

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
A.A. 2017/2018

Tesi di Laurea Magistrale

MALTE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE, CONSERVAZIONE, RESTAURO DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO



Relatore
arch. Marco Zerbinatti

Candidata
Benedetta Bellocchi

Marzo 2018

BENEDETTA BELLOCCI

MALTE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE, CONSERVAZIONE, RESTAURO
DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO MEDIANTE PROVE DI LABORATORIO



**POLITECNICO
DI TORINO**

INDICE

Introduzione.....	6
1. I materiali.....	8
1.1 Evoluzione dei materiali da costruzione.....	8
1.2 Gli aggregati.....	9
1.3 I leganti.....	15
1.3.1 I leganti aerei.....	16
1.3.2 I leganti idraulici.....	19
2. Le malte.....	23
2.1 Processo di produzione.....	24
2.2 Descrizione delle malte formulate.....	31
2.2.1 Malte idrauliche - G.....	31
2.2.2 Malte cementizie e bastarde - H.....	32
2.2.3 Malte di sabbia/cocciopesto e grassello di calce - I.....	34
2.2.4 Malte di sabbia/perlite e grassello di calce - L.....	35
3. Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici. Definizione del modulo elastico dinamico.....	37
3.1 Strumentazione.....	38
3.2 Descrizione della prova.....	40
3.3 Procedura operativa.....	44
3.4 Fase di sperimentazione.....	46
3.5 Risultati.....	51

4. Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione.	
Definizione del modulo elastico secante.....	54
4.1 Sperimentazione.....	55
4.1.1 Resistenza a flessione e a compressione.....	55
4.1.2 Determinazione del modulo elastico statico.....	56
4.2 Risultati.....	59
APPENDICE A.....	62
APPENDICE B.....	88
APPENDICE C.....	102
Bibliografia.....	106
Sitografia.....	107
Norme di riferimento.....	108

INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno di un campo più ampio quale quello degli interventi di manutenzione e/o restauro che riguardano sia il patrimonio architettonico di valore storico e documentario sia l'edilizia più recente.

La conservazione del patrimonio architettonico assume un'importanza rilevante se si pensa a quanto questo contribuisca a costituire l'immagine identitaria di un Paese e a quanto sia utile per preservarne la memoria.

Negli ultimi anni gli operatori del settore hanno posto grande attenzione al problema della manutenzione e della conservazione del patrimonio architettonico intervenendo sui manufatti; non sempre le soluzioni adottate (spesso con interventi irreversibili) si sono rivelate adeguate e in alcuni casi hanno portato gli edifici (o parti di essi) a un degrado maggiore. Però, la crescente sensibilità verso questo problema spinge a ricercare nuovi prodotti e/o materiali (spesso traendo spunto dal *know-how* derivato dalla tradizione), nuove soluzioni tecniche sempre meno invasive per evitare di alterare gli equilibri dei materiali o delle strutture preesistenti.

All'interno di questo ambito, ovvero quello della conservazione del costruito, si inserisce il tema delle malte, che possono assumere funzioni diverse all'interno del sistema costruttivo. Quando si deve operare nella rappezzatura di intonaci o nel risarcimento di giunti murari non è possibile asportare elementi di grandi dimensioni su cui poter fare le prove necessarie a definire le caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale in opera. Nasce da qui l'esigenza di allestire un catalogo, a disposizione dei vari operatori del settore, nel quale siano elencate numerose categorie di malte con le caratteristiche fisico-meccaniche che le definiscono, cosicché, a partire dalla conoscenza della composizione chimica e petrografica del materiale in opera, si possa risalire a una malta dalle caratteristiche simili. In particolare, per quanto riguarda il comportamento meccanico delle malte, è estremamente importante la valutazione del modulo elastico poiché se i materiali accoppiati non hanno moduli elastici compatibili, possono nascere sollecitazioni in uno dei due materiali proporzionali al proprio modulo elastico, portando all'insorgere di fenomeni di degrado come la delaminazione o la fessurazione. Quindi, lo scopo è di fornire degli strumenti di valutazione e di controllo del comportamento meccanico delle malte da restauro, nonché di fornire ai professionisti uno strumento valido per poter prendere delle decisioni idonee e garantire una certa durabilità in funzione del tipo di supporto murario, di clima e di esposizione, per esempio.

In particolare, questo lavoro illustra i risultati che sono stati ottenuti a seguito di un'esperienza sperimentale, relativa alla valutazione del modulo elastico dinamico (tramite appa-

recchiatura a ultrasuoni) e del modulo elastico statico (in prova di compressione), svolta su tredici categorie di malta con diversa composizione.

Questa tesi ha avuto l'obiettivo di aggiungere un tassello a quel progetto più vasto illustrato precedentemente, proseguendo l'esperienza iniziata nel 2015 con un'altra tesi di Laurea Magistrale¹, nella quale sono illustrati i risultati ottenuti su quindici categorie di malta.

¹ TRIMARCHI A., *Carterizzazione 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.

1. I MATERIALI

1.1 EVOLUZIONE DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Da sempre l'uomo è stato costruttore di opere edili e ha lavorato con moltissimi materiali; alcuni di questi erano direttamente disponibili in natura (per esempio il legno), altri richiedevano alcune trasformazioni e ha dovuto imparare a modificarne la natura prima di impiegarli. A seconda di quello che l'ambiente gli offriva, l'uomo fabbricò la propria casa e i propri oggetti, indifferentemente, con materiali pesanti o leggeri, rigidi o elastici, duri o teneri, "naturali" o "artificiali". Il tipo di struttura adottato dipendeva da vari fattori, quali:

- natura dei materiali disponibili in loco;
- utensili e strumenti disponibili;
- condizioni ambientali;
- osservazione di tecniche già sperimentate.

Le prime tracce di architettura sono in legno e risalgono all'inizio del Paleolitico superiore: gli uomini dediti alla caccia provavano a costruire ricoveri in zone sprovviste di caverne naturali. Altri materiali largamente usati nell'antichità furono i materiali lapidei poiché sono i materiali più disponibili in natura. Nei luoghi dove la pietra era facilmente reperibile e in pezzi di grandi dimensioni vi era la tendenza a realizzare strutture megalitiche per tombe, edifici per il culto e fortificazioni. La resistenza e la durevolezza del materiale hanno portato fino a noi esempi monumentali antichissimi: per esempio gli "stone circles" (o pietra curva) di Stonehenge (2200 - 1600 a.C.).

Un altro materiale largamente utilizzato è il laterizio che da sempre ha rivaleggiato con la pietra, sia per la realizzazione di opere modeste che grandiose. Pur non essendo il primo e il più naturale, è senz'altro un antichissimo mezzo di costruzione; certamente il primo materiale "artificiale" e il primo che ha avuto bisogno di una "industria".

Infine le malte, le quali hanno avuto una grande importanza poiché hanno contribuito alla durata delle murature, "legando" tra loro pietre e mattoni in un tutt'uno monolitico di grande resistenza e durabilità.

La divulgazione della tecnologia delle costruzioni si deve a molti trattatisti che hanno agevolato la conoscenza dei materiali. Per esempio Marco Vitruvio Pollione nel 13 a.C pubblicò il "*De architectura libri decem*"¹ che costituisce una delle fonti principali per ciò che riguarda i metodi costruttivi utilizzati in epoca romana e per la conoscenza di strutture sia grandi che piccole. I materiali utilizzati in quell'epoca erano la pietra (da costruzione o come rocce ornamentali), la terra e il laterizio, la calce, la sabbia e svariati pigmenti; come unico

1 MARCO VITRUVIO POLLIONE (80 a.C.-15 a.C circa): architetto all'epoca di Cesare e di Augusto, è noto soprattutto per la sua opera *De architectura libri decem*, volume in 10 libri ognuno dedicato ad un tema specifico.

metallo era utilizzato il piombo. Nel XV secolo Leon Battista Alberti scrisse il “*De re aedificatoria*” una sorta di rilettura critica e creativa del trattato di Vitruvio. Egli propose lo stesso elenco di materiali da costruzione con l’aggiunta del rame e con qualche riferimento al ferro.

Jean-Baptiste Rondelet² nel 1805 pubblicò il “*Traité theorique et pratique de l’Art de Bâtir*” nel quale scrisse riguardo alla calce, il gesso, il legname e il ferro come materiali da costruzione. Inoltre, esaminando le costruzioni di età romana concluse che l’eccellenza delle loro malte non dipendeva da qualche segreto nello spegnimento o nella composizione della calce, ma nella cura che mettevano nella miscelazione dell’impasto.

Il primo materiale utilizzato come legante fu l’argilla, dapprima cruda e poi cotta. L’uomo preistorico aveva capito che essa, impastata con acqua, diventava un materiale plastico capace di aderire ad altri materiali e, essiccando, legarli.

Invece, i primi leganti derivanti da calcinazione furono il gesso e la calce aerea. L’uomo si accorse che la pietra, che era stata a contatto con il fuoco, dopo il raffreddamento, si riduceva in polvere e che unita all’acqua dava un impasto plastico e successivamente ritornava a essere un materiale rigido, simile alla pietra di partenza [Rattazzi 2007].

I processi chimici che stanno alla base della cottura della calce aerea e della sua azione legante furono compresi a partire dal 1755 quando Josef Black³ isolò e identificò l’anidride carbonica (CO₂) che egli chiamò “aria fissa”. Black dimostrò che alcuni sali (i carbonati alcalini e alcalino-terrosi) se riscaldati, liberano anidride carbonica trasformandosi in ossidi caustici i quali, a loro volta, possono fissare l’anidride carbonica ritrasformandosi in carbonati. Questo è proprio il fenomeno chimico che sta alla base della formazione della calce. Successivamente Bryan Higgins⁴ estese i suoi studi anche al campo della tecnologia delle malte dimostrando che era meglio, dal punto di vista della resistenza, che le sabbie fossero plurigranulari e propose di classificarle granulometricamente in tre categorie.

1.2 GLI AGGREGATI

Gli aggregati sono materiali lapidei granulari (sabbia, ghiaia, pietrisco), naturali o artificiali, da unire al legante per il confezionamento di malte, calcestruzzi, conglomerati, ecc. Ne costituiscono l’ossatura e aumentano la resistenza meccanica del legante, impediscono la formazione di crepe dovute al ritiro e riducono il costo finale del prodotto.

2 JEAN BAPTISTE RONDELET (1743 - 1829): architetto francese e autore del *Traité theorique et pratique de l’Art de Bâtir*.

3 JOSEF BLACK (1728 - 1799): professore di medicina all’Università di Glasgow. A lui si deve la scoperta del calore latente, del calore specifico e dell’anidride carbonica.

4 BRYAN HIGGINS (1741 - 1818): chimico irlandese.

I materiali lapidei naturali sono essenzialmente le rocce. Nel campo dell'edilizia sono tutte quelle pietre che vengono utilizzate dall'uomo come materiale da costruzione o per la produzione di materiali lapidei artificiali come malte, intonaci, stucchi, ceramiche, ecc. La norma UNI EN 12670⁵ definisce la terminologia raccomandata per le pietre naturali e le suddivide in rocce ignee, rocce sedimentarie e rocce metamorfiche⁶.

Nella maggior parte dei casi una roccia è un aggregato naturale eterogeneo, cioè costituito da più specie di minerali. I minerali più comuni costituenti le rocce sono i silicati e i carbonati. I silicati sono composti da silicio e ossigeno e hanno come caratteristica comune quella di contenere gruppi tetraedrici SiO_4 . Queste strutture tetraedriche, che hanno un eccesso di carica negativa, vengono completate da ioni positivi di metalli (ferro, magnesio, potassio, calcio, sodio). L'alluminio è l'unico che può prendere il posto del silicio al centro del tetraedro, in questo caso si parlerà di alluminosilicati. Molti minerali importanti sono varietà di alluminosilicati stratificati (fillosilicati) contenenti metalli come ferro e magnesio: tra questi troviamo le argille. Un altro alluminosilicato importante è la caolinite (in commercio sotto il nome di caolino) che si origina in seguito a un'alterazione idrotermale (caolinizzazione) dei feldspati. Questi minerali, in ambiente acido, in presenza di acqua e di CO_2 e sotto condizioni di bassa temperatura e pressione perdono gli ioni alcalini e alcalino-terrosi e si trasformano in silicati idrati di alluminio, tra cui prevale la caolinite. I carbonati, invece, sono quei minerali che contengono gruppi CO_3 , tra i più comuni troviamo la calcite (carbonato di calcio CaCO_3) e la dolomite (carbonato di calcio e magnesio $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$).

L'aggregato viene definito “*materiale granulare utilizzato in edilizia. L'aggregato può essere naturale, industriale o riciclato*”⁷.

Secondo la norma UNI 10924:2001⁸ l'aggregato viene definito come componente di una malta e classificato, secondo la sua natura, in aggregato costituito da sabbia (di fiume, di cava, di litorale), da rocce frantumate, da materiali naturali a comportamento pozzolanico, da materiali artificiali a comportamento pozzolanico (per esempio il “cocciopesto”), da frammenti di malte indurite. Gli aggregati quindi si distinguono in due categorie: gli inerti, che non reagiscono dal punto di vista chimico se combinati con una sostanza reattiva (come la calce), e quelli reattivi che, al contrario, reagiscono e partecipano al processo di carbonatazione della calce.

La sabbia è uno dei materiali più usati come aggregato nella formulazione di malte, deriva da materiali lapidei di opportuna granulometria e qualità e deve essere scelta con molta

5 UNI EN 12670:2003 Pietre naturali. Terminologia. Sostituisce la UNI 8458:1983.

6 Definizioni da UNI EN 12670:2003.

Roccia ignea: roccia formata dalla solidificazione di materiale fuso (magma).

Rocce sedimentarie: rocce formate dall'accumulo di sedimenti in acqua o nell'aria.

Roccia metamorfica: include tutte quelle rocce che si sono formate da una roccia preesistente per metamorfismo.

7 UNI EN 13139:2003 Aggregati per malta.

Aggregato naturale: aggregato di origine minerale che è stato sottoposto unicamente a lavorazione meccanica.

Aggregato industriale: aggregato di origine minerale derivante da processo industriale che implica una modificazione termica o di altro tipo.

Aggregato riciclato: aggregato risultante dalla lavorazione di materiale inorganico precedentemente utilizzato in edilizia

8 UNI 10924:2001 Malte per elementi costruttivi e decorativi.

cura poiché costituisce il 70/75% del volume degli impasti. La sabbia naturale di qualsiasi natura ha forma più o meno arrotondata; mentre quella artificiale è a spigolo vivo e ha superficie rugosa soprattutto quando proviene da rocce compatte. Inoltre possiamo dire che a parità di quantità d'acqua, le sabbie naturali danno impasti più lavorabili; mentre a parità di lavorabilità, gli aggregati artificiali contribuiscono ad una migliore adesione inerte-pasta di legante.

Per la formulazione di qualsiasi impasto è importante l'**assortimento granulometrico** dell'aggregato, cioè l'utilizzo di aggregati che contengono, in varie percentuali, tutte le classi granulometriche, da quelle più fini a quelle più grossolane. Lo scopo è quello di riempire gli spazi tra i granuli più grossi con dell'aggregato più fine per garantire uno scheletro lapideo con la minor percentuale di vuoti. Questi vuoti saranno poi riempiti con la pasta (miscela di acqua e legante) che, al termine del processo di indurimento⁹, trasformerà l'insieme di granuli non legati tra loro in un conglomerato monolitico.

Negli anni sono state sviluppate varie curve granulometriche o granulometrie, cioè vari diagrammi che esprimono le quantità di materiale per ogni classe granulometrica al fine di avere un impasto che abbia il minor contenuto di vuoti.

La più usata è quella di Füller e Thompson:

$$P = 100 (d/D_{\max})^{1/2}$$

dove P è la percentuale passante per ogni singolo diametro (d) rapportato al diametro massimo (D_{\max}) dei granuli più grossi. Un impasto che granulometricamente rispetta questa curva risulta poco lavorabile proprio per il suo denso impacchettamento e richiede mezzi sofisticati per essere messo in opera. Per questo motivo Bolomey ha modificato leggermente la curva ideale inserendo un nuovo parametro A che tiene conto della lavorabilità richiesta e del tipo di aggregato disponibile:

$$P = A (100 - A) (d/D_{\max})^{1/2}$$

Le normative tecniche dei vari Paesi hanno fissato dei livelli di tolleranza relativi alle modifiche consentite che vanno a tracciare altre due curve che nel diagramma di Füller e Thompson rappresentano l'area di tolleranza utile, detta *fuso granulometrico*.

Per il confezionamento dei provini è stata usata una granulometria della sabbia che segue la curva denominata DISET¹⁰ (figura pagina successiva). Una volta decisa la curva

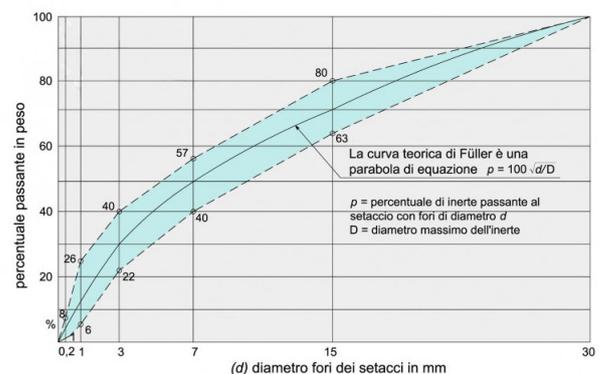


Fig.1 - Curva di Füller e Thompson

⁹ Indurimento: trasformazione fisico-chimica conseguente alla carbonatazione (leganti aerei calcici) o all'idratazione (leganti aerei solfatici e leganti idraulici) che conferisce consistenza litoide e resistenza meccanica ai conglomerati e alle paste.

¹⁰ Il Laboratorio di Architettura Tecnica del Politecnico di Torino DISET ha sperimentato dei fasci di curve granulometriche per la realizzazione di provini dimostrativi che utilizzano caratteristiche sabbie locali piemontesi e valdostane. Queste curve ricadono all'interno dei fusi

granulometrica da seguire per la preparazione dell'impasto, è necessario suddividere l'aggregato in classi granulometriche normalizzate da conservare in contenitori separati.

Questa operazione meccanica di vagliatura viene chiamata *stacciatura* e si effettua con una pila di setacci a maglie normalizzate di misura decrescente dall'alto verso il basso. La normativa di riferimento per le dimensioni delle aperture delle maglie metalliche degli stacci è la norma UNI EN 933-2¹¹.

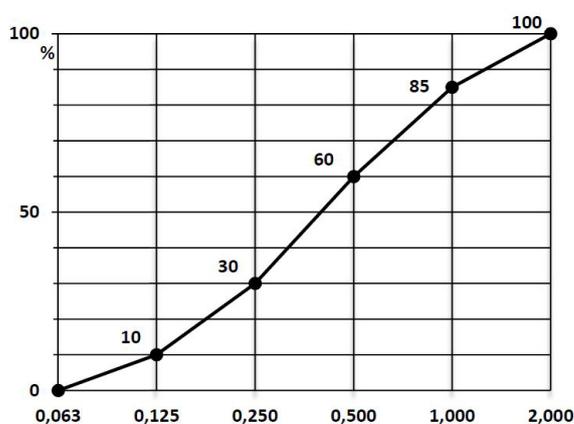


Fig. 2 - Curva DISET 2

Ci sono varie ragioni per cui si aggiungono gli aggregati a una pasta legante, tali ragioni sono di natura sia tecnica che economica. Le ragioni tecniche riguardano il ritiro della pasta legante che diminuisce con l'aggiunta dell'aggregato; la velocità e il grado di carbonatazione; e infine il miglioramento della durabilità dell'impasto dopo l'indurimento, poiché l'aggregato è meno soggetto all'attacco chimico degli agenti esterni. Tra i motivi economici vi è il fatto che l'aggregato ha un costo notevolmente inferiore a quello del legante. Inoltre molte caratteristiche, tra cui la resistenza meccanica, il modulo elastico, la resistenza al gelo e la permeabilità, possono essere migliorate aggiungendo una certa quantità di aggregato nell'impasto [Rattazzi 2007].

La sabbia, come abbiamo detto, è l'aggregato più comune utilizzato per la formulazione di malte ma, in alcuni casi e per varie necessità, può essere sostituita in parte o totalmente da altri tipi di aggregato con caratteristiche diverse. Nel nostro caso alcune malte sono state formulate con **aggiunte** di varia natura: perlite (roccia vulcanica effusiva) o cocciopesto (laterizio frantumato a effetto idraulicizzante). In entrambi i casi si è trattato di una sostituzione parziale del volume della sabbia, più precisamente i campioni sono stati realizzati con aggiunte in sostituzione del 100% del volume dei fini (<0,500 mm) della sabbia.

Perlite

La perlite è una varietà di roccia vulcanica effusiva appartenente alla famiglia delle rioliti. Le rocce magmatiche derivano dal magma, cioè dalla roccia fusa. Le rocce magmatiche effusive sono quelle rocce di origine vulcanica che si formano quando il magma trabocca (lava) e si solidifica raffreddandosi velocemente all'aria libera. Inoltre le rocce magmatiche

granulometrici proposti dalle norme o raccomandazioni ASTM (American Society for Testing and Materials), ACI (American Concrete Institute), British Standards. Le curve sono state tracciate tenendo conto dei seguenti requisiti: (a) di congruenza della distribuzione delle varie classi di granuli, per evitare ritiri eccessivi in fase di indurimento; (b) di congruenza verso i caratteri morfologici degli intonaci prelevati *in situ*, principalmente caratterizzati nell'aspetto e nella tessitura superficiali dalle classi granulometriche maggiori. (Scarzella e Zerbinatti, *Superfici Murarie*, 178).
 11 UNI EN 933-2:1997 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. Determinazione della distribuzione granulometrica. Stacci di controllo, dimensioni nominali delle aperture.

vengono classificate in base al contenuto di silice dei minerali, in particolare le rocce appartenenti alla famiglia delle rioliti sono rocce acide, cioè ricche di silice (>68%) come i graniti (roccia intrusiva). La famiglia dei graniti comprende anche le rocce effusive aventi la stessa composizione chimica di quelle intrusive, ma che hanno subito una diversa modalità di cristallizzazione e presentano pertanto una struttura porfirica¹². A queste appartengono, appunto, le rioliti o lipariti, che talvolta, per via della rapidità del raffreddamento, possono assumere l'aspetto vetroso delle ossidiane¹³.

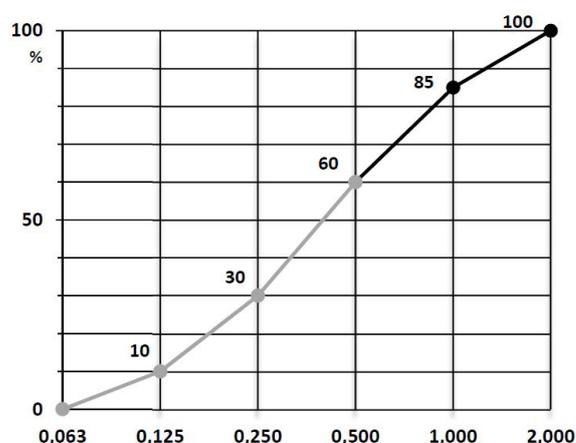


Fig.3 - Curva DISET 2: in grigio le classi granulometriche sostituite dalla perlite

La perlite, dunque, è una varietà di riolite, rocce di colore chiaro che hanno la proprietà di espandersi fino a 20 volte il loro volume se scaldate ad alte temperature (900÷1100 °C).

La perlite cruda, quella utilizzata per il confezionamento dei provini, contiene acqua fissata chimicamente a causa del repentino raffreddamento del magma arrivato in superficie. Essa può assumere varie colorazioni (nel nostro caso grigio), mentre la perlite espansa è sempre di colore bianco.

Altre malte sono state formulate con legante e materiale a effetto idraulicizzante; questi materiali sono chiamati genericamente pozzolane. L'aggiunta di materiali pozzolanici modifica le caratteristiche delle malte inducendo reazioni idrauliche. In queste malte l'indurimento avviene in seguito alla reazione chimica dell'idrossido di calcio, presente nella calce aerea, con la silice e l'allumina, presenti nella pozzolana, e l'acqua. Questa reazione forma i silicati e gli alluminati di calcio idrati, simili a quelli presenti nelle calce idrauliche naturali e nei cementi. I materiali pozzolanici possono essere di varia natura; ci sono pozzolane naturali (come pomice e ceneri vulcaniche), pozzolane artificiali (come coccio pesto e metacaolino) e derivanti da sottoprocessi industriali (come fumi di silice e loppe di altoforno).

Alcuni dei provini sono stati confezionati con malte a base di grassello di calce e coccio-pesto. Quest'ultimo non ha sostituito la totalità del volume della sabbia ma solo le granulometrie fini (da 63 μm a 500 μm), poiché l'idraulicità e la resistenza meccanica delle malte aumentano all'aumentare della finezza dei materiali pozzolanici.

12 Struttura porfirica: quando il raffreddamento del magma avviene in tempi diversi a diverse profondità, si può creare questa struttura in cui si osservano cristalli più grossi immersi in una pasta di fondo microcristallina o vetrosa.

13 PAROTTO E PALMIERI, *Il globo terrestre e la sua evoluzione*, 181

Cocciopesto

Il cocciopesto non è altro che laterizio pestato derivante da mattoni, tegole o coppi e fa parte di quei materiali naturali che attivano la loro proprietà pozzolanica tramite trattamenti termici a temperature di circa 800°C, seguiti da un rapido raffreddamento.

Il cocciopesto, quindi, non è propriamente un inerte poiché prende parte ai processi di presa e indurimento di una malta come le pozzolane naturali. Il cocciopesto più reattivo è quello che si ottiene dalla macinazione di tegole poiché sono cotte ad una temperatura più bassa il che comporta una sua miglior reazione con l'idrossido di calcio. Viceversa il cocciopesto derivante da materiali cotti ad alte temperature (come per esempio i laterizi moderni, tipo i mattoni forati) presentano una pozzolanicità ridotta o nulla. Inoltre, come abbiamo già detto, all'aumentare della finezza aumenta la sua capacità di conferire idraulicità alle malte, per via dell'aumento della superficie specifica.

Il cocciopesto è aggiunto alle malte a base di grassello di calce quando si vuole una presa più rapida e una maggiore resistenza e durabilità¹⁴ rispetto alle malte a base di solo grassello, senza modificarne la plasticità¹⁵, la flessibilità¹⁶ e la permeabilità¹⁷, caratteristiche che si perderebbero utilizzando i leganti idraulici, specialmente il cemento. Le malte di cocciopesto che sono state confezionate sono state ottenute miscelando il grassello di calce e il cocciopesto in parziale sostituzione della sabbia, mantenendo inalterata la curva DISET 2, come si può vedere dalla figura a sinistra.

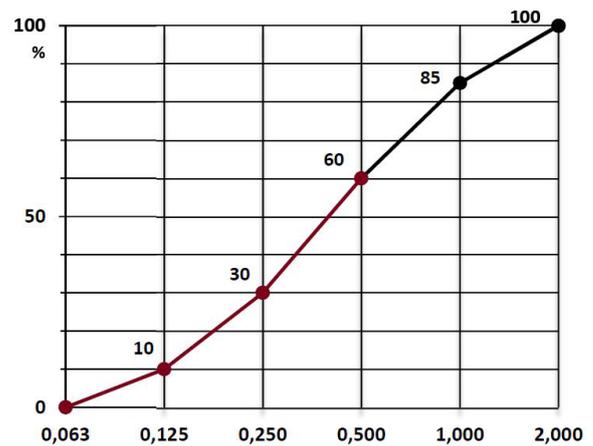


Fig.4 - Curva DISET 2: in rosso le classi granulometriche sostituite dal coccio pesto

14 Durabilità: qualità e condizione di ciò che può durare. [Enciclopedia Treccani]

15 Plasticità: proprietà di un materiale solido di deformarsi plasticamente, cioè di subire deformazioni di notevole ampiezza che permangono al cessare della sollecitazione che le ha prodotte. [Enciclopedia Treccani]

16 Flessibilità: attitudine a subire deformazioni elastiche, se sottoposta a flessione. [Enciclopedia Treccani]

17 Permeabilità: capacità e proprietà di certi materiali di essere attraversati da fluidi.

1.3 I LEGANTI

I leganti, o materiali cementanti da costruzione, sono “[...] una classe merceologica di prodotti che, allo stato di polvere finissima, mescolati con acqua, danno luogo a impasti omogenei e plastici, capaci di aderire ad altri materiali altrimenti sciolti, che una volta in opera, in conseguenza a processi d’essiccamento, perdono gradualmente la plasticità (presa)¹⁸ e successivamente, a seguito di processi chimici (indurimento)¹⁹, diventano rigidi e duri [...]”²⁰. I leganti, materiali che hanno la proprietà di unire altri materiali, possono essere di natura organica o inorganica. I leganti di natura organica sono costituiti da sostanze naturali oppure possono essere prodotti dall’uomo per lavorazione di sostanze naturali, o ancora possono essere prodotti in laboratorio in seguito a procedimenti di sintesi chimica. I leganti di natura inorganica sono prodotti dall’uomo attraverso trasformazioni chimiche (cottura) di materie prime (tipo rocce sedimentarie).

I leganti sono classificati in due categorie a seconda del loro comportamento:

- **Leganti aerei:** fanno presa e induriscono solo a contatto con l’aria e non sott’acqua;
- **Leganti idraulici:** fanno presa e induriscono sia a contatto con l’aria che sott’acqua.

LEGANTI	TIPO	MATERIALE
	Aerei	Gesso
		Calce aerea
	Idraulici	Calce idraulica
Cemento		

Con i leganti si possono ottenere vari prodotti a seconda del materiale che viene unito a essi: si possono ottenere stucchi o boiacche (impasti di legante e acqua), malte (impasti di legante, acqua e sabbia), calcestruzzi o conglomerati (impasti di legante, acqua, sabbia e ghiaia).

18 Presa: è il primo apprendimento, durante questa fase la massa plastica perde la propria plasticità e lavorabilità e alla fine del processo è capace di mantenere la sua forma anche se non ha raggiunto le proprietà meccaniche finali. Questa fase ha una durata che va da pochi minuti a una decina di ore.

19 Indurimento: segue la presa e in questa fase si ha un progressivo miglioramento delle proprietà meccaniche, indefinito nel tempo.

20 RATAZZI A., *Conosci il grassello di calce?*, 25.

1.3.1 I LEGANTI AEREI

La caratteristica dei leganti aerei, oltre quella di far presa e indurire solo a contatto con l'aria, è la loro scarsa resistenza al dilavamento (cioè al contatto con l'acqua) per effetto dei fenomeni atmosferici come pioggia e neve. Per questi motivi gli impasti confezionati con i leganti aerei sono utilizzati per lo più negli ambienti interni, dove è possibile un corretto indurimento ed è garantita un'eccellente durabilità nel tempo, grazie alla mancanza dei fenomeni sopra elencati.

Tra i leganti aerei abbiamo la calce²¹ aerea (e il grassello di calce) e il gesso.

