



**POLITECNICO DI TORINO**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN**  
**ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**  
**A.A. 2017/2018**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**DICEMBRE 2018**

**INTONACI IN TERRA STABILIZZATI CON CALCE:**

**PROVE SPERIMENTALI**

**RELATORE:** Prof.ssa Mattone Manuela

**CORRELATORI:** Prof. Invernizzi Stefano

Dott. Fratini Fabio

Dott.ssa Rescic Silvia

**CANDIDATO:** Giuria Gloria

*Ai miei genitori*

---

**INDICE**

---

## INTRODUZIONE

## CAPITOLO 1

---

### GLI INTONACI IN TERRA

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | CARATTERISTICHE                              | 10 |
| 1.2 | PROBLEMATICHE DI CONSERVAZIONE DELL'INTONACO | 14 |
| 1.3 | L'USO DI STABILIZZANTI                       | 17 |
| 1.4 | USO DELLA CALCE COME STABILIZZANTE           | 20 |

## CAPITOLO 2

---

### ATTIVITÀ SPERIMENTALE

|     |                           |    |
|-----|---------------------------|----|
| 2.1 | MATERIE PRIME             | 25 |
| 2.2 | PREPARAZIONE DEI CAMPIONI | 26 |
| 2.3 | METODOLOGIE DI PROVE      | 29 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.3.1  | PROVE PRELIMINARI                            | 30 |
| 2.3.2  | DIFFRAZIONE A RAGGI X                        | 30 |
| 2.3.3  | RESISTENZA ALL'EROSIONE - SPRAY EROSION TEST | 32 |
| 2.3.4  | RESISTENZA ALL'EROSIONE - GEELONG TEST       | 34 |
| 2.3.5  | ASSORBIMENTO D'ACQUA – TUBO DI KARSTEN       | 36 |
| 2.3.6  | PROVA DI ADESIONE – SHEAR TEST               | 37 |
| 2.3.7  | PROVA DI FESSURABILITÀ                       | 38 |
| 2.3.8  | PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO                | 39 |
| 2.3.9  | MISURE SPETTROFOTOMETRICHE                   | 41 |
| 2.3.10 | DRILLING TEST                                | 42 |
| 2.3.11 | PROVE MECCANICHE                             | 44 |

## CAPITOLO 3

---

### RISULTATI E DISCUSSIONE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | DIFFRAZIONE A RAGGI X                                | 49 |
| 3.1.1 | COMPOSIZIONE MINERALOGICA                            | 49 |
| 3.1.2 | EFFETTI DEGLI STABILIZZANTI SULLA FRAZIONE ARGILLOSA | 50 |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>3.2</b>  | <b>RESISTENZA ALL'EROSIONE - SPRAY EROSION TEST</b> | <b>50</b> |
| <b>3.3</b>  | <b>RESISTENZA ALL'EROSIONE - GEELONG TEST</b>       | <b>53</b> |
| <b>3.4</b>  | <b>ASSORBIMENTO D'ACQUA – TUBO DI KARSTEN</b>       | <b>54</b> |
| <b>2.5</b>  | <b>PROVA DI ADESIONE – SHEAR TEST</b>               | <b>55</b> |
| <b>2.6</b>  | <b>PROVA DI FESSURABILITÀ</b>                       | <b>57</b> |
| <b>2.7</b>  | <b>PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO</b>                | <b>58</b> |
| <b>2.8</b>  | <b>MISURE SPETTROFOTOMETRICHE</b>                   | <b>59</b> |
| <b>2.9</b>  | <b>DRILLING TEST</b>                                | <b>61</b> |
| <b>2.10</b> | <b>PROVE MECCANICHE</b>                             | <b>62</b> |

---

## **BIBLIOGRAFIA**

---

## **CONCLUSIONI**

---

## **ALLEGATI**

---

## **INTRODUZIONE**

Fino dalla preistoria la terra è stata uno dei materiali più utilizzati dall'uomo per la costruzione degli edifici, monumentali e vernacolari, sia grazie alla sua adattabilità sia per la varietà di tecniche costruttive che nel tempo ne hanno ottimizzato l'utilizzo. Dalla seconda metà del XIX secolo, la terra ha inevitabilmente ceduto il passo ad altri materiali da costruzione, dovendo così re-inventare la propria funzione anche in relazione ai nuovi modelli estetici. Tuttavia, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, essa ha continuato ad essere uno dei materiali più diffusamente utilizzati. La crisi legata al costo del petrolio ha evidenziato come un sistema dipendente da risorse non rinnovabili abbia limite in sé stesso. Oggi, la crescente attenzione rispetto al tema della preservazione delle risorse e al conseguente desiderio di massimizzare la sostenibilità degli interventi edilizi in termini energetici ha determinato lo sviluppo di sistemi costruttivi innovativi e coerenti, caratterizzati da semplicità, efficienza e basso costo e una

---

<sup>1</sup> O.B. FARIA, C. NEVES, *Técnicas de construcción con tierra*, FEB UNESP/PROTERRA, Bauru 2011, p.9

progressiva riscoperta della terra quale materiale da costruzione<sup>1</sup>. Infatti, quando si parla di terra, si parla di un materiale sostenibile sotto tutti i punti di vista, essendo facilmente reperibile, a basso impatto ambientale, economico e riciclabile.

Il principale problema degli edifici in terra è la sensibilità all'acqua, che, ne provoca sovente il deterioramento. Fenomeni quali:

- il dilavamento delle pareti a causa dello scorrere dell'acqua sulla facciata;
- la pioggia battente;
- presenza di un flusso d'acqua alla base del muro;
- la risalita capillare d'acqua

costituiscono le principali cause di alterazione degli edifici in terra.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> C. AUGARDE, P. JAQUIN, *Earth Building, History, science, and conservation*, HIS BRE Press, Bracknell 2012, p.44

Ai rivestimenti esterni e, in particolare, agli intonaci viene affidato il compito di proteggere i paramenti murari. Per questo motivo è importante ricercare nuove tecniche che diano la possibilità di proteggere la superficie degli intonaci, in modo da assicurare una sempre maggiore durabilità delle nuove costruzioni, così come la conservazione del ricco patrimonio esistente.

Da questa riflessione nasce il presente lavoro sperimentale, il quale si propone, partendo dall'analisi della letteratura scientifica, di valutare le prestazioni degli intonaci in terra stabilizzati con calce. Sono state sperimentate sei diverse miscele di intonaco, additivate con calce viva, calce idrata e grassello di calce. Un ulteriore intonaco a base di terra e privo di additivi è stato realizzato a scopo comparativo.

I sette composti di terra sono stati testati - al fine di ricavare le caratteristiche chimico-mineralogiche e quelle prestazionali - per mezzo di prove di resistenza meccanica, di erosione, di assorbimento d'acqua e vapore acqueo, spettrofotometriche.

Tali prove sono state esperite nel Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi del Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino, nei laboratori dell'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali del CNR di Sesto Fiorentino e presso il Centro sui Rischi e Durabilità nelle Costruzioni del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino.



## 1.1 CARATTERISTICHE

La terra cruda come materiale da costruzione presenta diversi vantaggi ambientali, tra cui:

- bassi livelli di energia inglobata;
- alta massa termica;
- facile reperibilità *in loco* e ridotte emissioni di CO<sub>2</sub> legate al suo trasporto;
- assenza di elementi tossici o allergenici;
- alto apporto nella regolazione dell'umidità interna.

Il problema principale delle costruzioni in terra è la loro vulnerabilità all'azione dell'acqua, derivante dalle piogge e dall'azione capillare, al vento e agli sbalzi termici.

Diverse soluzioni costruttive sono adottate per preservare le costruzioni in terra quali: realizzazione di coperture dotate di ampio sporto, utilizzo di stabilizzanti, applicazione di "superfici di sacrificio" quale gli intonaci.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> A. CAMOES, R. EIRES, S. JALALI, *Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil*, Journal of Cleaner Production, n° 142, 2017, p.3281

A questi viene affidato il compito di regolarizzare la superficie del paramento murario e di proteggerlo dagli agenti atmosferici e dalle infiltrazioni, andando a formare un rivestimento resistente. Esso è destinato a consumarsi relativamente in fretta, rispetto all'esistenza dell'edificio, e, pertanto, ad aver bisogno di una regolare ed oculata manutenzione<sup>4</sup>. Infatti, data la sua posizione, l'intonaco è soggetto all'azione continua di agenti esterni e di quelli riconducibili alle caratteristiche fisiche proprie del materiale, i quali provocano alterazioni localizzate e diffuse.

L'intonaco dovrebbe essere impermeabile all'acqua, permeabile al vapore e compatibile dal punto di vista fisico e meccanico con il substrato.

La prima caratteristica può essere raggiunta grazie a piccole percentuali di ingredienti aggiuntivi chiamati "stabilizzanti", come per esempio la calce, i quali possono ridurre il rischio di deterioramento dovuto agli agenti atmosferici.

<sup>4</sup> G. W. PALESTRA, *Intonaco: una superficie di sacrificio*, ETASLIBRI, Milano, 1995, p.36

La permeabilità al vapore è un'altra proprietà importante, in quanto, se il contenuto di acqua all'interno del muro non è libero di evaporare, esso farà aumentare il volume della terra con conseguente distacco dell'intonaco dalla parete. Possono, inoltre, verificarsi dei fenomeni biotici, come la comparsa di muffe. Gli intonaci di terra possiedono già in sé una buona capacità di regolare l'umidità interna del fabbricato ed essendo traspirabili, mantengono quest'ultima in valori compresi tra il 50 % e 70 %, rendendo sano l'ambiente. La compatibilità meccanica è dettata dalla confrontabilità tra il modulo di Young del supporto (circa 0.5 – 1 GPa per la terra compressa) e quello dell'intonaco in terra (simile a quello delle malte di terra e ai mattoni in terra cruda, varia da 0.5 a 2.5 GPa)<sup>5</sup>, in modo che quest'ultimo non si opponga ai movimenti del primo in caso di variazioni igrometriche o di temperatura. Per quest'ultimo fattore i due materiali devono presentare compatibilità fisica dettata dalla similarità del coefficiente di

---

<sup>5</sup> H. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011, p.508

espansione termica, il quale quantifica le variazioni dimensionali in funzione del gradiente di temperatura.

Per quanto riguarda la sua composizione l'intonaco di terra è composto da tre elementi fondamentali: sabbia, limo e argilla. Va premesso che “non tutte le terre possono essere utilizzate come materiale da costruzione; una terra risulta adatta a scopi edificativi solo se possiede ben determinate composizioni mineralogiche sia per quanto riguarda la qualità sia la quantità percentuale dei componenti.”<sup>6</sup>

In generale, il quantitativo di argilla dovrebbe essere compreso tra il 5 e il 12 %, in quanto percentuali minori non garantiscono sufficiente potere legante, mentre superiori causano fessure durante l'essiccamento. La sabbia serve per “smagrire” la terra, andando ad influire sulla quantità di argilla che va a riempire i pori tra i diversi grani, rendendo l'intonaco compatto. La distribuzione uniforme dei grani, infatti, riduce la possibilità di

<sup>6</sup> S. BRICCOLI BATI, *I limiti della terra come materiale da costruzione*, in *Scritti sulla terra*, il Prato casa editrice, n. 4/10 Didattica & Ricerca, Saonara 2010, p.45

restringimento e innalza la tenuta all'aggrappo, con una maggiore coesione dei grani del terreno. La forma dei grani della sabbia influisce anche sulla compattezza e lavorabilità della miscela:

- sabbie di forma spigolosa si addicono a malte di arriccio;
- sabbie di forma stondata a malte di finitura.

La scelta dei dosaggi va stabilita mediante delle prove preliminari sul campo che permettono di ottenere delle valutazioni sul comportamento degli intonaci.<sup>7</sup>

L'acqua è indispensabile per rendere lavorabile la miscela per realizzare l'intonaco; il suo dosaggio e composizione sono determinanti per assicurare l'idratazione dell'impasto e garantire la coesione del materiale indurito. Al fine di ottenere una miscela molto omogenea e meno soggetta a restringimento, che può asciugare più rapidamente, è possibile utilizzare meno acqua possibile.

---

<sup>7</sup> S. SABBADINI, *Intonaci e finiture in terra*, in *Scritti sulla terra*, il Prato casa editrice, n. 4/10 Didattica & Ricerca, Saonara 2010, p.57

In alternativa, l'acido umico, l'acido tannico e l'urina di cavallo possono sostituire completamente l'acqua.<sup>8</sup>

Sin dall'antichità gli intonaci in terra sono stati additivati con altri materiali allo scopo di migliorarne le prestazioni. Rientrano tra questi le fibre animali derivanti dal manto pilifero e le fibre vegetali, come la paglia di grano, l'orzo, il grano saraceno, il riso e il miglio, che assolvono la funzione di armature.

