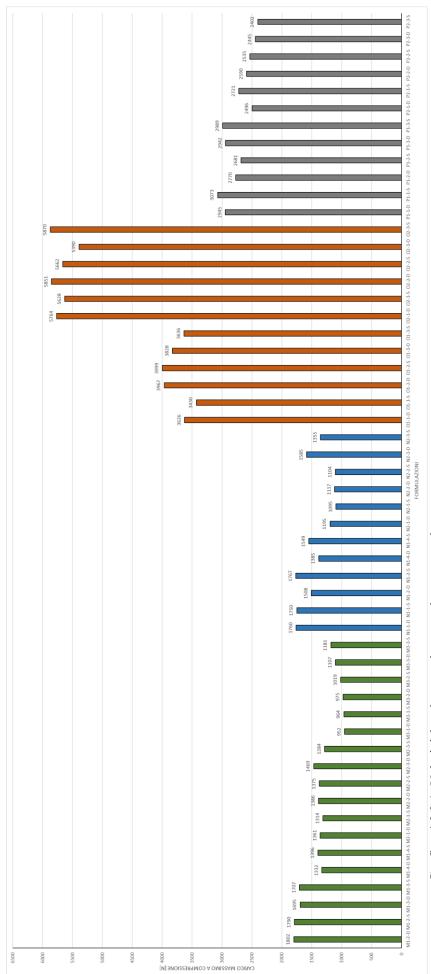


Grafico 4.3.2.1: Valori del carico massimo per ciascun campione testato

Dal grafico 4.3.2.1 nella pagina precedente, si evince che i provini pur essendo formulati tutti con calci aeree possiedono una discreta resistenza a compressione. Anche in questo caso i provini con le formulazioni O1 e O2 presentano valori di resistenza a compressione notevolmente maggiori.

Le resistenze a compressione dei mezzi prismi destri e sinistri per ciascun campione sono confrontabili, i provini si sono quindi dimostrati omogenei e ben realizzati.

Le formulazioni con rapporto aggregato/legante 1 a 2,5, cioè le malte grasse, hanno registrato a parità di materiali valori più alti di resistenza a compressione.

Avere una formulazione più legante, come auspicabile, garantisce una migliore resistenza meccanica a compressione.

Questo meccanismo non è stato riscontrato nelle malte con cocciopesto, dove al contrario una maggiore quantità di aggregato reattivo ha comportato resistenze maggiori.

Le malte con pozzolana (P1 e P2) hanno registrato valori di resistenza a compressione leggermente superiori rispetto ad una malta a base solo di sabbia. La pozzolana, anche se in minor parte rispetto il cocciopesto, migliora la resistenza a compressione. Con buona probabilità questa differenza è dovuta alla quantità di aggregato reattivo, la pozzolana in proporzione è solo il 30% dell'aggregato totale, contro il 60% del cocciopesto.

Per maggiore chiarezza vengono riportati per ciascuna formulazione i valori medi di carico massimo e di resistenza a flessione (tabella 4.3.2.2).

Tabella 4.3.2.2: Risultati mediati per ciascuna formulazione

VALORI	F _{max}	Resistenza a compressione
MEDI	N	MPa
M1	3241	2,03
M2	2730	1,71
M3	2066	1,29
N1	3240	2,03
N2	2484	1,55
01	7496	4,68
O2	11389	7,12
P1	5801	3,63
P2	5063	3,16

Di seguito sono riportati i grafici con i valori medi del carico a rottura (grafico 4.3.2.2) e la resistenza a compressione media per ciascuna formulazione (grafico 4.3.2.3).

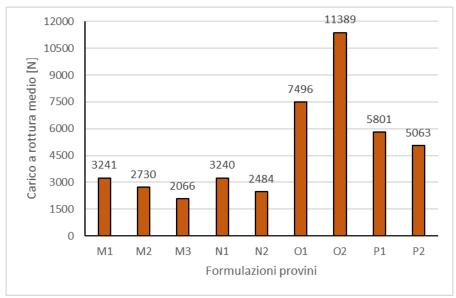


Grafico 4.3.2.2: Carico a rottura medio per formulazione

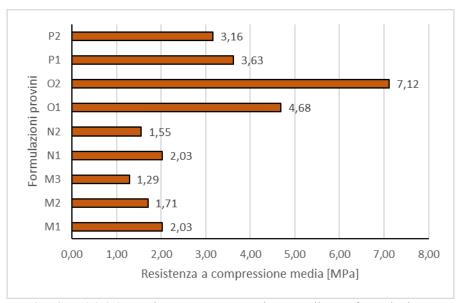


Grafico 4.3.2.3: Resistenza a compressione media per formulazione

APPENDICE A





1. PROVINO	M1		
Data di confezionamento	04/12/2018		
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm		
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere		
Rapporti	2,5:1		