Calce aerea

La calce aerea²² e il grassello di calce sono classificati nei leganti aerei perché l'idrossido di calcio (o di calcio e magnesio) reagisce con l'anidride carbonica presente nell'aria per

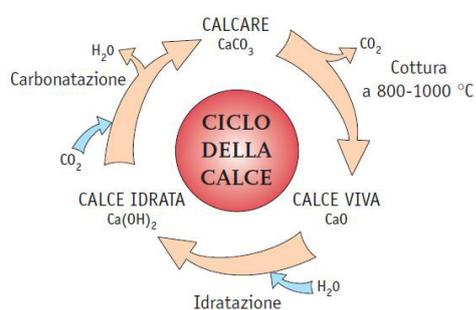


Fig. 5 - Ciclo della calce



Fig. 6 - Una zolla di calce viva viene immersa in una caraffa piena di acqua

riformare il carbonato di calcio (o di calcio e magnesio) da cui originariamente sono stati prodotti, chiudendo il cosiddetto *ciclo della calce* (fig. 5). Nell'ambito delle costruzioni, con calce aerea si intendono due prodotti: la *calce viva* e la *calce idrata* (o spenta). La materia prima per la produzione della calce aerea è il calcare, una roccia sedimentaria ricca di carbonato di calcio (CaCO_3), minerale noto come calcite. Associate ai calcari, ma meno abbondanti, si trovano le dolomie, formate da un minerale chiamato dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). I termini calce viva e calce spenta si usano indipendentemente dalla presenza o meno di magnesio; quando si vuole indicare la differenza di contenuto si usano gli aggettivi *calcico* e *magnesiaco* (o *dolomitico*) per indicare le *calci calciche* e le *calci magnesiache* (o *dolomitiche*).

La produzione di calce aerea inizia con la fran-

21 Calce: Ossido e/o idrossido di calcio, e ossido e/o idrossido di calcio e magnesio prodotti per decomposizione termica (calcinazione) del carbonato di calcio reperibile in natura (per esempio calcare, gesso, fossili) o carbonato di magnesio reperibile in natura (per esempio calcare dolomitico, dolomite). [UNI EN 459-1]

Calce da costruzione: Gruppo di prodotti di calce consistente esclusivamente in due famiglie: calce aerea e calce con proprietà idrauliche, utilizzate in applicazioni o materiali per costruzione, edilizia e ingegneria civile. [UNI EN 459-1]

22 Calce aerea: calce che si combina e indurisce reagendo con il biossido di carbonio presente nell'aria. La calce aerea non possiede proprietà idrauliche. La calce aerea è suddivisa in due sottofamiglie: calce calcica (CL) e calce dolomitica (DL). [UNI EN 459-1]



Fig. 7 - Inizia la reazione dell'acqua con l'ossido di calcio dalla quale si ottiene l'idrossido di calcio.



Fig. 8 - La reazione diventa violenta a causa del calore raggiunto.



Fig. 9 - Al termine della reazione la zolla si è disfatta, si è creata una pasta di idrossido di calcio.

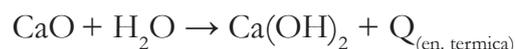
tumazione grossolana della roccia che successivamente viene cotta a circa 900°C.

Durante questa fase avviene una reazione chimica, chiamata *calcinazione*, che porta alla produzione di ossido di calcio e alla liberazione di anidride carbonica. Questa reazione è endotermica (processo che avviene con assorbimento di calore).



Dopo la cottura del materiale si ottiene la **calce viva** (ossido di calcio), la quale ha una consistenza porosa. Questa non è direttamente utilizzabile in edilizia, ma deve essere trasformata in calce idrata.

Per ottenere la **calce idrata**, o calce spenta, il materiale ottenuto dalla fase precedente (la calce viva) deve reagire con l'acqua (figg. 6 e 7). Lo spegnimento della calce viva è effettuato sulla base del rapporto stechiometrico²³. In questa fase si ha la trasformazione dell'ossido di calcio in idrossido di calcio e un rilascio di calore (fig. 8). Questa reazione è esotermica (rilascio di calore dal sistema all'ambiente):



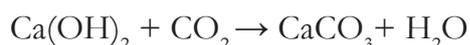
Lo spegnimento della calce viva in passato avveniva in cantiere mentre adesso avviene negli stabilimenti industriali che garantiscono una qualità del prodotto costante. La calce viva viene posta all'interno di vasche e bagnata con acqua; assorbendola la calce si gonfia e si screpola per la reazione chimica rilasciando un'elevata quantità di calore. Può raggiungere temperature elevate. La fase di spegnimento, ovvero la trasformazione dell'ossido in idrossido, deve completarsi totalmente durante l'estinzione per evitare che si formino i cosiddetti '*calcinaroli*' (fig. 9)²⁴. Se lo spegnimento non si conclude, infat-

23 La stechiometria di reazione indica in che rapporti due o più sostanze reagiscono tra di loro. Essa viene rappresentata attraverso coefficienti, detti appunto coefficienti stechiometrici, i quali esprimono i rapporti molari con cui le sostanze coinvolte nella reazione reagiscono. Il calcolo stechiometrico permette di determinare matematicamente le quantità di reagenti e prodotti coinvolti in una reazione chimica [Wikipedia].

24 Immagini 6, 7, 8, 9 sono tratte da <http://www.unisve.it>

ti, la reazione di idratazione si completa dopo la messa in opera del legante che si gonfia quando l'indurimento è già iniziato, portando all'espulsione di materiale. La presa inizia con l'evaporazione dell'acqua in eccesso e la successiva essiccazione.

Una volta che la calce viene posata reagisce con l'anidride carbonica che la trasforma in calcare (carbonatazione), il prodotto originario.



La calce idrata viene commercializzata sia sotto forma di polvere secca (si parlerà di calce idrata in polvere) sia come pasta (si parlerà di pasta di calce idrata o di **grassello di calce**). La differenza tra la calce idrata in polvere e la calce idrata in pasta sta nella quantità di acqua utilizzata per lo spegnimento della calce viva. Se viene utilizzata la quantità stechiometrica allora si avrà come risultato dello spegnimento, la calce idrata; se si utilizza una quantità di acqua in eccesso (fino a 3 volte il peso di CaO) si ottiene il grassello di calce. La differenza, invece, tra la calce idrata in pasta e il grassello di calce sta nella quantità di acqua libera e nella diversa maturazione. Il grassello, infatti, è ottenuto dalla lunga maturazione in eccesso di acqua; durante questo periodo, che va da alcuni mesi a più di un anno, i cristalli di idrossido di calcio cambiano forma e dimensione, aumentando la plasticità e la lavorabilità della calce. Dunque, quando si miscela la calce idrata in polvere con acqua (pari ad un terzo della sua massa) si realizza un impasto omogeneo che può essere subito utilizzato come pasta di calce idrata, mentre il grassello deve maturare in ambiente anaerobico per lungo tempo. Quando l'acqua viene aggiunta in forte eccesso (più di 5 l/kg) si ottiene una sospensione²⁵ acquosa, lattiginosa e basica, detta *crema di calce* o *latte di calce* in relazione a densità e consistenza. Se viene lasciata sedimentare completamente, si divide in due strati, quello superiore costituisce l'acqua di calce (soluzione limpida acquosa e satura di idrossido di calcio), quello inferiore è costituito da una pasta compatta che, dopo la maturazione, diventerà grassello. Il grassello si presenta come una pasta bianca, morbida, di consistenza plastica e untuosa al tatto con comportamento tixotropico²⁶ [Rattazzi 2007].

Gesso

Ai leganti aerei appartiene, come abbiamo detto, anche il gesso, anche se il suo processo di indurimento non dipende dalla presenza di aria o di anidride carbonica, indispensabile per l'indurimento della calce. In questo caso si parla di legante aereo perché il gesso biidrato non rimane stabile a contatto con l'acqua per via della sua solubilità.

²⁵ Sospensione: miscela in cui un materiale solido, finemente suddiviso, è disperso in un altro materiale, più liquido, in modo tale da non sedimentare in tempi brevi. Essa si presenta come una miscela torbida e opaca.

²⁶ Tixotropia: proprietà di alcuni gel di passare allo stato liquido per effetto di semplice agitazione o sotto l'azione di vibrazioni, per poi tornare a coagulare non appena l'azione perturbatrice cessa.

Il gesso deriva dalla pietra da gesso, roccia sedimentaria di origine chimica costituita da solfato di calcio biidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cotta a temperature abbastanza basse; una volta macinato e miscelato con acqua diventa un impasto molto lavorabile che indurisce in pochi minuti. Il gesso è costituito da solfato di calcio emidrato o anidro che in presenza di acqua si idrata formando solfato biidrato, simile alla materia iniziale. Al variare della temperatura di cottura si ottengono prodotti diversi.

Dalla cottura di rocce da gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) si può ottenere:

- Gesso emidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$): temperatura di cottura 125-128°C;
- Anidrite α (CaSO_4): temperatura di cottura 165-180°C;
- Anidrite β (CaSO_4): temperatura di cottura 300°C;
- Anidrite $\alpha + \text{CaO}$: ($\text{CaSO}_4 + \text{CaO}$): temperatura di cottura 300°C.

1.3.2 I LEGANTI IDRAULICI

I leganti idraulici si caratterizzano per il fatto che induriscono a seguito della loro reazione con l'acqua di impasto per creare composti stabili anche sott'acqua, quindi richiedono come elemento reattivo indispensabile l'acqua per dar luogo al processo di presa e indurimento da cui si ottengono prodotti insolubili. Questa proprietà di indurire anche in acqua è dovuta alla formazione di composti idrati a partire da silicati, alluminati e ferriti di calcio presenti nel legante. Alla categoria dei leganti idraulici appartengono le calce idrauliche²⁷ e i cementi.

Calce idraulica

La calce idraulica è prodotta artificialmente dall'uomo dalla cottura (calcinazione) di pietre calcaree contenenti minerali argillosi o silicei in percentuale compresa tra il 5 e il 20% del peso. La caratteristica idraulicità di queste calce dipende, appunto, dalla presenza di silice (SiO_2) e allumina (Al_2O_3), le quali durante la cottura reagiscono con l'ossido di calcio (CaO) producendo silicati e alluminati di calcio che, impastati con acqua, induriscono.

La calce idraulica, quindi, è ottenuta dalla calcinazione a relativamente bassa temperatura (900-1200°C) di pietre dette calcari marnosi, ovvero carbonati aventi quantità variabili di argilla al loro interno. Le diverse quantità di argilla all'interno della materia prima conferi-

27 Calce con proprietà idrauliche [UNI EN 459-1:2015]: Calce da costruzione costituita prevalentemente da idrossido di calcio, silicati di calcio e alluminati di calcio. Possiede la proprietà di far presa e indurire sotto l'acqua e/o quando miscelata con acqua. La reazione a contatto con il biossido di carbonio presente nell'atmosfera contribuisce al processo di indurimento. La calce con proprietà idrauliche è suddivisa in tre sottofamiglie: calce idraulica naturale (NHI), calce formulata (FL), calce idraulica (HI).

scono differenti caratteristiche al prodotto finale che può essere più o meno idraulico.

Durante la cottura la frazione carbonatica della pietra si dissocia in ossido di calcio e anidride carbonica che si libera (come avviene nelle calci aeree), mentre la frazione argillosa si trasforma in silicato bicalcico (belite) e alluminato tricalcico reagendo con il carbonato e l'ossido di calcio. Dopo la cottura avviene la fase di spegnimento, molto delicata perché si deve irrorare le zolle con una quantità d'acqua sufficiente ad idratare solo la parte di calce area (gli ossidi) senza attivare i silicati e gli alluminati che altrimenti inizierebbero la loro fase di presa idraulica.

Le sottofamiglie della calce idraulica, come scritto nella norma UNI EN 459-1, sono:

- **Calce idraulica naturale (NHL):** ottenute dalla cottura di materie prime che in natura presentano una composizione tale da ottenere queste calci. *È ottenuta dalla cottura di calcari più o meno argillosi o silicei (compreso il gesso) con successiva riduzione in polvere mediante spegnimento con o senza macinazione. Le proprietà idrauliche risultano esclusivamente dalla speciale composizione chimica della materia prima naturale* [UNI EN 459-1:2015]. La calce idraulica naturale, è designata come NHL ed è classificata in conformità alla rispettiva classe di resistenza a compressione (2; 3,5; 5)
- **Calce formulata (FL):** *è una calce con proprietà idrauliche costituita prevalentemente da calce aerea (CL) e/o calce idraulica naturale (NHL) con l'aggiunta di materiale idraulico e/o pozzolanico* [UNI EN 459-1:2015]. La calce formulata è designata come FL ed è classificata in conformità al rispettivo contenuto di calce libera Ca(OH)_2 (A, B, C), alla classe di resistenza (2; 3,5; 5) e alla composizione.
- **Calce idraulica (HL):** *è un legante costituito prevalentemente da calce e altri materiale come cemento, loppa d'altoforno, ceneri volanti, filler calcareo e altri materiali idonei* [UNI EN 459-1:2015]. La calce idraulica è designata come HL ed è classificata in conformità alla rispettiva classe di resistenza a compressione (2; 3,5; 5).

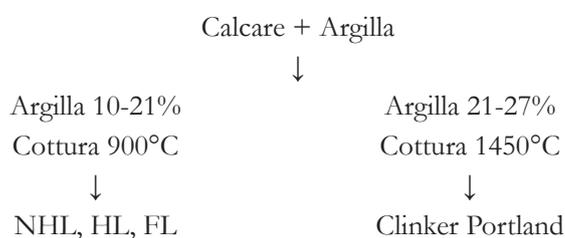
Cemento

Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che quando mescolato con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua. Il cemento [...] CEM²⁸, opportunamente dosato e miscelato con aggregato e acqua, deve essere in grado di produrre un calcestruzzo o una malta capace di conservare la lavorabilità per un periodo di tempo sufficiente e di raggiungere, dopo determinati periodi, livelli di resistenza meccanica prestabiliti nonché di possedere una stabilità

28 Si definisce cemento CEM il cemento conforme alla norma UNI EN 197-1:2011

di volume a lungo termine²⁹.

Il cemento più conosciuto è il cemento Portland che si ottiene dalla macinazione del clinker Portland con l'aggiunta di piccole quantità di gesso che ha la funzione di regolarne la presa. Il clinker, che costituisce la matrice idraulica, si ottiene dalla cottura di una miscela di rocce calcaree e argilla a temperature che si aggirano tra i 1400 e i 1450°C. Le rocce sedimentarie, da cui deriva il clinker, devono essere costituite di carbonato di calcio e da una percentuale (21-27%) di argilla. Il nome cemento Portland venne usato per la prima volta dal capomastro Joseph Aspdin che nel 1824 brevettò questo cemento. Aspdin scelse questo nome perché la pietra artificiale che si creava assomigliava alla pregiata pietra da costruzione della penisola di Portland.



Acqua e cemento, mescolati in proporzioni opportune, danno luogo a un impasto, chiamato *pasta cementizia*, plastico e lavorabile inizialmente, che però fa presa entro poche ore e indurisce nel giro di un mese. Le differenze principali tra il cemento e le calce idrauliche stanno nella percentuale di argilla che contengono le rocce da cui derivano e la loro temperatura di cottura.

La UNI EN 197-1:2011 prevede 5 tipi di cemento (I, II, III, IV, V) caratterizzati dalla percentuale decrescente di clinker, 27 sottotipi e 6 classi di resistenza (fig. 10):

CEM I- Cemento Portland: percentuale di clinker pari ad almeno il 95%;

CEM II- Cemento Portland composito (previsti 19 sottotipi): percentuale di clinker di almeno il 65%. Inoltre, a seconda della percentuale del costituente utilizzato in combinazione del clinker Portland si hanno le sottocategorie A (6-20%) e B (21-35%). Queste sono seguite da un'altra lettera in base alla natura di tale aggiunta, e quindi avremo: S (loppa d'altoforno), P (pozzolana naturale), Q (pozzolana naturale calcinata), V/W (cenere volante silicica/calce), T (scisto calcinato), L-LL (calcare), D (microsilice, in aggiunta al solo CEM II-A), M (composito, almeno due tipi diversi di aggiunte).

CEM III- Cemento d'altoforno (previsti 3 sottotipi): con una percentuale di loppa d'altoforno (S) dal 36 al 95%. CEM III-A (36-65%), CEM III-B (66-80%), CEM III-C (81-95%).

CEM IV- Cemento pozzolanico (previsti 2 sottotipi): ottenuto per miscela di clinker con microsilice, pozzolana naturale, pozzolana calcinata, ceneri volanti di tipo silicico, ceneri volanti di tipo calcico. I sottotipi si classificano in base alla percentuale delle aggiunte:

29 UNI EN 197-1:2011

CEM IV-A (11-35%), CEM IV-B (36-55%). Le aggiunte devono essere inferiori al 55% perché, oltre questo limite, la quantità di calce proveniente dall'idratazione del clinker non sarebbe sufficiente a garantire la reazione pozzolanica e parte del materiale pozzolanico rimarrebbe nell'impasto come inerte senza contribuire alle prestazioni meccaniche.

CEM V- Cemento composito (previsti 2 sottotipi): è ottenuto per aggiunta di clinker Portland, loppa d'altoforno e materiale pozzolanico. I due sottotipi si classificano in base alla percentuale di aggiunte: CEM V-A (16-30%), CEM V-B (31-50%).

Ognuno dei tipi e sottotipi previsti dalla normativa sono disponibili in 3 classi di **resistenza normalizzata**³⁰: classe 32,5, classe 42,5 e classe 52,5. Per ogni classe di resistenza normalizzata sono definite tre classi di **resistenza iniziale**³¹: classe di resistenza iniziale ordinaria, contrassegnata dalla lettera N; classe di resistenza iniziale elevata, contrassegnata dalla lettera R; e una classe di resistenza iniziale bassa, contrassegnata dalla lettera L. La classe L si applica solo ai CEM III poiché i cementi d'altoforno sono contraddistinti da una bassa resistenza iniziale.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa ^{a)})										Costituisce secondi	
			Costituenti principali											
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare			
						naturale	naturale calcinata	silicea	calcareea		L	LL		
K	S	d ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		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 alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		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 alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		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 allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		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 composito ^{c)}	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 -----→									0-5		
	CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 -----→									0-5		
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{d)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→							0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→							0-5		
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→						0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 -----→						0-5		

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
 b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
 c) Nei cementi Portland composti CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A

Fig. 10 - Prospetto 1 della UNI 197-1:2011

30 La resistenza normalizzata di un cemento è la resistenza a compressione a 28 giorni, determinata in conformità alla EN 196-1.
 31 La resistenza iniziale di un cemento è la resistenza meccanica a compressione determinata a 2 o 7 giorni in conformità alla EN 196-1.

2. LE MALTE

La malta è un impasto composto di più materiali, in generale è formato da una matrice continua, rappresentata dal legante, e da uno scheletro discontinuo, rappresentato dall'aggregato; il tutto impastato con una quantità opportuna di acqua. La norma UNI EN 998 (parte 1 e 2) definisce la malta come "[...]una miscela di uno o più leganti inorganici, aggregati, acqua ed eventualmente additivi e/o aggiunte [...]". Come esplicitato dalla norma, le malte, oltre ad essere costituite dai materiali base (legante e aggregato), possono contenere uno o più tipi di additivi, organici o inorganici, con lo scopo di modificare alcune caratteristiche o proprietà delle malte per ottenere specifiche prestazioni o effetti estetici in fase di impasto o di indurimento.

La differenza tra *calce* e malta sta nel fatto che la seconda si ottiene con l'aggiunta di aggregato che ha la funzione, oltre che di ridurre i costi (i leganti sono più onerosi degli aggregati), di contrastarne il ritiro, quella contrazione di volume tipica della calce in fase di presa e indurimento, che può portare a crepe e fessure.

Le malte hanno caratteristiche e proprietà diverse che dipendono dal tipo e dalla qualità del legante, dalla natura e dalla granulometria dell'aggregato e dalle proporzioni con cui vengono miscelati questi due materiali; inoltre, dipendono dalla presenza o meno di additivi e dalla loro tipologia, e infine dalle modalità e condizioni di esecuzione. A seconda delle caratteristiche che si ottengono, le malte possono essere utilizzate per murature, per intonaci, per sottofondi o anche per elementi decorativi¹. Le caratteristiche principali delle malte sono prima di tutto la capacità di legare più elementi, come nel caso delle malte di allettamento che hanno la funzione di legare gli elementi di una muratura o gli elementi di un rivestimento al loro supporto; hanno la capacità di adattarsi a una forma e mantenerla nel tempo: questa caratteristica è sfruttata ogni qualvolta si voglia riempire un vuoto all'interno di spazi confinati. Infine, le malte sono facilmente lavorabili essendo degli impasti plastici (per un determinato tempo) e questo rende favorevole il loro utilizzo in cantiere. Le prime due proprietà delle malte, ovvero la capacità di legare e di riempire un vuoto, non sarebbero così importanti se, dopo l'indurimento, non raggiungessero una resistenza meccanica paragonabile a quella di alcuni mattoni o pietre [Vecchiattini 2009], anche se in alcuni casi è opportuno utilizzare malte e conglomerati con resistenze meccaniche paragonabili a quelle in opera.

Le malte possono essere classificate secondo criteri diversi a seconda della caratteristica che si vuole evidenziare; solitamente tale caratteristica è riferita al legante.

¹ UNI 10924:2001. Beni culturali. Malte per elementi costruttivi e decorativi. Classificazione e terminologia.

Si avrà, quindi, una classificazione in base:

- **alla natura del legante:** malte aeree (in cui il legante è di tipo aereo: gesso calce aerea) e malte idrauliche (in cui il legante è di tipo idraulico: calce idraulica, calce idraulica naturale o calce formulata, cemento);
- **al tipo di legante utilizzato:** malte di gesso, malte di calce aerea, malte di calce idraulica, malte di cemento, malte miste o bastarde (costituite da una miscela di calci aeree e/o idrauliche e di calci e cemento). Per essere considerate miste è necessario che le malte siano costituite da due leganti impiegati in quantità confrontabili tra loro in modo che entrambi influiscano sulle caratteristiche e sulle proprietà della malta;
- **al rapporto legante/aggregato:** malte *grasse*, in cui la quantità di legante eccede il volume dei vuoti della sabbia; malte *magre*, in cui prevale la quantità di aggregato e la quantità di legante non è sufficiente a riempire i vuoti della sabbia;
- **alla loro funzione nel sistema costruttivo:** malte di allettamento (utilizzate per legare elementi di una muratura o per posare elementi di rivestimento orizzontali), malte da rivestimento (utilizzate per gli intonaci, interni o esterni, per realizzare un rivestimento decorativo, ecc.), malte da decorazione (utilizzate per gli stucchi), oppure malte per operazioni particolari come sigillare fessure, stuccare, ecc.

Quando si formula una malta è molto importante dosare bene i componenti; di solito si usa misurare le quantità in volume esprimendo la quantità di materiale in *parti*, ovvero il rapporto tra la quantità di aggregato e di legante.

La normativa di riferimento per le malte è:

- UNI EN 998-1:2016 - Malte per intonaci esterni ed interni
- UNI EN 998-2:2016 - Malte da muratura
- UNI EN 1015 (tutte le parti) - Metodi di prova per malte per opere murarie

2.1 PROCESSO DI PRODUZIONE

La prima parte del lavoro di tesi ha riguardato il confezionamento di una certa quantità di provini che, successivamente, al termine del processo di presa e indurimento, sono stati testati con lo scopo di valutarne, tramite prove sperimentali, il modulo elastico dinamico (tramite prova a ultrasuoni) e il modulo elastico statico (tramite prova distruttiva a compressione).

Questo lavoro si inserisce nell'ambito degli studi sui problemi di conservazione degli edifici, per questo la scelta del tipo di malta e della sua applicazione deve tenere in considerazione non solo gli aspetti estetici di colore, grana, ecc., ma anche gli aspetti di compor-

tamento meccanico. Diventa, quindi, fondamentale conoscere le caratteristiche fisico-mecchaniche del materiale usato per le integrazioni oltre che di quello preesistente, al fine di valutare nel tempo l'efficacia e la durabilità degli interventi di manutenzione, integrazione, consolidamento. Per ottenere dei risultati efficaci e duraturi si deve arrivare a una buona affinità tra i materiali e a una buona omogeneità delle caratteristiche meccaniche, altrimenti si va incontro a un'amplificazione dei fenomeni di danneggiamento iniziali. L'obiettivo che si pone questa ricerca è quello di stabilire degli strumenti di valutazione e di controllo delle malte, utilizzabili dai professionisti che devono prendere delle decisioni sul tipo di intervento nel campo del recupero e della conservazione. Lo scopo, quindi, è quello di fornire valori caratteristici comparativi di differenti miscele di malte che possono essere utili per una prima selezione di malte da utilizzare nel campo del recupero. In particolare i risultati sperimentali riguardano l'analisi del comportamento meccanico delle malte.

La compatibilità meccanica delle malte è importante perché il nuovo materiale non deve trasmettere tensioni al vecchio, innescando stati di tensione, oltre un livello tale da contribuire alla sua fessurazione, delaminazione o rottura. Questo fenomeno viene controllato tramite il modulo elastico che non deve essere più alto del modulo elastico del materiale in opera².

Le malte sono state formulate con differenti leganti: cemento (Tipo II/B-P 32,5 R e 42,5), calce idraulica NHL 3,5 e grassello di calce. In alcuni casi sono stati aggiunti materiali a comportamento pozzolanico come il cocchiopesto. Il dosaggio e la granulometria dell'aggregato, invece, sono rimasti invariati in ogni formulazione, tranne in un paio di casi, in cui sarà specificato.

La produzione dei provini prevede varie fasi che saranno elencate e spiegate di seguito.

1. Preparazione dell'aggregato

Lo scheletro della malta è costituito dalla frazione discontinua rappresentata dall'aggregato. I provini sono stati confezionati tutti seguendo la curva granulometrica Diset 2 (fig. 11). Per suddividere la sabbia nelle varie classi granulometriche, è stato fatto uso di una setacciatura automatica (fig. 12) su cui sono stati montati i setacci con dimensione delle aperture conformi alla norma UNI EN 933-2.

L'operazione di setacciatura avviene posizionando una colonna di setacci, di maglia via via più piccola, su uno scuotitore meccanico.

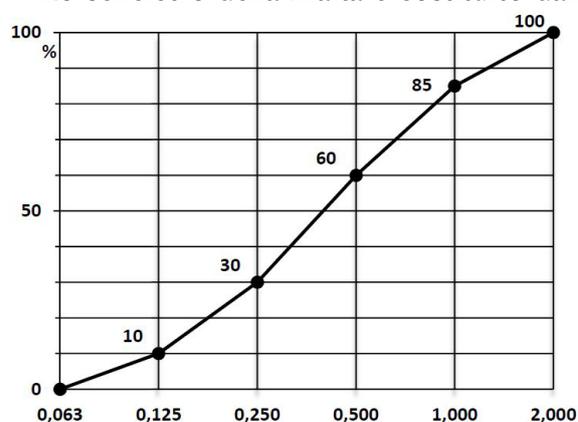


Fig.11 - Curva Diset 2

2 VEIGA, M.R., VELOSA, A.L., MAGALHÃES, A.C., *Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test*, 2007.



Fig. 12 - Setacciatrice utilizzata

Una data quantità di materiale viene adagiata nel setaccio più alto, che avrà le maglie di dimensioni maggiori e, dopo aver posizionato il coperchio viene attivata la setacciatrice. Le frazioni di solido trattenute da ciascun setaccio vengono conservate in contenitori diversi. Una volta ottenuta la quantità opportuna per ciascuna

MASSA VOLUMICA APPARENTE SABBIA						
CLASSE	Tara	Volume	Pesata 1	Pesata 2	Pesata 3	Massa Volumica Apparente Media
mm	g	cm ³	g	g	g	g/cm ³
0,063 ÷ 0,125	3,2	64	77,98	75,30	77,03	1,20
0,125 ÷ 0,250	3,2	64	76,86	77,09	77,49	1,21
0,250 ÷ 0,500	3,2	64	81,45	81,28	81,43	1,27
0,500 ÷ 1,000	3,2	64	85,84	86,67	85,20	1,34
1,000 ÷ 2,000	3,2	64	91,70	89,40	89,02	1,41

classe granulometrica si procede con il calcolo della massa volumica apparente di ciascuna di queste classi.

2. Calcolo massa volumica apparente

Al fine di poter calcolare in modo preciso le quantità di materiale per ogni impasto è necessario conoscere la massa volumica apparente dei leganti e degli aggregati utilizzati. L'operazione si svolge in varie fasi:

- si pesa un recipiente vuoto (di cui si conosce il volume V), pulito e asciutto determinando la sua massa che viene appuntata nella scheda dell'operatore (Tara);
- si colloca il recipiente su una superficie orizzontale e lo si riempie fino all'orlo del materiale di cui si vuole conoscere la massa volumica apparente. Appoggiando sul bordo superiore del recipiente una paletta si elimina il materiale in eccesso, assicurandosi che la superficie sia regolare e senza compattare il materiale;
- si pesa il recipiente pieno determinandone la sua massa (Pesata 1);
- si svuota e si pulisce il contenitore per svolgere la stessa operazione almeno altre due volte;
- al termine dell'ultima pesata si calcola la massa volumica apparente media del materiale con la seguente formula

$$\rho_{m,i} = [(Pesata1 + Pesata2 + Pesata3) - Tara] / V$$

Di seguito sono riportati i valori della massa volumica apparente di tutti i materiali utilizzati:

MASSA VOLUMICA APPARENTE						
MATERIALE	Tara	Volume	Pesata 1	Pesata 2	Pesata 3	Massa Volumica Apparente Media
	g	cm ³	g	g	g	g/cm ³
Calce idraulica NHL 3,5	3,2	64	43,68	44,65	44,10	0,690
Grassello di calce	3,2	64	90,20	92,80	100,85	1,478
Cemento Portland 32,5	3,2	64	60,13	61,34	61,46	0,953
Cemento Portland 42,5	3,2	64	64,10	62,92	63,37	0,992

MASSA VOLUMICA APPARENTE PERLITE						
CLASSE	Tara	Volume	Pesata 1	Pesata 2	Pesata 3	Massa Volumica Apparente Media
mm	g	cm ³	g	g	g	g/cm ³
0,063 ÷ 0,125	3,2	64	68,84	68,47	71,09	1,09
0,125 ÷ 0,250	3,2	64	70,82	73,71	70,28	1,12
0,250 ÷ 0,500	3,2	64	73,91	73,95	73,05	1,15

MASSA VOLUMICA APPARENTE COCCIO PESTO						
CLASSE	Tara	Volume	Pesata 1	Pesata 2	Pesata 3	Massa Volumica Apparente Media
mm	g	cm ³	g	g	g	g/cm ³
0,063 ÷ 0,125	3,2	64	55,13	53,13	52,55	0,84
0,125 ÷ 0,250	3,2	64	51,92	52,34	52,21	0,81
0,250 ÷ 0,500	3,2	64	49,05	50,37	49,85	0,78

3. Preparazione degli stampi metallici

Per confezionare i provini si utilizzano degli stampi metallici normalizzati. Gli stampi (fig. 13) sono descritti dalla norma UNI EN 1015-11:2007 e sono costituiti da un telaio aperto di elementi removibili formanti, quando assemblati, tre scomparti.