La qualità di un intonaco in terra è determinata anche da una sua realizzazione corretta, la quale si può ottenere attenendosi alle seguenti buone pratiche:

- l'intonaco deve essere posto in zone ombreggiate e protette dai raggi del sole; è buona prassi evitare di intonacare in giornate molto calde (la temperatura ambientale non deve essere inferiore a 5°C e superiore a 30°C) o ventose, in modo che l'intonaco non asciughi troppo velocemente<sup>7</sup>;

<sup>8</sup> H. HOUBEN, H. GUILLAUD, *Traité de construction en terre*, L'Encyclopedie de la construction en terre, vol 1, Editions Parenthèses, Marseille 1989, p.332

- è utile realizzare giunti verticali e orizzontali tra ogni porzione di intonaco di 10-20 mq e terminare ogni facciata nello stesso giorno<sup>9</sup>;
- la superficie del muro deve essere correttamente preparata: rimuovendo la polvere superficiale con una spazzola metallica<sup>10</sup>;
- il supporto deve essere sufficientemente ruvido e, se necessario, inumidito e scanalato o il giunto di malta smussato<sup>11</sup>;
- prima di intonacare, la muratura deve essere sufficientemente inumidita in modo che la superficie si ammorbidisca e l'intonaco permi lo strato morbido;
- l'intonaco deve essere gettato con forza (con il classico "schiaffo") in modo che raggiunga una forza vincolante maggiore a causa dell'impatto;
- se lo spessore dell'intonaco è maggiore di 10-15 mm, esso deve essere applicato in due o anche tre strati al fine di evitare la formazione di fessurazioni;
- se l'intonaco contiene uno stabilizzante a base di cemento o calce, è importante spruzzare con acqua l'intonaco due o tre volte al giorno durante i primi giorni di essiccazione, soprattutto durante l'estate, per ridurre lo sviluppo di fessurazioni.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> P. DOAT, A. HAYS, H. HOUBEN, *Building with earth*, The Mud Village Society, New Delhi 1991, p.241

<sup>10</sup> O. RUSKULIS, *Mud plasters and renders*, Technical Brief by Practical Action, Technology challenging poverty, *Appropriate Technology Journal*, 2009 pp. 4-5

<sup>11</sup> G. MINKE, *Building with earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*, BIRKHÄUSER, 2006, p.94

<sup>12</sup> S. SABBADINI, *Intonaci e finiture in terra*, in *Scritti sulla terra*, il Prato casa editrice, n. 4/10 Didattica & Ricerca, Saonara 2010, p.57

## 1.2 PROBLEMATICHE DI CONSERVAZIONE DELL'INTONACO

I fenomeni di degrado che riguardano un intonaco in terra sono molteplici e possono essere suddivisi in base alle cause di origine: meccanica, fisica e biologica. Fra quelle meccaniche si evidenziano:

- i terremoti, le tempeste e le inondazioni sono generalmente catastrofici indipendentemente dalla natura delle strutture, ma i loro effetti sul materiale terra, considerando che l'elasticità è minima e la solidità è alterata dalla presenza d'acqua, sono particolarmente distruttivi<sup>13</sup>;
- la pioggia battente che attraverso i micro-urti che si susseguono provoca usura;
- l'azione del vento che innesca la disgregazione delle parti intonacate favorendo, così, la proliferazione di

agenti di degrado, tra cui microorganismi.<sup>14</sup> Inoltre, il vento provoca un'evaporazione eccessiva dell'acqua contenuta nell'intonaco causandone così il restringimento. L'evaporazione permette ai sali solubili di depositarsi, andando così a rompere i legami tra le particelle di terra, con conseguente perdita di adesione.<sup>15</sup>

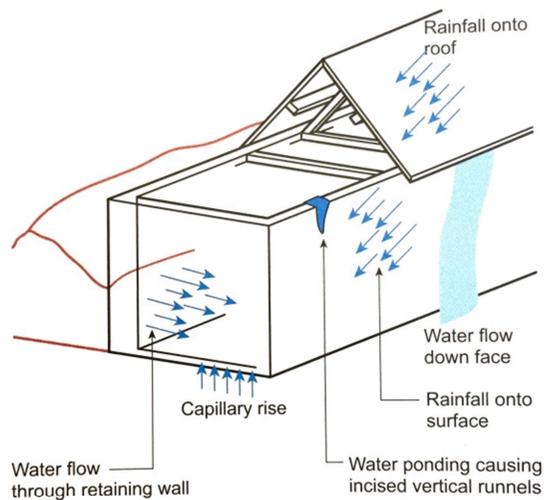
La principale causa di origine fisica è l'acqua - in tutti i suoi stati di aggregazione - contenuta sia all'interno del manufatto che nell'ambiente circostante. Sovente l'intonaco si distacca poiché non consente l'evaporazione dell'acqua contenuta nel supporto su cui è applicato, il quale, espandendosi, provoca una perdita di forza coesiva alla quale corrisponde un aumento della duttilità della terra.

---

<sup>13</sup> J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth Heinemann, Oxford 1999, p. 87

<sup>14</sup> C. A. REYNERI, *Intonaci in bioedilizia*, EdicomEdizioni, Monfalcone 2003, p.9

<sup>15</sup> J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth Heinemann, Oxford 1999, p. 89



**Figura 1.1**  
Principali cause di infiltrazioni d'acqua che provocano erosione della terra. In C. Augarde, P. Jaquin, *Earth Building, History, science, and conservation*, HIS BRE Press, Bracknell 2012, p.44

“Il danno maggiore è quello provocato dall’acqua che, dal terreno, sale per capillarità lungo i muri ed evapora sulla superficie dell'edificio, provocando una cristallizzazione dei Sali”<sup>16</sup>.

Un altro fenomeno di degrado è la gelività ossia il passaggio dell'acqua dallo stato liquido a quello solido, per cui ghiacciando

<sup>16</sup> C. CARDUCCI, *Cause di degrado*, in <http://www.studiotorresi.it/sito/it/testi-pubblicazioni.html>, consultato il 02/07/2018

all'interno dei pori provoca un aumento di volume di circa il 9 %, ed esercita pressione all’interno di questi.

Fra le cause biologiche va annoverata la possibile presenza di vegetazione causata da accumuli di umidità e l’attacco di organismi autotrofi. Le radici all’interno delle fessurazioni esercitano un’azione meccanica che provoca il distacco dell’intonaco<sup>17</sup>.

L’elevato tasso di umidità e l’esposizione al sole favoriscono la formazione di microorganismi, i quali penetrano negli spazi interparticolari della terra, andando a indebolire la struttura strato per strato.

Infatti, acidi organici prodotti durante il loro ciclo vita e i cicli di decadimento cambiano la struttura chimica delle particelle di

<sup>17</sup> R. MATTONE, *Il paesaggio delle case in terra cruda*, L’artistica Editrice, Savigliano 2010, pp. 84-85

argilla. L'effetto pratico, oltre all'indebolimento della forza coesiva, è la polverizzazione della struttura della terra.<sup>18</sup>



Figura 1.2  
Distacco di intonaco in terra. In R. Mattone, *Il paesaggio delle case in terra cruda*, L'artistica Editrice, Savigliano 2010, pp. 84-85

Gli animali rappresentano un'altra fonte di erosione, riuscendo essi a scavare nella terra. Gli animali di piccola taglia, quali insetti, sono più difficili da individuare rispetto ad animali di dimensione più grande in quanto il danno da loro provocato non è sempre facilmente individuabile. Le termiti sono uno degli insetti più infestanti; la loro attività, consistente nel

rimuovere particella dopo particella la terra, si riconosce nella polvere lasciata dopo il loro passaggio.

La presenza di animali, quali piccioni, rappresenta generalmente una conseguenza della mancata manutenzione da parte dell'uomo.

L'azione dell'uomo è quella che altera più di ogni altra gli edifici in generale. Fra i danni antropici che provocano erosione per usura, i più frequenti sono i graffi, le iscrizioni, le incisioni della superficie e, soprattutto, la carenza di manutenzione dell'edificio.

A questi deve aggiungersi, chiaramente, l'errata tecnica di esecuzione dell'intonaco.

Avendo individuato i fenomeni di degrado degli intonaci in terra e le cause che li hanno provocati, vanno ora analizzati gli stabilizzanti che consentono di migliorarne le prestazioni.

---

<sup>18</sup> J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth Heinemann, Oxford 1999, p. 82

### 1.3 USO DI STABILIZZANTI

Gli stabilizzanti, di tipo organico o inorganico, sono prodotti il cui uso è funzionale all'incremento di certe proprietà degli intonaci, in particolare:

- prevenire crepe da restringimento per essiccazione;
- aumentare la resistenza all'azione dell'acqua;
- migliorare l'aggrappo al supporto;
- aumentare la resistenza a compressione.

Per questi fini, la stabilizzazione implica:

- ridurre i vuoti interni attraverso la compressione del terreno;
- introdurre un materiale che garantirà maggiore adesione delle particelle;
- introdurre un materiale che occuperà i vuoti e provvederà a tenere unite le particelle impedendone il movimento;

- fare in modo che le particelle si leghino chimicamente o elettrostaticamente cambiando il loro ambiente circostante;
- inibire il fenomeno di risalita capillare.

Gli stabilizzanti sono mescolati alla miscela a secco per permettere un composto più uniforme, ad eccezione di additivi particolarmente idrosolubili che vengono aggiunti all'impasto plastico.

I materiali inorganici principalmente utilizzati sono:

- *Cemento*. La stabilizzazione con cemento è efficace solo se il terreno è molto sabbioso. I dosaggi possono variare dal 2 al 15% di cemento, a seconda che si voglia ottenere, un leggero miglioramento, o una reale stabilizzazione. Gli intonaci con cemento dovrebbero essere preferibilmente applicati a supporti stabilizzati, in modo da far fronte al problema di incompatibilità tra

supporto e intonaco<sup>19</sup>. Le miscele di terra con aggiunta di cemento hanno diversi svantaggi tra cui una bassa flessibilità che rende l'intonaco incompatibile con il supporto. Possono, poi, essere prodotti sali solubili che danneggiano l'intonaco andando a interferire tra i legami di argilla contenuti nella terra.<sup>20</sup>

- *Bitume*. Le terre stabilizzate con bitume non sono né troppo argillose né troppo sabbiose e polverizzate. La quantità di bitume varia dal 2 al 6%; quantitativo che deve essere preventivamente riscaldato senza raggiungere temperature troppo alte (max 100°C). Nel caso di soluzioni bituminose, la miscela deve essere preparata lentamente in modo da non provocare la rottura dell'emulsione<sup>21</sup>. Il bitume è solitamente disciolto in acqua con l'aggiunta di emulsificanti come la

nafta, olio di paraffina o petrolio, in proporzione di 4 a 5 parti di bitume, 1 parte di olio di paraffina e 1% di paraffina ottenuta scaldando a 100°C. È sufficiente 3-6% di questa soluzione perché si verifichi la formazione di una patina che lega le particelle di terra, prevenendo così l'ingresso d'acqua.

- *Gesso*. Il suo utilizzo come stabilizzante è antico quanto quello della calce. Viene utilizzato il solfato di calcio emidrato, identificato con il nome di scagliola o plaster di Paris, ottenuto tramite la cottura a 163° della pietra da gesso. Ha caratteristiche di traspirabilità, elasticità, permeabilità al vapore, e, durante la fase di presa, il suo volume aumenta circa del 1%, contrastando il ritiro della terra e di conseguenza la formazione di fessurazioni<sup>22</sup>.

---

<sup>19</sup> H. HOUBEN, H. GUILLAUD, *Traité de construction en terre*, L'Encyclopedie de la construction en terre, vol 1, Editions Parenthèses, Marseille 1989, p.332

<sup>20</sup> J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth Heinemann, Oxford 1999, pp. 113, 115, 127-128

<sup>21</sup> J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth Heinemann, Oxford 1999, pp. 113, 115, 127-128

<sup>22</sup> N. EL GHAZZALI, *Architettura in terra cruda in Marocco. Sperimentazione di intonaci per la protezione dei paramenti murari*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Il Facoltà di Architettura, Prof. Arch. Manuela Mattone, A.A. 2014-2015.