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

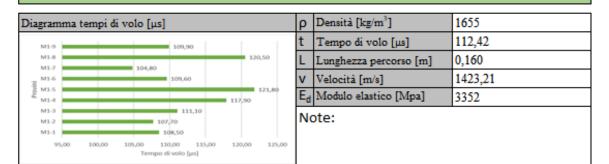
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 104 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	M2
Data di confezionamento	14/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

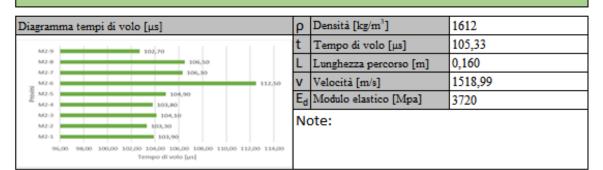
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 94 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	M3
Data di confezionamento	19/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere
Rapporti	3,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

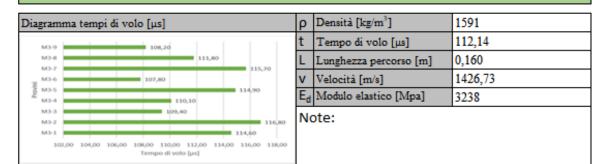
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 89 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	N1
Data di confezionamento	08/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

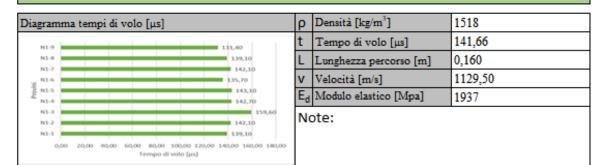
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 69 giorni
Numero campioni misurati	9

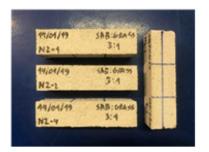
4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	N2
Data di confezionamento	14/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

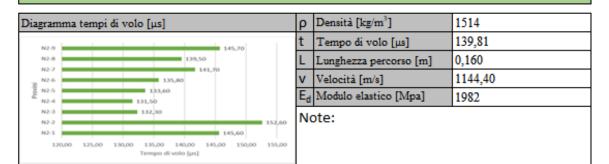
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 63 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	01
Data di confezionamento	24/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata in polvere
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

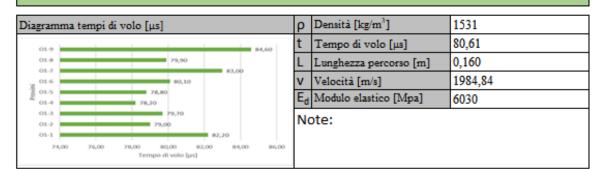
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 53 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	O2
Data di confezionamento 01/02/2019	
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

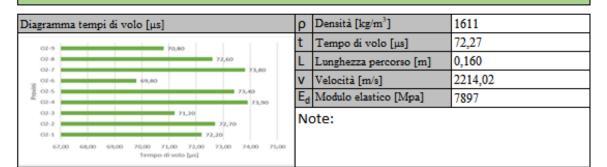
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 45 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala đei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	P1
Data di confezionamento	23/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata in polvere
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

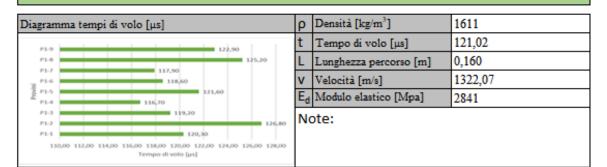
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 23 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	P2
Data di confezionamento	22/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	18/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

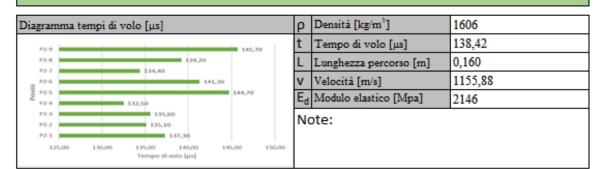
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 24 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	M1
Data di confezionamento	04/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

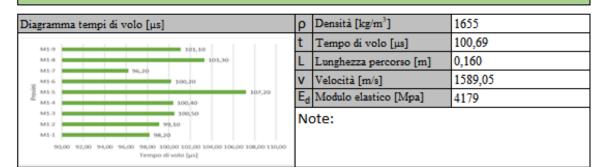
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 101 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	M2
Data di confezionamento	14/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

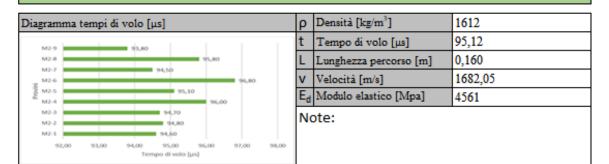
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 91 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	M3
Data di confezionamento	19/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata in polvere
Rapporti	3,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