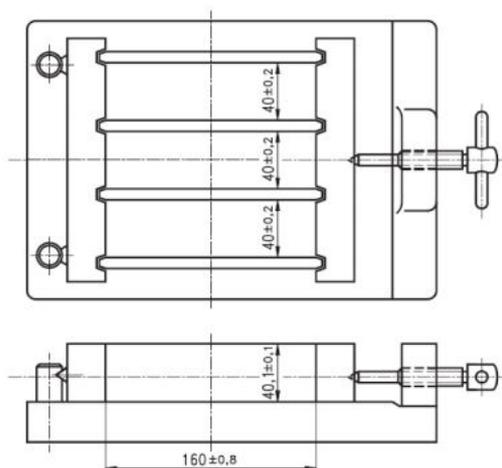


Fig. 13 - Schema stampi UNI EN 1015-11:2007

La norma specifica che le pareti divisorie devono essere spesse almeno 8 mm e abbastanza rigide da prevenire distorsioni o danni ai campioni al momento della rimozione.

Il telaio dello stampo assemblato deve essere saldamente fissato a una piastra base rigida per mezzo di viti di ritegno in modo da formare un insieme a tenuta d'acqua quando viene ingrassato.

Tra gli altri requisiti³ elencati nella norma riportiamo le dimensioni che devono avere gli stampi: profondità e larghezza interna di ciascun comparto ($40\pm 0,1$) mm e la lunghezza di ciascun comparto ($160\pm 0,4$) mm.

Gli stampi, prima di essere riempiti con la malta fresca, devono essere puliti e lubrificati con olio minerale per prevenire l'adesione della malta a seguito della presa e dell'indurimento.



Fig. 14 - Stampi metallici

4. Preparazione della miscela

Una volta compiute le operazioni preliminari, si può procedere con la preparazione della malta. Come abbiamo detto in precedenza, ci sono varie tipologie di malte: aeree, idrauliche, cementizie, ecc. Una volta deciso che tipo di malta formulare, non resta che impastare i materiali nelle opportune quantità. Si illustra il procedimento adottato, a titolo di esempio per un tipo di malta.

Posto che si debbano confezionare 6 provini di malta idraulica identificata con il codice G1 (malta composta da 3 parti di sabbia e 1 parte di calce idraulica NHL3,5), si procede come segue:

- si calcola il volume totale dei provini ($V=1536 \text{ cm}^3$), questo corrisponderà al volume di sabbia (3 parti);
- si calcola il volume di legante (1 parte= 512 cm^3);
- si moltiplicano i volumi per le rispettive masse volumiche apparenti e si ottiene la quantità (in massa) di materiale necessario. Per quanto riguarda la sabbia è possibile procedere in due modi: (a) si suddivide il volume totale (1536 cm^3) nelle varie classi granulometriche con le percentuali della curva DISET 2 e poi si moltiplica ciascuna classe per la propria massa volumica apparente (vedi tabella a pagina seguente); oppure (b) si prepara una certa quantità di sabbia seguendo sempre la curva DISET 2, e poi con l'operazione di quartatura⁴ si preleva la quantità necessaria di aggregato.
- si pesa una certa quantità di acqua che sarà utilizzata per l'impasto.
- poi, si collocano i materiali in un contenitore e si comincia a impastarli aggiungendo poca acqua alla volta finché non si arriva alla consistenza desiderata. L'impasto deve essere plastico e perfettamente omogeneo.
- infine si annota la quantità di acqua utilizzata per ciascuna miscela.

3 Elencati nella norma UNI EN 1015-11:2007

4 Normalizzata nella norma UNI EN 932-2:2000. Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati. Metodi per la riduzione dei campioni di laboratorio. L'operazione di quartatura è descritta al punto 10.

MALTA IDRAULICA G1						
Materiali	Classe mm	Parti -	%	Volume cm ³	ρ g/cm ³	Massa g
Sabbia	0,063 ÷ 0,125	3	10	160	1,20	192
	0,125 ÷ 0,250		20	320	1,21	387,2
	0,250 ÷ 0,500		30	480	1,27	609,6
	0,500 ÷ 1,000		25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
Calce idraulica NHL 3,5	-	1	-	533,33	0,69	368



Fig. 15 - Attrezzatura necessaria



Fig. 16 - Preparazione dei materiali

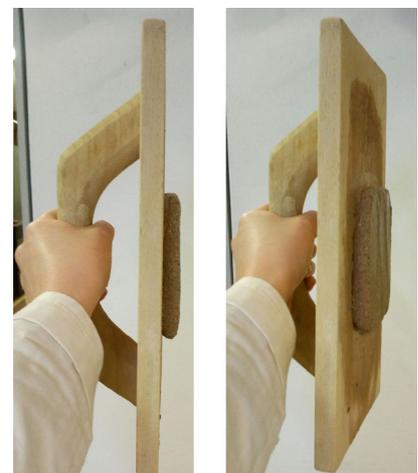


Fig. 17 - Metodo empirico per verificare la giusta consistenza

5. Colata nello stampo

Una volta preparata la malta, deve essere colata negli stampi. La malta deve raggiungere ogni angolo dello stampo e deve essere compattata con l'ausilio dell'attrezzatura adeguata in modo da ridurre al massimo i vuoti d'aria all'interno; inoltre è necessario lisciare bene la superficie che è la prima parte soggetta ad asciugatura (fig.18).

I provini devono stare all'interno degli stampi finché non si è conclusa la fase di presa che ha una durata diversa a seconda del tipo di malta. La presa è il primo stadio dell'azione legante ed è caratterizzata dalla perdita di lavorabilità, plasticità e deformabilità e conferisce alla malta una certa rigidità, senza che si sviluppi una vera e propria resistenza meccanica. Questa fase può durare da alcune ore ad alcuni



Fig. 18 - Colata nello stampo

giorni in funzione del tipo di malta e delle condizioni climatiche (temperatura e umidità). Al termine della fase di presa i provini possono essere rimossi dagli stampi in quanto sono in grado di mantenere la forma data. A questo punto sono riposti in modo che possano concludere la fase di indurimento per acquisire tutte le loro caratteristiche meccaniche (fig.19). Anche il tempo di indurimento varia notevolmente in base alla natura della malta.



Fig. 19 - Provini rimossi dagli stampi

		COMPOSIZIONE						
		AGGREGATI			LEGANTI			
		SABBIA SILICEA DI CAVA	COCCIOPESTO	PERLITE	GRASSELLO DI CALCE	CALCE IDRAULICA NHL3,5	CEMENTO PORTLAND 32,5	CEMENTO PORTLAND 42,5
MALTA DI SABBIA E CALCE IDRAULICA	G1	3				1		
	G2	2,5				1		
	G3	12			1	3		
MALTA DI SABBIA E CEMENTO 32,5	H1	3				1		
	H2	12			2	2		
	H3	12			1	3		
	H4	12			3	1		
MALTA DI SABBIA E CEMENTO 42,5	H1	3					1	
	H2	12			2		2	
	H3	12			1		3	
	H4	12			3		1	
MALTA DI SABBIA/COCCIOPESTO E GRASSELLO	I1	3	100% VF		1			
MALTA DI SABBIA/PERLITE E GRASSELLO	L1	3		100% VF	1			
	L2	2		100% VF	1			
	L3	2,5		100% VF	1			

2.2 DESCRIZIONE DELLE MALTE FORMULATE

Nei paragrafi che seguono saranno descritte le malte che sono state formulate (si veda tabella a pagine precedente), la loro composizione e le loro caratteristiche. Per ogni miscela sono stati confezionati 6 provini di dimensioni normalizzate (40x40x160) mm, come richiesto dalla norma UNI EN 1015-11:2007 e 6 provini di dimensioni non standard (30x30x300) mm.

2.2.1 MALTE IDRAULICHE - G

Le malte idrauliche sono costituite da calce idraulica (naturale o artificiale), sabbia e acqua. In un caso è stata aggiunta una parte di grassello di calce per dare più plasticità alla malta e aumentarne la scorrevolezza dell'impasto. Le malte a base di calce idraulica sono utilizzate quando viene richiesta una certa resistenza sia alle sollecitazioni meccaniche che agli agenti atmosferici e quando sono necessari tempi di presa e indurimento più brevi rispetto alle malte a base di calce aerea. La calce idraulica utilizzata è la NHL 3,5 della ditta Calceforte, di cui si allega la scheda tecnica in APPENDICE C.

Di seguito si riportano le tipologie di malta miscelate con questa calce e le quantità utilizzate per il confezionamento di 6 provini di dimensioni normalizzate.

CODICE MALTA - G1				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	1600	Vedi curva DISET 2	
NHL 3,5	1	533	0,69	368
Acqua				469

CODICE MALTA - G2				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	2,5	1600	Vedi curva DISET 2	
NHL 3,5	1	640	0,69	441
Acqua				472

CODICE MALTA - G3				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
NHL 3,5	3	400	0,69	276
GRASSELLO DI CALCE	1	133	1,48	197
Acqua				472

2.2.2 MALTE CEMENTIZIE E BASTARDE - H

Per il confezionamento delle malte cementizie e delle malte bastarde è stato usato il cemento della ditta Buzzi Unicem: Tipo II/B-P 32,5R e 42,5R. La malta cementizia è una malta che ha come unico legante il cemento; la malta bastarda, invece, è una malta costituita da due leganti di solito confezionata per "esaltare" le caratteristiche di entrambi. Ovviamente le quantità dei due leganti devono essere confrontabili, se una è prevalente rispetto all'altra le caratteristiche della malta non saranno influenzate dalla presenza del secondo legante. Nel nostro caso il secondo legante è rappresentato dal grassello di calce.

CODICE MALTA - H1				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 32,5 R	1	533	0,95	508
Acqua				463

CODICE MALTA - H2				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 32,5 R	2	267	0,95	184
GRASSELLO DI CALCE	2	267	1,48	394
Acqua				224

CODICE MALTA - H3				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 32,5 R	3	400	0,95	381
GRASSELLO DI CALCE	1	133	1,48	197
Acqua				392

CODICE MALTA - H4				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 32,5 R	1	133	0,95	127
GRASSELLO DI CALCE	3	400	1,48	591
Acqua				184

CODICE MALTA - H5				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	3	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 42,5 R	1	533	0,99	529
Acqua				449

CODICE MALTA - H6				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 42,5 R	2	267	0,99	265
GRASSELLO DI CALCE	2	267	1,48	394
Acqua				261

CODICE MALTA - H7				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 42,5 R	3	400	0,99	396
GRASSELLO DI CALCE	1	133	1,48	197
Acqua				345

CODICE MALTA - H8				
	PARTI	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
SABBIA	12	1600	Vedi curva DISET 2	
CEMENTO 42,5 R	1	133	0,99	132
GRASSELLO DI CALCE	3	400	1,48	591
Acqua				155

2.2.3 MALTE DI SABBIA/COCCIOPESTO E GRASSELLO DI CALCE - I

Questa malta aerea è stata formulata sostituendo il 100% del volume dei fini (<0,500 mm) della sabbia con il cocchio pesto della ditta Sinopia (scheda tecnica in APPENDICE C). Il

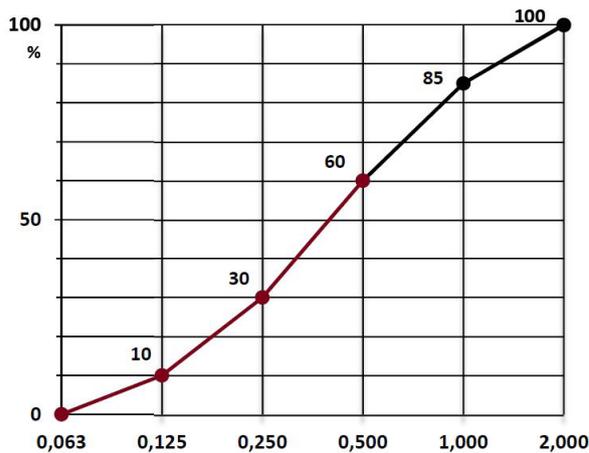


Fig. 20 - Curva Diset 2, sostituzione dei fini con il cocchiopesto

prodotto utilizzato deriva dalla macinazione di mattoni cotti e tegole; la presenza di questo materiale conferisce alla malta debole idraulicità e leggerezza. Le malte di cocchiopesto erano utilizzate in età romana come impermeabilizzante poiché avevano ottime proprietà idrauliche e ottime capacità traspiranti.

Il cocchiopesto essendo un materiale molto poroso tende ad assorbire acqua, in questo caso l'acqua di impasto. È molto importante, quindi, che il cocchio pesto si trovi nella condizione di saturo a superficie asciutta (*saturated and surface-dry*)⁵, in modo tale che

non vari la quantità di acqua di impasto. Le quattro condizioni in cui può trovarsi un aggregato sono: asciutto, insaturo, saturo a superficie asciutta (s.s.a.), umido; ma la condizione in cui si trova all'interno di un impasto è sempre di s.s.a. Quindi, se l'aggregato è umido, l'acqua in eccesso presente sulla superficie viene ceduta all'impasto cosicché all'acqua di impasto deve essere aggiunta anche l'umidità dell'aggregato. Se, viceversa, l'aggregato è asciutto o insaturo, assorbe parte dell'acqua di impasto fino a saturare le porosità aperte, cioè fino a portarsi nella condizione di s.s.a., cosicché all'acqua di impasto deve essere sottratta quella necessaria a portare l'aggregato da saturo a superficie asciutta. Se, invece, l'aggregato si trova nella condizione di saturo a superficie asciutta, l'acqua contenuta nei pori non prende parte al processo di idratazione⁶. Detto questo, si capisce l'importanza di controllare l'umidità del cocchiopesto e di accertare che sia nella condizione di s.s.a. se si vuole mantenere costante la quantità d'acqua di impasto.

Prima di impastare la malta di cocchiopesto è stato, quindi, necessario portarlo alla condizione di saturo superficie asciutta bagnando a poco a poco le tre classi granulometriche interessate separatamente, poiché la diversa dimensione dei granuli influisce sul grado di porosità. Una volta raggiunta questa condizione si è proceduto con l'impasto aggiungendo la sabbia e il grassello di calce nelle quantità stabilite.

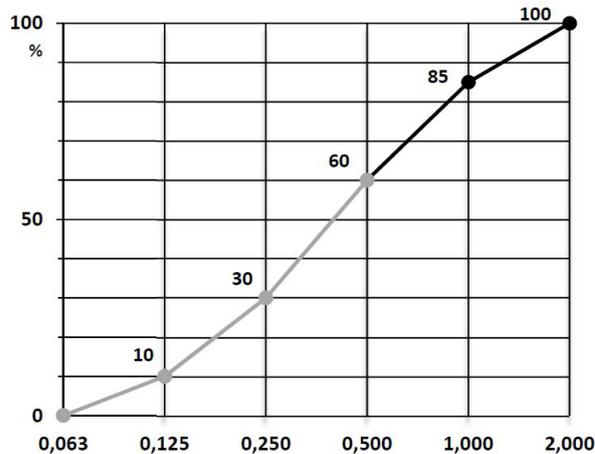
5 NEVILLE A. M., *Properties of concrete fourth edition*, p.128-132

6 COLLEPARDI M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, p. 273

CODICE MALTA - I1						
	CLASSE [mm]	PARTI	%	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
COCCIO PESTO	0,063 ÷ 0,125	3	10	160	0,84	134
	0,125 ÷ 0,250		20	320	0,81	259
	0,250 ÷ 0,500		30	480	0,78	374
SABBIA	0,500 ÷ 1,000	3	25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
GRASSELLO DI CALCE	-	1	-	533	1,48	788
Acqua						-

2.2.4 MALTE DI SABBIA/PERLITE E GRASSELLO DI CALCE - L

Questa malta aerea è stata formulata sostituendo il 100% del volume dei fini (<0,500 mm) della sabbia con la perlite cruda della ditta Perlite Italiana (scheda tecnica in APPENDICE C).



Le considerazioni che si possono fare sono le seguenti: gli impasti con il codice L2 e L3 hanno presentato, in fase di presa, crepe e fessure dovute al ritiro (figg. 21 e 22). Evidentemente la quantità di grassello di calce in questi impasti era eccessivo. Si è, dunque, deciso di provare a miscelare anche un impasto L4 che presenta un rapporto aggregato/legante maggiore (4:1). Nelle figure sotto sono riportate le immagini dei provini fessurati.



Fig.21 e 22 - Fessure da ritiro

CODICE MALTA - L1						
	CLASSE [mm]	PARTI	%	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
PERLITE	0,063 ÷ 0,125	3	10	160	1,09	167
	0,125 ÷ 0,250		20	320	1,12	344
	0,250 ÷ 0,500		30	480	1,15	529
SABBIA	0,500 ÷ 1,000	3	25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
GRASSELLO DI CALCE	-	1	-	533	1,48	788
Acqua						82

CODICE MALTA - L2						
	CLASSE [mm]	PARTI	%	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
PERLITE	0,063 ÷ 0,125	2,5	10	160	1,09	167
	0,125 ÷ 0,250		20	320	1,12	344
	0,250 ÷ 0,500		30	480	1,15	529
SABBIA	0,500 ÷ 1,000	2,5	25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
GRASSELLO DI CALCE	-	1	-	640	1,48	946
Acqua						43,7

CODICE MALTA - L3						
	CLASSE [mm]	PARTI	%	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
PERLITE	0,063 ÷ 0,125	2	10	160	1,09	167
	0,125 ÷ 0,250		20	320	1,12	344
	0,250 ÷ 0,500		30	480	1,15	529
SABBIA	0,500 ÷ 1,000	2	25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
GRASSELLO DI CALCE	-	1	-	800	1,48	946
Acqua						0

CODICE MALTA - L4						
	CLASSE [mm]	PARTI	%	VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [g/cm ³]	MASSA [g]
PERLITE	0,063 ÷ 0,125	4	10	160	1,09	167
	0,125 ÷ 0,250		20	320	1,12	344
	0,250 ÷ 0,500		30	480	1,15	529
SABBIA	0,500 ÷ 1,000	4	25	400	1,34	536
	1,000 ÷ 2,000		15	240	1,41	336
GRASSELLO DI CALCE	-	1	-	533	1,48	788
Acqua						107

3. DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI

DEFINIZIONE DEL MODULO ELASTICO DINAMICO

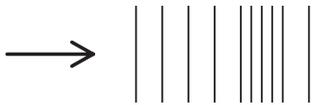
La prova a ultrasuoni fa parte delle prove non distruttive, ovverosia di quelle prove che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame; queste prove sono finalizzate alla ricerca e all'identificazione dei difetti nella struttura stessa oppure alla determinazione di talune caratteristiche.

Il suono è un'oscillazione, cioè un movimento nello spazio, compiuta dalle particelle in un mezzo; è un'onda elastica, quindi comporta delle deformazioni reversibili. Anche gli ultrasuoni sono onde meccaniche elastiche, ma differiscono dai suoni per le frequenze, che sono superiori a quelle che caratterizzano il fenomeno sonoro; per questo si chiamano ultrasuoni, cioè *al di là del suono*, ovvero oltre il fenomeno fisico udibile dall'essere umano. La frequenza di 20 kHz divide convenzionalmente le onde soniche da quelle ultrasoniche. Gli ultrasuoni si propagano meglio nei solidi e non si propagano affatto nel vuoto e dal punto di vista fisico sono alterazioni reversibili del mezzo attraversato.



Le onde elastiche si suddividono in due grandi famiglie:

1. **Onde di volume** (o di corpo): sono onde che si propagano all'interno dei corpi e si suddividono a loro volta in:

- Onde P (primarie): onde longitudinali, ovvero onde che si propagano nella stessa direzione della perturbazione e si propagano più velocemente delle onde trasversali; 
- Onde S (secondarie): onde trasversali (o fessurali o di taglio), quindi la direzione di vibrazione delle particelle è perpendicolare alla direzione del moto. Si propagano solo nei solidi poiché liquidi e gas non hanno resistenza a taglio. 

2. **Onde di superficie**: sono onde che si originano nei pressi della superficie di separazione tra due mezzi diversi e derivano dalla composizione di onde longitudinali e trasversali; il moto delle particelle, in generale è di tipo ellittico. Tra le onde ultrasoniche superficiali possiamo avere le onde di Rayleigh o le onde di Lamb.

Come tutti i fenomeni ondulatori, anche gli ultrasuoni sono soggetti a fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione. I parametri che caratterizzano la propagazione degli ultrasuoni sono¹:

- **frequenza** f : numero di cicli (oscillazioni) nell'unità di tempo. L'unità di misura della frequenza è l'Hertz (Hz). Il tempo che un'onda impiega a compiere un ciclo si chiama periodo (T), quindi vale la relazione $f=1/T$
- **lunghezza d'onda** λ : è la distanza tra due massimi di pressione e di solito viene misurata in mm. È legata alla frequenza con la seguente relazione $\lambda=v/f$
- **velocità di propagazione** v : è lo spazio percorso dal fronte d'onda nell'unità di tempo. Viene espressa in m/s e dipende solo dalla densità del materiale e dalle costanti elastiche. La velocità di propagazione si calcola come $v=\sqrt{E/\rho}$
- **intensità** I : è il flusso di energia che si trasmette nell'unità di tempo attraverso un'area unitaria normale ad esso. L'intensità si misura come $I=P^2/2Z$
- **impedenza acustica** Z : dipende solo dalle caratteristiche del mezzo $Z=\rho v$.

La prova, descritta dalla norma UNI EN 12504-4:2005, si basa sul principio di propagazione delle onde elastiche longitudinali; infatti, il suono è una tipica onda longitudinale prodotta in un mezzo elastico da un corpo che vibra a una certa frequenza. La velocità di propagazione dipende dalle caratteristiche elastiche del mezzo. Lo scopo è quello di misurare la velocità di propagazione delle onde nei vari provini di malta per poi ricavarne il modulo elastico dinamico E_d . In generale le prove ultrasoniche consentono di determinare, oltre al valore del modulo elastico, anche la presenza di vuoti o discontinuità nell'elemento, i difetti di getto, il grado di omogeneità del materiale e le variazioni delle proprietà nel tempo. Nel nostro caso lo scopo della prova è quello di rilevare il tempo di volo a cui è legata la velocità di propagazione la quale è direttamente proporzionale alla radice quadrata del modulo elastico e inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità del mezzo, inoltre, è funzione del coefficiente di Poisson. Quindi è possibile correlare, con le dovute cautele², la velocità di propagazione alle costanti elastiche del mezzo.

I fattori che possono influenzare la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche sono:

- dimensioni e tipo di aggregato;
- lunghezza del percorso di misura;
- grado di compattazione;
- presenza di vuoti o fratture;
- condizioni di temperatura e umidità.

1 Per le definizioni si veda tesi di Laurea di Baronio E., *Esperienze di laboratorio*, pagg. 9-12

2 La dipendenza dal modulo elastico, densità e coefficiente di Poisson è applicabile ad un mezzo omogeneo.

3.1 STRUMENTAZIONE

L'apparecchiatura necessaria si compone di una serie di unità (fig. 27) che assolvono ognuna un compito specifico. Le parti che la compongono sono³:

- **Sincronizzatore:** dispositivo che invia un comando al generatore di impulsi e al contatore;
- **Generatore di impulsi:** dispositivo che genera un segnale elettrico impulsivo da applicare alla sonda emittente per la creazione dell'onda ultrasonica. Il segnale è ripetuto a intervalli regolari generando un treno di impulsi. La frequenza di ripetizione può essere variata.
- **Amplificatore:** dispositivo che alza il livello di tensione del segnale prodotto dal trasduttore ricevente.
- **Filtro:** dispositivo che opera sul segnale amplificato.
- **Contatore:** dispositivo collegato rispettivamente alla partenza dell'impulso per la sonda emittente e all'arrivo del primo impulso della sonda ricevente. Misura l'intervallo di tempo tra istante di emissione e istante di ricezione del segnale ultrasonico.
- **Indicatore:** dispositivo che visualizza la misura dell'intervallo di tempo contabilizzato dal contatore.
- **Sonde:** costituiscono il sistema di emissione e inserimento, nel materiale da esaminare, del fascio ultrasonico e ricezione degli ultrasuoni. Contiene il relativo trasduttore che funziona sfruttando la proprietà dell'elettrostrizione (piezoelettricità) indotta in alcuni materiali, detti appunto piezoelettrici.
- **Cavi Coassiali:** particolari cavi schermati che consentono il collegamento tra sonda e apparecchiatura. Sono costituiti da due canali: uno interno e uno esterno (schermo), che si estendono sullo stesso asse e rimangono separati da uno strato di isolante.



Fig. 23 - Sirio RP 4000 CSM

L'apparecchio utilizzato è della ditta Sirio, modello RP 4000 CSM (vedi fig. 23). Le sonde disponibili sono da 27 kHz, 50 kHz e 120 kHz. Generalmente, le sonde ultrasoniche sono costituite da un elemento attivo rappresentato da una componente sottile di ceramica piezoelettrica⁴ di forma circolare (o altre forme) che converte l'energia elettrica in energia meccanica (vibrazioni ultrasonore) e

3 Per le definizioni: Di Vasto V., <https://goo.gl/vT7qHP>

4 La piezoelettricità è il fenomeno per cui alcuni corpi cristallini, detti genericamente cristalli piezoelettrici, si polarizzano elettricamente in conseguenza di una deformazione meccanica di natura elastica (effetto piezoelettrico diretto), e viceversa si deformano elasticamente se sottoposti all'azione di un campo elettrico (effetto piezoelettrico inverso o effetto Lippmann). Questo effetto piezoelettrico si manifesta solo lungo una determinata direzione (fonte: Enciclopedia Treccani).

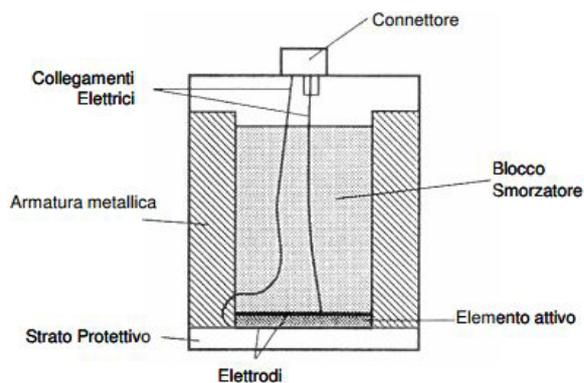


Fig. 24 - Schema di una sonda

viceversa. Questo elemento è protetto da un rivestimento che ha la funzione di evitare il danneggiamento incidentale o da usura. Dietro al trasduttore piezoelettrico troviamo un blocco di smorzamento, protetto da un involucro metallico di protezione. Inoltre vi sono i collegamenti elettrici che permettono il collegamento della sonda con i sistemi di acquisizione e controllo (fig. 24).

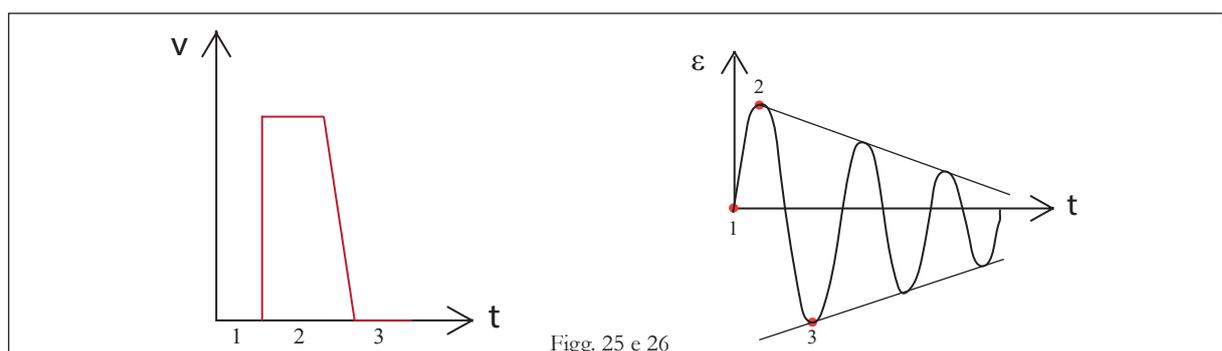
3.2 DESCRIZIONE DELLA PROVA

Le prove a ultrasuoni si eseguono nell'ambito dei controlli non distruttivi per la determinazione delle caratteristiche elastiche e meccaniche e sono considerate un importante mezzo per indagini sull'omogeneità del mezzo analizzato, difetti di getto, variazioni delle proprietà, modulo di elasticità dinamico, coefficiente di Poisson dinamico.

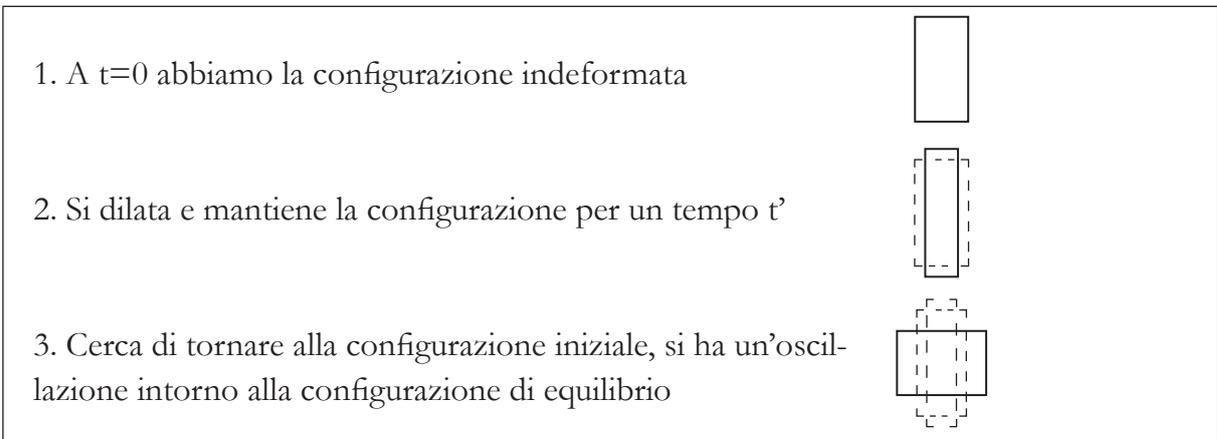
Il funzionamento dell'apparecchiatura si basa sugli effetti della propagazione di impulsi vibrazionali applicati a un mezzo solido:

- La velocità di propagazione dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla densità del mezzo in esame;
- Le disomogeneità (fessure, cavità,...) alterano la velocità di propagazione; se possibile, infatti, dovrebbero essere condotte prove ripetute posizionando le sonde in più punti.

L'impulso viene generato tramite un trasmettitore sonico utilizzando una pastiglia di ceramica piezoelettrica ai cui estremi viene applicata una differenza di potenziale per provocare una compressione o una dilatazione. Può avvenire anche il contrario: si applica una compressione (o dilatazione) che provoca un accumulo di carica creando una differenza di



Figg. 25 e 26



potenziale. È un fenomeno di natura reversibile. Questi trasduttori⁵, quando vengono eccitati elettricamente, entrano in vibrazione a una frequenza f (figg. 25 e 26).