Tra gli stabilizzanti organici:

- Le fibre formano un'armatura che riduce la fessurazione durante l'essiccamento e aumenta la resistenza a trazione. Tra le altre proprietà alleggeriscono il materiale aumentando l'isolamento termico e accelerano il processo di essiccamento dell'impasto, in quanto l'acqua è in parte assorbita dai pori delle fibre. Il dosaggio ottimale è intorno al 4%.<sup>23</sup> Le fibre utilizzate sono per esempio derivanti dalle noci di cocco, bambù, paglia tagliata e aghi di pini.
- Succhi vegetali provenienti dalle piante di banane, agave, sisal se addizionati alla calce, possono contribuire a un alto grado di protezione dagli agenti atmosferici.
- Urina che contiene urea e acetato d'ammonio che può aumentare la resistenza a compressione e legame coesivo dell'argilla di tipo caolinite. La resistenza a

---

<sup>23</sup> B.NARICI, G. SCUDO, C. TALAMO, *Costruire con la terra*. Tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni, Sistemi editoriali, 2011, p.179

flessione, in questo modo, viene aumentata da 10 a 20 volte.<sup>24</sup>

- Prodotti di derivazione animale come il sangue, letame, caseina e colla animale sono usati come stabilizzanti contro l'erosione dell'acqua. Ad esempio, sperimentazioni condotte al *Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB)* dell'Università di Kassel, Germania, hanno dimostrato che un provino di intonaco di terreno argilloso posto a spray erosion test si deteriora dopo 4 minuti, mentre un provino con 3,5% in massa di sterco di vacca mostra segni di erosione dopo 4 ore.

L'uso di stabilizzanti ha la capacità di incrementare certe caratteristiche degli intonaci, ma allo stesso tempo può verificarsi un peggioramento di altre proprietà. Pertanto, per ogni utilizzo è buona pratica che vengano testati al fine di verificare il soddisfacimento dei risultati desiderati.

<sup>24</sup> G. MINKE, *Earth Construction Handbook*, The building Material Earth in Modern Architecture, WIT Press, Southampton 2000, pp. 45-46, 52

#### 1.4 USO DELLA CALCE COME STABILIZZANTE

Il lavoro di ricerca di questa tesi si incentra sulla possibilità di utilizzare la calce come stabilizzante degli intonaci di terra, al fine di ottenere prestazioni migliori. Sono state sperimentate sei diverse miscele di intonaco, additivate con calce viva, calce idrata e grassello di calce. Per comparazione dei risultati un ulteriore intonaco a base di terra e privo di additivi è stato realizzato.

Lo studio ha preso avvio da un'analisi del materiale bibliografico relativo agli intonaci in terra stabilizzati con calce.

Fatta questa premessa, il seguente sotto capitolo è incentrato sulla presentazione delle proprietà chimico-fisiche degli additivi sopracitati e delle sperimentazioni antecedenti.

La prima distinzione che va fatta all'interno della famiglia della calce aerea è quella tra:

- calce calcica (CL), costituita prevalentemente da ossido e idrossido di calcio senza aggiunta di materiali idraulici o pozzolanici;

- calce dolomitica (DL), calci costituite prevalentemente da ossido di calcio e magnesio, senza aggiunta di materiali idraulici o pozzolanici.

La norma UNI EN 459-1 in vigore dal 2015 *Calce da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità*, definisce la forma, indicata con un suffisso, con il quale la calce è fornita, ossia:

- calce viva (Q), materiale inorganico ottenuto per cottura ad alta temperatura di rocce calcaree, che reagisce producendo calore a contatto con l'acqua;
- calce idrata (S), prodotto in polvere ottenuto dallo spegnimento della calce viva il cui componente principale è l'idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). La quantità d'acqua di spegnimento copre appena il fabbisogno della reazione chimica per cui il prodotto presenta un tenore di umidità irrilevante;
- grassello di calce (SPL), pasta di calce idrata ottenuta per spegnimento con acqua della calce viva.

L'uso della calce ha origini antiche e presenta diversi vantaggi rispetto ad un altro stabilizzante inorganico quale il cemento.

Oltre ad essere più economico ed ecologico, la calce:

- ha particelle più piccole rispetto al cemento; presenta una granulometria tale da garantire una migliore aderenza al substrato. Le particelle di dimensioni più piccole consentono anche una migliore coesione dei cristalli di sabbia;
- migliora le proprie prestazioni meccaniche con il passare del tempo a seguito del fenomeno di carbonatazione. Contrariamente, le malte di cemento in breve tempo raggiungono la loro massima resistenza meccanica (che in quel momento può essere due volte la forza della calce), ma con il passare del tempo la sua stabilità può progressivamente diminuire;
- garantisce la permeabilità dell'intonaco, permettendo all'accumulo di umidità nel substrato di evaporare.

Viceversa, i materiali cementizi fungono da barriera intrappolando l'umidità nelle pareti causando un lento deterioramento e, in alcuni casi, provocandone il cedimento e il collasso;

- ha tempi di asciugatura più lenti, che consentono maggiore flessibilità, permettendo, così, la correzione di eventuali errori.<sup>25</sup>

Prove pratiche sono state svolte specialmente in Inghilterra, Scozia e Irlanda, nel contesto della conservazione degli edifici esistenti, sull'uso delle miscele di calce viva.

Gli studiosi appartenenti alla "Earth Stone & Lime Company", N. Copsey e B. Gourley, hanno constatato che l'uso della calce viva determina una maggiore adesione al supporto, permeabilità al vapore e durabilità degli intonaci. Al fine di ottenere questi risultati il rapporto tra calce viva e aggregati deve essere 1:3, che diventerà 2:3, in quanto la calce viva aumenta di volume

---

<sup>25</sup> F.U. CONTRERAS, L.F.GUERRERO BACA, *The use of lime in the conservation of earth construction*, in Fourth International Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest, New Mexico 2007, p.44

fino a 2,2 volte in fase di spegnimento. Sempre in contesto anglofono, il “Building Limes Forum Ireland (BLFI)” conduce ricerche applicate sull’uso della calce viva fornendo linee guida per l’applicazione.

Con l’intento di incrementare la resistenza della terra alla permeabilità all’acqua mantenendo la permeabilità al vapore, un gruppo di studiosi portoghesi, in seguito a ricerche di laboratorio, ha verificato che con 4% di calce viva si ottengono benefici per le costruzioni in terra. L’uso della calce viva permette di ottenere una migliore resistenza meccanica, sia in condizioni asciutte o sature, ridotto assorbimento d’acqua per capillarità e erosione, senza compromettere la permeabilità al vapore acqueo.<sup>26</sup>

Simili percentuali di calce sono riportate da L. E. Garzón, la quale afferma come aggiunte di 2-3% di calce viva in un terreno argilloso provochino la riduzione della plasticità dell’impasto e

---

<sup>26</sup> A. CAMOES, R. EIRES, S. JALALI, *Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil*, Journal of Cleaner Production, n° 142, 2017

<sup>27</sup> O.B. FARIA, C. NEVES, *Técnicas de construcción con tierra*, FEB UNESP/PROTERRA, Bauru 2011, p.66

sbriciolamento dei grumi, facilitando così la miscelazione, oltre a contrastare la contrazione del materiale durante l’essicazione. Il dosaggio ottimale di calce idrata, secondo la ricercatrice, varia tra il 6 e il 12% a seconda del tipo di argilla.<sup>27</sup>

L.F. Guerrero Baca<sup>28</sup>, nell’articolo scientifico “Vantaggi costruttivi dell’uso di terra compressa stabilizzata con calce in Messico”, parte da un quadro di riferimento in cui nota che vi sono quattro processi di interazione tra calce e terra:

- *Scambio ionico*. Le argille contengono cationi di sodio, potassio e magnesio che attraggono le molecole d’acqua andando a causare uno squilibrio tra le cariche di superficie;
- *Flocculazione*. Con l’aggiunta di calce, le particelle di argilla perdono acqua e si raggruppano, diventando così più stabili;

<sup>28</sup> L.F. GUERRERO BACA, R.S.R. GUTIÉRREZ, F.J.S. LOPEZ, *Constructive advantages of use of compressed earth stabilized with lime in Mexico*, Palapa Revista de Investigación Científica en Arquitectura, v.V, n.1 [10], 2011, pp. 49, 56

- *Reazione pozzolanica.* La calce reagisce lentamente con gli ossidi presenti nelle argille generando silicati e alluminati di calcio che hanno un elevato potere cementante;
- *Carbonatazione.* Reazione in cui l'idrossido di calcio si combina con l'anidride carbonica presente nell'aria e forma cristalli che intrappolano i minerali circostanti aumentando la coesione dell'insieme.

Nel progetto di ricerca da lui condotto all'interno dell'Universidad Autonoma Metropolitana Xochimilco, ha riscontrato migliori prestazioni con aggiunte di calce in polvere in percentuali comprese tra 6 a 10%, rispetto al grassello di calce che nel processo di miscelazione con il terreno facilmente forma grumi. Questo si traduce in una miscela meno omogenea e conseguentemente meno resistente. Le percentuali di calce da lui aggiunte consentono di ottenere un aumento della resistenza a risalita capillare, oltre a un incremento della resistenza a compressione.



## 2.1 MATERIE PRIME

I test sono stati eseguiti utilizzando terra proveniente da Valleandona nel comune di Asti, utilizzata per precedenti sperimentazioni. La terra è stata considerata adatta in quanto composta da una percentuale di argilla pari al 11%, di sabbia 46% e limo 43%, così come attestato dalla curva granulometrica fornita dal laboratorio dell'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali del CNR.

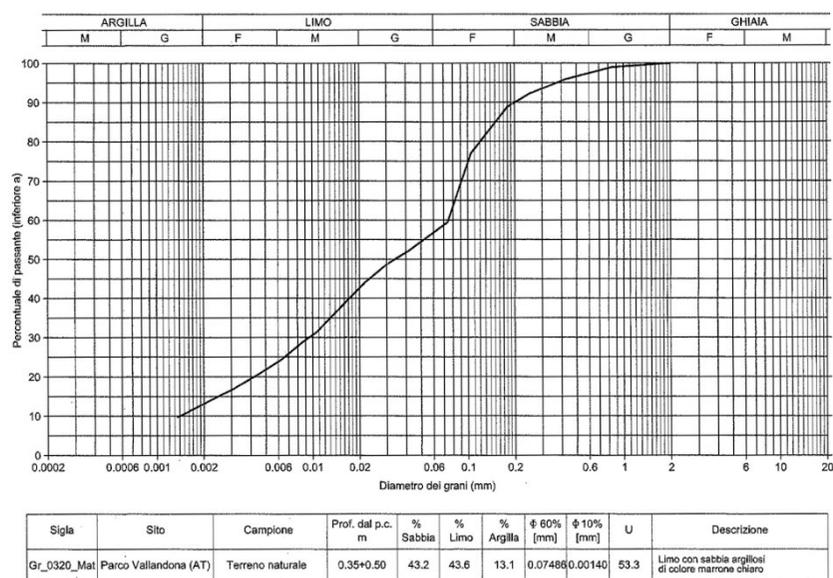


Figura 2.1  
Curva granulometrica della terra

La sabbia di diametro 1 mm, di origine alluvionale, è stata aggiunta con lo scopo di smagrire la terra e raggiungere la percentuale di argilla pari al 9%.

La sabbia rappresenta anche uno scheletro per l'intonaco in quanto assolve funzione antifessurativa. La stessa funzione viene compiuta dalla paglia, con taglio di lunghezza 2 cm, proveniente dal Marocco, mescolata a secco con gli altri componenti.

Gli stabilizzanti, quali calce viva (CL-90-Q), grassello di calcio e calce idrata (CL-90-S), di origine calcica, sono disponibili in commercio e sono stati acquistati presso la ditta Fassa Bortolo.



Figura 2.2  
Fotografie scattate in data 18/09/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.

In alto: terra  $\phi$  1 mm.  
 In mezzo a sinistra: terra  $\phi$  1 mm con aggiunta a secco di paglia.  
 In mezzo a destra: sabbia di origine alluvionale  $\phi$  1 mm.  
 In basso: calce viva in polvere della Ditta Fassa Bortolo.

## 2.2 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

Sette differenti tipologie di intonaci sono state realizzate, come indicato nella Tabella 1.

|              | N° | Terra | Sabbia | Acqua |     | Additivo |     | Fibre |    |
|--------------|----|-------|--------|-------|-----|----------|-----|-------|----|
|              |    | (g)   | (g)    | (l)   | (%) | (g)      | (%) | (g)   |    |
| TERRA        | A  | 12408 | 2730   | 4     | 0   | -        | -   | 85    |    |
| CALCE IDRATA | B  | 10500 | 2310   | 4,1   | 32  | 640      | 5   | 85    | 26 |
|              | C  | 10500 | 2310   | 5,2   | 40  | 1280     | 10  | 85    |    |
| GRASSELLO    | D  | 10500 | 2310   | 3,5   | 27  | 937      | 5   | 85    |    |
|              | E  | 10500 | 2310   | 2,8   | 22  | 1874     | 10  | 85    |    |
| CALCE VIVA   | F  | 10500 | 2310   | 4,4   | 34  | 640      | 5   | 85    |    |
|              | G  | 10500 | 2310   | 5     | 39  | 1280     | 10  | 85    |    |

Tabella 2.1  
Composizione dettagliata degli intonaci

L'intonaco indicato con la lettera A è costituito da sola terra, sabbia, fibre e acqua, ed è stato preso come miscela di base per comparare i risultati ottenuti con i diversi stabilizzanti.