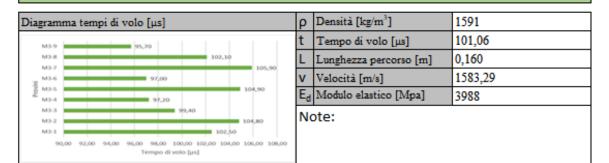
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 86 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	N1
Data di confezionamento	08/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

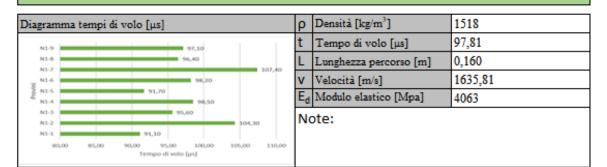
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 66 giorni
Numero campioni misurati	9

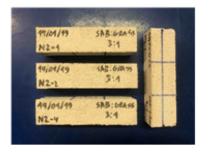
4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	N2
Data di confezionamento	14/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

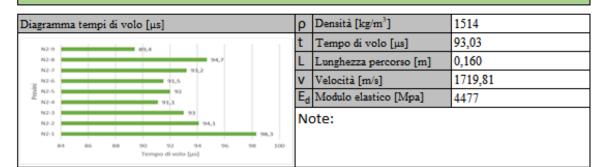
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 60 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	01
Data di confezionamento	24/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata in polvere
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

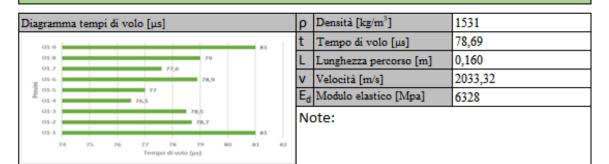
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 50 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	O2
Data di confezionamento	01/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

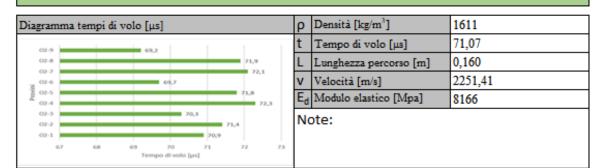
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 42 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	P1
Data di confezionamento	23/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata in polvere
Rapporti	2,5:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

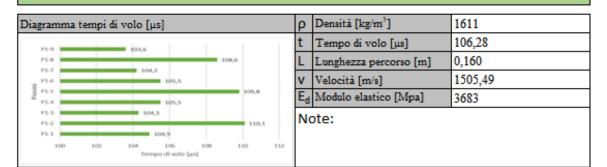
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 20 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.





1. PROVINO	P2
Data di confezionamento	22/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata in polvere
Rapporti	3:1

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	15/03/2019
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova con ultrasuoni
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4:2005
Operatore	Vecchio Federico

3. CONDIZIONI DI PROVA

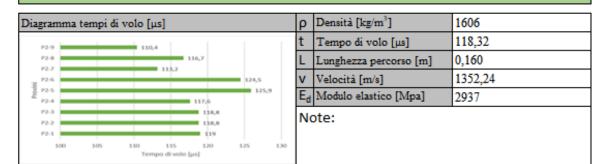
Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche provino	Stagionatura di 21 giorni
Numero campioni misurati	9

4. APPARECCHIATURA

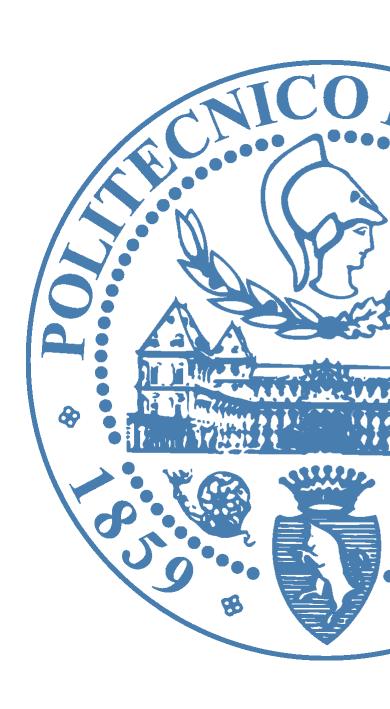
Costruttore	PROCEQ
Modello	PUNDIT 200
Scala dei tempi	0,1 μs
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata eseguita con il metodo di trasmissione diretta, posizionando le sonde ai capi dei provini distanti 160 mm. Prima di applicare le sonde al provino sono state rivestite da un sottile strato di plastilina. L'adesione tra provino e sonda è stata verificata prima di ogni misurazione. Finita ogni misurazione il materiale accoppiante è stato controllato ed eventualmente pulito. Al termine della misurazione di 9 provini la plastilina è stata completamente sostituita e rifatta la calibrazione dello strumento. Il provino con le sonde collegate è stato tenuto in mano dall'operatore in modo che con l'applicazione di una modesta forza l'accoppiamento risultasse ottimale. L'operatore è stato aiutato e supervisionato durante le prove. Per ogni tipologia di malta sono stati misurati 9 diversi provini.