Per la rilevazione del segnale viene utilizzato un ricevitore costituito da una sonda uguale a quella trasmittente. Le sonde emittente e ricevente sono uguali ma nella seconda è l'onda che si trasferisce al piezoelettrico che si trasforma in una certa differenza di potenziale. Quello che ci interessa rilevare è la velocità di propagazione.

La risposta dell'impulso ultrasonico applicato al mezzo solido consente lo studio di tre parametri fondamentali:

- Ritardo di ricezione dell'impulso per determinare la velocità di propagazione;
- Tipologia della forma d'onda per evidenziare la presenza di fessure;
- Ampiezza delle onde trasversali e longitudinali.

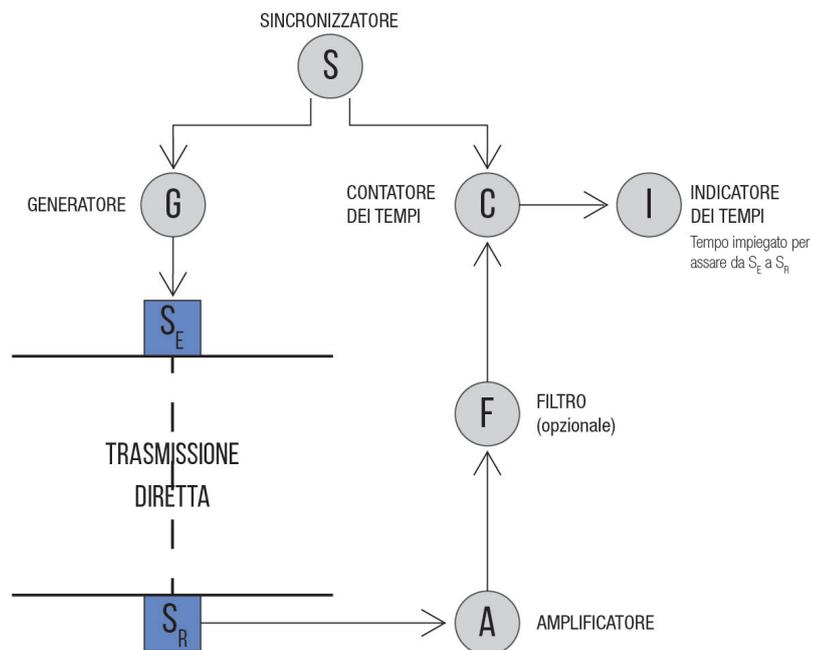


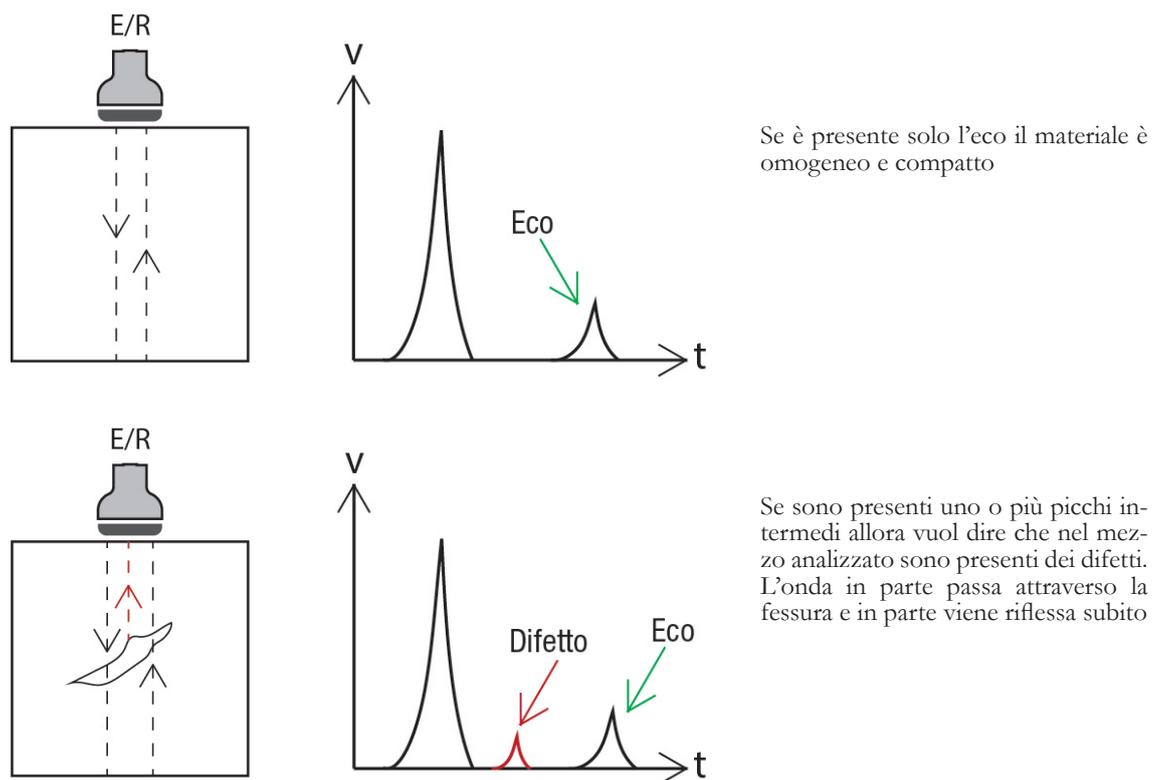
Fig. 27 - Schema di funzionamento della macchina ad ultrasuoni

5 I trasduttori sono elementi che traducono una grandezza in un'altra. In questo caso traducono la pressione in elettricità e viceversa.

Come detto precedentemente, il segnale ultrasonico è una vibrazione meccanica indotta dalla messa in risonanza della sonda tramite l'applicazione di un segnale impulsivo. La frequenza di lavoro può variare dai 40 ai 120 kHz; la scelta è legata alle caratteristiche del materiale da indagare. La norma⁶ suggerisce di “[...] utilizzare trasduttori ad alta frequenza (da 60 kHz a 200 kHz) per percorsi di lunghezza breve (fino a 50 mm) e trasduttori a bassa frequenza (da 10 kHz a 40 kHz) per percorsi di lunghezza maggiore (fino ad un massimo di 15 m). I trasduttori con frequenza da 40 kHz a 60 kHz sono considerati utili per la maggior parte delle applicazioni”.

È possibile utilizzare due diverse tecniche d'esame:

1. **Riflessione:** è un metodo che impiega una sola sonda che funziona sia come sonda emittente sia come sonda ricevente (figg. 28 e 29). Questo metodo si basa sul principio dell'eco ed è utilizzato per lo più con i materiali metallici.

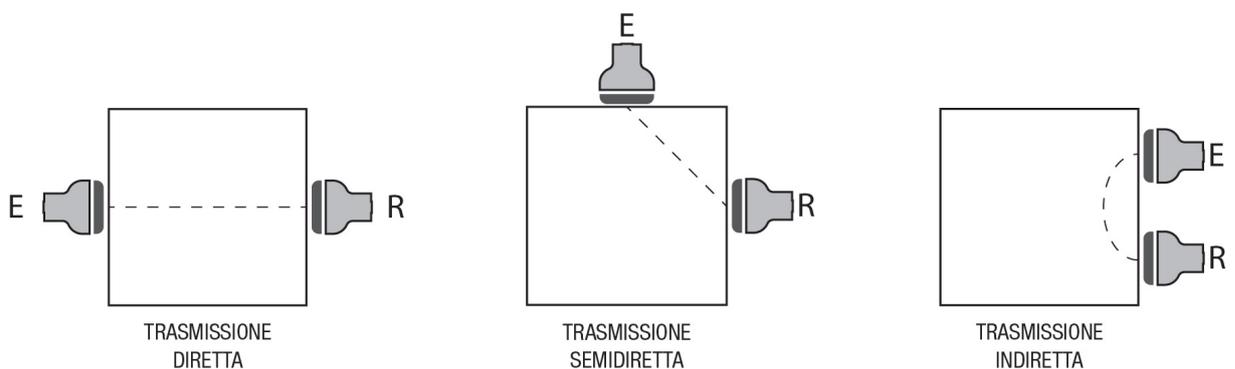


2. **Trasmissione:** è un metodo che impiega due sonde: una emittente (sorgente dell'impulso ultrasonico) e una ricevente (riceve il segnale). Questo metodo prevede tre schemi di applicazione delle sonde; la scelta si baserà sulla conformazione strutturale dell'oggetto in esame o sulla possibilità di accesso dei punti di indagine.

- **Trasmissione diretta:** le sonde si applicano su due facce opposte dell'oggetto da indagare. Questo tipo di indagine è sicuramente il più accurato.

6 UNI EN 12504:2005. Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

- **Trasmissione semidiretta:** le sonde si applicano su due facce adiacenti. Questo tipo di indagine è utilizzata quando non è possibile utilizzare il tipo di trasmissione diretta.
- **Trasmissione indiretta:** le sonde sono applicate sulla stessa faccia, in due punti allineati. Questo tipo di indagine è il meno accurato e deve essere utilizzato solo quando è accessibile una sola faccia dell'elemento da indagare o quando interessa la qualità del materiale superficiale rispetto alla qualità complessiva.



Una volta decisa la tecnica da utilizzare (riflessione o trasmissione) occorre stabilire un accurato accoppiamento acustico tra l'elemento da esaminare e le sonde. Infatti, la vibrazione ultrasonica è disturbata dalla più piccola imperfezione e discontinuità, per questo motivo occorre assicurare un buon contatto tra la superficie del mezzo e le sonde. Il materiale che dovrà essere interposto tra la superficie della sonda e la superficie del mezzo da indagare viene chiamato **mezzo di accoppiamento**. Questo può essere scelto tra vari materiali come, per esempio, la vaselina, il grasso, la pasta di caolino/glicerina o la plastilina.

Per queste prove è stata scelta la plastilina, poiché le malte, essendo un materiale poroso, avrebbero potuto assorbire un materiale gelatinoso.



Fig. 30 - Applicazione mezzo accoppiamento

3.3 PROCEDURA OPERATIVA

Di seguito sono descritte le fasi che sono state seguite per il rilevamento del tempo di transito utile per il calcolo della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

1. Calibrazione

Il primo passo da compiere prima di effettuare la prova è la calibrazione del rilevatore a ultrasuoni. La regolazione della calibrazione del misuratore si effettua collegando le due sonde (della stessa frequenza), mediante apposito cavo, al connettore. Dopo di che si accoppiano le sonde al blocco di calibrazione⁷ utilizzando lo stesso mezzo accoppiante che sarà utilizzato nelle prove. A questo punto si agisce sul regolatore fintanto che sullo schermo non compare l'esatta misura (53,5 μ s). Lo strumento deve essere ricalibrato ogni qualvolta sia cambiata la coppia di sonde e ogni qualvolta si spenga e si riaccenda lo strumento.

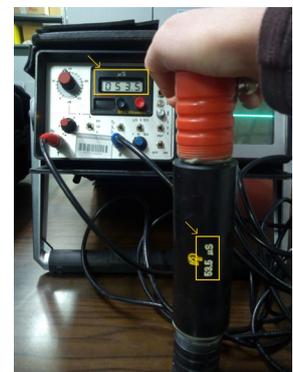


Fig. 31 - Calibrazione

2. Preparazione della superficie

La superficie del mezzo su cui saranno applicate le sonde deve essere pulita, liscia e regolare; nel caso in cui risultasse ruvida e/o irregolare dovrebbe essere resa idonea mediante levigatura.

3. Applicazione delle sonde

È opportuno assicurarsi che le sonde siano ben accoppiate alla superficie dell'elemento di prova, che sia stato utilizzato un idoneo mezzo di accoppiamento e che le sonde rimangano ben premute contro il materiale finché non si stabilizza la lettura del tempo di propagazione sullo schermo.

4. Misurazione del tempo di transito

Tenendo premute le sonde alle superfici del provino, si legge il tempo di volo sullo schermo una volta che si è stabilizzato. Questo valore è il tempo impiegato dal segnale ultrasonico per attraversare il materiale in esame dalla sonda emittente alla sonda ricevente.

⁷ Il blocco di calibrazione è un cilindro campione di cui è noto il tempo di propagazione degli impulsi ultrasonici, in questo caso il tempo è di 53,5 μ s.

5. Misurazione della lunghezza del percorso

Per la trasmissione diretta, la lunghezza del percorso è la distanza più breve tra i due trasduttori. L'accuratezza della misurazione deve essere di $\pm 1\%$.

La prova con gli ultrasuoni consente di determinare le caratteristiche elastico-dinamiche dei materiali oggetto di studio; in particolare ha permesso di determinare il modulo elastico dinamico (E_d) tramite la velocità di propagazione nel mezzo; questa è stata calcolata a seguito della prova che ha permesso di rilevare il ritardo di ricezione dell'impulso (tempo di volo) letto sul monitor dell'apparecchiatura utilizzata.

Quindi, i passaggi seguiti per arrivare al calcolo del modulo elastico dinamico sono stati:

1. scegliere 6 provini per ogni miscela di malta, i quali sono stati pesati al fine di determinarne la densità media

$$\rho_m = \sum \frac{m_i}{V_i}$$

ρ_m è la densità media, in kg/m^3 ;

m_i è la massa dei provini, in kg;

V_i è il volume, in m^3 .

2. poi i sei provini scelti sono stati testati con gli ultrasuoni;
3. Di tutti e sei i provini è stato rilevato il tempo di volo;
4. È stato calcolato il tempo di volo medio;
5. Con il tempo di volo medio è stata calcolata la velocità di propagazione media di ogni miscela di malta

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

v è la velocità di propagazione degli impulsi, in km/s ;

L è la lunghezza di percorso, in mm;

t_m è il tempo impiegato dall'impulso per attraversare la lunghezza, in μs .

6. È stato calcolato il modulo elastico di ciascuna miscela a partire dalla velocità media di propagazione e dalla densità media di ogni miscela. Lungo il provino si ha un'onda di spostamento, con velocità di propagazione v che dipende dalle proprietà elastiche (E) e di inerzia (ρ) del materiale.

$$v = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_m}} \quad E_d = v^2 \cdot \rho$$

E_d è il modulo elastico, in Pa;

v è la velocità di propagazione, in m/s ;

ρ è la densità, in kg/m^3 .

3.4 FASE DI SPERIMENTAZIONE

La prova a ultrasuoni è stata svolta su due categorie di provini:

- provini di dimensione normalizzata 40mm x 40mm x 160mm;
- provini di dimensione non normalizzata 30mm x 30mm x 300mm.

Per ogni tipo di impasto, quindi, sono stati confezionati 12 provini: 6 di dimensioni normalizzate e 6 di dimensioni non normalizzate.

Questi provini sono stati codificati con una sigla in base al tipo di impasto e alle dimensioni, in modo da poter riconoscere univocamente ciascun provino. La sigla adottata è stata pensata con criteri di semplicità e brevità. Lo schema adottato per la sigla è il seguente:

H1.1_UNI

Il primo blocco identifica il tipo di impasto (riferimento alla tabella a pag. 28). Il secondo blocco fa riferimento al numero del provino di quell'impasto: è un numero progressivo da 1 a 6, poiché sono stati confezionati 6 provini per ogni impasto. Il terzo blocco identifica le dimensioni del provino: UNI (provino di dimensioni normalizzate), NN (provino di dimensioni non normalizzate).

I provini sono stati testati dopo un periodo non inferiore a 28 giorni. Prima di cominciare la prova sono stati determinati massa, volume e densità media dei provini. Si riporta di seguito la tabella con i valori:

DENSITÀ MEDIA PROVINI NORMALIZZATI								
IMPASTO	MASSA [g]						VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [kg/m ³]
	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6		
G1	406,2	406,4	412,0	409,6	411,3	406,2	256	1596
G2	409,5	408,6	408,4	408,1	407,9	413,9	256	1599
G3	365,3	376,8	377,4	378,4	377,8	380,5	256	1469
H1	449,2	450,8	452,2	451,3	455,1	450,0	256	1763
H2	408,8	406,0	402,3	408,4	402,9	-	256	1585
H3	408,4	415,6	419,2	407,2	406,5	407,2	256	1604
H4	353,9	358,3	359,1	347,0	370,3	359,0	256	1398
H5	465,4	460,7	463,8	463,7	468,0	465,9	256	1815
H6	434,9	431,6	435,8	433,7	431,0	431,8	256	1692
H7	424,7	429,2	425,5	437,1	426,1	432,2	256	1676
H8	403,1	403,1	423,6	422,1	407,4	425,5	256	1618
I1	304,4	304,0	304,9	300,7	306,5	299,8	256	1185
L1	355,6	353,9	353,8	353,4	353,6	354,7	256	1384

DENSITÀ MEDIA PROVINI NON NORMALIZZATI								
IMPASTO	MASSA [g]						VOLUME [cm ³]	DENSITÀ [kg/m ³]
	PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6		
G1	449,4	436,8	441,9	440,1	447,9	445,1	270	1643
G2	425,2	417,1	433,1	441,1	423,4	427,2	270	1585
G3	399,1	390,7	387,3	392,4	389,3	-	270	1451
H1	474,5	481,3	475,7	482,5	468,0	471,2	270	1761
H2	441,3	440,5	435,2	441,0	436,3	429,5	270	1620
H3	409,2	406,9	403,5	398,3	406,3	413,6	270	1505
H4	381,8	392,5	384,8	393,7	389,2	405,4	270	1449
H5	486,0	477,9	492,4	484,9	480,4	484,8	270	1794
H6	435,7	433,2	437,4	432,4	434,2	434,6	270	1610
H7	407,4	409,2	402,3	400,6	395,7	399,4	270	1491
H8	403,1	392,8	397,7	-	-	-	270	1474
I1	321,4	334,5	-	-	-	-	270	1215

In un secondo momento i provini sono stati testati con la macchina a ultrasuoni Sirio RP 4000 CSM per la determinazione della velocità di propagazione dell'impulso.

Sono state utilizzate sonde che lavorano a due frequenze diverse a seconda del tipo di provino testato (figg. 32 e 33):

- Sonde da 50 kHz (diametro 50 mm) per i provini di dimensione 30mm x 30mm x 300mm (volume 270 cm³);
- Sonde da 120 kHz (diametro 30 mm) per i provini di dimensione 40mm x 40mm x 160mm (volume 256 cm³).



Fig. 32 - Provino 40mm x 40mm x 160mm



Fig. 33 - Provino 30mm x 30mm x 300mm

Letto il tempo di volo sul *display* dell'apparecchiatura, è stata calcolata la velocità di propagazione dell'impulso sapendo che $v = L/t$.

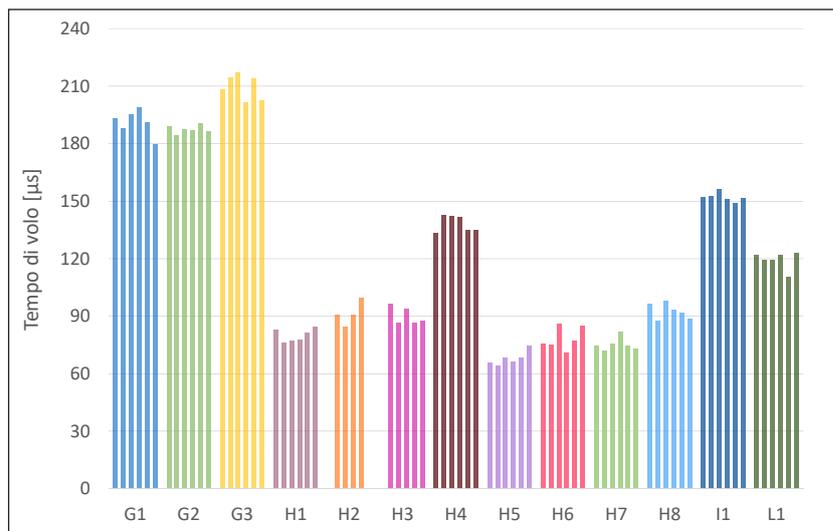
Dopo di che è stato calcolato il modulo elastico dinamico (E_d) con la relazione che lega la velocità alle caratteristiche, elastiche e di inerzia, del mezzo in esame (formula a pag. 43).



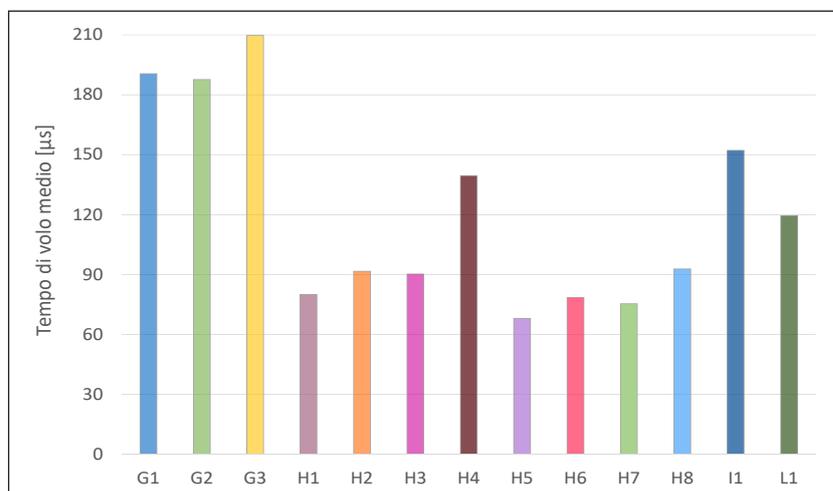
Fig. 34 - Lettura tempo di volo

Nelle pagine seguenti sono allegate le tabelle che riportano i seguenti dati:

- Tempo di volo
- Velocità di propagazione dell'impulso
- Modulo Elastico



Tempo di volo registrato per i sei provini di ogni categoria di malta



Tempo di volo medio per ogni categoria di malta

TEMPO DI VOLO PROVINI NORMALIZZATI

	TEMPO DI VOLO											CALCOLO MODULO ELASTICO			
	PROVINO 1 µs	PROVINO 2 µs	PROVINO 3 µs	PROVINO 4 µs	PROVINO 5 µs	PROVINO 6 µs	MEDIA µs	LUNGHEZZA mm	VELOCITA' m/s	DENSITA' kg/m ³	MODULO ELASTICO MPa				
G1	193,1	188,3	195,5	198,9	191,5	179,9	190,5	160	839,80	1596,16	1126				
G2	189,1	184,7	187,5	187,1	190,8	186,5	187,6	160	852,80	1599,22	1163				
G3	208,2	214,5	217,4	201,5	214,2	202,4	209,7	160	762,99	1468,88	855				
H1	82,9	76,3	77,1	77,8	81,3	84,5	80,0	160	2000,42	1763,41	7057				
H2	-	90,7	84,7	90,9	99,9	-	91,6	160	1747,68	1584,69	4840				
H3	-	96,4	86,7	93,8	86,7	87,5	90,2	160	1773,44	1604,23	5045				
H4	133,6	143	142,5	141,7	134,9	135,1	139,4	160	1147,45	1398,18	1841				
H5	65,7	64,3	68,2	66,3	68,5	74,9	68,0	160	2353,52	1814,78	10052				
H6	75,9	75	86,2	71,1	77,3	85,1	78,4	160	2039,95	1691,93	7041				
H7	74,7	72,1	75,7	81,7	74,5	73,1	75,3	160	2124,83	1676,30	7568				
H8	96,5	87,9	98,1	93,5	91,9	88,6	92,8	160	1725,07	1617,71	4814				
I1	152,1	152,5	156,3	150,9	149,3	151,7	152,1	160	1051,71	1185,09	1311				
L1	122,0	119,6	119,2	121,8	110,8	123,0	119,4	160	1340,03	1383,46	2484				

TEMPO DI VOLO PROVINI NON NORMALIZZATI												
TEMPO DI VOLO												CALCOLO MODULO ELASTICO DINAMICO
PROVINO 1	PROVINO 2	PROVINO 3	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	MEDIA	LUNGHEZZA	VELOCITÀ	DENSITÀ	MOD. ELASTICO 1		
μs	μs	μs	μs	μs	μs	μs	mm	m/s	kg/m ³	MPa		
G1	290,3	-	296,6	285,3	279,8	283,9	300	1044,64	1643	1793		
G2	317,5	285,9	-	268,9	-	270,5	300	1099,30	1585	1915		
G3	375,2	373,5	390,5	391,8	361,2	-	300	792,73	1451	912		
H1	139,3	138,7	135,3	140,7	137,3	144,5	300	2153,63	1761	8169		
H2	183,6	181,4	177,8	177,2	181,6	184,2	300	1657,76	1620	4451		
H3	160,6	162,4	163,1	182,4	181,3	180	300	1747,91	1505	4597		
H4	231,4	225,2	230	219,7	214,8	212,8	300	1349,43	1449	2639		
H5	105,1	103,4	102,7	107,9	107,8	109,6	300	2827,97	1794	14347		
H6	158,8	153,8	153,6	156,8	160,4	166	300	1895,93	1610	5785		
H7	164,2	164,8	162,8	159,6	157,4	158,2	300	1861,43	1491	5164		
H8	213,2	210	210,9	-	-	-	300	1419,33	1474	2968		
I1	246,1	240	-	-	-	-	300	1234,31	1215	1851		

3.5 RISULTATI

Il modulo elastico dei materiali ha un'importanza elevata soprattutto quando siamo in presenza di materiali accoppiati come, per esempio, nel caso di un intonaco applicato al suo supporto. Infatti, in questo caso la malta, una volta applicata al supporto murario, comincia le fasi di presa e indurimento che portano inevitabilmente al sorgere di deformazioni controllate e tensioni, che solo in parte sono trasmesse alla muratura [Veiga et al., 2007].

Per esempio, i fenomeni come variazioni termiche repentine, ritiro per maturazione dell'intonaco, ecc., non comprometterebbero la durabilità della malta se questa non fosse vincolata al supporto rigido; infatti, se un corpo è libero di deformarsi in una qualunque direzione dello spazio, perché privo di vincoli, un qualunque fenomeno che produce dilatazioni o compressioni, produrrebbe solo spostamenti e deformazioni senza far insorgere stati sollecitativi all'interno del mezzo.

Nel caso di intonaco applicato al supporto, ci troviamo però in presenza di un vincolo, ovvero, gli spostamenti dovuti a fenomeni di dilatazione o compressione sono impediti. Di conseguenza nascono delle tensioni nel materiale applicato: la sollecitazione che si crea nel materiale dovrà bilanciare quella dovuta al vincolo. Il valore è proporzionale al modulo di elasticità del materiale; quindi lo sforzo di trazione o compressione sarà tanto maggiore quanto maggiore è la rigidità del materiale stesso.

In conclusione, si può affermare che se uno strato di intonaco si ritira (o si dilata) rispetto alla muratura, si creano delle sollecitazioni di trazione (o compressione) nell'intonaco stesso proporzionali al suo modulo elastico dovuti al ritiro (o alla dilatazione) impedito. Questi fenomeni possono portare a stati di delaminazione o fessurazione.

Questi sono i motivi per cui il modulo elastico dei materiali è estremamente importante nel caso di materiali accoppiati. Per evitare i fenomeni di degrado appena descritti è necessario che tra i due materiali (il nuovo e il preesistente) vi sia una certa compatibilità meccanica e che i valori dei moduli elastici siano compatibili. Questo significa che il modulo elastico dell'intonaco applicato su una vecchia muratura deve essere simile, meglio se inferiore, al modulo elastico del supporto. In questo modo le sollecitazioni sono sopportate dalla muratura, avendo rigidità maggiore.

La determinazione del modulo elastico E_d è stata effettuata trascurando la dipendenza dal coefficiente di Poisson per due motivi:

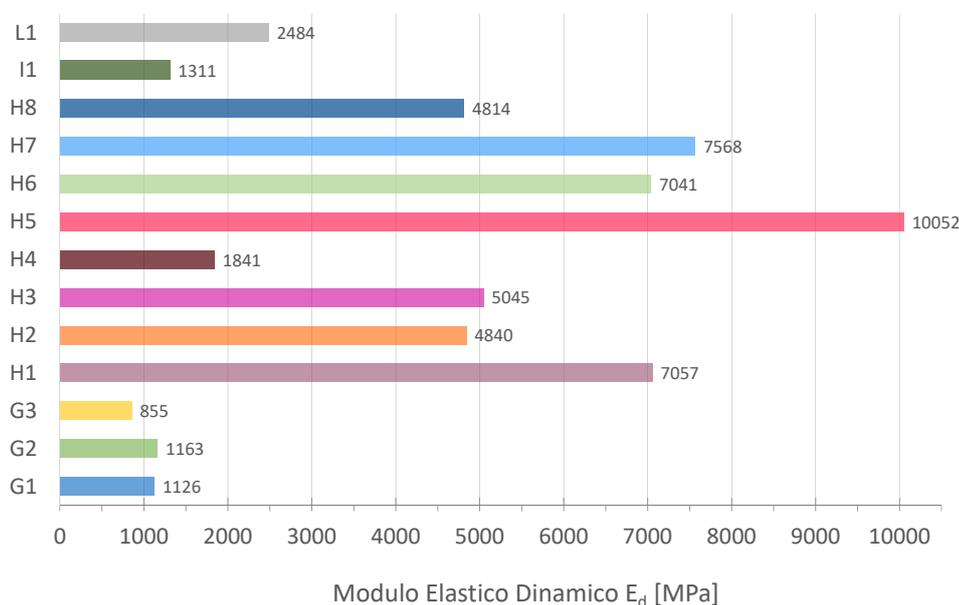
1. la determinazione di tale coefficiente richiedeva di sostenere ulteriori prove;
2. la formulazione sarebbe stata imprecisa anche conoscendo il valore di tale coefficiente, in quanto valida per materiali omogenei privi di porosità.

Per questo motivo è più attendibile il confronto tra malte formulate con lo stesso legante (anche in proporzioni diverse), mentre è da valutare con cautela il confronto tra malte formulate con leganti diversi.