I provini sono stati realizzati secondo due modalità:

- su muretti di adobe in terra cruda, per simulare una situazione reale. Sono stati eseguiti provini delle seguenti tipologie: 25x25x2 cm per prove di fessurabilità e 5x4x2 cm per prove di aderenza come ripreso dalle sperimentazioni di Erwan Hamard<sup>29</sup>;
- su mattoni adobe, stampi di legno e metallo per prove di laboratorio, quali resistenza all'erosione dell'acqua, permeabilità al vapore acqueo e prove meccaniche. Le dimensioni dei provini sono le seguenti: 30x16x2 cm secondo le dimensioni dei mattoni adobe per le prove

---

<sup>29</sup> E. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011

<sup>30</sup> G. MINKE, *Earth Construction Handbook*, The building Material Earth in Modern Architecture, WIT PRESS, Southampton 2000

di resistenza all'erosione dell'acqua; 5x5x10,5 cm e 4x4x16 cm per le prove meccaniche.

Inoltre, per ciascun tipo di intonaco è stato realizzato un ulteriore provino di dimensioni 25x25x2 cm su un supporto di polistirolo, che è stato utilizzato per le sperimentazioni condotte presso i laboratori del CNR-ICVBC di Sesto Fiorentino.

Per entrambe le tipologie l'iter di preparazione è stato lo stesso: frantumazione della terra in grani di 1 mm di diametro massimo, secondo quanto è stato precedentemente provato da Minke, Hamard e Stazi<sup>30</sup>.

La sabbia di origine fluviale è stata setacciata con un setaccio di 1 mm.

La giusta proporzione di terra-sabbia è stata stabilita con test preliminari in laboratorio, in modo da ottenere una struttura ottimale dell'intonaco.

F. STAZI, *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016

H. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011

| <b>Riferimento bibliografico</b>   | <b>Calce viva</b> | <b>Calce idrata</b> |
|--|-------------------|---------------------|
| A. CAMOES, R.EIRES, S. JALALI, <i>Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil</i> , Journal of Cleaner Production, 2016   | 4%                | 4%                  |
| L. E. GARZÓN, <i>Técnicas Mixtas</i> , in Técnicas de construcción con tierra, FEB-UNESP / PROTERRA, 2011  | 2/3%              | 6-12%               |
| L.F. GUERRERO BACA, R.S.R. GUTIÉRREZ, F.J.S. LOPEZ, <i>Constructive advantages of use of compressed earth stabilized with lime in Mexico</i> , Palapa Revista de Investigación Científica en Arquitectura, v.V, n.1 [10], 2011 | /                 | 7-8%                |
| L.F. GUERRERO BACA, <i>Revoques para la conservación de obras arqueológicas de tierra en México</i> , Terra 2016 Lyon  | /                 | 8-10%               |
| T. SANTOS, P. FARIA, A.S. SILVA, <i>In situ evaluation of the behaviour of earth based mortar renders with low additions of limes</i> , Revista ARP, 2017  | /                 | 0,05-0,08 in volume |

**Tabella 2.2**

Riferimenti bibliografici inerenti ai quantitativi di calce viva e calce idrata

<sup>31</sup> G. MINKE, *Earth Construction Handbook*, The building Material Earth in Modern Architecture, WIT PRESS, Southampton 2000, p.53

I due componenti base sono stati mescolati a secco per garantire la giusta omogeneizzazione.

L'utilizzo della paglia, tagliata in questo caso a una lunghezza di 2 cm, per essere conforme alle indicazioni che prevedono che le fibre non debbano superare la lunghezza dell'elemento costruttivo in realizzazione<sup>31</sup>, aiuta l'intonaco a contrastare la fessurazione e la contrazione durante la fase di asciugatura. Anch'essa è stata aggiunta e miscelata a secco con terra e sabbia.

Durante la sperimentazione è stato aggiunto un quantitativo d'acqua che permettesse una buona lavorabilità della miscela. Questo quantitativo è stato misurato per ogni intonaco, in modo da fornire il giusto apporto idrico in base alla componente specifica dei diversi additivi utilizzati.

Le percentuali 5 e 10% degli stabilizzanti, quali calce idrata, grassello e calce viva, sono state scelte sulla base di un confronto con le sperimentazioni antecedenti questa ricerca.

Nella tabella 2 vengono indicati i riferimenti bibliografici rispetto ai quantitativi di calce idrata e viva.

Tutti i provini consistono in uno strato di 2 cm di spessore applicato in due mani con l'ausilio di una cazzuola, per evitare la formazione di fessurazioni.

Per i provini realizzati sui muretti di adobe è stata prevista la preparazione del supporto con idratazione del muretto e stesura di uno strato preliminare per migliorare l'aggrappo dell'intonaco.

In seguito alla realizzazione, i provini destinati alle prove meccaniche sono stati lasciati asciugare in una stanza dei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino. Gli altri provini sono stati mantenuti durante l'essiccazione all'interno del laboratorio LAstin a una temperatura inferiore ai 30°C onde evitare screpolature degli stessi. Durante i primi giorni di essiccazione, gli intonaci sono stati curati, spruzzandoli con acqua due o tre volte al giorno.

## 2.3 METODOLOGIE DI PROVE

Le metodologie di prove consistono in una fase preliminare, atta a verificare l'effettivo incremento delle proprietà grazie all'aggiunta di sabbia rispetto a una miscela di sola terra, e, una principale in cui vengono valutate le prestazioni degli intonaci con diverse additivazioni. Sono stati realizzati tre provini per ogni tipo di miscela e per ogni tipo di prova. I provini sono stati sottoposti a prove:

- di resistenza all'erosione (Spray Erosion Test e Geelong Test);
- di assorbimento d'acqua (Tubo di Karsten);
- di aderenza al supporto (Shear Test);
- di coesione superficiale (prova di fessurabilità);
- di permeabilità al vapore (metodo del bicchierino);
- colorimetriche (misure spettrofotometriche);
- prove meccaniche (secondo EN 1015-11 e CEN ISO/TS 17892-7).

### 2.3.1 PROVE PRELIMINARI

Nei giorni precedenti alla realizzazione delle miscele è stato verificato, tramite l'esecuzione di due tipi di provini, il variare delle prestazioni della miscela a seguito dell'aggiunta di sabbia all'impasto. La miscela terra-sabbia è stata formulata aggiungendo per ogni 100 gr di terra, 22 gr di sabbia, entrambi di granulometria non superiore ad 1 mm.

Sono state eseguite le prove di fessurabilità e di aderenza al supporto. La prima eseguita su un mattone di adobe 300x160 mm per ogni miscela, terra e terra-sabbia, e la seconda, su muretto di adobe, con provini di dimensione 50x40 mm e 20 mm di spessore, tre per ogni miscela. Entrambe le tipologie di provini sono state lasciate asciugare per quattro giorni prima di verificarne i risultati.

Le due prove mostrano che l'aggiunta di sabbia all'impasto di terra ha considerevoli effetti positivi in termini di contrasto al ritiro e alle fessurazioni, oltre al fatto che incrementa la capacità di aggrappo al muro

### 2.3.2 DIFFRAZIONE A RAGGI X

Le analisi sono state eseguite presso il laboratorio dell'ICVBC del CNR di Sesto Fiorentino in collaborazione con la dott.ssa Silvia Rescic.

Il metodo sfrutta gli effetti dell'interferenza di una radiazione X con il reticolo cristallino. Il reticolo, colpito da una radiazione di lunghezza d'onda  $\lambda$  dello stesso ordine delle distanze dei piani reticolari, diffrange la radiazione secondo un determinato angolo  $\theta$ .

Tale principio è noto come legge di Bragg ( $n\lambda=2d \sin\theta$ ). La diffrazione dei raggi X da parte dei vari piani reticolari fornisce una serie di picchi variabili per posizione ed intensità, che costituiscono lo spettro di diffrazione caratteristico della sostanza cristallina analizzata.

Lo strumento utilizzato per la determinazione della composizione mineralogica è un diffrattometro a raggi X modello X'Pert PRO della PANalytical, costituito da rilevatore

X'celerator e software di acquisizione ed elaborazione dati HighScore. Le condizioni operative seguite sono le seguenti: radiazione Cu K $\alpha$ 1= 1.545 Å, voltaggio 40 KV, amperaggio 20 mA, intervallo di investigazione  $2\theta = 3-20^\circ$  e  $2\theta = 3-35^\circ$  per minerali argillosi.

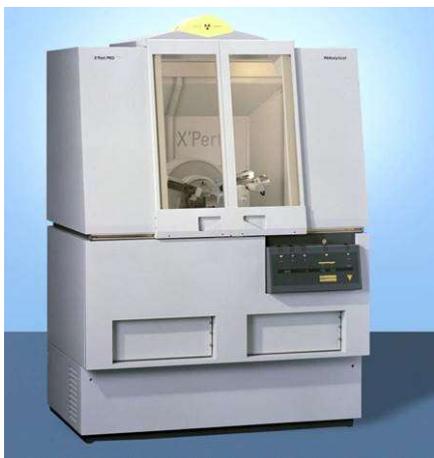


Figura 2.3  
Diffrattometro a raggi X modello X'Pert PRO della PANalytical, in [www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Diffrattometro\\_RX.html](http://www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Diffrattometro_RX.html)

Per ogni campione è stato prelevato 1 g di polvere che è stato opportunamente macinato e quindi analizzato. Per l'identificazione dei minerali argillosi è stata seguita la procedura di seguito riportata.

La terra è stata macinata e sono stati prelevati 3-4 grammi della polvere così ottenuta, la quale è stata dispersa in acqua distillata e sottoposta all'azione dell'agitatore magnetico fino a ottenere una completa disgregazione del campione. Seguentemente i campioni sono stati bilanciati a due a due, lavati quattro alla volta con acqua distillata tramite centrifugazione.

Le sospensioni di ogni campione sono state poste in un cilindro di sedimentazione di vetro munito e, trascorsa un'ora, è stata estratta, mediante una pipetta, una frazione di materiale. Tale sospensione è stata posta su delle lastre e lasciata asciugare per le scansioni diffrattometriche.

Per il riconoscimento qualitativo e semiquantitativo dei singoli minerali argillosi, le riprese diffrattometriche sono state effettuate su tre preparati: il primo tal quale, il secondo trattato con glicol etilenico spruzzato direttamente sulla superficie della lastra; il terzo su campione prelevato dalle lastre e riscaldato in una muffola a 450 °C per circa un'ora. Una volta raffreddate le polveri sono state pressate su

lastrine in vetro smerigliato e sottoposte ad analisi diffrattometrica.

Ciò ha consentito il riconoscimento dei singoli minerali argillosi presenti nel campione, grazie al confronto tra gli spettri ottenuti dai preparati in seguito ai vari trattamenti.

Questa procedura è stata eseguita anche sulla terra degli intonaci stabilizzati per verificare se il trattamento stabilizzante avesse modificato la struttura cristallina dei minerali argillosi.

### **2.3.3 RESISTENZA ALL'EROSIONE - SPRAY EROSION TEST**

Lo spray erosion test è stato effettuato presso il Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LASTIN) del Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino.