APPENDICE B





1. PROVINI	M1
Data di confezionamento	04/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	106 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

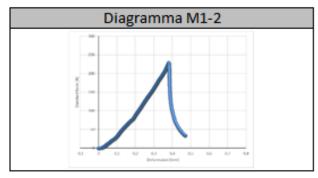
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

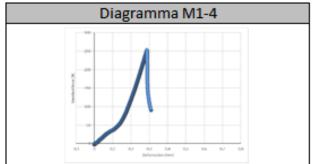
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

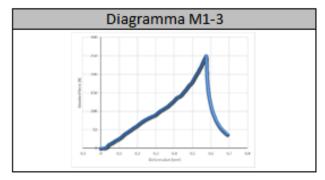
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	244
Resistenza a flessione [MPa]	0,572

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	M2
Data di confezionamento	14/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	96 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

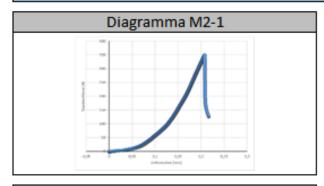
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

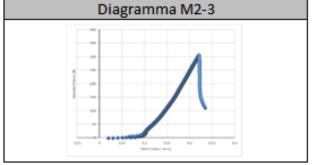
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

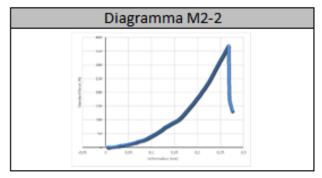
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	342
Resistenza a flessione [MPa]	0,801

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	M3
Data di confezionamento	19/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	3,5:1
Stagionatura	91 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

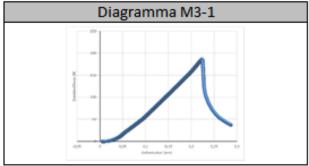
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

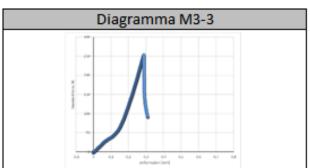
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

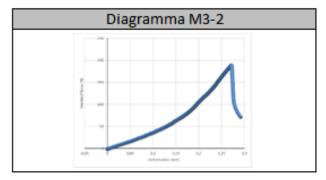
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	203
Resistenza a flessione [MPa]	0,476

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	N1
Data di confezionamento	08/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	71 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

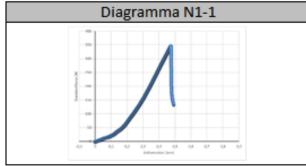
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

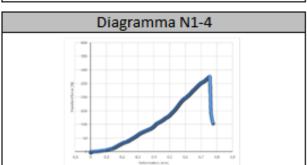
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

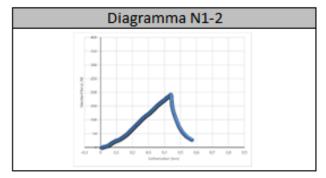
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	272
Resistenza a flessione [MPa]	0.638

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

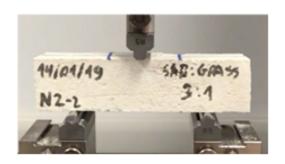
La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	N2
Data di confezionamento	14/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	3:1
Stagionatura	65 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

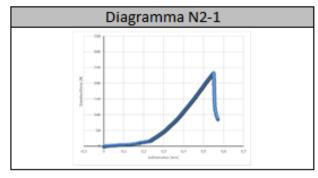
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

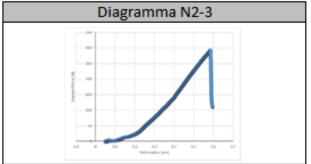
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

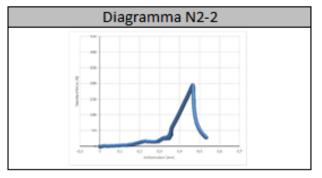
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	241
Resistenza a flessione [MPa]	0,564

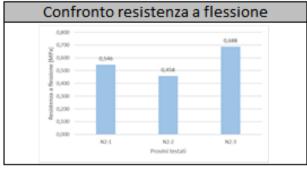
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	01
Data di confezionamento	24/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	55 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

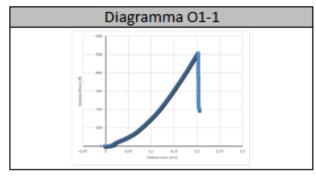
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