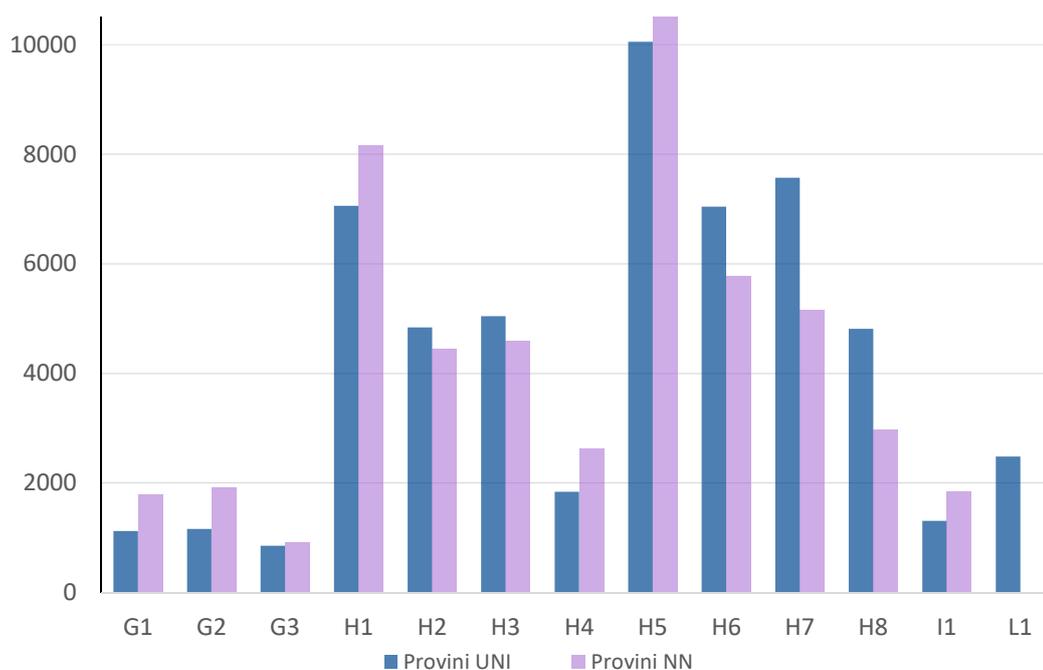
Nel grafico sottostante sono riportati i valori di modulo elastico risultanti dalla prova condotta. Sulla base di questi dati è possibile fare alcune osservazioni:

- Come si può notare dal grafico a pag. 46 i provini caratterizzati da un elevato tempo di volo sono quelli che presentano porosità maggiore (malte di calce idraulica e malte con quantità elevate di grassello di calce). Poi, confrontando il grafico di pag. 46 con il grafico sottostante, si può osservare che i provini nei quali si registra un tempo di volo elevato sono caratterizzati da un basso valore di modulo elastico, essendo quest'ultimo inversamente proporzionale al quadrato del tempo.
- In assoluto, i valori più elevati di E_d sono riferibili ai provini realizzati con cemento e con cemento e grassello di calce (categoria H), con l'eccezione dei provini con una quantità di grassello di calce preponderante rispetto a quella di cemento (H4 e H8). Tra i provini della categoria H, a parità di composizione, il modulo elastico maggiore viene registrato, ovviamente, dai provini composti da cemento 42,5 (H5, H6, H7, H8). Mentre i valori, in assoluto, più bassi di E_d vengono registrati dai provini realizzati con calce idraulica (categoria G).
- All'interno della categoria H, i provini composti da cemento 42,5 hanno restituito valori molto elevati: si può osservare che all'aumentare del rapporto grassello di calce/cemento diminuisce il valore di E_d ($E_{d(H3)} > E_{d(H2)} > E_{d(H4)}$).

La stessa osservazione si può fare per i provini confezionati con il cemento 32,5.



- Anche tra le malte di calce idraulica possiamo osservare che la malta G3 (che presenta il grassello di calce nella sua composizione) ha un modulo elastico minore rispetto alle altre due malte (G1 e G2) che hanno come unico legante la calce idraulica. Confrontando i valori delle malte G1 e G2 possiamo notare come all'aumentare della quantità di calce idraulica aumenti il modulo elastico ($E_{d(G2)} > E_{d(G1)}$).
- Confrontando il modulo elastico E_d dei provini di dimensioni normalizzate e quelli di dimensioni non normalizzate, possiamo notare che i valori non si discostano di molto tra loro. Le differenze possono essere dovute a vari fattori quali la diversa compattazione dei provini, il diverso grado di stagionatura, la diversa pressione esercitata sulle sonde.



4. DETERMINAZIONE DEL MODULO DI ELASTICITÀ SECANTE IN COMPRESSIONE

DEFINIZIONE DEL MODULO ELASTICO SECANTE

Lo scopo della prova che sarà illustrata nei paragrafi seguenti, è quello di determinare il modulo elastico statico delle malte confezionate. L'esperienza è stata condotta in conformità alla norma UNI EN 12390-13:2013¹.

Il modulo elastico (misurato in Pascal²) è una caratteristica propria dei materiali ed è definito come il rapporto tra sforzo e deformazione, in presenza di condizioni di carico

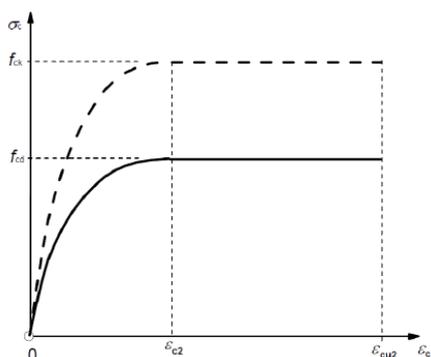


Fig. 35 - Grafico σ-ε (PLEVRIS V, et al., 2013)

monoassiale e di comportamento "elastico" del materiale. Infatti, tutti i materiali sono soggetti a una variazione dimensionale (ε), contrazione o allungamento, se sottoposti ad una sollecitazione (σ), rispettivamente di compressione o trazione. Per valori piccoli di sollecitazione abbiamo un legame lineare tra sforzo e deformazione ($\sigma = E \epsilon$), in cui il modulo elastico rappresenta proprio la costante di proporzionalità, ovvero la pendenza della curva sforzo-deformazione (fig. 35). Possiamo distinguere due tipi di modulo elastico:

1. il modulo elastico statico tangente all'origine: che è pari alla tangente dell'angolo compreso tra le ascisse e la tangente alla curva nell'origine;
2. il modulo elastico statico secante che è calcolato dividendo un carico σ per la corrispondente deformazione ϵ . Questo diminuisce (rispetto a quello tangente all'origine) all'aumentare del carico σ per la forma che assume la curva σ - ϵ .

Per questo motivo occorre dichiarare in corrispondenza di quale valore di carico si è calcolato il modulo elastico E_s . La norma prescrive di valutare E_s applicando un carico pari a 1/3 del carico massimo sopportato dal campione³.

La differenza tra il modulo elastico dinamico E_d (descritto nel capitolo precedente) e il modulo elastico statico E_s deriva dal fatto che il primo è misurato indirettamente tramite misure di altre proprietà (come, appunto, la velocità di propagazione del suono), mentre il secondo è valutato attraverso il rilevamento di deformazioni provocate da carichi statici. In generale E_d è maggiore di E_s poiché il modulo elastico dinamico, per piccole sollecitazioni, si avvicina al modulo elastico tangente all'origine, che risulta essere maggiore di E_s in quanto, all'aumentare del carico, si instaura un processo di micro fessurazione che porta alla non

1 UNI EN 12390-13:2013. Prova su calcestruzzo indurito. Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione.
2 1 Pascal [Pa] corrisponde a 1N/m². 1 MPa corrisponde a 1N/mm².
3 COLLEPARDI M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Hoepli, 1992.

linearità del materiale, ovvero, a una riduzione della rigidità dello stesso.

4.1 SPERIMENTAZIONE

Lo scopo finale della prova è quello di determinare il modulo elastico statico secante in compressione per ciascuna categoria di malta.

La prova è stata condotta presso il laboratorio MastrLAB ed è stata svolta in due fasi:

- Fase 1: è stato determinato il carico di rottura a compressione (prova distruttiva) per ciascuna categoria di provini (questa prova è stata svolta secondo la norma UNI EN 1015-11:2007⁴);
- Fase 2: sono stati applicati tre cicli di carico ai provini (almeno tre per categoria) e rilevate le corrispondenti deformazioni tramite due estensimetri applicati su due facce opposte del provino (questa prova è stata condotta seguendo le prescrizioni della norma UNI EN 12390-13:2013).

Dopo la fase sperimentale si è proceduto analizzando i dati di *output* registrati dal programma informatico utilizzato per lo svolgimento delle prove e calcolando il modulo elastico secante E_s .

4.1.1 RESISTENZA A FLESSIONE A COMPRESSIONE

Per determinare la resistenza a compressione dei campioni di malta è stata seguita la norma UNI EN 1015-11, la quale prescrive di svolgere prima la prova di resistenza a flessione per ottenere due parti di ogni provino che saranno poi testate a compressione; nel caso in cui la resistenza a flessione non sia oggetto di indagine, le parti destinate alla prova di resistenza si possono ottenere anche in altro modo.

I provini testati erano di dimensioni (160 x 40 x 40) mm e avevano una stagionatura non inferiore a 28 giorni. La norma prescrive di rompere a flessione 3 provini per poter testare sei mezzi prismi a compressione. Per ragioni di tempo abbiamo testato solo due mezzi provini (per ogni categoria di malta) a compres-

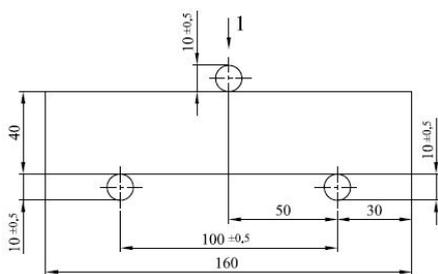


Fig. 36 - Schema prova a flessione. Trattato da norma UNI EN 1015-11:2007

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

sione per determinarne il carico di rottura.

Le due metà del medesimo provino sono state ottenute con l'apparecchiatura usata per determinare la resistenza a flessione. Questa è composta (come si vede in figg. 36 e 37) di due rulli di sostegno di acciaio distanziati l'uno dall'altro di 100 mm, e di un terzo rullo, sempre di acciaio e delle stesse dimensioni degli altri due, posizionato centralmente tra i rulli di sostegno. Questo rullo e uno di quelli di sostegno devono essere in grado di inclinarsi per permettere una distribuzione uniforme del carico lungo la larghezza del provino. Il campione deve essere posizionato con una delle facce lisce (una di quelle *gettate* contro l'acciaio dello stampo) sui rulli di sostegno. Dopo di che è stato applicato il carico in controllo di spostamento fino alla rottura del provino in due metà; per le malte a bassa resistenza è stato necessario utilizzare una velocità più bassa rispetto a quella applicata agli altri provini.

A questo punto le due metà di ciascun provino sono state testate a compressione (fig. 38). Anche in questo caso il carico è stato applicato in controllo di spostamento fino alla rottura del provino (fig. 39). Il carico di rottura è stato annotato e utilizzato ai fini della prova per la determinazione del modulo elastico statico.

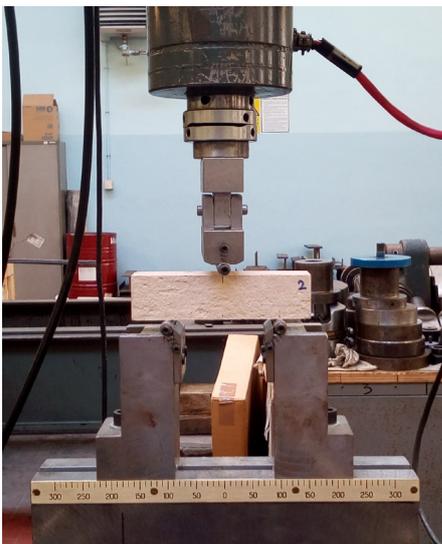


Fig. 37 - Prova a flessione



Fig. 38 - Prova a compressione



Fig. 39 - Rottura provino a compressione

4.1.2 DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO

La prova è stata svolta nel laboratorio MastrLAB del Politecnico di Torino in luogo confinato. I provini sono pervenuti in laboratorio dopo la prova a ultrasuoni con una stagionatura non inferiore a 28 giorni.

La prova è stata eseguita con una macchina MTS con capacità di carico pari a 100 kN

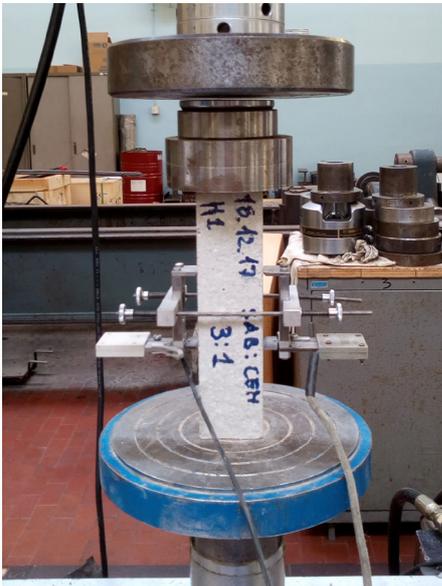


Fig. 40 - Posizionamento del provino centrato sulla macchina di prova con i due estensimetri applicati alle due facce lisce opposte.

su cui è stata posta una cella di carico da 10 kN con una sensibilità maggiore, dal momento che i carichi da applicare erano molto bassi.

Al provino sono stati applicati due estensimetri, centrati sulle due facce laterali opposte tra loro, per misurarne le deformazioni durante l'applicazione del carico. Dopo di che il provino è stato appoggiato al centro del piatto inferiore della macchina e sulla faccia superiore è stato posto uno snodo sferico al fine di adattare la macchina alla faccia del provino (non sempre perfettamente piana) per assicurare la centralità del carico. Una volta posizionato il provino sono stati inseriti nel software i cicli di carico da applicare.

Per la prova è stato seguito il Metodo B illustrato nella norma UNI EN 12390-13:2013, il quale prevede di effettuare tre cicli di applicazione del carico e di calcolare il modulo di elasticità secante stabilizzato al terzo ciclo. Prima di cominciare la prova sono stati calcolati, con foglio Excel (fig. 41), lo sforzo di precarico σ_p , lo sforzo superiore σ_a e lo sforzo inferiore σ_b (in questo il valore dello sforzo inferiore è stato assunto pari allo sforzo di precarico, essendo questo già molto basso).

colore il modulo di elasticità secante stabilizzato al terzo ciclo. Prima di cominciare la prova sono stati calcolati, con foglio Excel (fig. 41), lo sforzo di precarico σ_p , lo sforzo superiore σ_a e lo sforzo inferiore σ_b (in questo il valore dello sforzo inferiore è stato assunto pari allo sforzo di precarico, essendo questo già molto basso).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
4												
5	Normativa di riferimento:	UNI EN 12390-13		Metodo B								
6												
7	Forma del provino		Prismatico									
8												
9	Dimensioni	Lato 1	L1	40	mm			Sezione	S	1600	mm ²	
10		Lato 2	L2	40	mm							
11		Altezza	H	160	mm							
12												
13	Sforzi	Resistenza compressione	f_c	12,6294	N/mm ²			Carico massimo stimato	C_{max}	20,207	kN	
14	$f_c/3$	Sforzo nominale superiore	σ_a	4,210	N/mm ²			Carico nominale superiore	C_a	6,736	kN	
15	$10 \pm 15 \% f_c$	Sforzo nominale inferiore	σ_b	1,894	N/mm ²			Carico nominale inferiore	C_b	3,031	kN	
16	$0,5 \text{ MPa} - \sigma_b$	Sforzo nominale precarico	σ_p	1,894	N/mm ²			Carico nominale precarico	C_p	3,031	kN	
17												
18	Velocità di carico	Velocità di carico min	V_{min}	0,4	MPa/s			Velocità di carico max	V_{min}	0,64	kN/s	
19	$0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$	Velocità di carico max	V_{max}	0,8	MPa/s			Velocità di carico max	V_{max}	1,28	kN/s	
20								Tempo impiegato a V_{min}	T_{min}	10,52	s	
21								Tempo impiegato a V_{max}	T_{max}	5,26	s	

Fig. 41 - Foglio Excel utilizzato per il calcolo degli sforzi da applicare ai provini

A questo punto è stata avviata la macchina che ha effettuato tre cicli di carico dopo il ciclo di precarico che serve a stabilizzare gli strumenti di misura.

I tre cicli di carico sono stati applicati come segue:

1. Dopo una prima fase di stabilizzazione degli strumenti è stato applicato lo sforzo di precarico σ_p che è stato tenuto per 5s.
2. È stato aumentato lo sforzo, a una velocità costante, dallo sforzo di precarico allo sforzo superiore σ_a . Questo è stato tenuto per 15s prima di ridurre lo sforzo e tornare nuovamente allo sforzo di precarico, anch'esso mantenuto costante per 15s.

Questa successione è stata ripetuta tre volte; durante i tre cicli di carico il *software* ha registrato sia il carico applicato nel tempo che le deformazione longitudinali, tracciando due grafici riportati nelle figg. 42a e 42b.

Questa prova è stata eseguita su tre provini per ogni categoria di malta confezionata e il modulo elastico statico E_s è stato calcolato mediando i risultati.

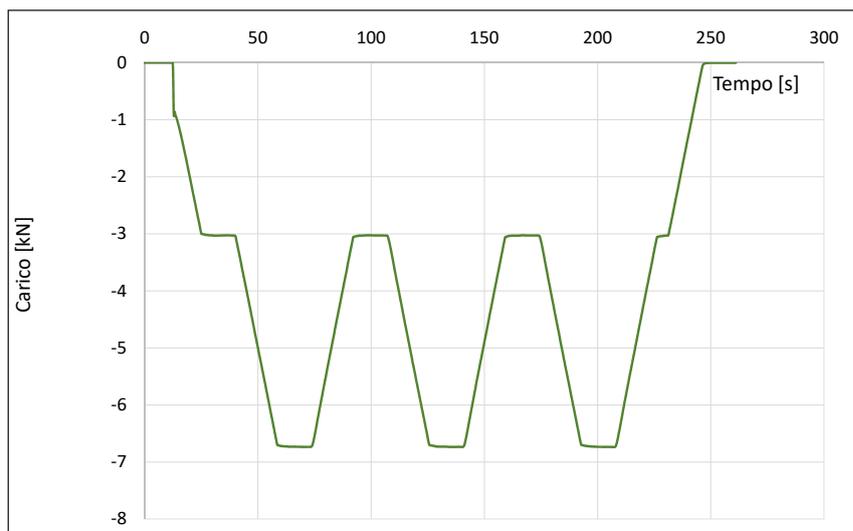


Fig. 42a - Grafico del carico applicato

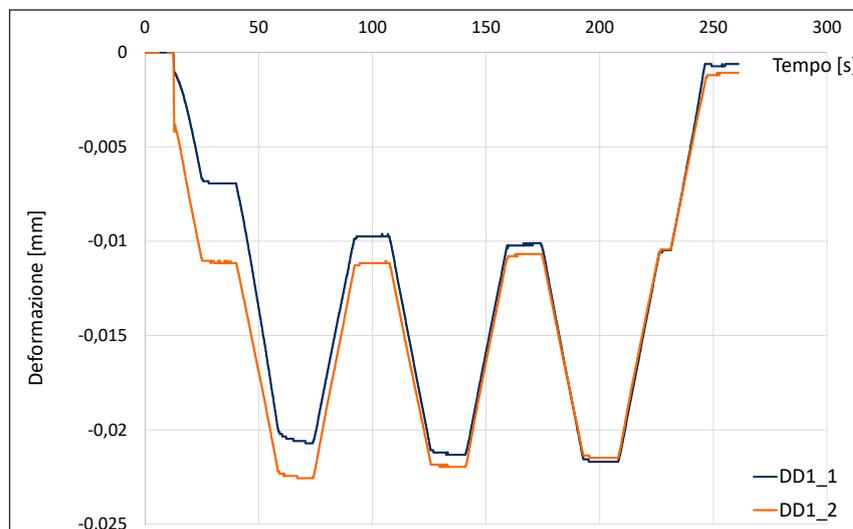


Fig. 42b - Grafico delle deformazioni

4.2 RISULTATI

Osservando i valori medi del modulo elastico statico E_s (fig. 44) è evidente che le osservazioni fatte per i valori del modulo elastico dinamico risultano ancora valide. Per esempio, è possibile osservare che all'aumentare della quantità di grassello di calce (rispetto al secondo legante) diminuisce il modulo elastico, anche se questa differenza è poco percettibile tra la categoria H2 e H3, poiché la quantità di grassello di calce varia di poco tra i due impasti. Per quanto riguarda la categoria G è da notare come l'impasto G2, nonostante abbia una quantità di calce idraulica naturale (NHL 3,5) leggermente maggiore rispetto all'impasto G3, risulti avere un modulo elastico lievemente superiore. Questa inesattezza può essere dovuta alla non perfetta compattazione del materiale (non avendo avuto a disposizione una macchina a scosse) che ha creato nei provini dei vuoti che hanno alterato i risultati. Nella prova a ultrasuoni questa inversione dei risultati non è stata percepita perché la malta G2 presentava un modulo elastico appena superiore.

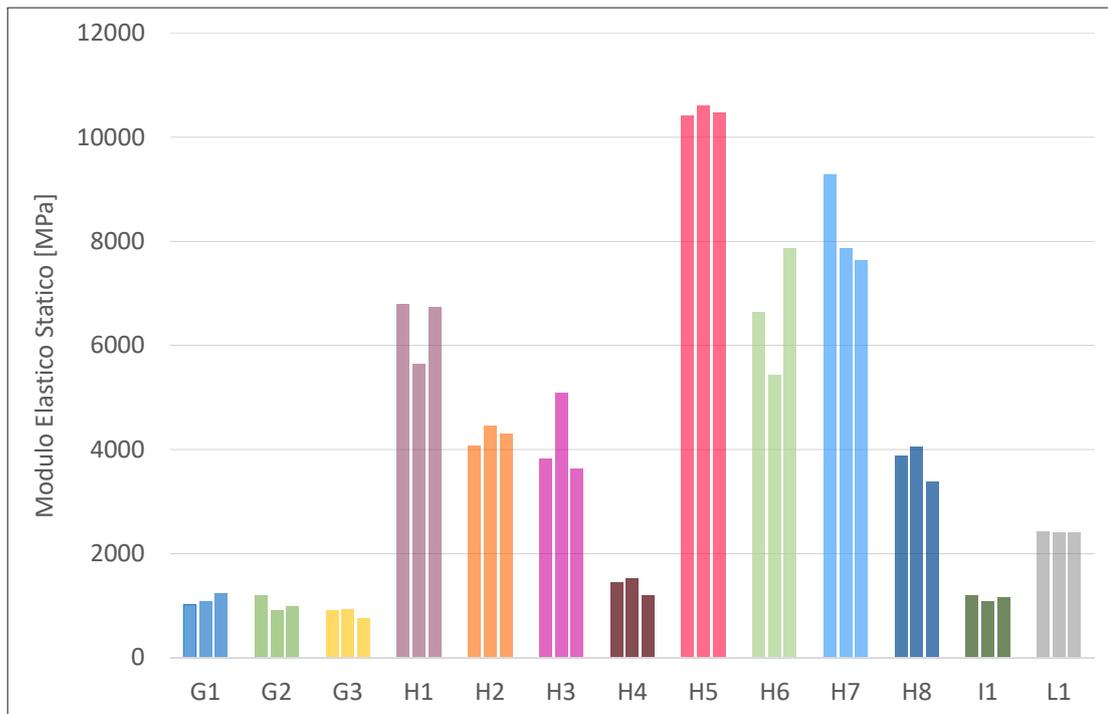


Fig.43 - Moduli Elastici dei tre provini di ogni categoria

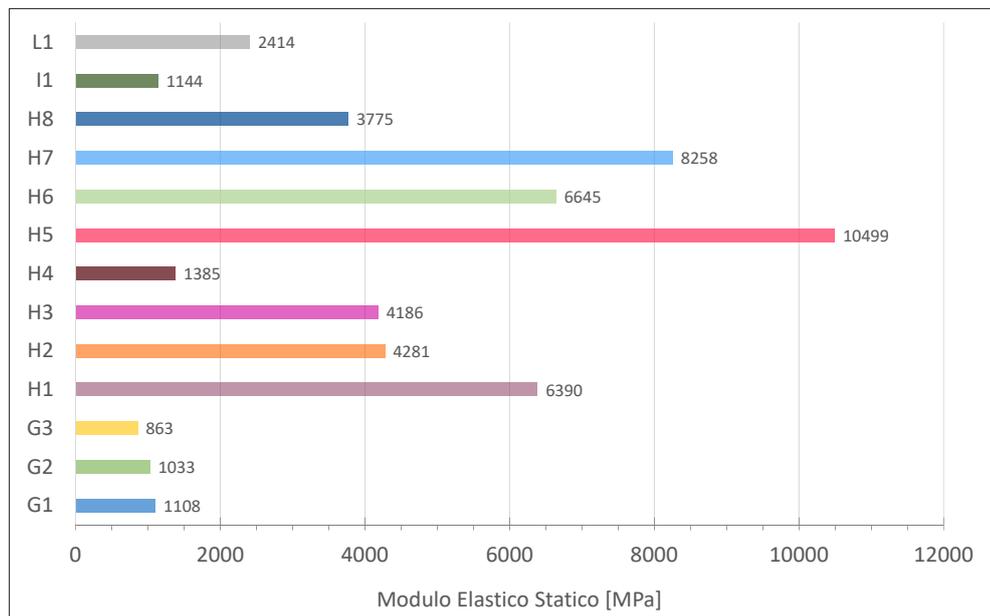
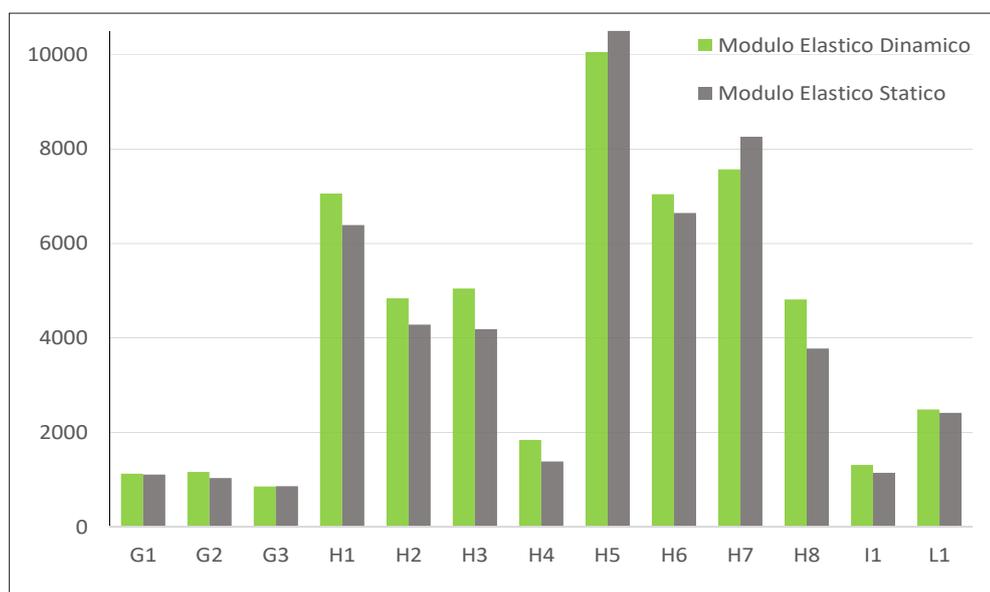


Fig. 44 - Modulo elastico statico medio

Inoltre, confrontando i valori del modulo elastico dinamico E_d e statico E_s (fig. 45) si evince che:

1. i valori del modulo elastico dinamico E_d sono, nella maggior parte dei casi, superiori ai valori del modulo elastico statico E_s , come atteso per i motivi illustrati nella parte iniziale del capitolo (pag. 55). Il motivo per cui in due casi (H5 e H7) i risultati non rispecchiano le attese può risiedere nel fatto che la prova a compressione è stata svolta con un livello di stagionatura dei provini più elevato;
2. le differenze tra i moduli elastici delle differenti categorie di malte permangono in proporzioni pressoché simili.

Fig. 45 - Confronto tra E_d e E_s

Altre osservazioni possono essere fatte confrontando i risultati ottenuti dall'esperienza del 2015 e quelli ottenuti in questo lavoro, paragonando miscele di malte costituite da leganti uguali (o simili nel caso delle malte di calce idraulica) utilizzati nelle medesime proporzioni.

- B1/G1 e B3/G2: si tratta di malte di calce idraulica, con la differenza che le malte B1 (3:1) e B3 (2,5:1) sono state miscelate con calce idraulica naturale NHL 2, mentre le malte G1 (3:1) e G2 (2,5:1) sono state miscelate con calce idraulica naturale NHL 3,5. Dal confronto ci aspetteremmo un modulo elastico maggiore delle malte G1 e G2 essendo costituite di calce con una maggior resistenza; il fatto che ciò non avvenga può stare nel fatto che le malte B1 e B3 siano state testate dopo un tempo di stagionatura maggiore. Infatti, è noto che le malte di calce idraulica incrementino nel tempo la loro resistenza meccanica.
- B4/G1 e B6/G2: in questo caso la malta B4 (3:1) e B6 (2,5:1) sono state miscelate con calce idraulica naturale NHL 5. Per quanto riguarda il confronto B4/G1 i risultati soddisfano le aspettative essendo $E_{B4} > E_{G1}$; invece, per quanto riguarda il raffronto B6/G2 notiamo che non solo che $E_{B6} < E_{G2}$, ma che lo è con una proporzione molto lontana da quella del paragone precedente.
- E3/H1: entrambe le malte sono state miscelate con cemento 32,5 in proporzione 3:1. I valori ottenuti non sono molto diversi tra loro. Anche in questo caso la differenza può essere data da un diverso grado di compattazione o da una diversa stagionatura dei provini.
- E4/H3: entrambe le malte sono state miscelate con cemento 32,5 e grassello in proporzione (12:1:3). Anche in questo caso i risultati sono comparabili, nonostante il divario tra i due moduli elastici aumenti sempre a favore della categoria H.