Secondo quanto riportato dalla Normativa Neozelandese NZS 4298<sup>32</sup>, il test è stato condotto proiettando un getto d'acqua localizzato su una superficie di intonaco circolare di diametro 7,5 cm per un intervallo di tempo massimo di un'ora o fino a completa erosione del campione, con interruzioni ogni 15 minuti al fine di registrare i livelli di erosione dovuti all'azione meccanica dell'acqua. Il getto d'acqua viene azionato a una distanza dal provino di 470 mm alla pressione costante di 0,5 bar. La norma fornisce specifica circa la conformazione che deve avere l'ugello. (Vedi Figura 1.7)

---

<sup>32</sup> NZS 4298, *Materials and Workmanship For Earth Buildings*, 1998, p.56

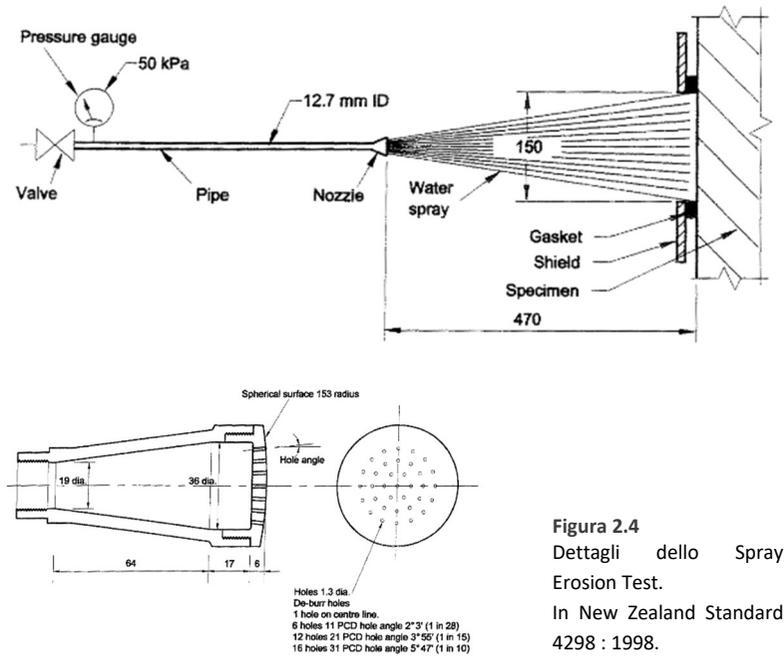


Figura 2.4  
Dettagli dello Spray  
Erosion Test.  
In New Zealand Standard  
4298 : 1998.

Sono stati testati tre provini, applicati su mattoni di terra cruda di dimensione 300x160 mm, per ogni miscela di intonaco in modo da ottenere omogeneità dei risultati. La prova è stata condotta dopo 28 giorni dalla realizzazione degli intonaci.



Figura 2.5  
Fotografia scattata in data 17/10/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.  
Getto d'acqua azionato a distanza di 470 mm dalla superficie di intonaco.

Facendo riferimento alla tabella riportata di seguito (Tabella 3) viene stabilito, in base alla profondità dei fori lasciati dal getto d'acqua, l'indice di erosione.

| Property  | Criteria                                    | Erodibility index |
|---|---|-------------------|
| Depth of erosion D<br>[mm/hr]   | $0 < D < 20$                                | 1                 |
|   | $20 < D < 50$                               | 2                 |
|   | $50 < D < 90$                               | 3                 |
|   | $90 < D < 120$                              | 4                 |
|   | $< D < 120$                                 | 5 (fail)          |
| Depth of penetration (break sample immediately after completion of above tests) if sample thicker than 120 mm | $< 120$ mm                                  | Pass              |
|   | $> 120$ mm<br>(measured from face of brick) | Fail              |

Tabella 2.3  
Indici di erosione, in NZD 4298 : 1998.

### 2.3.4 RESISTENZA ALL'EROSIONE - GEELONG TEST

Il Geelong test è stato condotto presso il Laboratorio LAstin secondo le indicazioni date dalla normativa neozelandese NZD 4298 : 1998<sup>33</sup>.

La prova prevede la caduta goccia a goccia di 100 ml d'acqua, da un'altezza di 400 mm sulla superficie del provino, inclinato di circa 30°.

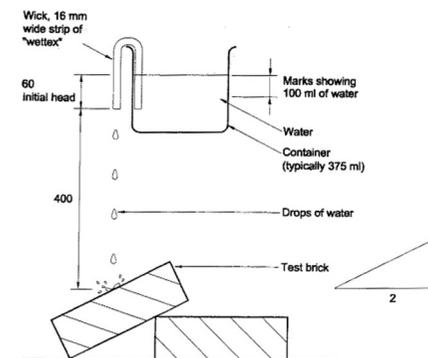


Figura 2.6  
Dettagli del Geelong Test.  
In New Zealand Standard 4298 : 1998.

L'intervallo di tempo previsto perché i 100 ml si esauriscano varia da un minimo di 20 minuti a un massimo di un'ora.

<sup>33</sup> NZS 4298, *Materials and Workmanship For Earth Buildings*, 1998, p.58

Il test serve a valutare la profondità del foro lasciato dall'azione erosiva continua dell'acqua dovuta allo sgocciolamento e l'indice di erosione è stabilito in base alla tabella riportata di seguito.

| Property  | Criteria                                 | Erodibility index |
|---|--|-------------------|
| Pit depth, D (mm)   | $0 < D < 5$                              | 2                 |
|   | $5 < D < 10$                             | 3                 |
|   | $10 < D < 15$                            | 4                 |
|   | $D > 15$                                 | 5 (fail)          |
| Depth of penetration (break sample immediately after completion of above tests) if sample thicker than 120 mm | <120 mm                                  | Pass              |
|   | >120 mm<br>(measured from face of brick) | Fail              |

Tabella 2.4  
Indici di erosione, in NZD 4298 : 1998.



Figura 2.7  
Fotografia scattata in data 17/10/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.

In alto a sinistra: Filo di piombo utilizzato per localizzare la caduta delle gocce d'acqua sul provino.

In alto a destra: Esecuzione della prova.  
A sinistra: Momento di accertamento dell'altezza di 400 mm dal punto di contatto della goccia con il provino alla spugna.

### 2.3.5 ASSORBIMENTO D'ACQUA – TUBO DI KARSTEN

La prova di assorbimento d'acqua è stata effettuata mediante il metodo del tubo di Karsten<sup>34</sup>, il quale viene applicato sul provino da testare in posizione verticale mediante silicone.

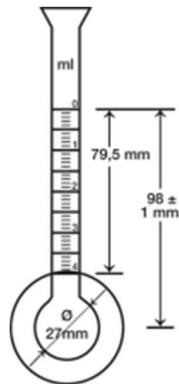


Figura 2.8  
Tubo di Karsten, in <http://ruceni.info/2018/mirowski-pipe.html>

Consiste nel misurare il quantitativo di acqua assorbita dall'intonaco dal tubo graduato, a intervalli regolari di un minuto, per un massimo di 15 minuti.



Figura 2.9  
Fotografie scattate in data 18/10/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.

In alto a sinistra: applicazione del silicone per il fissaggio del tubo di Karsten all'intonaco.  
In alto a destra: tubo di Karsten riempito di acqua.  
A sinistra: riempimento con acqua del tubo di Karsten.

<sup>34</sup> R.KARSTEN, *Bauchemie für Studium und Praxis*, Heidelberg, Germany, 1983

### 2.3.6 PROVA DI ADESIONE – SHEAR TEST

La capacità di aderenza dell'intonaco al muro è stata valutata seguendo le indicazioni riportate da Hamard<sup>35</sup>. I provini, tre per ogni tipo di intonaco, sono stati realizzati di dimensioni 50x40 mm e spessore 20 mm, steso in un unico strato.



Figura 2.10  
Fotografie scattate in data  
18/09/2018 presso LASTIN,  
Politecnico di Torino.

A sinistra: tre provini 50x40x20 mm.  
In alto a destra: strumento usato per  
applicare il carico.

Il supporto murario deve essere precedentemente inumidito in modo che l'acqua presente nella miscela dell'intonaco non venga assorbita in maniera eccessivamente veloce, dando luogo così al distacco precoce o al restringimento. È stato steso uno strato preliminare di miscela in modo da migliorare l'aggrappo al muro dei provini.

Il test misura il carico necessario a far cadere il campione. Lo strumento con cui viene applicato il carico è stato realizzato manualmente e deve garantire un buon contatto con la parte superiore del campione su cui viene appoggiato.

Questo strumento viene caricato con dei piombini, i quali consentono una misura più precisa del carico che porta al distacco dell'intonaco. Il carico con cui il provino cade viene pesato e registrato.

Si calcola la tensione media di taglio ( $\tau$ , Nmm<sup>-2</sup>), conoscendo il carico ( $m_f$ , Kg) e la superficie del campione ( $S$ , mm<sup>2</sup>) :

<sup>35</sup> H. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011, p.509

$$\tau = m_f \cdot g / S$$

dove  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$



Figura 2.11  
Fotografie scattate in data  
15/10/2018 presso LASTIN,  
Politecnico di Torino.

A sinistra: prova di carico su un  
provino 50x40x20 mm.  
In alto a destra: piombini

### 2.3.7 PROVA DI FESSURABILITÀ

La prova è stata effettuata secondo la procedura contenuta nel lavoro di ricerca di Hamard<sup>36</sup>. La fessurabilità viene considerata dannosa per l'integrità dell'intonaco se sono visibili profonde crepe o il ritiro è evidente.

Un provino per ogni formulazione di intonaco, di dimensione 250 x 250 mm e spessore 20 mm, applicato in due strati, è stato realizzato sul muro di adobe.



Figura 2.12  
Fotografia scattata in data  
18/09/2018 presso LASTIN,  
Politecnico di Torino.  
Fase di realizzazione di un provino  
250x250x20 mm.

<sup>36</sup> H. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011, p.509

Dopo 28 giorni di asciugatura, la presenza o assenza di crepe validano l'intonaco.

### **2.3.8 PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO**

La prova è stata effettuata secondo quanto specificato dalla normativa europea EN15803 del 2009<sup>37</sup>, al fine di determinare la permeabilità al vapore acqueo (WVP) di materiali inorganici porosi trattati e non, tra cui malte e intonaci.

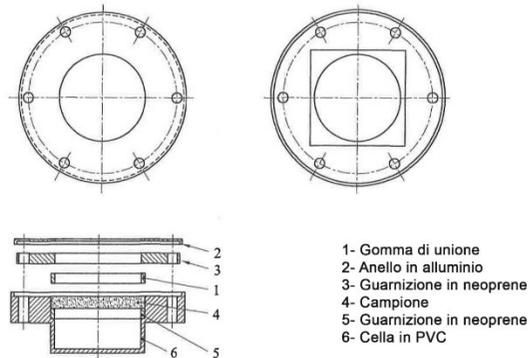
Si determina la quantità di vapore acqueo che passa, nell'unità di tempo, per unità di superficie e in condizioni stazionarie, attraverso un campione, sotto l'effetto di una differenza di pressione parziale di vapore acqueo tra due superfici. Viene usato il metodo del "bicchierino" col fine di verificare se gli stabilizzanti utilizzati (calce idrata, grassello di calce e calce viva) occludono i pori degli intonaci in terra cruda.

I campioni stabilizzati, a temperatura e umidità ambiente, vengono posti nel bicchierino, sul cui fondo viene depositato

---

<sup>37</sup> EN 15803:2009, *Conservation of cultural property- Test methods- Determination of water vapour permeability ( $\delta_p$ )*.

un batuffolo di cotone con 10 ml di acqua, al fine di mantenere l'umidità all'interno.



**Figura 2.13**  
Composizione  
dettagliata del  
"bicchierino".  
In UNI EN 15803 del  
2009.

Il bicchierino viene sigillato, e posto in ambiente anidro ad una temperatura costante di 25°C. Vengono effettuate delle registrazioni giornaliere di peso, fino a che il campione non raggiunge un peso costante. Quella sarà la quantità d'acqua trattenuta dal provino, che relazionata con l'intonaco a base di sola terra e sabbia, riferirà di quanto è variata la traspirabilità del provino stabilizzato rispetto a quello non.

Minore è la differenza tra i due, migliore sarà il risultato della stabilizzazione.

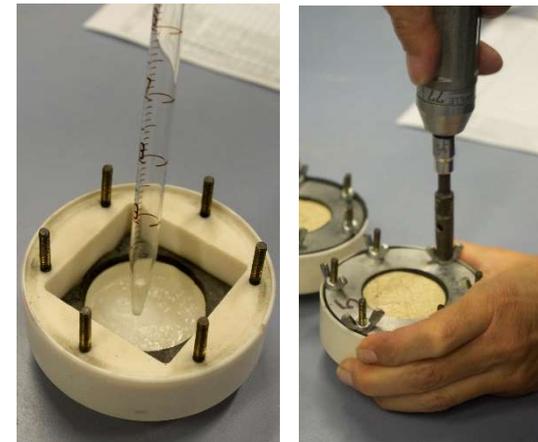
La permeabilità al vapore acqueo viene espressa come Permeabilità Residua Percentuale (P.Res%) :

$$P.Res\% = (P_1/P_0) * 100$$

dove,

$P_1$ = quantità di acqua persa in 24 ore per unità di superficie, alla temperatura di 25°C, dal campione trattato

$P_0$ = quantità di acqua persa in 24 ore per unità di superficie, alla temperatura di 25°C, dal campione non trattato.



**Figura 2.14**  
Fotografia scattata in data  
07/11/2018 presso ICVBC,  
CNR Sesto Fiorentino.  
Inserimento 10 ml di acqua  
e sigillatura bicchierino.

### 2.3.9 MISURE SPETTROFOTOMETRICHE

Le variazioni di colore apportate dall'aggiunta di additivi rispetto alla formulazione di partenza a base di sola terra sono una valutazione puramente estetica, che può diventare importante in caso di operazioni di restauro.