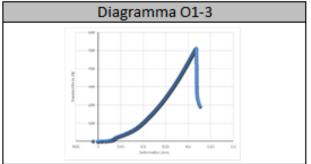
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

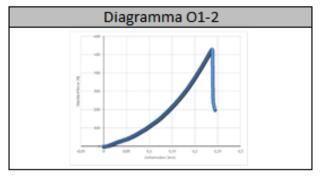
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	517
Resistenza a flessione [MPa]	1,213

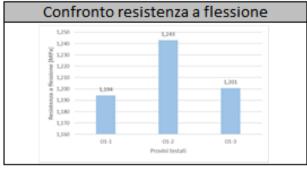
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	O2
Data di confezionamento	01/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	47 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

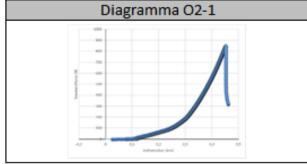
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

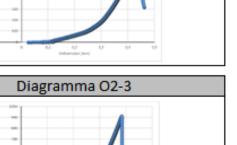
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

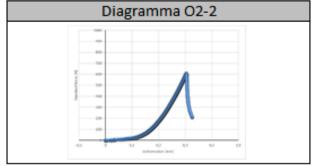
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	791
Resistenza a flessione [MPa]	1,853

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	P1
Data di confezionamento	23/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	25 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

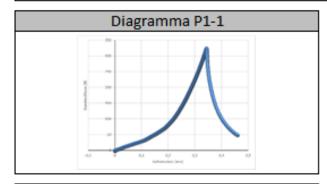
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

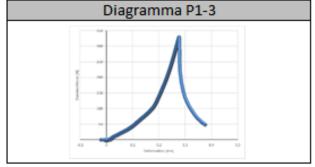
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

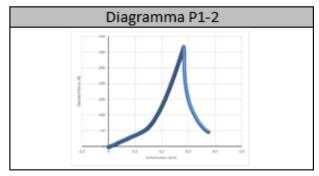
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	325
Resistenza a flessione [MPa]	0,761

5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.











1. PROVINI	P2
Data di confezionamento	22/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	26 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

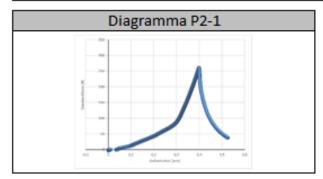
Data della prova	20/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

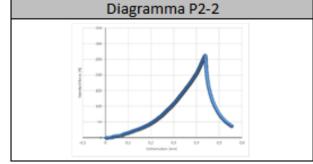
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

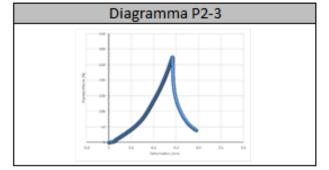
Distanza rulli [mm]	100
Velocità di carico [N/s]	5
Altezza provino [mm]	40
Larghezza provino [mm]	40
Carico massimo [N]	267
Resistenza a flessione [MPa]	0,626

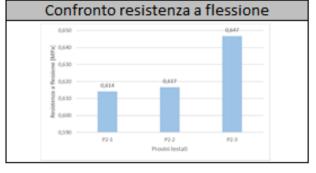
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. Al macchinario sono state applicate delle componenti per effettuare la prova a flessione a 3 punti. I rulli di sostegno in acciaio inferiori sono distanziati di 100 mm e un terzo rullo superiore posto esattamente in mezzeria del provino. Il provino è stato posizionato tra i rulli su delle facce lisce del provino. La prova è stata realizzata in controllo di spostamento. La velocità di carico scelta è di 5 N/s, velocità notevolmente più basta rispetto lo standard di 50 N/s. Lo scopo principale è stato quello di ottenere la rottura del provino trai 30 e i 90 secondi.









APPENDICE C





1. PROVINI	M1
Data di confezionamento	04/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	107 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

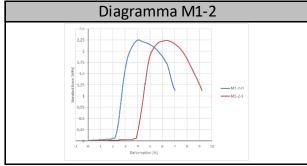
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

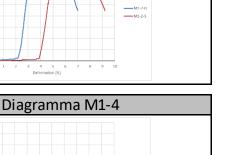
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

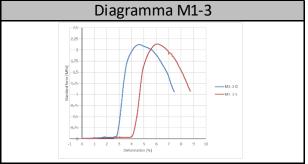
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm ²]	1600
Carico inizio frattura [N]	1620
Carico massimo [N]	3241
Resistenza a flessione [MPa]	2,026

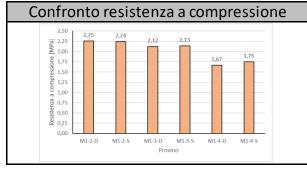
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	M2
Data di confezionamento	14/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	97 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