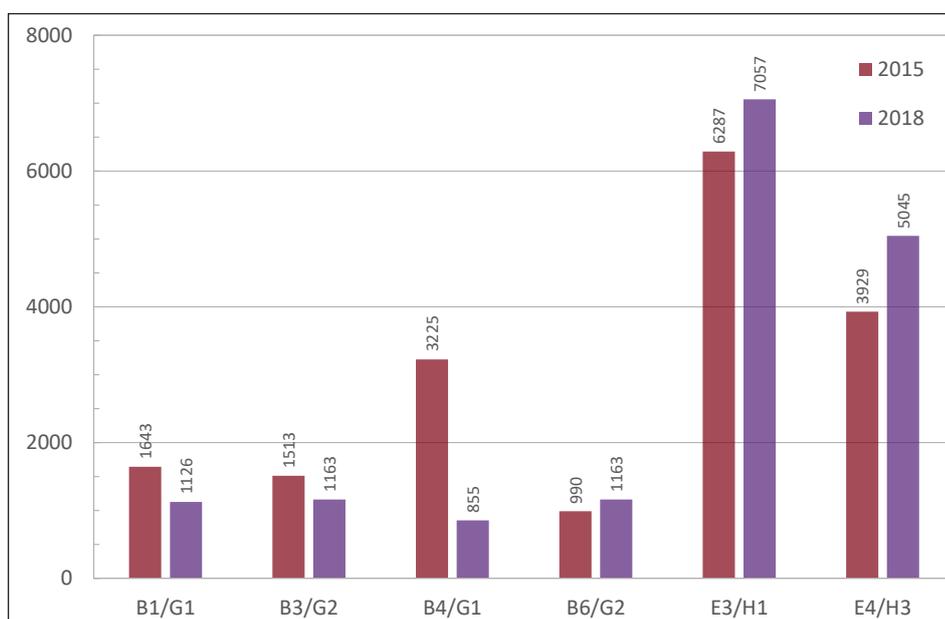


Fig. 46 - Confronto tra risultati del 2015 e del 2018

APPENDICE A



DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G1 UNI
Data di confezionamento	22/11/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 84 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1596 kg/m ³
Tempo di volo	190,5 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	836,82 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1126 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G2 UNI
Data di confezionamento	27/11/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 78 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni	
Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	30 mm
Frequenza sonda	120 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1599 kg/m ³
Tempo di volo	187,6 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	817,02 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1163 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G3 UNI
Data di confezionamento	06/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia, calce NHL 3,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 70 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

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

Apparecchio ad ultrasuoni

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

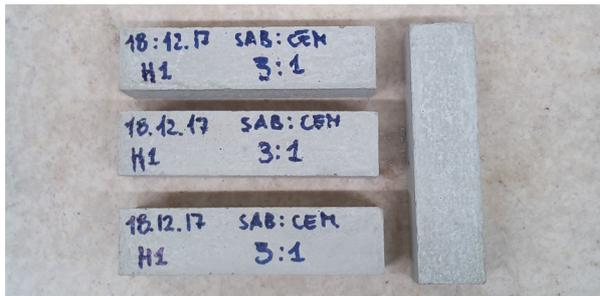
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1599 kg/m ³
Tempo di volo	209,7 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	817,02 m/s
Modulo Elastico Dinamico	855 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H1 UNI
Data di confezionamento	18/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 57 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1763 kg/m ³
Tempo di volo	80,0 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1978,97 m/s
Modulo Elastico Dinamico	7057 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H2 UNI
Data di confezionamento	25/01/2018
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 33 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1585 kg/m ³
Tempo di volo	91,6 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1663 m/s
Modulo Elastico Dinamico	4840 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H3 UNI
Data di confezionamento	25/01/2018
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 33 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

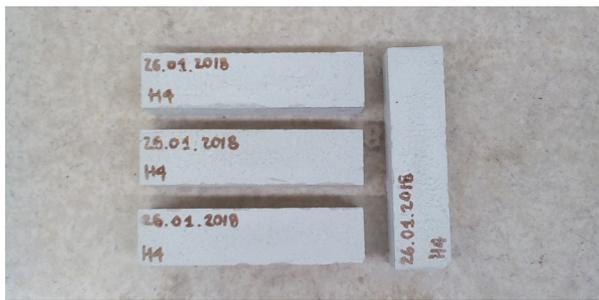
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1604 kg/m ³
Tempo di volo	90,2 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1737 m/s
Modulo Elastico Dinamico	5045 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H4 UNI
Data di confezionamento	26/01/2018
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 32 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1398 kg/m
Tempo di volo	139,4 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1098 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1841 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H5 UNI
Data di confezionamento	05/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 42,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 70 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

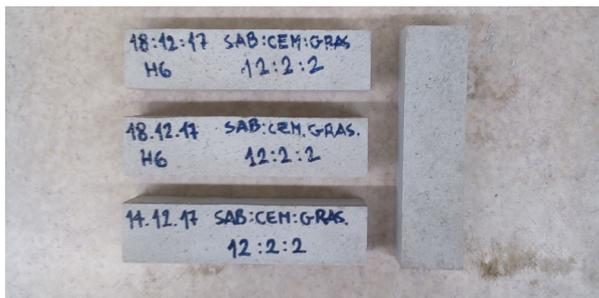
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1815 kg/m ³
Tempo di volo	68,0 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	2353,52 m/s
Modulo Elastico Dinamico	10052 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H6 UNI
Data di confezionamento	14-18/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 62/58 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1692 kg/m ³
Tempo di volo	78,4 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	2039,95 m/s
Modulo Elastico Dinamico	7041 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H7 UNI
Data di confezionamento	11/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 65 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

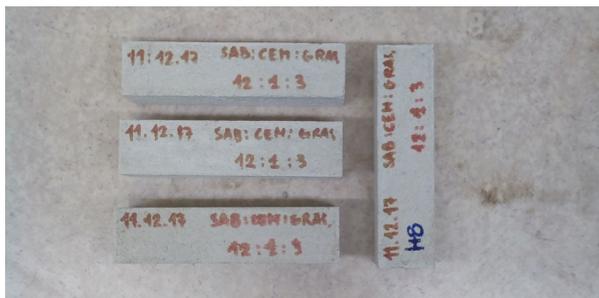
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1676 kg/m ³
Tempo di volo	75,3 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	2124,83 m/s
Modulo Elastico Dinamico	7568 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H8 UNI
Data di confezionamento	11/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 65 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1618 kg/m ³
Tempo di volo	92,8 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1575,32 m/s
Modulo Elastico Dinamico	4814 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	I1 UNI
Data di confezionamento	30/11/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia/Cocciopesto e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	14 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 75 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

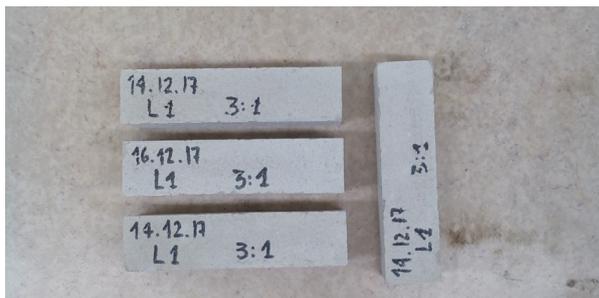
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1185 kg/m ³
Tempo di volo	152,1 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1052 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1311 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	L1 UNI
Data di confezionamento	14/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia/Perlite e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 58 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

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

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

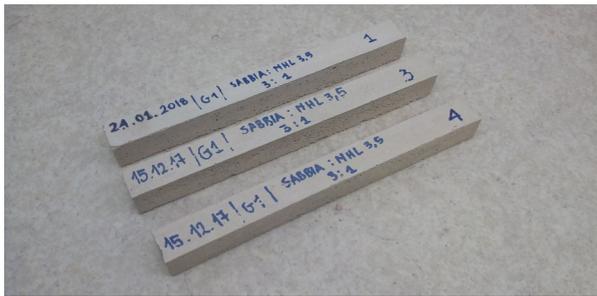
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1383 kg/m ³
Tempo di volo	119,4 μ s
Lunghezza	160 mm
Velocità	1340 m/s
Modulo Elastico Dinamico	2484 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G1_NN
Data di confezionamento	15-24/01/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 34 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1642,7 kg/m ³
Tempo di volo	287,2 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1044,6 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1793 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G2_NN
Data di confezionamento	26/01/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 32 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

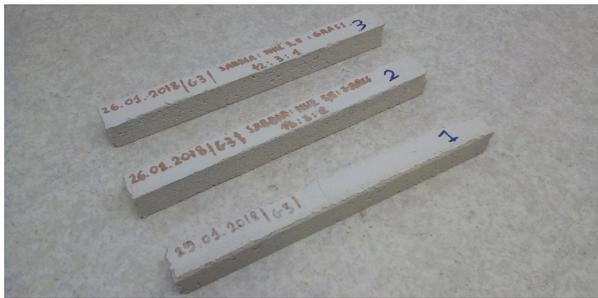
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1584,6 kg/m ³
Tempo di volo	272,9 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1099,3 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1193 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	G3_NN
Data di confezionamento	26-29/01/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	Sabbia, calce NHL 3,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 28 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

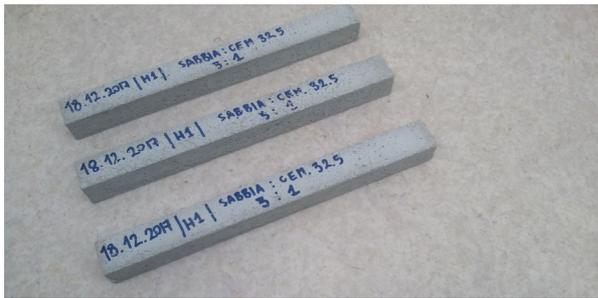
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1451,0 kg/m ³
Tempo di volo	378,4 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	792,73 m/s
Modulo Elastico Dinamico	568 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H1_NN
Data di confezionamento	18/12/2017
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 70 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1761 kg/m ³
Tempo di volo	139,3 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	2154 m/s
Modulo Elastico Dinamico	8169 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H2_NN
Data di confezionamento	31/01/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 28 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

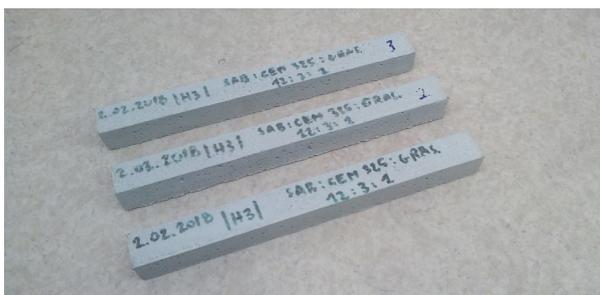
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1620 kg/m ³
Tempo di volo	181 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1658 m/s
Modulo Elastico Dinamico	4451 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H3_NN
Data di confezionamento	02/02/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	06 Marzo 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 31 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1505 kg/m ³
Tempo di volo	172 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1748 m/s
Modulo Elastico Dinamico	4597MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H4_NN
Data di confezionamento	05-07/02/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	06 Marzo 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 28 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1449 kg/m ³
Tempo di volo	222 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1349 m/s
Modulo Elastico Dinamico	2639 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H5_NN
Data di confezionamento	30/01/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	06 Marzo 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 34 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

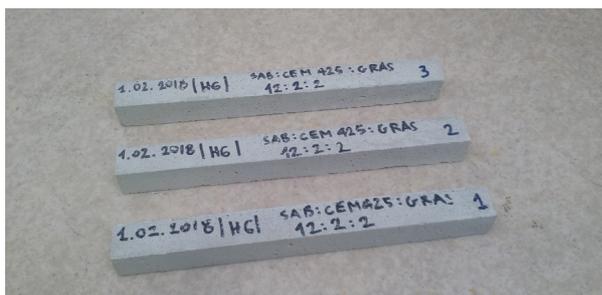
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1794 kg/m ³
Tempo di volo	106 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	2828 m/s
Modulo Elastico Dinamico	14347 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO

H6_NN

Data di confezionamento

01/02/2018

Dimensioni cassaforma

30mm x 30mm x 300mm

Dimensioni provino

30mm x 30mm x 300mm

Materiali utilizzati

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	06 Marzo 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 32 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

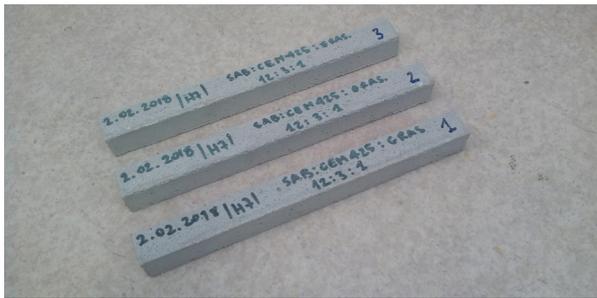
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1610 kg/m ³
Tempo di volo	158 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1896 m/s
Modulo Elastico Dinamico	5785 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H7_NN
Data di confezionamento	02/02/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	06 Marzo 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 32 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

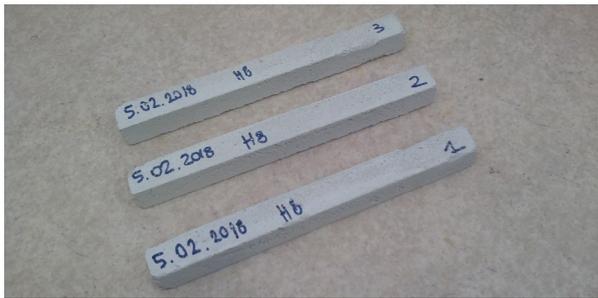
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1491 kg/m ³
Tempo di volo	161 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1861 m/s
Modulo Elastico Dinamico	5164 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	H8_NN
Data di confezionamento	05/02/2018
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	28 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 28 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

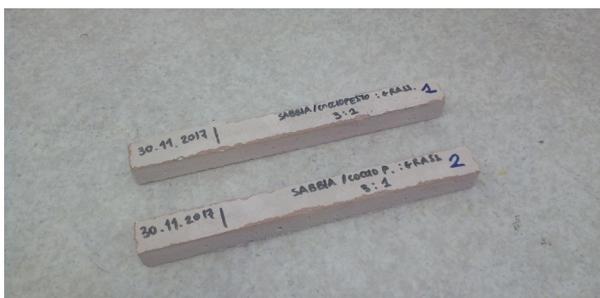
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1474 kg/m ³
Tempo di volo	211 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1419 m/s
Modulo Elastico Dinamico	2968 MPa

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DEGLI IMPULSI ULTRASONICI



1. PROVINO	I1_NN
Data di confezionamento	30/11/2017
Dimensioni cassaforma	30mm x 30mm x 300mm
Dimensioni provino	30mm x 30mm x 300mm
Materiali utilizzati	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	20 Febbraio 2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12504-4
Operatore	Bellocci Benedetta

3. CONDIZIONI DI PROVA

Luogo della prova	Laboratorio Sistemi Edilizi
Umidità relativa	50%
Temperatura	24°C
Condizioni fisiche	Stagionatura 80 giorni
Condizioni statiche	Provino appoggiato su piano

4. APPARATO SPERIMENTALE

Apparecchio ad ultrasuoni

Costruttore	SIRIO
Modello	RP 4000 CSM
Scala dei tempi	0,1 μ s
Diametro sonda	50 mm
Frequenza sonda	50 kHz

5. MODALITÀ ESECUTIVE DELLA PROVA

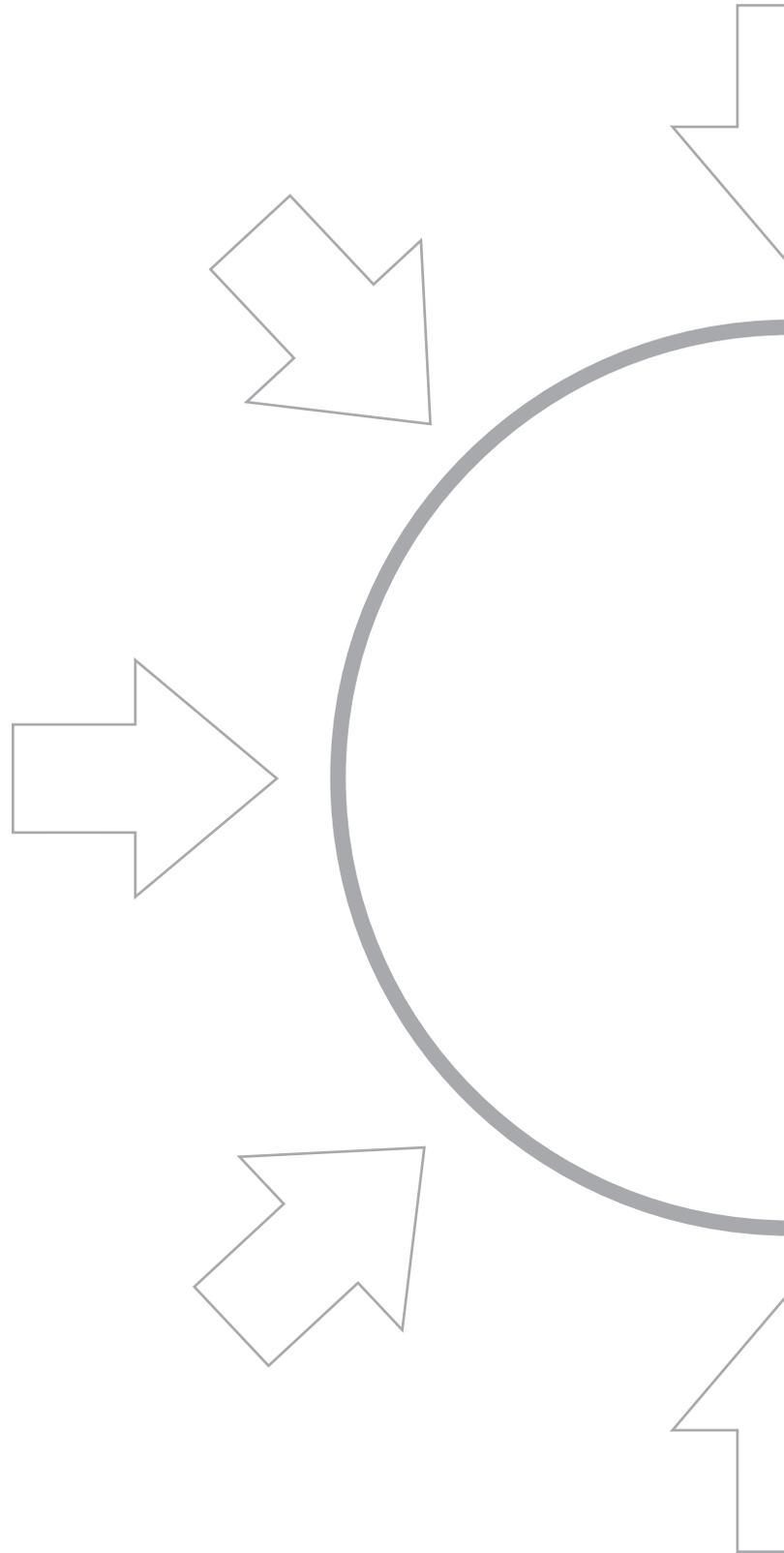
La prova è stata effettuata con il metodo di trasmissione diretta delle onde, posizionando trasmettitore e ricevitore in direzioni opposte, con in mezzo l'elemento da indagare.

Le sonde vengono applicate alle facce ortogonali alla direzione del getto in modo tale che il materiale presenti una buona omogeneità. Prima di applicare le sonde è necessario verificare l'adesione di queste alle superfici dell'elemento da sottoporre alle prove per evitare che l'inclusione di aria provochi un'attenuazione del segnale. Per migliorare questa adesione si è fatto uso della plastilina.

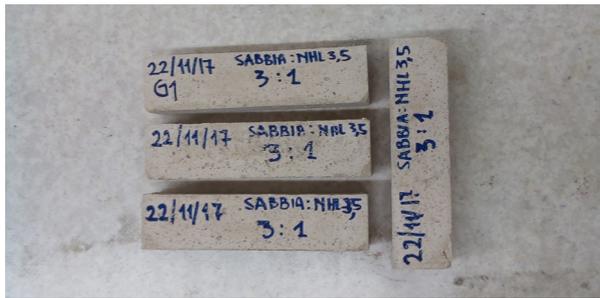
6. ANALISI DEI RISULTATI

Densità	1215 kg/m ³
Tempo di volo	243 μ s
Lunghezza	300 mm
Velocità	1234 m/s
Modulo Elastico Dinamico	1851 MPa

APPENDICE B



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



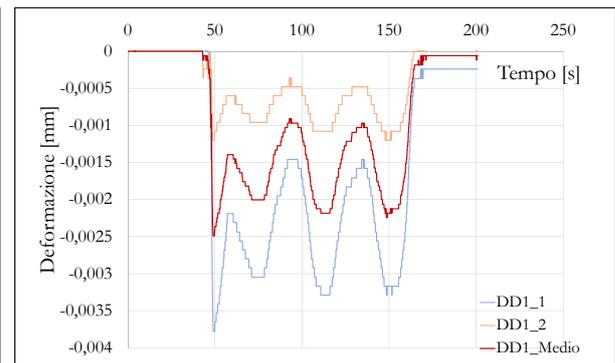
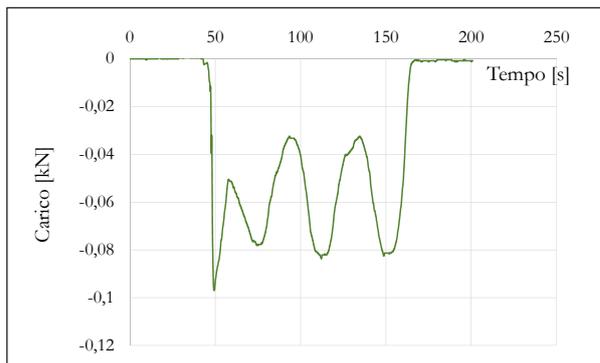
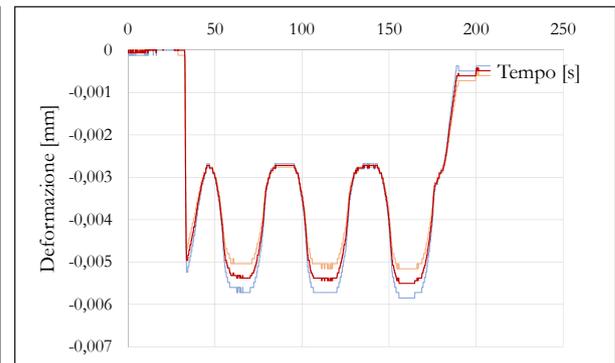
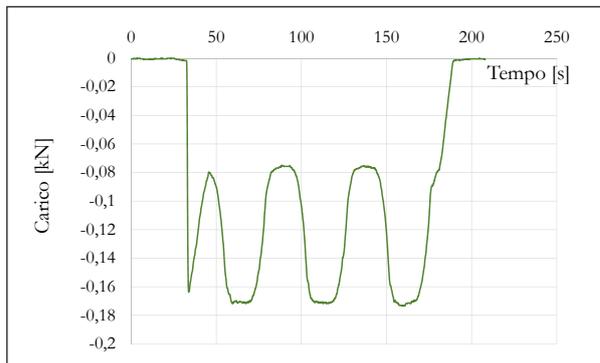
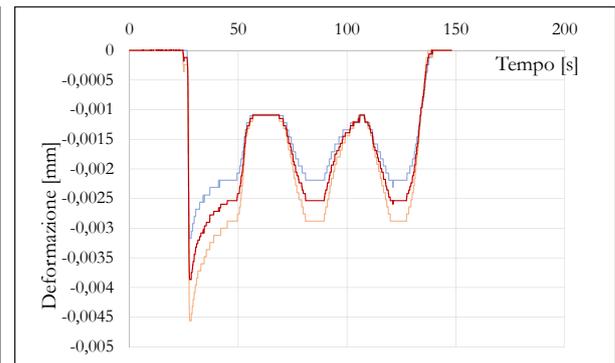
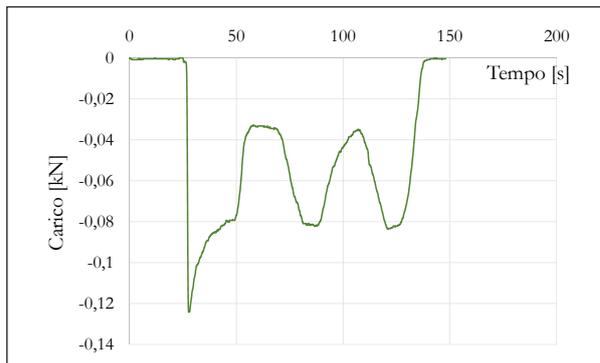
1. PROVINO	G1_UNI
Data di confezionamento	22/11/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	20/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,0471 MPa
Sforzo massimo	0,1074 MPa
Deformazione minima	0,0000544
Deformazione massima	0,0001101
Modulo Elastico Statico	1108 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



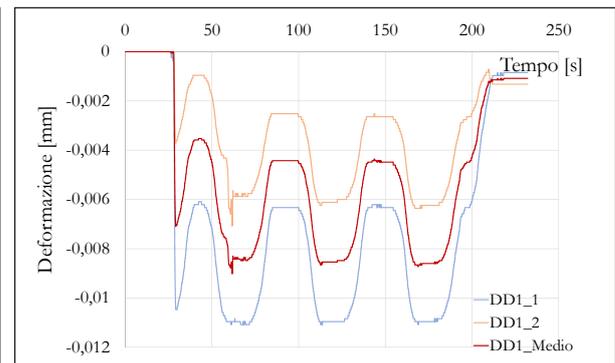
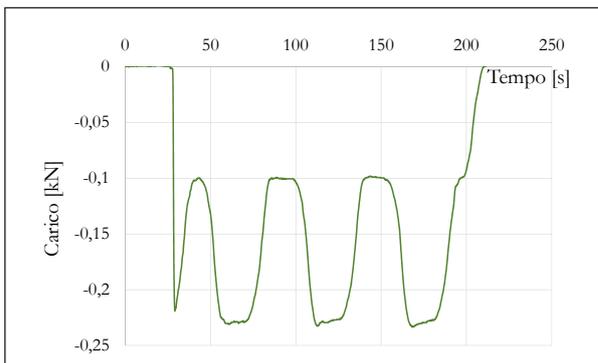
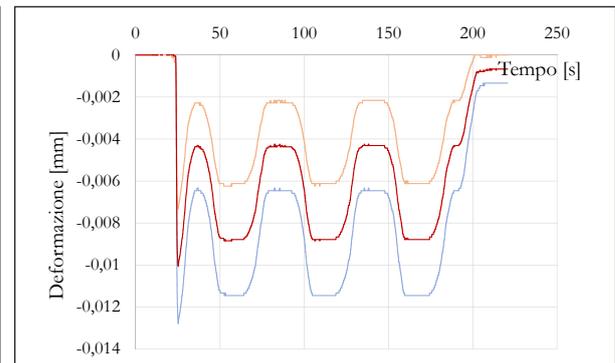
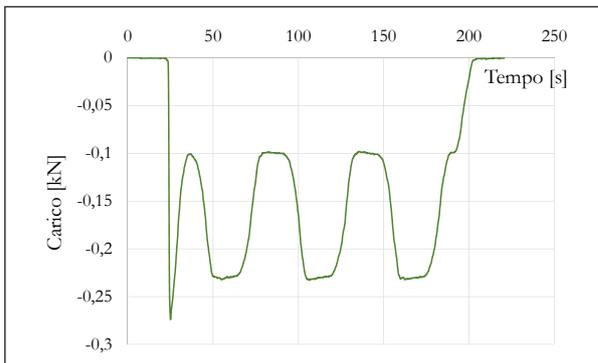
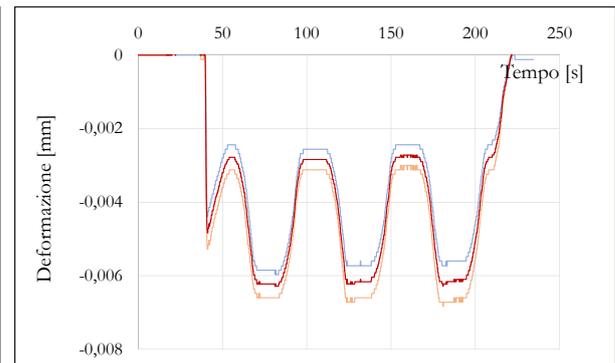
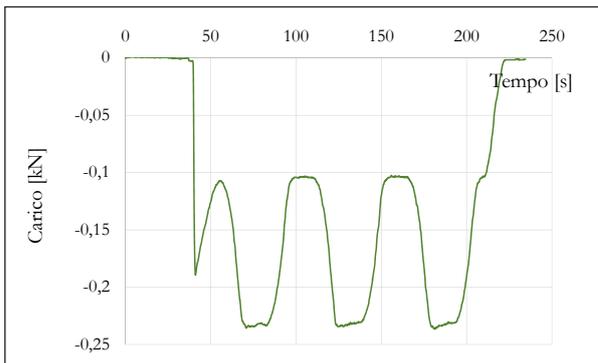
1. PROVINO		G2_UNI
Data di confezionamento	27/11/2017	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e calce NHL 3,5	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	20/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,0623 MPa
Sforzo massimo	0,1459 MPa
Deformazione minima	0,0000897
Deformazione massima	0,0001744
Modulo Elastico Statico	1033 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



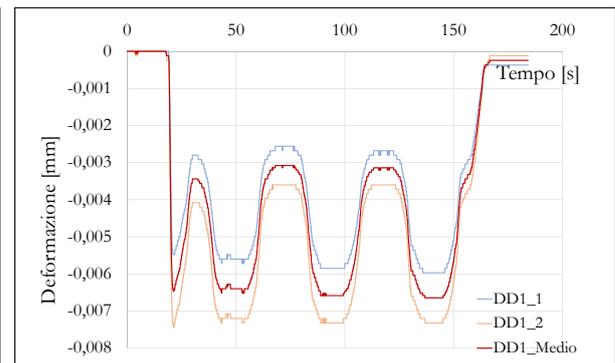
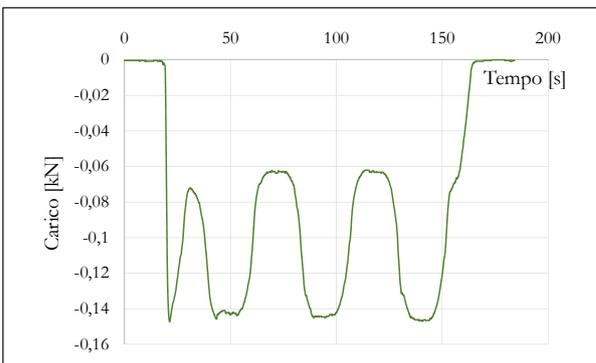
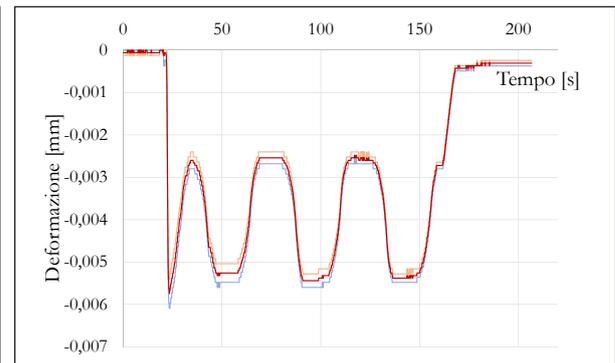
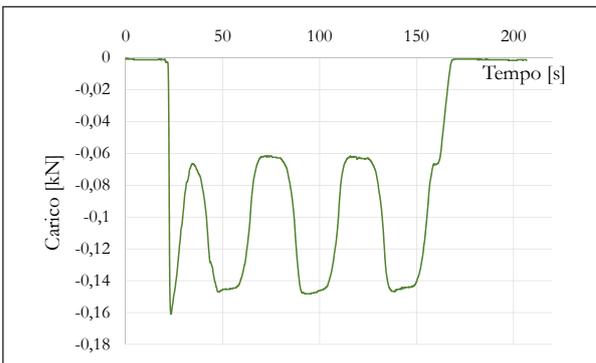
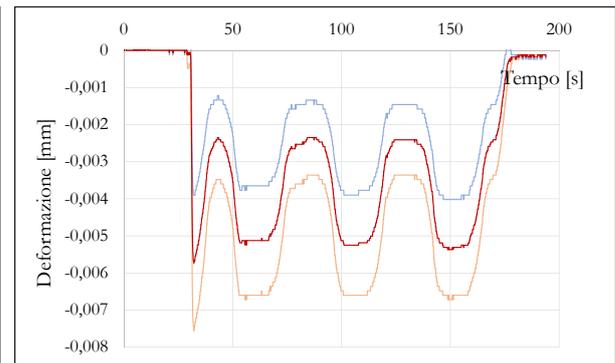
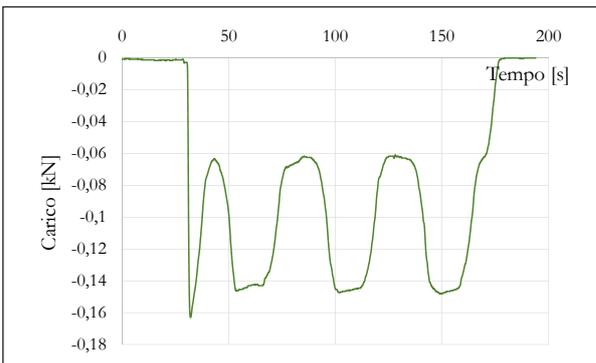
1. PROVINO	G3_UNI
Data di confezionamento	06/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia, calce NHL 3,5 e grassetto