La prova è stata condotta presso il laboratorio di Sesto Fiorentino del CNR, utilizzando lo spettrofotometro Konica - Minolta CM - 700d.



Figura 2.15  
Spettrofotometro Konica -  
Minolta CM - 700d, in  
[www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Spettrofotometro.html](http://www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Spettrofotometro.html)

È stata seguita la procedura convenuta dalla normativa europea EN 15886 del 2010 - Conservazione dei Beni Culturali - Metodi di prova - Misura del colore delle superfici.

Per la misurazione del colore è stato impiegato lo spazio colorimetrico CIE  $L^*a^*b^*$ , in cui  $L^*$  indica la luminosità che può variare da 0 (colore nero) a 100 (colore bianco),  $a^*$  l'asse di cromaticità rosso-verde e  $b^*$  quello giallo-blu.

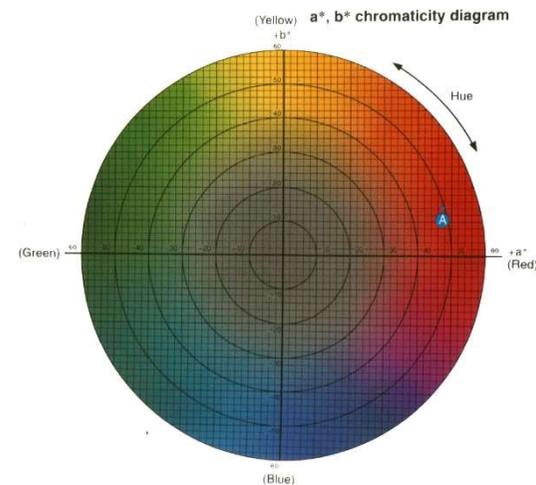


Figura 2.16  
Diagramma di cromaticità  
 $a^*$ ,  $b^*$ .  
In  
[www.dmi.unict.it/~fstanco/lezioni\\_IEM\\_2007\\_2008/Lez%2008%20colori.pdf](http://www.dmi.unict.it/~fstanco/lezioni_IEM_2007_2008/Lez%2008%20colori.pdf)

I provini sono stati preparati prima di procedere alla prova, in quanto presentavano sulla superficie i segni del polistirolo dello stampo.

Per ogni intonaco, non stabilizzato e stabilizzato, sono state effettuate venti misurazioni, per un totale di centoquaranta misure. Il valore medio delle venti misurazioni e la loro deviazione standard per ogni intonaco sono stati calcolati.

Prendendo come riferimento i valori delle misurazioni dell'intonaco a base di sola terra, sono state calcolate le variazioni di colore  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ .

Il  $\Delta E^*$  ( $\Delta E^*=5$  è limite di rilevazione dell'occhio umano) viene determinato per ottenere la differenza cromatica tra l'intonaco di base di sola terra e gli intonaci stabilizzati, tramite l'equazione:

$$\Delta E^* = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]}$$

### 2.3.10 RESISTENZA ALLA PERFORAZIONE – DRILLING TEST

Per effettuare il drilling test è stato adoperato un foratore, progettato per misurare la resistenza alla perforazione dei materiali lapidei (pietre e marmi), e delle malte.



Figura 2.17  
Fotografia scattata in data  
06/11/2018 presso ICVBC,  
CNR Sesto Fiorentino.  
Foratore utilizzato per il  
drilling test.

I seguenti parametri, quali:

- forza di penetrazione;
- profondità del foro;
- velocità di rotazione;
- velocità di avanzamento

vengono misurati durante la prova.

Esiste anche un macchinario portatile DRMS Cordless (Drilling Resistance Measurement System), prodotto dall'azienda SINT Technology sviluppato per prove di laboratorio e "in situ" con batteria integrata nell'unità principale, così da essere un macchinario portatile.

Per la prova in laboratorio il macchinario è stato impostato con velocità di rotazione 200 giri/min, velocità di avanzamento 10 mm/min per una profondità totale del foro di 10 mm.

La forza applicata viene misurata in un campo compreso tra 0 e 100 N.

Per la prova è stata utilizzata una punta in acciaio Fischer di diametro 5 mm (con resistenza 19.96 – 19 N). Esistono anche punte diamantate certificate per materiali particolarmente resistenti, le quali non subiscono usura.

Sono stati eseguiti nove fori su frammenti di ciascun intonaco e i dati acquisiti dalle prove vengono trasmessi su

Pc da un software di misurazione elaborato da Sint Technology.



Figura 2.18  
Fotografia scattata in data 06/11/2018 presso ICVBC, CNR Sesto Fiorentino. Frammento di intonaco inserito nel macchinario.

### 2.3.11 PROVE MECCANICHE

Non essendovi una disposizione specifica per quanto riguarda gli intonaci in terra, le prove meccaniche di resistenza a flessione e a compressione sono state eseguite attenendosi alle specifiche della norma europea UNI EN 1015-11 Metodi di prova per malte per opere murarie- Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita, e della specifica tecnica UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005 Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 7: Prova di compressione non confinata su terreni a grana fine.

Queste due tipologie di prove sono state scelte sulla base della letteratura scientifica studiata, in particolare nell'articolo di Stazi<sup>38</sup>, viene citata la norma ISO/TS 17892-7, mentre nella normativa tedesca DIN 18947:2013-08<sup>39</sup> per le

prove di compressione e flessione su tre punti si applicano le norme per la prova di malta secondo DIN EN 1015-1.

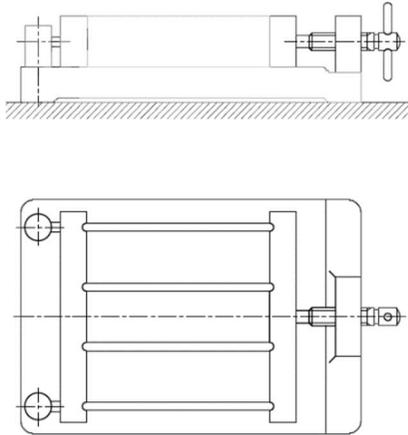
Secondo la norma UNI EN 1015-11 i provini sono stati realizzati in stampi metallici composti da tre comparti, aventi dimensioni di 160x40x40 mm. La miscela è stata stesa in due strati e compattata con un pestello. Per entrambe le tipologie di prove, prima di sottoporre i provini ai test devono essere trascorsi 28 giorni di stagionatura.



Figura 2.19  
Fotografia scattata in data 18/09/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.  
Fase di realizzazione di tre provini in stampi di dimensioni 160x40x40 mm.

<sup>38</sup> F. STAZI, *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016, p.31

<sup>39</sup> DIN 18947:2013-08 Lehmputzmörtel - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren



**Figura 2.20**  
 Dettaglio stampo per formatura  
 dei provini. In UNI EN 1015-11.

La resistenza alla flessione è determinata sollecitando su tre punti fino alla rottura i campioni prismatici induriti. I campioni sono posti al centro delle selle inferiori distanziate di 100 mm l'una dall'altra. Si è preferito porre i provini con le due superfici parallele corrispondenti ai lati longitudinali dello stampo a contatto con le selle, in quanto la superficie di getto potrebbe provocare delle interferenze con la prova, essendo il suo piano meno regolare. Il carico è stato applicato a velocità costante di 1.25 N/s, mediante il

macchinario di prova Zwick/Roell Z050, al fine di ottenere la rottura.



**Figura 2.21**  
 Fotografie scattate in data 22/10/2018  
 presso Centro sui Rischi e Durabilità nelle  
 Costruzioni, Politecnico di Torino.

A sinistra: macchinario Zwick/Roell Z050.  
 In alto: posizionamento del provino al  
 centro delle piastre tramite calibro a  
 corsoio.

Durante il test, tramite il software di controllo testXpertII, è possibile simultaneamente verificare il carico espresso in Newton e la deformazione in millimetri.

Il risultato viene espresso in  $\text{newton/mm}^2$  tramite l'equazione della resistenza a flessione:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

dove,

F è il carico massimo applicato al campione, in newton (N);

l è la distanza tra gli assi dei rulli di sostegno, in millimetri (mm);

b è la larghezza del campione, in millimetri (mm);

d è lo spessore del campione, in millimetri (mm).



Figura 2.22

Fotografie scattate in data 22/10/2018 presso Centro sui Rischi e Durabilità nelle Costruzioni, Politecnico di Torino.

A sinistra: comprimitrice montata su Zwick/Roell Z050.

In alto: conci utilizzati per prova a compressione, derivati da prova a flessione.

La resistenza a compressione viene determinata sui due conci ottenuti dalla prova di resistenza a flessione. Viene posizionata una comprimitrice su una piastra tonda montata sul macchinario di prova Zwick/Roell Z050.

Il coniglio deve essere posizionato con attenzione in modo che il carico venga applicato all'intera superficie tramite una piastra di dimensioni 40x40 mm.

Il carico è stato applicato a una velocità di 0,675 N/s.

Il risultato, espresso in  $N/mm^2$ , è il carico massimo sopportato dal campione diviso per la sua area della sezione trasversale.

La misura della resistenza a compressione non confinata, legata alla coesione apparente del materiale, è stata calcolata tramite UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005. La norma definisce la resistenza a compressione non confinata come lo sforzo verticale massimo che un campione non confinato può sostenere o lo stress verticale al 15% di deformazione

verticale, a seconda di quale evento si verifichi per primo durante l'esecuzione del test.

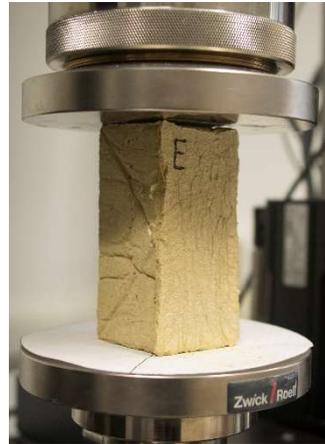
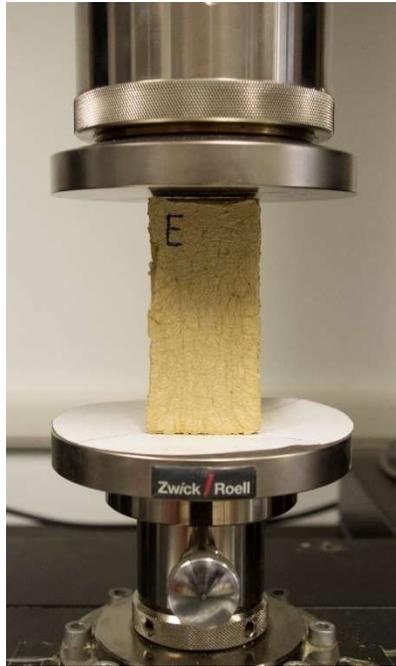


Figura 2.23  
Fotografie scattate in data 23/10/2018 presso Centro sui Rischi e Durabilità nelle Costruzioni, Politecnico di Torino.

A sinistra e in alto: prisma posizionato al centro della piastra

Provini di dimensioni 100x50x50 mm, uno per ogni formulazione, sono stati realizzati in stampi di legno.

Il carico è stato applicato fino a rottura al fine di calcolare il modulo elastico secante tra 0 e 40% della forza massima applicata, secondo la seguente equazione:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

dove,

$\sigma$  è il carico espresso in  $\text{N}/\text{mm}^2$

$\varepsilon$  è la deformazione espressa in percentuale

Le sopraelencate prove meccaniche sono state eseguite presso il laboratorio del Centro sui Rischi e Durabilità nelle Costruzioni del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino, in collaborazione con il prof. Invernizzi Stefano e la ricercatrice Restuccia Luciana.



### 3.1 DIFFRAZIONE A RAGGI X

#### 3.1.1 COMPOSIZIONE MINERALOGICA

Dalla lettura del diffrattogramma ottenuto dalla diffrazione a raggi X la composizione mineralogica principale della terra è risultata la seguente: quarzo, feldspati e minerali argillosi.

La composizione semi-quantitativa della frazione argillosa risulta la seguente: 10% di Caolinite (K), 40% di Illite (I), 30% di Illite-Smectite (IS), 15% di Clorite-Vermiculite (CIV) e 5% di Clorite (Cl). Di questi Illite-Smectite e Clorite-Vermiculite sono minerali argillosi interstratificati dove per convenzione viene indicato per primo il nome del minerale componente con minore distanza interplanare. L'illite e la clorite sono due minerali non espandibili, mentre la Smectite e la Vermiculite sono a reticolo espandibile.

Gli spettri della composizione mineralogica principale e dei minerali argillosi (tal quale, glicolato e 450°C) della terra, risultanti dall'analisi dell'intonaco A non stabilizzato, sono riportati di seguito.