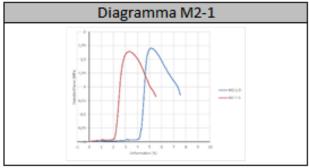
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

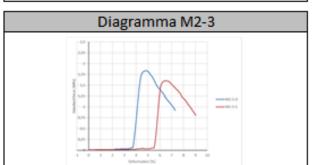
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

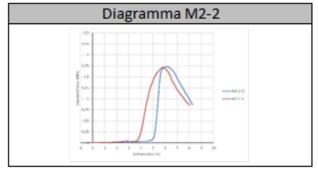
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	1365
Carico massimo [N]	2730
Resistenza a flessione [MPa]	1,706

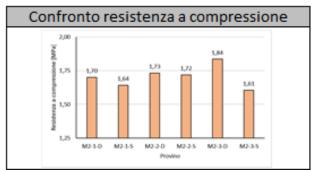
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	M3
Data di confezionamento	19/12/2018
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Calce idrata
Rapporti	3,5:1
Stagionatura	92 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

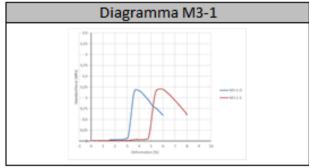
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

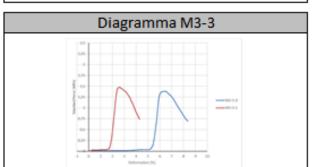
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

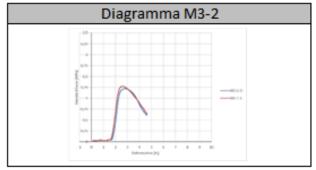
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	1033
Carico massimo [N]	2066
Resistenza a flessione [MPa]	1,291

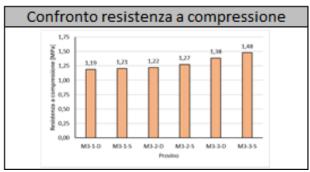
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	N1
Data di confezionamento	08/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	72 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

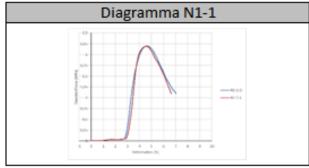
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

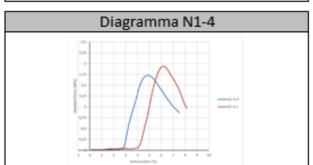
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

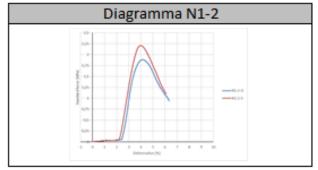
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	1620
Carico massimo [N]	3240
Resistenza a flessione [MPa]	2.025

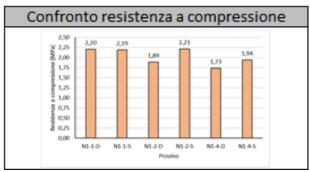
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	N2
Data di confezionamento	14/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia : Grassello di calce
Rapporti	3:1
Stagionatura	64 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

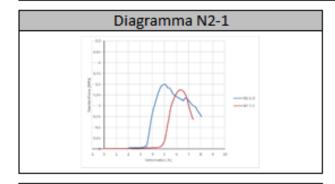
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

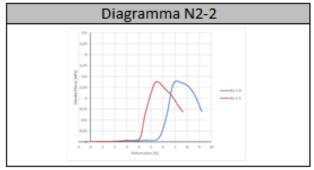
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

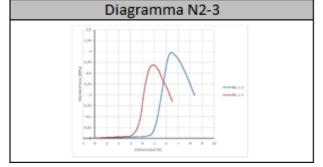
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	1242
Carico massimo [N]	2484
Resistenza a flessione [MPa]	1,553

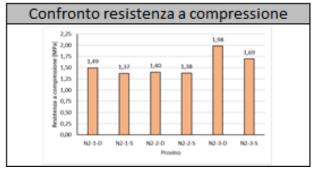
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm. Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	01
Data di confezionamento	24/01/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	56 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

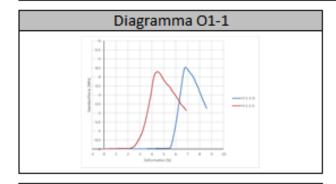
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

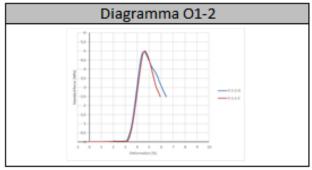
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

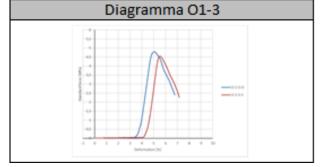
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	3748
Carico massimo [N]	7496
Resistenza a flessione [MPa]	4,685