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	20/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,0391 MPa
Sforzo massimo	0,0919 MPa
Deformazione minima	0,0000482
Deformazione massima	0,0001074
Modulo Elastico Statico	863 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



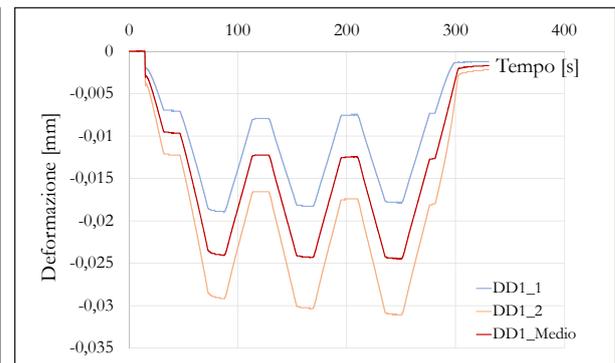
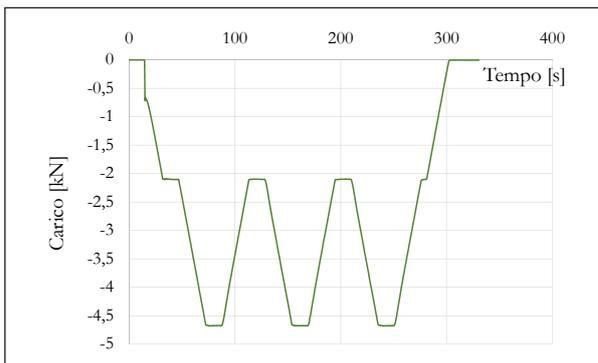
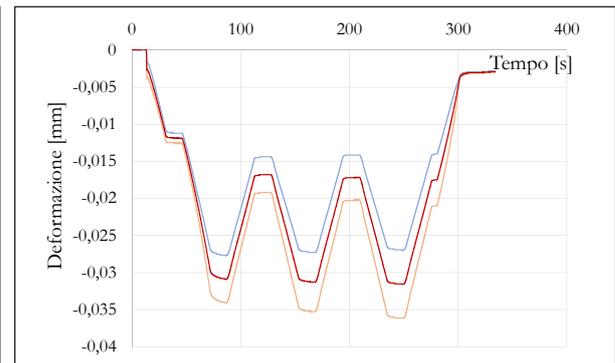
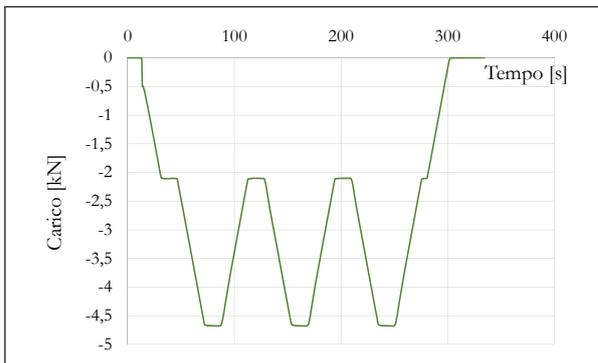
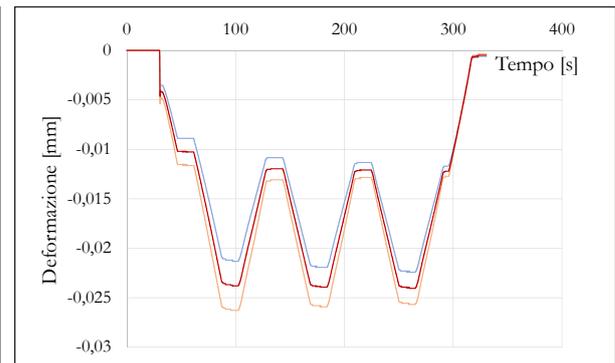
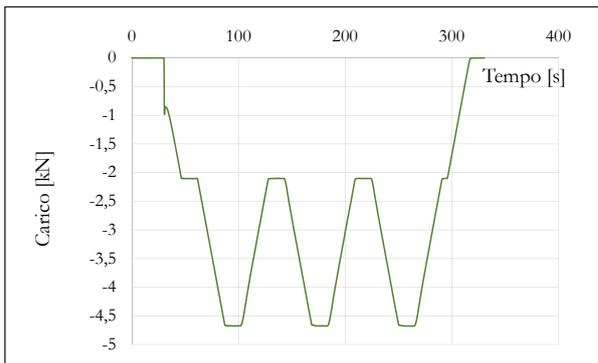
1. PROVINO		H1_UNI
Data di confezionamento	18/12/2017	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

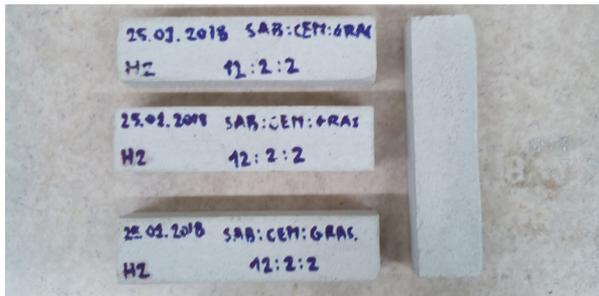
Data della prova	20/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	1,3188 MPa
Sforzo massimo	2,9225 MPa
Deformazione minima	0,0002495
Deformazione massima	0,0004875
Modulo Elastico Statico	6390 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



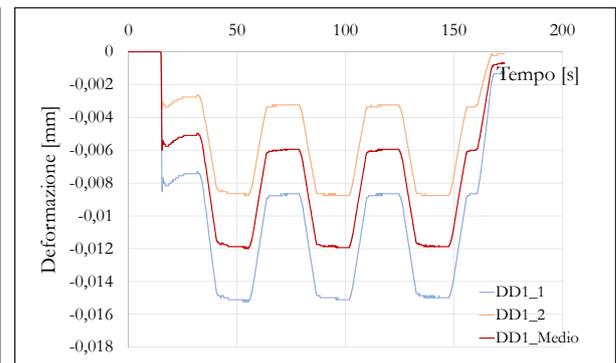
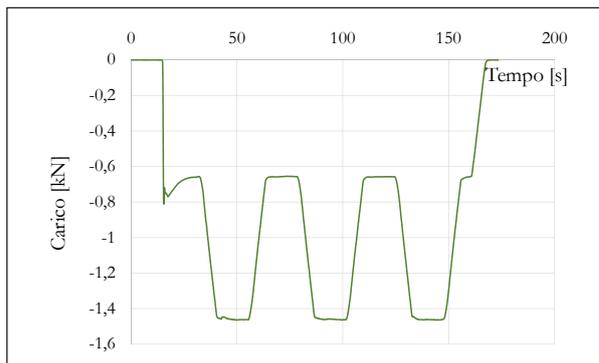
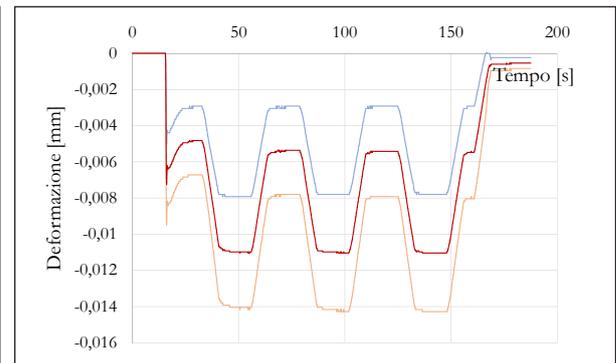
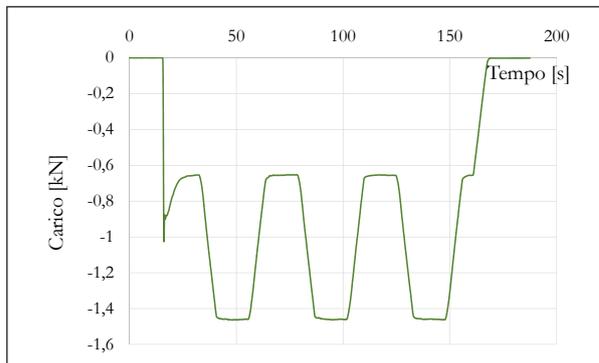
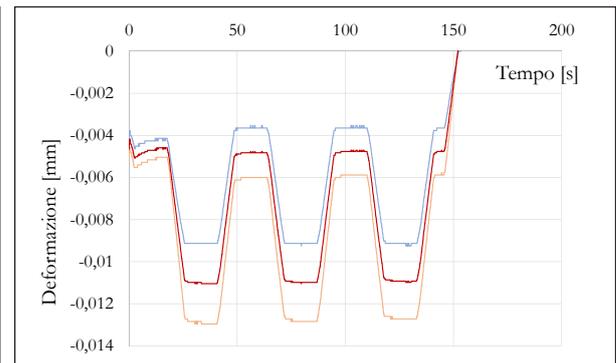
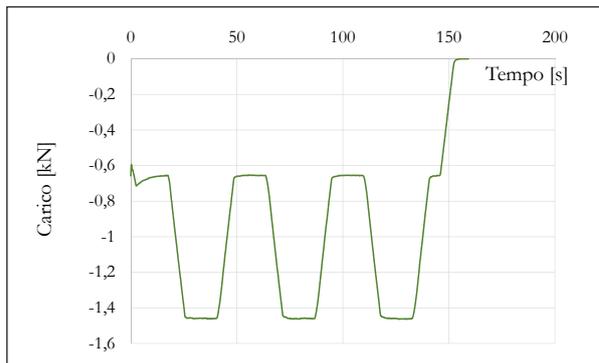
1. PROVINO		H2_UNI
Data di confezionamento	25/01/2018	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

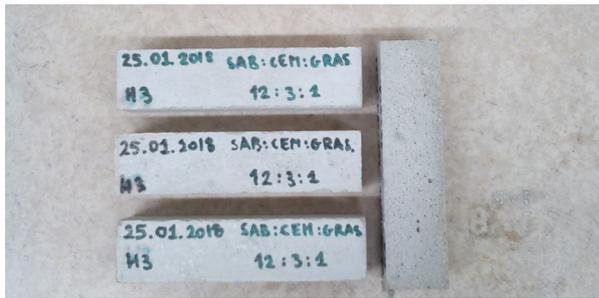
Data della prova	23/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,4108 MPa
Sforzo massimo	0,9113 MPa
Deformazione minima	0,0001189
Deformazione massima	0,0002350
Modulo Elastico Statico	4281 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



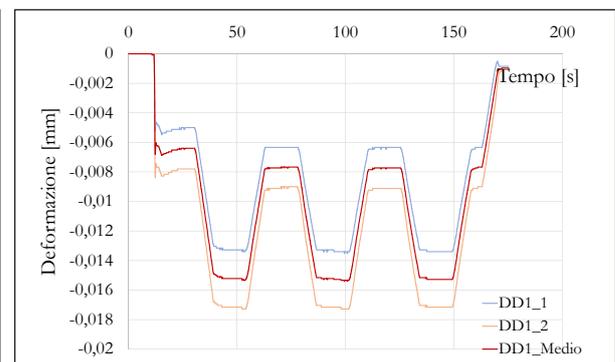
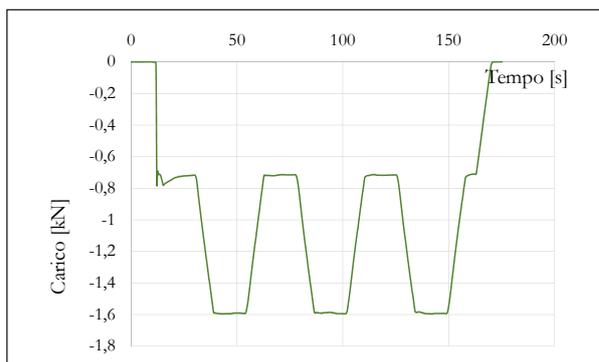
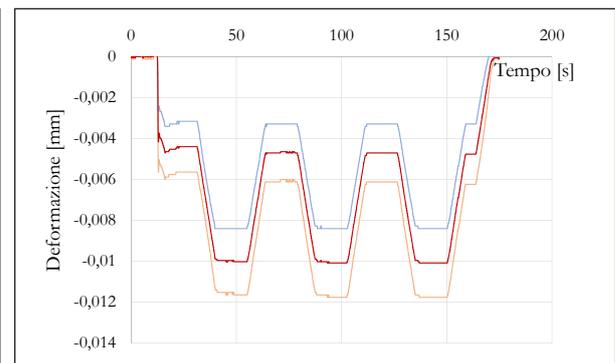
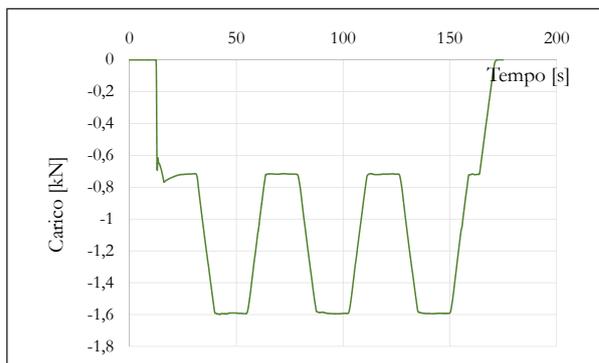
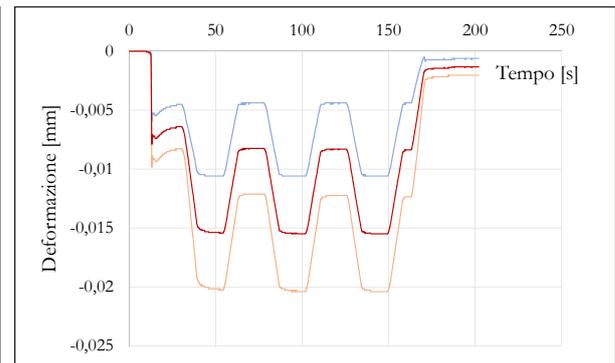
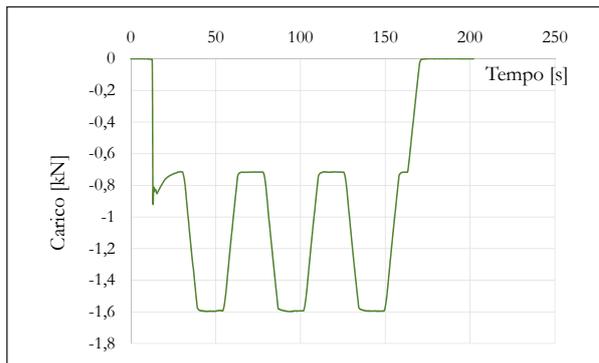
1. PROVINO		H3_UNI
Data di confezionamento	25/01/2018	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

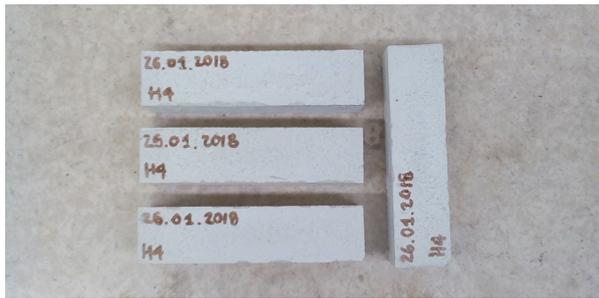
Data della prova	23/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,4478 MPa
Sforzo massimo	0,9969 MPa
Deformazione minima	0,0001662
Deformazione massima	0,0003099
Modulo Elastico Statico	4186 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



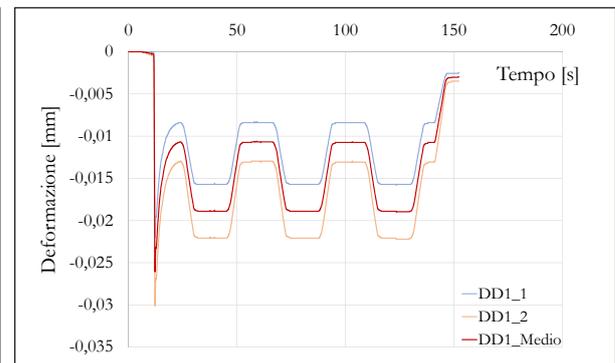
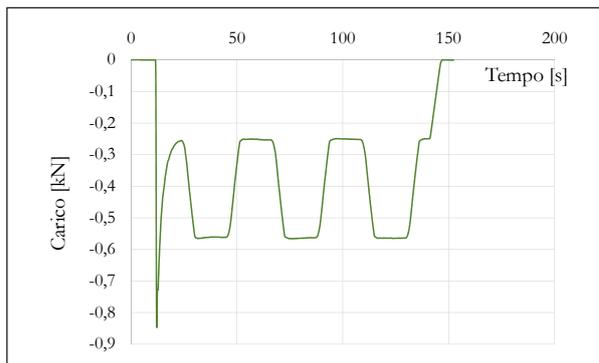
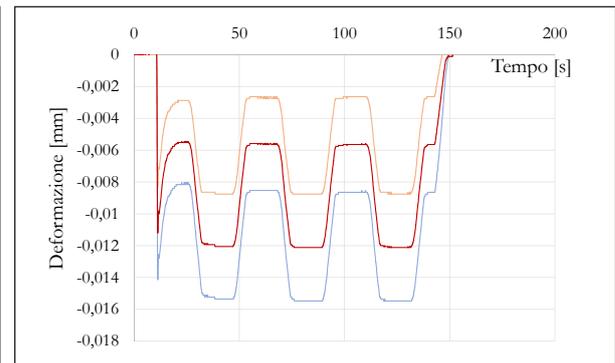
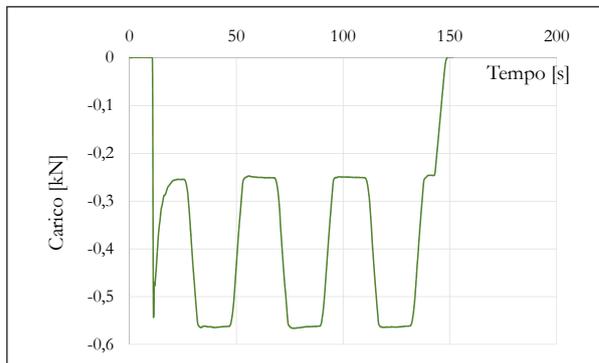
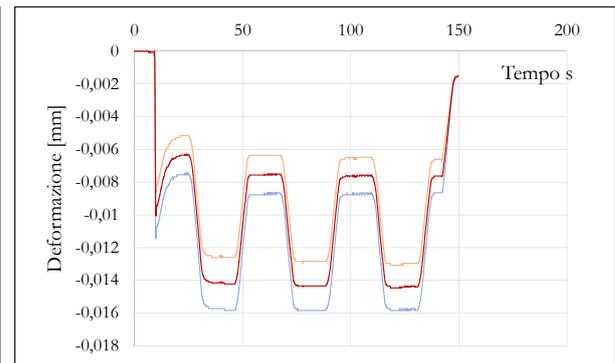
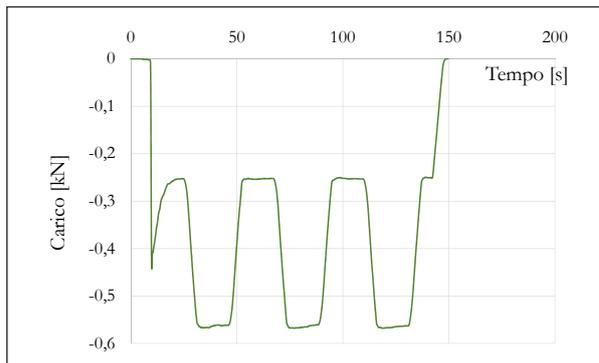
1. PROVINO		H4_UNI
Data di confezionamento	26/01/2018	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 32,5 e grassello	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	23/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,1597 MPa
Sforzo massimo	0,3549 MPa
Deformazione minima	0,0001537
Deformazione massima	0,0002892
Modulo Elastico Statico	1385 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



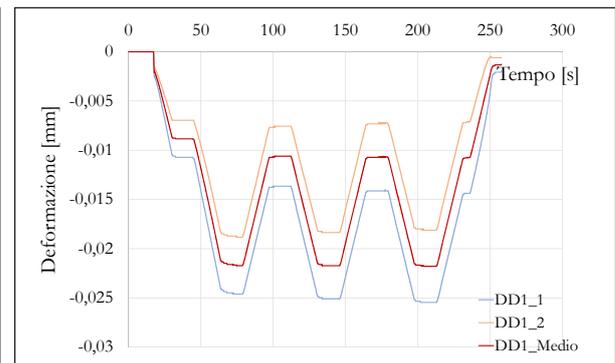
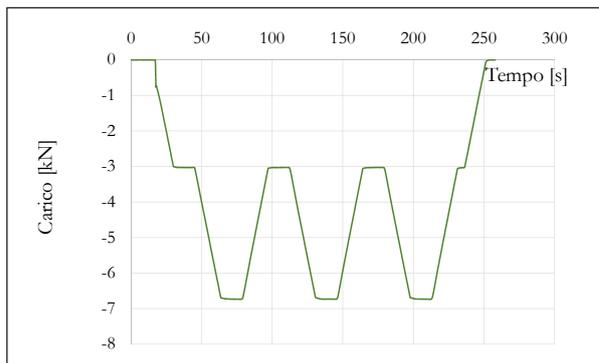
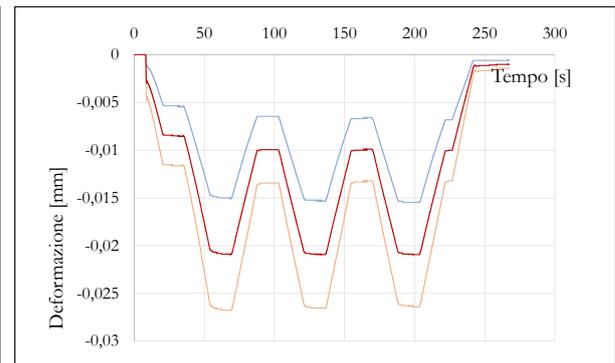
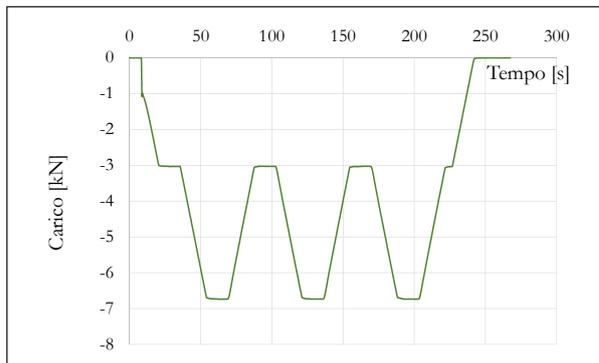
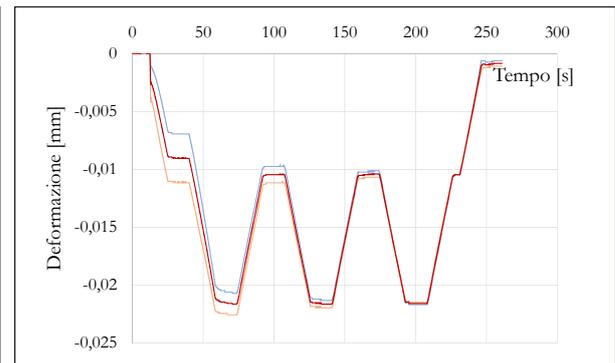
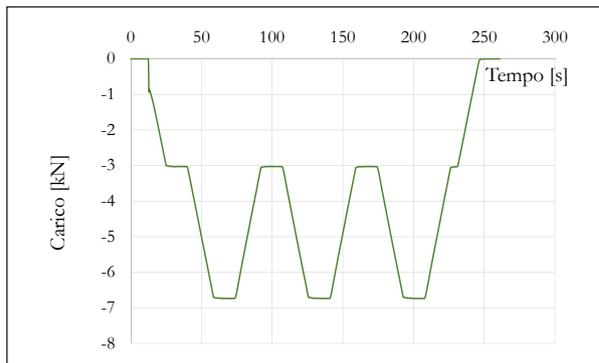
1. PROVINO	H5_UNI
Data di confezionamento	05/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 42,5

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	21/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	1,8913 MPa
Sforzo massimo	4,1963 MPa
Deformazione minima	0,0002133
Deformazione massima	0,0004334
Modulo Elastico Statico	10499 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



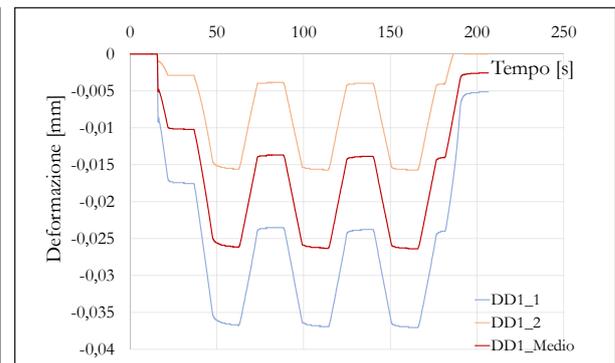
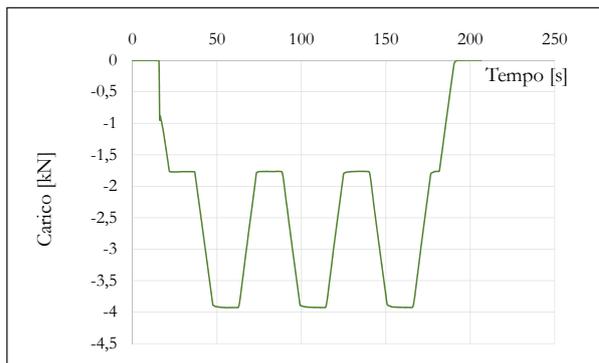
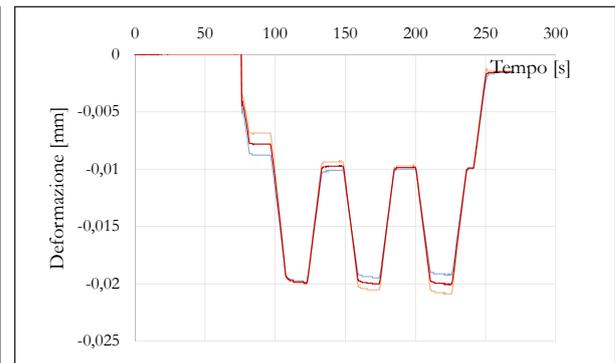
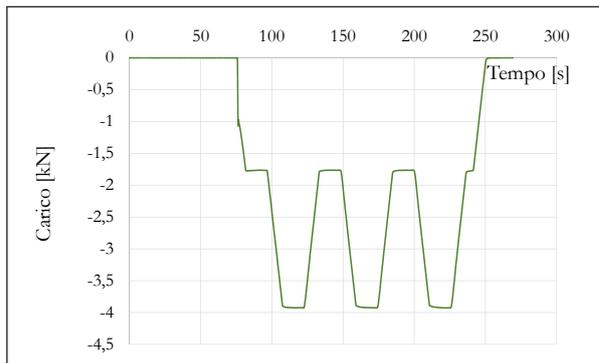
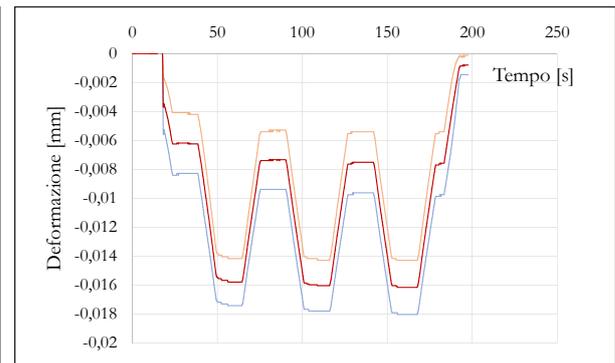
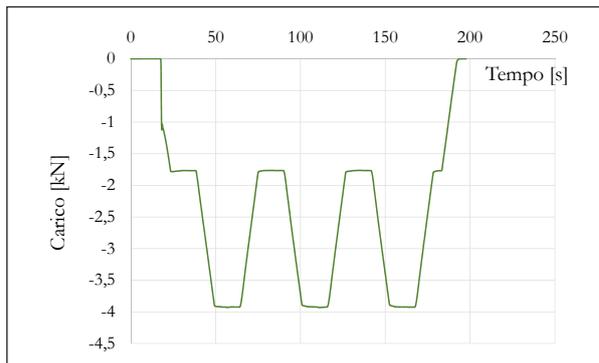
1. PROVINO	H6_UNI
Data di confezionamento	14-18/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 42,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

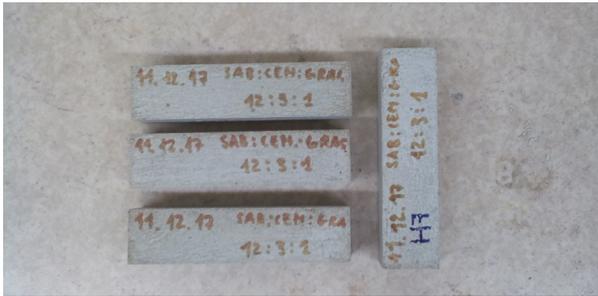
Data della prova	21/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	1,1081 MPa
Sforzo massimo	2,4469 MPa
Deformazione minima	0,0001971
Deformazione massima	0,0003988
Modulo Elastico Statico	6645 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