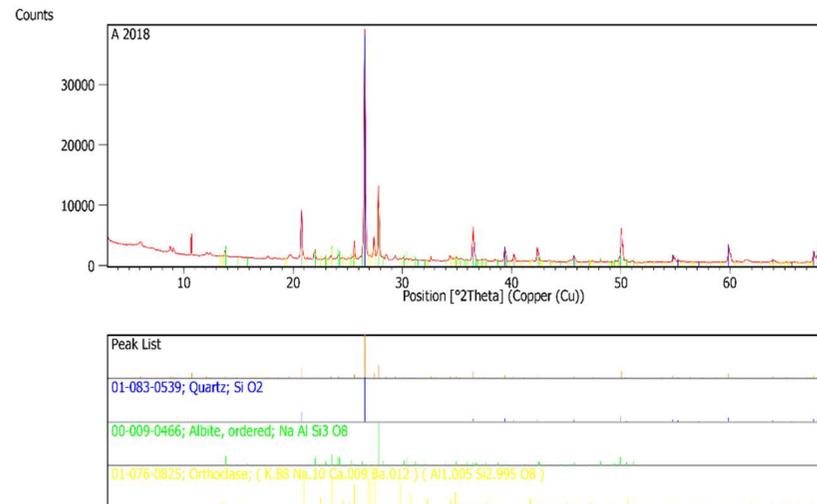


Figura 3.1 Spettro della composizione mineralogica principale della terra dell'intonaco A.

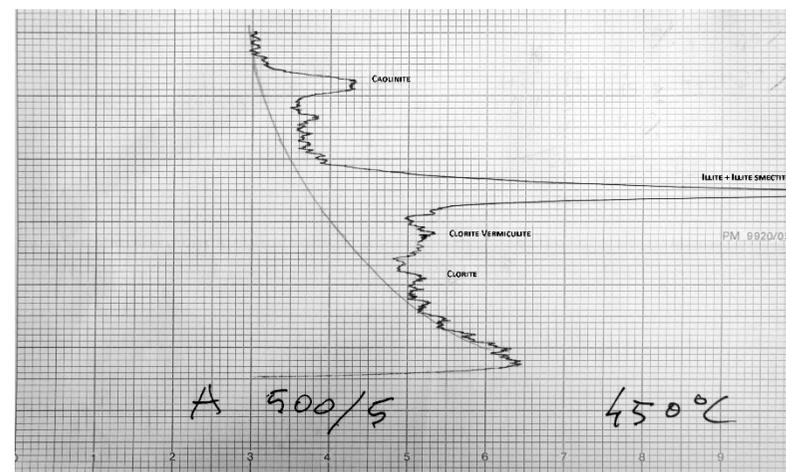


Figura 3.2 Spettro 450° dei minerali argillosi del campione di terra dell'intonaco A.

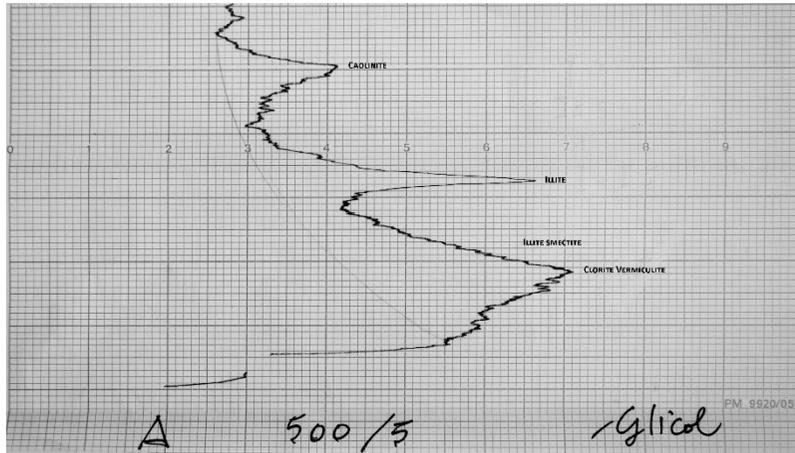


Figura 3.3  
Spettro gicol dei minerali argillosi del campione di terra dell'intonaco A.

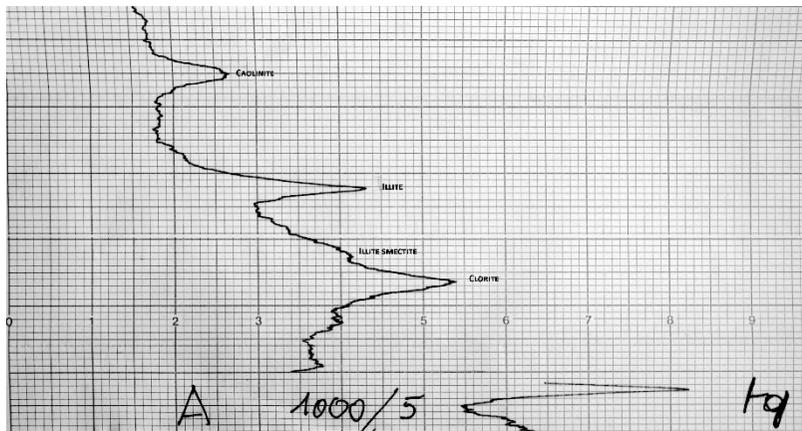


Figura 3.4  
Spettro tal quale dei minerali argillosi del campione di terra dell'intonaco A.

### 3.1.2 EFFETTO DEGLI STABILIZZANTI SULLA FRAZIONE ARGILLOSA

L'influenza degli stabilizzanti sulla frazione argillosa è stata studiata esaminando gli spettri ottenuti dalla diffrazione X (tal quale, glicol etilenico, 450°).

Infatti, nelle diffrazioni ottenute sulla terra degli intonaci stabilizzati con le varie tipologie e percentuali di calce non è stato possibile rilevare la presenza di nuove fasi cristalline dovute alla reazione tra additivo e terra probabilmente a causa della scarsa cristallinità dei prodotti formati o delle loro micro cristallinità, è stata solo rilevata la, ovvia, presenza di calcite e, talora, di portlandite dovute alla reazione tra additivo e terra.

In tabella 1 sono sintetizzati i risultati ottenuti.

|          | Caolinite | Illite | Clorite | Illite-<br>Smectite | Clorite-<br>Vermiculite |
|----------|-----------|--------|---------|---------------------|-------------------------|
| <b>A</b> | x         | x      | x       | x                   | x                       |
| <b>B</b> | x         | x      | x       | x                   | -                       |
| <b>C</b> | x         | x      | x       | -                   | -                       |
| <b>D</b> | x         | x      | x       | x                   | -                       |
| <b>E</b> | x         | x      | x       | -                   | -                       |
| <b>F</b> | x         | x      | x       | x                   | -                       |
| <b>G</b> | x         | x      | x       | -                   | -                       |

Tabella 3.1  
Composizione minerali argillosi.

Si può quindi osservare che:

- negli intonaci stabilizzati con calce idrata in polvere, grassello di calce e calce viva al 10% sembrerebbe esserci stato un attacco da parte degli additivi alla struttura cristallina dei minerali argillosi a reticolo espandibile (clorite-vermiculite e illite-smectite) tanto che non risultano più identificabili tramite diffrazione a raggi X.

- negli intonaci stabilizzati con calce idrata in polvere, grassello di calce e calce viva al 5% sembrerebbe che gli additivi abbiano attaccato solo la struttura cristallina della clorite-vermiculite che non risultati più identificabile tramite questa tecnica mentre l'illite-smectite che ancora identificabile, anche se con qualche incertezza.

Questo fatto è importante in quanto i minerali quali la clorite-vermiculite e l'illite-smectite sono in grado di assorbire acqua nel loro reticolo cristallino con un conseguente aumento di volume e, in seguito, quando l'acqua assorbita è rilasciata, essi diminuiscono il loro volume.

L'alternanza di cicli di espansione e ritiro causa fessurazioni nell'intonaco.

Pertanto, la diminuzione della loro presenza garantisce una certa durabilità all'intonaco.

Il fatto che l'illite –smectite risulti più resistente all'attacco da parte degli stabilizzanti rispetto alla clorite vermiculite è da collegarsi al fatto che questi minerali esistono in natura con diversi rapporti tra i due costituenti e che quindi probabilmente nell'illite-smectite oggetto di questo studio prevale la parte illitica che è più stabile (meno attaccabile).

### 3.2 RESISTENZA ALL'EROSIONE - SPRAY EROSION TEST

I risultati ottenuti dall'esposizione per 60 minuti degli intonaci al getto d'acqua sono schematizzati nel diagramma. I campioni con aggiunta di stabilizzanti hanno mostrato un comportamento migliore rispetto all'intonaco a base di sola terra e sabbia.

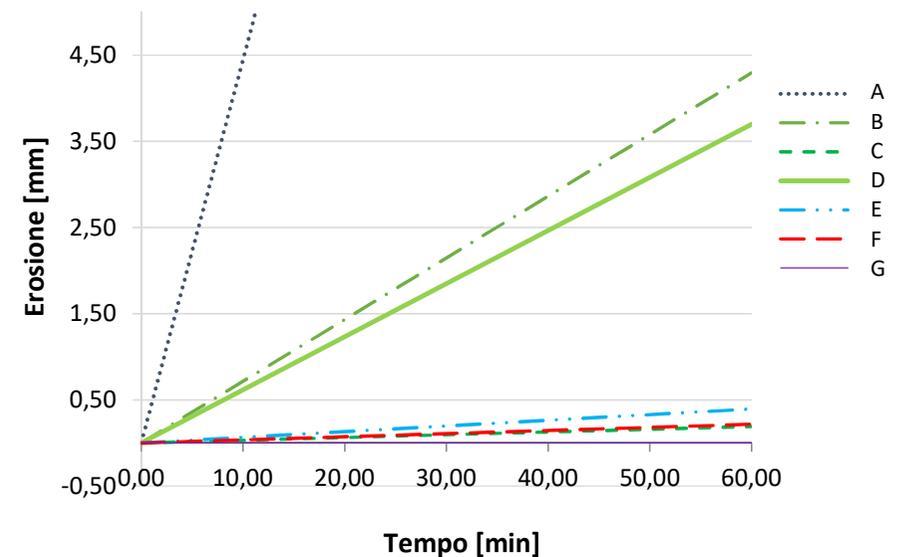


Figura 3.5  
Istogramma valori di erosione.

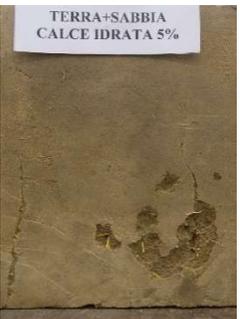
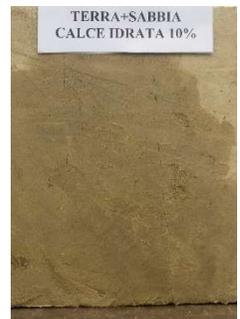
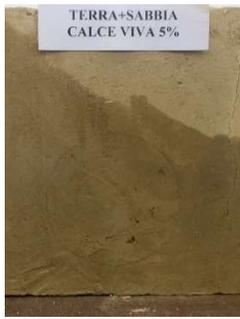
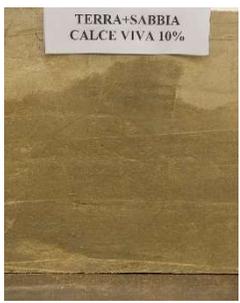
|   |  |  |
|---|--|--|
|  <p>TERRA+SABBIA</p> <p>EROSIONE MEDIA: 20 mm</p>                                |  <p>TERRA+SABBIA<br/>CALCE IDRATA 5%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 4 mm</p>              |  <p>TERRA+SABBIA<br/>CALCE IDRATA 10%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 0.36 mm</p> |
|  <p>TERRA+SABBIA<br/>GRASSELLO DI CALCE<br/>5%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 3.7 mm</p> |  <p>TERRA+SABBIA<br/>GRASSELLO DI CALCE<br/>10%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 0.5 mm</p> |  <p>TERRA+SABBIA<br/>CALCE VIVA 5%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 0.23 mm</p>    |
|  <p>TERRA+SABBIA<br/>CALCE VIVA 10%</p> <p>EROSIONE MEDIA: 0 mm</p>            |  |  |

Figura 3.6  
Risultati visivi del test di erosione.

Tendenzialmente, per ogni diversa formulazione di intonaco, quelli con la percentuale maggiore di additivo, corrispondente al 10%, rivelano una resistenza all'erosione maggiore rispetto a quelli stabilizzati con 5% di additivo. In particolare, è importante notare come le miscele a base di calce viva abbiano mostrato una performance migliore rispetto a tutte le altre, con valori di erosione pari a zero (intonaco G) e prossimi allo zero (intonaco F).