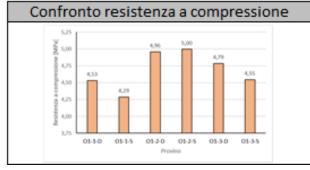
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	O2
Data di confezionamento	01/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Cocciopesto : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	48 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

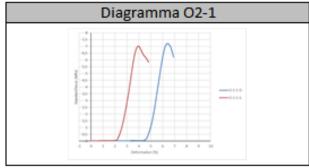
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

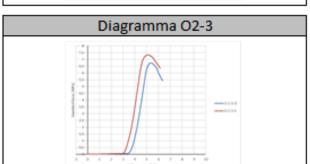
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

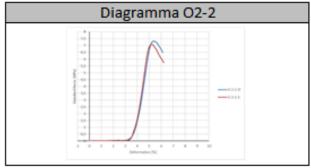
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	5694
Carico massimo [N]	11389
Resistenza a flessione [MPa]	7.118

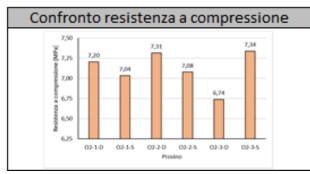
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm. Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	P1
Data di confezionamento	23/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata
Rapporti	2,5:1
Stagionatura	26 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

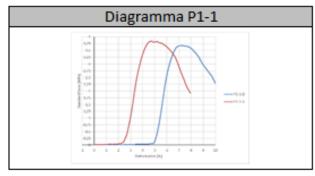
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

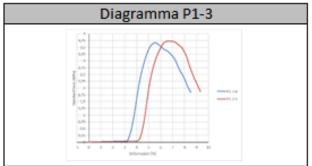
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

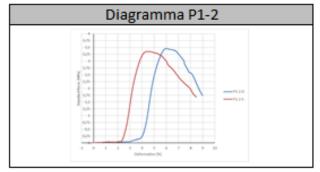
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	2900
Carico massimo [N]	5801
Resistenza a flessione [MPa]	3.626

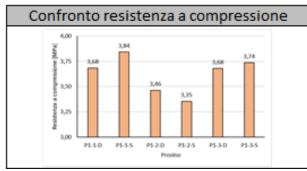
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.











1. PROVINI	P2
Data di confezionamento	22/02/2019
Dimensioni provino	40 mm x 40 mm x 160mm
Materiale	Sabbia + Pozzolana : Calce idrata
Rapporti	3:1
Stagionatura	27 giorni

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

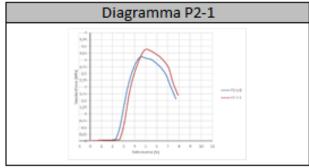
Data della prova	21/03/2019
Luogo della prova	Laboratorio MasterLab
Macchinario	Z050 kN (Zwick/Roell)
Tipologia sperimentale	Prova distruttiva
Norma di riferimento	UNI EN 1015-11:2007
Operatore	Vecchio Federico

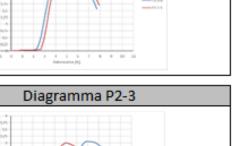
3. DATI E RISULTATI DELLA PROVA

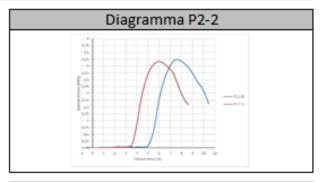
Mezzi prismi testati	6
Velocità di carico [mm/s]	2
Area di carico [mm²]	1600
Carico inizio frattura [N]	2531
Carico massimo [N]	5063
Resistenza a flessione [MPa]	3,164

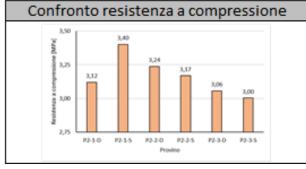
5. SINTESI MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata realizzata con la macchina ProLine Z050 della Zwick/Roell con capacità di carico massima di 50kN. I campioni utilizzati avevano dimensioni variabili, ma all'incirca pari alla metà di un provino UNI. La normativa UNI EN 1015-11:2007 prescrive infatti l'utilizzo dei mezzi prismi ricavati dalla prova a flessione. Il carico applicato dalla componentistica aveva un'area di (40x40) mm.Il carico è stato applicato in controllo di spostamento con velocità di 2 mm/min. Dopo che è il provino è stato portato a rottura la prova è perdurata fino al ritorno a un valore di carico pari al 50% del carico massimo ottenuto.









BIBLIOGRAFIA



Bibliografia

Antonaci P., Bocca P., Nuove metodologie di valutazione delle malte consolidanti, in "Superfici murarie dell'edilizia storica. Conservazione e manutenzione", Firenze, Alinea Editrice, 2010.