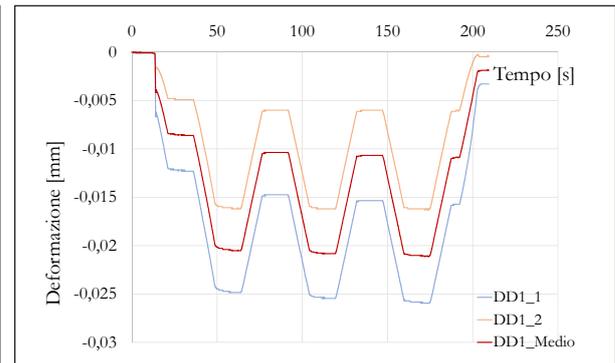
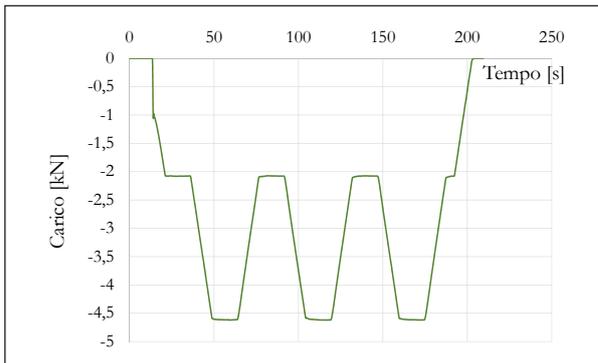
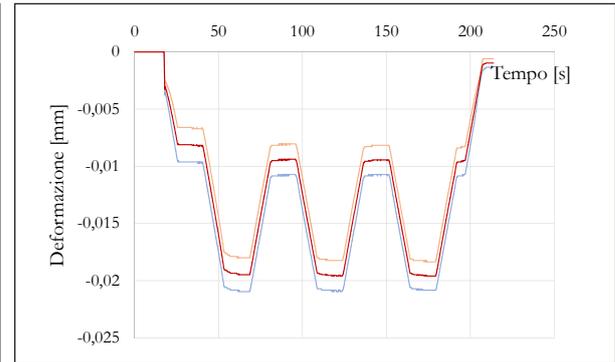
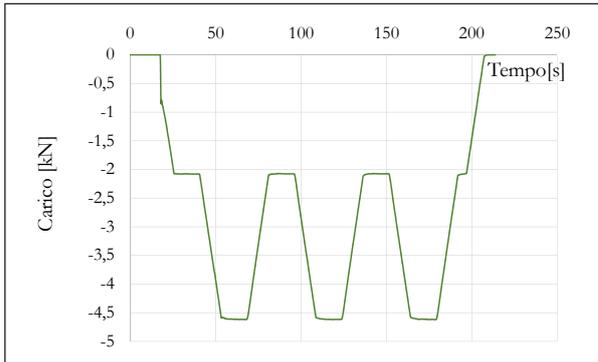
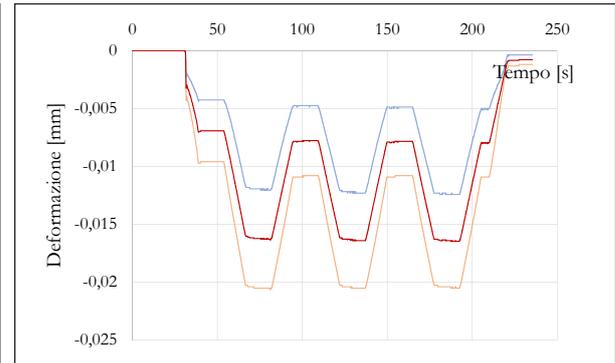
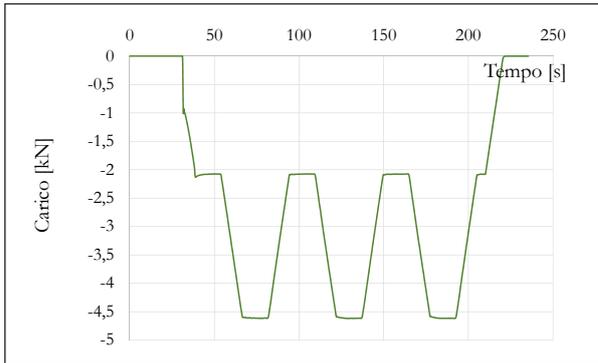
1. PROVINO	H7_UNI
Data di confezionamento	11/12/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 42,5 e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	21/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	1,2969 MPa
Sforzo massimo	2,8850 MPa
Deformazione minima	0,0001888
Deformazione massima	0,0003907
Modulo Elastico Statico	8258 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



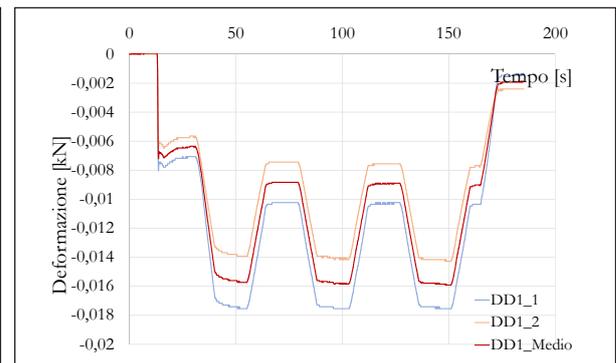
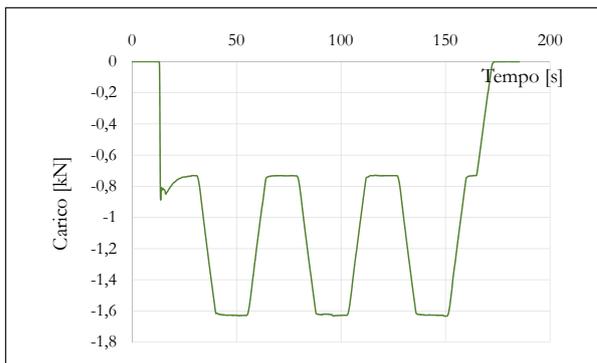
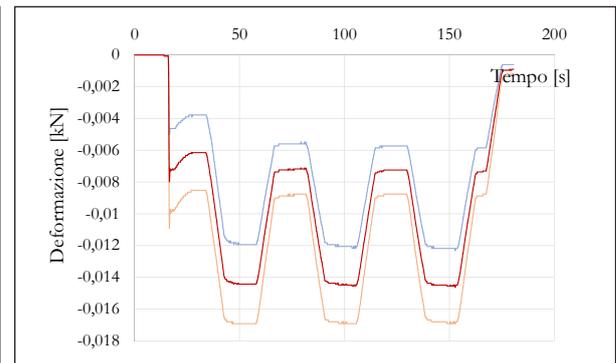
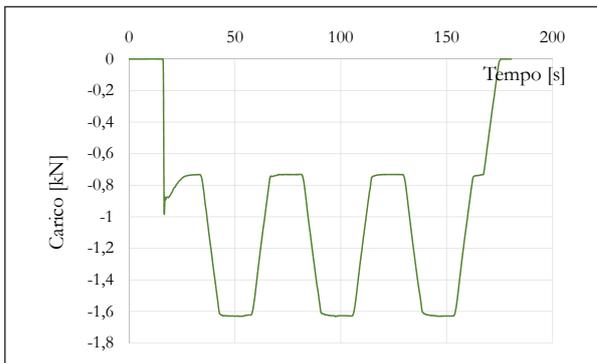
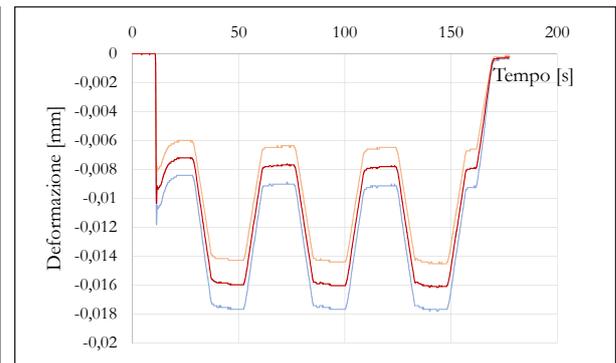
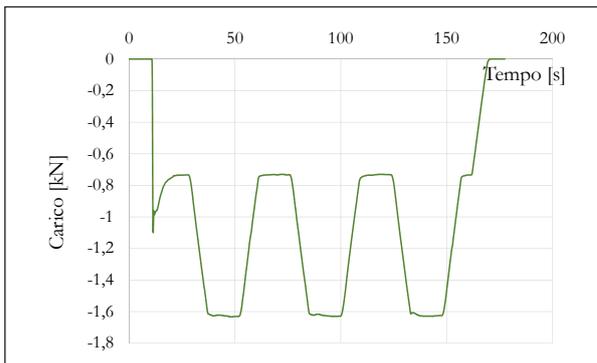
1. PROVINO		H8_UNI
Data di confezionamento	11/12/2017	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia e cemento 42,5 e grassello	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

Data della prova	21/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,4574 MPa
Sforzo massimo	1,0106 MPa
Deformazione minima	0,0001449
Deformazione massima	0,0002874
Modulo Elastico Statico	3775 MPa



DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



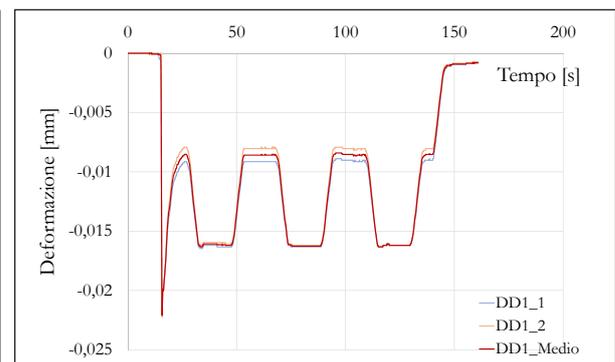
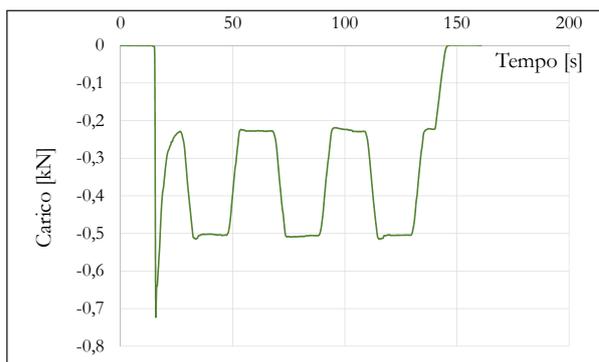
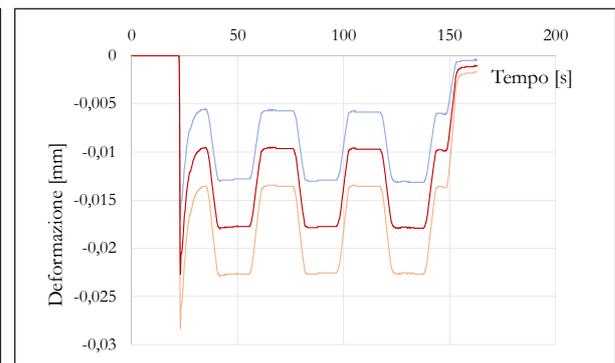
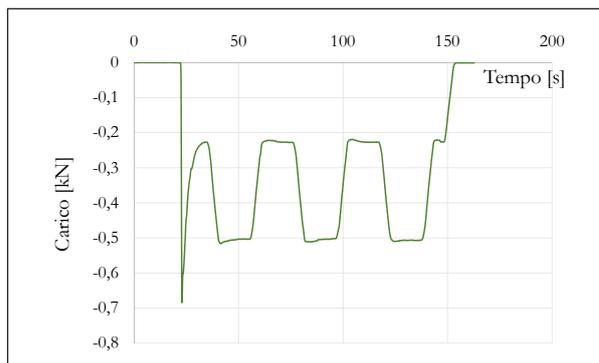
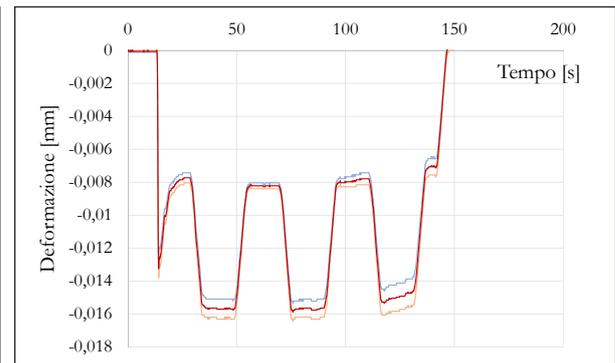
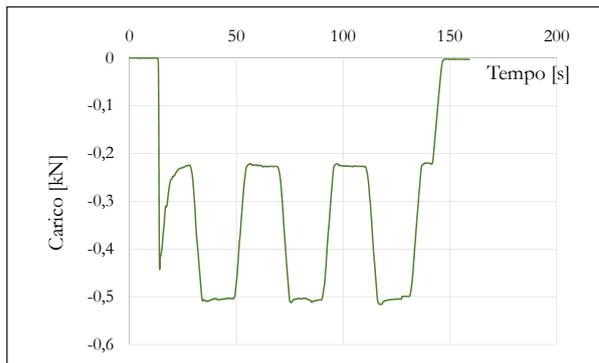
1. PROVINO	I1_UNI
Data di confezionamento	30/11/2017
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm
Materiali utilizzati	Sabbia/Cocciopesto e grassello

2. ESECUZIONE DELLA PROVA

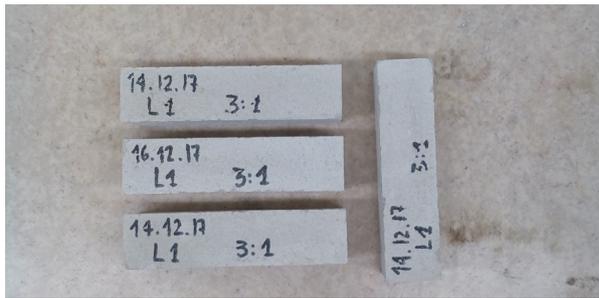
Data della prova	23/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI

Sforzo minimo	0,1427 MPa
Sforzo massimo	0,3209 MPa
Deformazione minima	0,0001706
Deformazione massima	0,0003252
Modulo Elastico Statico	1144 MPa



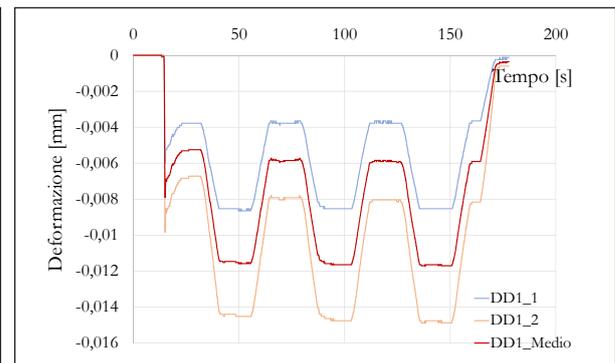
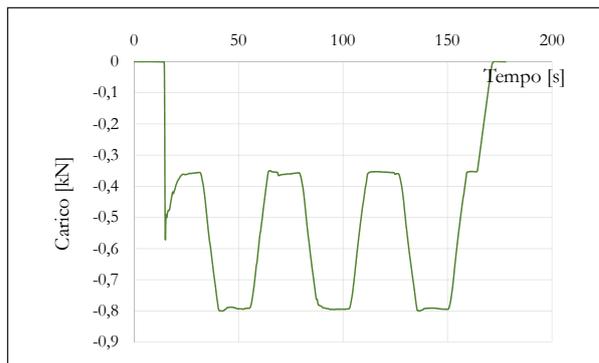
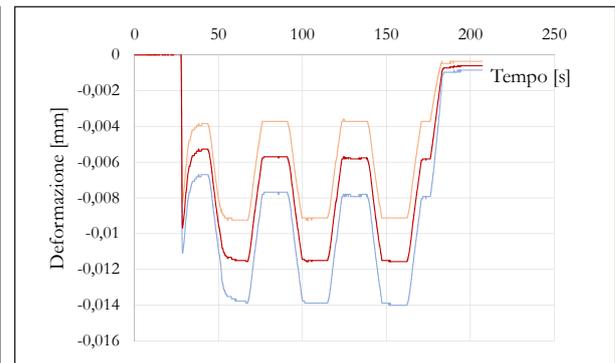
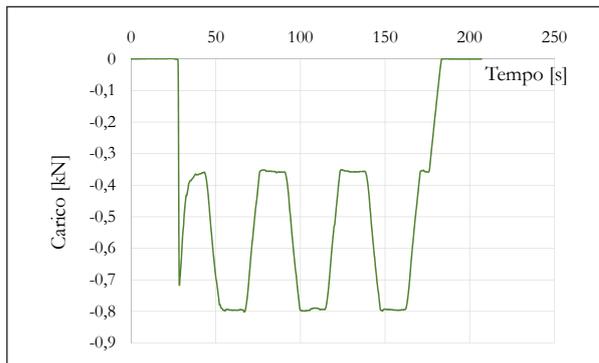
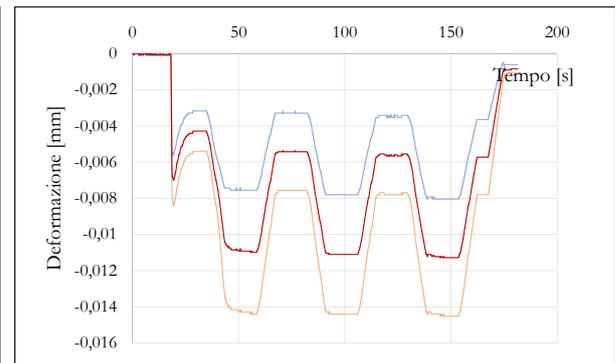
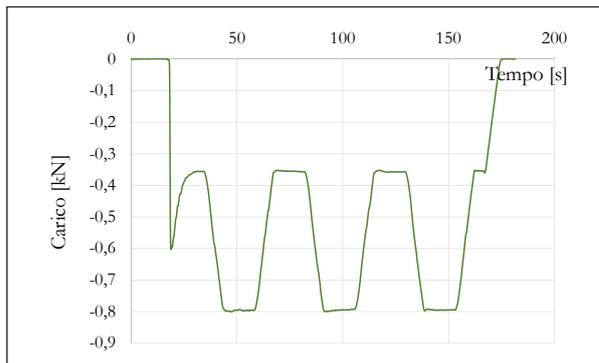
DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO STATICO



1. PROVINO		L1_UNI
Data di confezionamento	14/12/2017	
Dimensioni cassaforma	40mm x 40mm x 160mm	
Dimensioni provino	40mm x 40mm x 160mm	
Materiali utilizzati	Sabbia/Perlite e grassello	

2. ESECUZIONE DELLA PROVA	
Data della prova	23/02/2018
Tipologia sperimentale	Prova non distruttiva
Tipologia di prova	Prova su materiali
Norma di riferimento	UNI EN 12390-13
Operatore	Bellocci Benedetta

3. ANALISI DEI RISULTATI	
Sforzo minimo	0,2223 MPa
Sforzo massimo	0,4992 MPa
Deformazione minima	0,0001152
Deformazione massima	0,0002301
Modulo Elastico Statico	2414 MPa



APPENDICE C





CALCEFORTE NHL 3,5

SCHEMA TECNICA - CODICE PRODOTTO C 0204

Posa in opera

La CALCEFORTE NHL 3,5 dovrà essere mescolata con sabbie lavate o graniglie scelte, in adeguata curva granulometrica in funzione alla destinazione d'utilizzo della malta, e impastata con sola acqua pulita in ragione di 1 parte in peso di calce e 3 parti in peso di sabbia (indicativamente kg 400–450 di calce ogni m³ di inerte). Si consiglia di lasciare riposare l'impasto per alcuni minuti prima dell'applicazione. Si raccomanda di preparare le miscele in cantiere ed eseguire delle prove di applicazione, in quanto, i numerosi inerti presenti sul mercato non permettono di standardizzare i dosaggi. Al fine di preservarne la purezza si consiglia di NON aggiungere alla CALCEFORTE NHL 3,5 alcun altro legante idraulico artificiale di origine cementizia. Le malte realizzate con la CALCEFORTE NHL 3,5 possono essere applicate su murature tradizionali in laterizio e pietre naturali purchè porose. Per applicazioni su superfici in calcestruzzo, isolanti naturali, termolaterizi, prefabbricati in CLS, si deve utilizzare un idoneo rinzafo per migliorare l'adesione al supporto. Essendo gli intonaci formati con le calci naturali CALCEFORTE estremamente porosi, vanno rifiniti con materiali dalle simili comprovate caratteristiche di traspirabilità (come la ST06 e la ST12 Stabilitura e le pitture e i tonachini in calce, ai silicati, ai silossani, marmorini e stucchi in calce delle Linee CALCEFORTE).

Confezione

Sacco da kg 25.

NOTE TECNICHE

Stato fisico	solido in polvere
Massa volumica apparente	0,65 – 0,70 g/cm ³ circa
Tempo di presa	inizio 5 – 6 ore fine 5 – 6 giorni
Resistenza meccanica a 7 giorni	≥ 1,0 N/mm ²
Resistenza meccanica a 28 giorni	≥ 3,5 N/mm ²
Resistenza meccanica a 56 giorni	≥ 5,0 N/mm ²
Finezza (residuo a 0,2 mm)	< 0,2%
Finezza (residuo a 0,09 mm)	< 7%
Calce libera	20 – 25%
Contenuto SO ₃	< 0,5%

ANALISI CHIMICA

Analisi in fluorescenza dei raggi X (XRF)	
CaO	75,87%
SiO ₂	15,04%
Al ₂ O ₃	3,37%
Fe ₂ O ₃	2,98%
MgO	1,17%
K ₂ O	0,89%
SO ₃	0,13%

Voce di capitolato

Realizzazione di malte per muratura, per rinzafo, per intonaco, per stabilitura, per finitura a spessore, mediante l'impiego di calce idraulica naturale marcata NHL 3,5 secondo normativa EN 459-1, ottenuta dalla calcinazione di calcari marnosi ricchi di silice, cotti con carbone a bassa temperatura, con bassissimo contenuto di sali idrosolubili e altissima porosità, esente da clinker. Il colore della calce sia il naturale nocciola, proprio della materia all'atto dello spegnimento (tipo CALCEFORTE NHL 3,5 CALCEFORTE).

Stoccaggio

Mantenere in luogo coperto e asciutto.

Indicazioni

Temperature di applicazione tra + 5 °C e + 30 °C del supporto e dell'aria.

Uso

Preparazione alla finitura di intonaci esterni

Avvertenze

Prodotto destinato a uso professionale. Proteggere adeguatamente le parti a cui il prodotto non è destinato. L'operatore dovrà essere equipaggiato con quanto previsto dalle vigenti norme di sicurezza. Si declina ogni responsabilità per i danni che potrebbero risultare dall'uso improprio del prodotto.

Note

L'azienda si riserva di modificare nel tempo le informazioni sopra riportate, mantenendo inalterate le caratteristiche del prodotto. Dati tecnici validi da gennaio 2010.

CALCEFORTE S.R.L. – P.I. e C.F. 01031210295 – Via Molino Vigne, 5 – Loc. TORRIANA – 47824 POGGIO TORRIANA (RN)
Tel. 0541.675677 – Fax 0541.675678 – Email info@calceforte.it – PEC calceforte@legalmail.it – Web www.calceforte.it

SCHEDA TECNICA

COCCIOPESTO INERTE

INERTI AD AMPIO ARCO
GRANULOMETRICO
RICAVALI DALLA
MACINAZIONE DI TEGOLE
E MATTONI COTTI.

Carica utilizzata fin dall'antichità per la preparazione di malte da intonaco, arricci, stabiliture; conferisce debole idraulicità alla malta, leggerezza, alta permeabilità al vapore e contribuisce all'isolamento termico del manufatto.

Disponibile in tre archi granulometrici:

-COCCIOPESTO FINE: 0 - 1 mm per stabiliture, tonachini (spessori 2-3 mm).

-COCCIOPESTO MEDIO GRANELLA: 0 - 3 mm per allettamento, intonaco (spessori 10 mm).

-COCCIOPESTO GROSSO: 5 - 10 mm per rinzafo, allettamento, intonaco (spessori 15-20 mm)

UTILIZZO:

Miscelare manualmente o in betoniera con grassello di calce e/o calce idraulica naturale per il restauro in rapporto 1:2,5-3,5 in peso, bagnando esclusivamente con acqua pulita; se si utilizzano altri inerti (sabbie silicee essiccate e lavate, polveri di marmo, ecc.) il totale delle cariche dovrà comunque rispettare i rapporti indicati.

Applicare su supporto pulito e preventivamente bagnato con spessori non superiori a 3 volte la misura max dell'inerte utilizzato

AVVERTENZE:

Non applicare le malte confezionate nelle modalità sopra indicate con temperature inferiori a + 5°C o superiori a + 32°C del supporto e dell'aria.

Ad applicazione avvenuta evitare forti insolazioni e nel caso, tenere la superficie inumidita.

In caso di applicazioni a spessori superiori ai 10 ÷ 15 mm applicare a più passate

Conservare il prodotto in luogo fresco ed asciutto, al riparo dal gelo, pioggia, umidità e forte calore.

CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE:

ASPETTO: polvere rossa
PESO SPECIFICO: 0,9 Kg/l



Ultimo aggiornamento 1 febbraio 2007

SINOPIA S.A.S.
VIA POLIZIANO, 56/A
10153 TORINO (TO)
TEL 011/8159362
FAX 011/8146923
info@sinopiarestauro.it

Le informazioni contenute in questa scheda si basano sulle nostre attuali conoscenze e sono riferite unicamente al prodotto indicato.
L'utilizzatore è tenuto ad accertare l'idoneità di tali informazioni in relazione all'utilizzo specifico del prodotto.
Questa scheda è stata redatta da SINOPIA S.A.S., annulla e sostituisce ogni edizione precedente.



PERLITE GREZZA 0,3-1,2 E 0,8-2,5



Perlite grezza a granulometria media (0,3 -1,2 mm) e grossolana (0,8 -2,5 mm), naturale, atossica, inerte, non combustibile: si tratta di una varietà specifica di roccia vulcanica effusiva della famiglia delle rioliti.

L'uso di materie prime selezionate consente di fornire un prodotto inorganico, stabile e chimicamente inerte, rigorosamente standard.

Il prodotto resiste agli attacchi biologici e non presenta fenomeni di degrado o di marcescenza, anche dopo lunghi periodi di conservazione.

Non trattandosi di rifiuto o scarto di lavorazione è quindi privo di sostanza tossiche come previsto dalle norme vigenti. Utilizzare il prodotto tal quale a diretto contatto con il metallo fuso; le quantità sono da stabilire in funzione della superficie esposta da trattare utilizzando utensili idonei per la protezione di eventuali schizzi di materiale incandescente.

La reazione della perlite grezza è immediata creando sulla superficie esposta una massa agglomerata pastosa da asportare con sistemi che ne permettono l'operazione in totale sicurezza. Si può ripetere l'operazione se necessario.

Può essere impiegata nei forni ad induzione, a bacino e nelle siviere di tutte le dimensioni come addensante e sforficante nei processi metallurgici fusori.

Caratteristiche chimico-fisiche

Caratteristiche fisiche

Dimensioni dei granuli
(allo scarico in stabilimento)

0,3 - 1,2 mm		0,8 -2,5 mm	
+1,18 mm	15% max	+2,5 mm	10% max
- 0,3 mm	10% max	- 0,8 mm	10% max

Densità a caduta libera 1100 ±100 kg/m³

Composizione chimica (% peso)

SiO ₂	74,0 ± 2,0
Al ₂ O ₃	13,0 ± 1,5
Fe ₂ O ₃	1,0 ± 0,3
MgO	0,6 ± 0,3
CaO	1,4 ± 0,4
Na ₂ O	4,5 ± 1,0
K ₂ O	3,5 ± 1,5
Perdita al fuoco	2,6 ± 0,6

Imballo e immagazzinamento

Chiedere al produttore per avere informazioni relative agli imballi disponibili.

La perlite grezza non ha scadenza e presenta un'ottima stabilità all'immagazzinamento.

Qualità

La perlite grezza è prodotta in regime di controllo qualità e pertanto tutte le operazioni che regolano la produzione seguono specifiche procedure standardizzate e sono riportate nei manuali redatti in accordo con la norma UNI EN ISO 9001.

I macchinari, le strumentazioni di controllo e le materie prime vengono costantemente controllate durante il ciclo produttivo.

Marzo 2013



Questa scheda ha lo scopo di fornire informazioni sulle caratteristiche e sui metodi di applicazione del materiale descritto. I dati tecnici riportati sono relativi a valori medi di produzione e soggetti quindi a periodica revisione.
Perlite Italiana si riserva il diritto di apportare in qualsiasi momento le modifiche e variazioni che riterrà opportune; è pertanto interesse dell'utilizzatore verificare di essere in possesso della versione aggiornata della scheda.

ST 103 11.1 1/1



Alzaia Trento, 7 - 20094 Corsico (MI) - Italia
tel. +39 02 4407041 fax. +39 02 4401861
www.perlite.it info.com@perlite.it

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

COLLEPARDI M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Hoepli, 1992 VITRUVIO M. P., *De architectura libri decem*, Einaudi, 1997

GULOTTA D., GOIDANICH S., TEDESCHI C., ET. AL., Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterisation, in "Construction and Building Materials" 38:31-42, 2013

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

NEVILLE A. M., *Properties of concrete fourth edition*, Essex, Addison Wesley Longman Limited, 1

PACHECO-TORGAL F., FARIA J., JALALIS., *Some considerations about the use of lime-cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?*, in "Construction and Building Materials" 30:488-494,2012

PAROTTO M., PALMIERI E. L., *Il globo terrestre e la sua evoluzione*, Zanichelli, 1973

PISTILLI A., Determinazione del rapporto aggregato/legante di malte: affidabilità dello studio petrografico in sezione sottile, Tesi di Laurea Triennale, Università degli studi di Parma, 2013

RATTAZZI A., *Conosci il grassello di calce? Origine, produzione e impiego del grassello in architettura, nell'arte e nel restauro*, Monfalcone, EdicomEdizioni, 2007

REPOSSI V., I materiali da costruzione. Dalle origini alla normativa energetica dei laterizi, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, 2012

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

SLIZKOVA Z., DRDACKY M., VIANI A., Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solutions of calcium hydroxide or barium hydroxide, in "Journal of Cultural Heritage" 16:452-460, 2015

VECCHIATTINI R., *La civiltà della calce. Storia, scienza e restauro*, Genova, De Ferrari, 2009

VEIGA M. R., FRAGATA A., VELOSA A., E MAGALHAES A., *Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings*, in "International Journal of Architectural Heritage, vol. 4, 2010

VEIGA M. R., VELOSA A., E MAGALHAES A., *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation*, in "Construction and Building Materials" 23:318-327, 2009

VEIGA M. R., VELOSA A., E MAGALHAES A., Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls based on a restrained shrinkage test, in "Materials and Structures" 10(40): 1115-1126, 2007

VEIGA M. R., AGUIAR J., SILVA A. S., CARVALHO F., Methodologies for characterisation and repair of mortars for ancient buildings, in " Historical constructions" 353-362, 2001

SITOGRAFIA

<http://www.forumcalce.it>

DI VASTO V., <https://goo.gl/vT7qHP>

http://www.mae-srl.it/allegati/3_9_345

https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2010_252_7773

<http://www.unisve.it>

NORME DI RIFERIMENTO

UNI EN 196-1:2016. Metodi di prova dei cementi. Determinazione delle resistenze meccaniche.

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

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

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

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

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

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. Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.

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

UNI EN 12390-13:2013. Prova sul calcestruzzo indurito. Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione

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

UNI EN 12670:2003. Pietre naturali. Terminologia

UNI EN 13139:2003 Aggregati per malta.

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.