Arcolao C., *Le ricette del restauro. Malte, intonaci, stucchi dal XV al XIX secolo*, Venezia, Marsillo Editori, Seconda edizione, 2001.

Bertolini L., Carsana M., *Materiali da costruzione. Volume primo. Struttura, proprietà e tecnologie di produzione*, Novara, Città studi edizioni, Terza edizione, 2014.

Broccolo A., *Malte, intonaci e paste nelle costruzioni e nel recupero*, Roma, Carrocci Editore, Prima edizione, 2000.

Collepardi M., Scienza e tecnologia del calcestruzzo, Milano, Hoepli, 1992.

Franceschi S., Germani L., Manuale operativo per il restauro architettonico. Metodologie di intervento per il restauro e la conservazione del patrimonio storico, Roma, Dei - Tipografia del Genio Civile, Quarta edizione, 2010.

Neville A. M., *Properties of concrete*, Essex, Addison Wesley Longman Limited, 4th edition, 1995.

Nelva R., Vancetti R., Valutazione e confronto sperimentale dei moduli elastici di malte per restauro, in "Superfici murarie dell'edilizia storica. Conservazione e manutenzione", Firenze, Alinea Editrice, 2010.

Rattazzi A., Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell'arte e nel restauro, Monfalcone, Edicom Edizioni, 2007.

Quaderni del manuale di progettazione edilizia. I materiali e i manufatti in conglomerati cementizi, Milano, Hoepli, 2004.

Scarzella P., Zerbinatti M., Superfici murarie dell'edilizia storica. Conservazione e manutenzione, Firenze, Alinea Editrice, 2010.

Scarzella P., Zerbinatti M., *Recupero e conservazione dell'edilizia storica*, Firenze, Alinea Editrice, 2009.

Vitruvio M. P., De architectura libri decem, Einaudi, 1997.

Tesi di laurea

Trimarchi A., Caratterizzazione di malte per interventi di manutenzione e conservazione. Criteri di formulazione e miscelazione, confronto tra caratteristiche meccaniche, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Luglio 2015.

Bellocci B., Malte per interventi di manutenzione, conservazione, restauro. Determinazione del modulo elastico mediante prove di laboratorio, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Marzo 2018.

Norme di riferimento

UNI EN 990-1:2004 – Specifiche per malte per opere murarie: Malte da intonaco.

UNI EN 990-2:2004 – Specifiche per malte per opere murarie: Malte da muratura.

UNI EN 998-1:2016 – Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni.

UNI EN 998-2:2016 – Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura.

UNI 11089:2003, Beni culturali – Malte storiche da restauro: Stima della composizione di alcune tipologie di malte.

UNI 11088:2003, Beni culturali – Malte storiche da restauro: Caratterizzazione chimica di una malta. Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di specie solubili.

UNI 10924:2001, Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi. Classificazione e terminologia.

UNI EN 933-1:2012 – Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura.

UNI EN 933-2:1997 – Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. - Parte 2: Determinazione della distribuzione granulometrica - Stacci di controllo, dimensioni nominali delle aperture.

UNI EN 15167-1:2006 – Loppa granulata d'altoforno macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.

UNI EN 13055-1:2003 – Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta per iniezione.

UNI EN 932-2:2000 – Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati. Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio.

UNI EN 1097-3:1999 – Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati. Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari.

UNI EN 13139:2003 – Aggregati per malta.

UNI EN 12670:2003 – Pietre naturali. Terminologia.

UNI EN 934-1:2008 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Requisiti comuni.

UNI EN 934-3:2012 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 3: Additivi per malte per opere murarie - Definizioni, requisiti, conformità e marcatura ed etichettatura.

UNI EN 934-6:2007 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione – Parte 6: Campionamento, controllo e valutazione della conformità.

UNI EN 480-1:2014 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 1: Calcestruzzo e malta di riferimento per le prove.

UNI EN 480-2:2007 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 2: Determinazione del tempo di presa.

UNI EN 480-13:2015 – Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Metodi di prova - Parte 13: Malta da muratura di riferimento per le prove sugli additivi per malta.

UNI EN 1008:2003 – Acqua d'impasto per il calcestruzzo - Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di ricupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo.

UNI 11201:2017 – Prove sul calcestruzzo fresco – Determinazione del contenuto di acqua.

UNI EN 459-1:2015 – Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.

UNI EN 459-2:2010 – Calci da costruzione. Metodi di prova.

UNI EN 197-1:2011 – Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

UNI EN ISO 4287:2009 – Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) – Stato della superficie: Metodo del profilo – Termini, definizioni e parametri dello stato della superficie.

UNI EN 12504-4:2005 – Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici

UNI EN 1015-3:2007 – Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse).

UNI EN 1015-2:2007 – Metodi di prova per malte per opere murarie. Campionamento globale delle malte e preparazione delle malte di prova.

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