Infine, nelle immagini riportate è visibile come, ad esempio nell'intonaco "D" a base di terra, sabbia e grassello di calce 5%, la presenza di leggere irregolarità della superficie, dovute alla compattazione del provino in fase di realizzazione, abbia dato origine a delle leggere fessure a contatto con l'acqua.

### 3.3 RESISTENZA ALL'EROSIONE - GEELONG TEST

La profondità del foro lasciato dal gocciolamento dell'acqua è stata misurata e secondo le disposizioni della normativa neozelandese NZD 4298: 1998 le miscele formulate presentano un indice di erosione pari a 2, essendo compresa tra 0 e 5 mm.

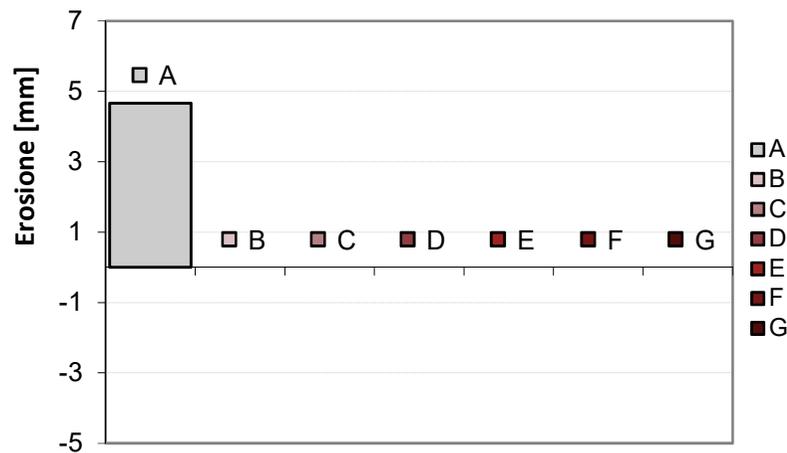


Figura 3.7  
Diagramma valori di resistenza all'erosione

L'intonaco A (Terra+Sabbia) manifesta segni di erosione, in particolare ha raggiunto un indice di erosione pari 3, come

riportato nella tabella. Viceversa, tutti gli altri intonaci non sono stati in alcun modo erosi.

| Intonaco | Additivo         | Profondità del foro <i>D</i> [mm] | Indice di erosione |
|----------|------------------|-----------------------------------|--------------------|
| <b>A</b> | /                | 5                                 | 3                  |
| <b>B</b> | Calce idrata 5%  | 0                                 | /                  |
| <b>C</b> | Calce Idrata 10% | 0                                 | /                  |
| <b>D</b> | Grassello 5%     | 0                                 | /                  |
| <b>E</b> | Grassello 10%    | 0                                 | /                  |
| <b>F</b> | Calce viva 5%    | 0                                 | /                  |
| <b>G</b> | Calce viva 10%   | 0                                 | /                  |

Tabella 3.2  
Valori indice di erosione.

L'idrossido di calcio, infatti, combinandosi con l'anidride carbonica determina un aumento della coesione delle particelle di argilla, contribuendo a creare un reticolo fitto che impedisce l'erosione.



Figura 3.8  
Fotografia scattata in data 17/10/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.

Provini a base di terra e sabbia soggetti a disgregazione.

### 3.4 ASSORBIMENTO D'ACQUA – TUBO DI KARSTEN

Il diagramma riportato di seguito mostra i risultati del test di assorbimento d'acqua.

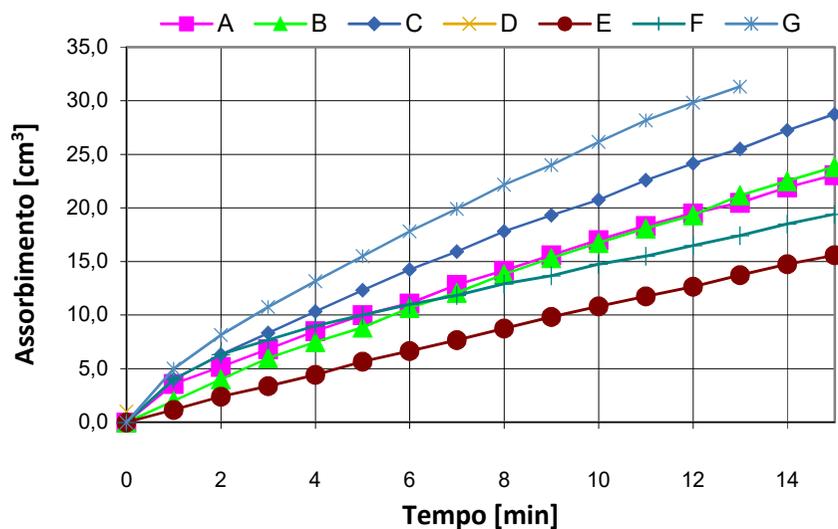


Figura 3.9  
Istogramma valori di assorbimento.

L'aggiunta di grassello di calce in percentuale del 10% (intonaco E) e calce viva in percentuale del 5% (intonaco F) hanno dato risultati migliori come si può riscontrare dai dati emersi sul diagramma.

Va notato come l'intonaco stabilizzato con calce viva in proporzione del 10% abbia raggiunto il massimo assorbimento d'acqua in minor tempo rispetto agli altri provini. Tale risultato appare in difformità con quanto previsto da precedenti analisi sperimentali, le quali sostenevano che le caratteristiche di assorbimento d'acqua fossero migliorate mediante l'uso della calce viva.

### 3.5 PROVA DI ADESIONE – SHEAR TEST

La resistenza al taglio mostrata dai provini, tre per ogni tipologia di intonaco, è riportata nel diagramma di seguito.

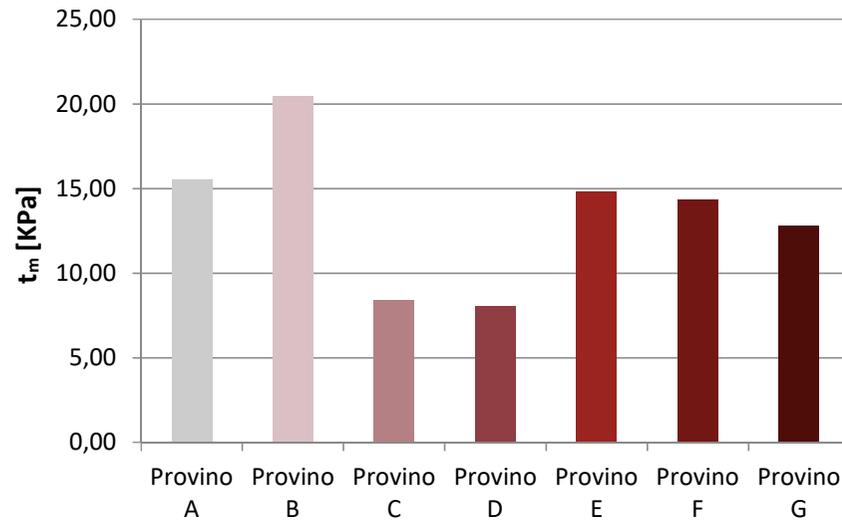


Figura 3.10  
Diagramma valori di resistenza al taglio.

I valori più alti sono stati raggiunti dalla miscela B a base di terra, sabbia e calce idrata 5%, mentre in media i provini A (Terra+Sabbia), E (Terra+Sabbia+Grassello10%), F (Terra+Sabbia+Calce Viva 5%) e G (Terra+Sabbia+Calce

Viva10%) hanno ottenuto risultati simili. Solamente i provini C e D non hanno raggiunto il valore soddisfacente di 10 KPa.

Va sottolineato il fatto che tale prova, può presentare delle variazioni rispetto a un'ipotetica situazione reale in quanto le esigue dimensioni dei provini (50x40 mm) comportano delle difficoltà in fase di realizzazione, come ad esempio problematiche dovute alla compattazione del provino.

Inoltre, si è osservato che i campioni posizionati tra un mattone di adobe e il giunto di malta, abbiano resistito meglio al carico rispetto a quelli posizionati interamente su mattone.



Figura 3.11  
Fotografia scattata in data 15/10/2018 presso LASTIN, Politecnico di Torino.

In seguito al test è possibile vedere come i provini agli estremi, entrambi collocati a cavallo tra giunto di malta e mattone, presentino valori di resistenza al taglio maggiori.

È stato perciò constatato che la prova di adesione al supporto - con le dimensioni dei provini utilizzati - sarebbe stata più precisa e veritiera qualora fossero stati testati cinque provini in luogo dei tre utilizzati, ciascuno per ogni formulazione, in modo da escludere gli estremi ed ottenere un margine minore di errore.

### **3.6 PROVA DI FESSURABILITÀ**

La prova di fessurabilità ha mostrato che il contenuto di argilla pari al 9% e la sabbia di granulometria inferiore a 1 mm hanno apportato buoni risultati in termini di aderenza al supporto in quanto nessuno dei provini si è distaccato. Inoltre, la paglia ha garantito il controllo del ritiro durante il tempo di asciugatura. L'intonaco F (terra+sabbia+calce viva 5%) non ha palesato segni di fessurazioni. Questo è un risultato significativo essendo la reazione della calce viva la più complessa; infatti, essendo una reazione esotermica, quantitativi limitati di acqua possono innalzare troppo la temperatura e dare luogo in seguito a fenomeni di ritiro. Per tutte le altre miscele sono visibili segni di fessurazioni ma non crepe profonde.

Tali risultati dipendono da vari fattori come già affermato nello studio di Stazi<sup>40</sup>, quali: proporzioni dei componenti della terra; contenuto di acqua; presenza di stabilizzanti.

---

<sup>40</sup> F. STAZI ET AL., *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016, p.35

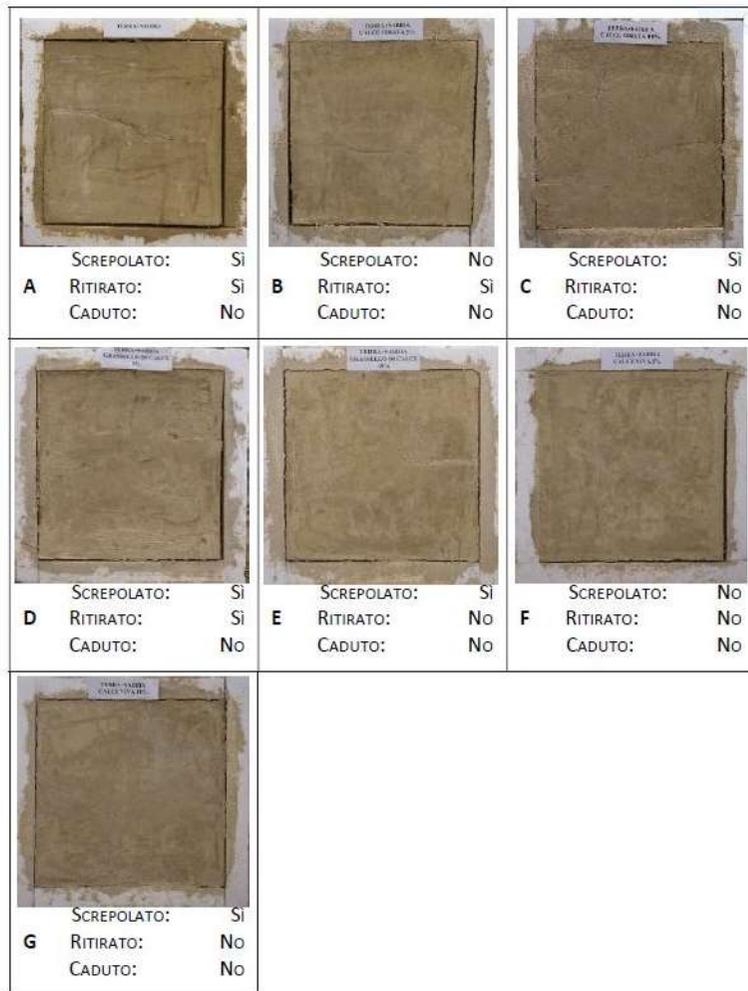


Figura 3.12  
Risultati test di fessurabilità.

### 3.7 PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO

I dati relativi a questa prova sono riportati nella Tabella 3.3. Si riporta anche il dato della quantità di acqua persa, espressa in grammi, nelle 24 ore.

| Intonaco | Quantità di acqua persa (g) in 24h | P.Res% |
|----------|------------------------------------|--------|
| A        | 0,446±0,018                        | -      |
| B        | 0,419±0,017                        | 94±0,7 |
| C        | 0,412±0,006                        | 92±0,7 |
| D        | 0,415±0,014                        | 93±0,7 |
| E        | 0,410±0,013                        | 92±0,5 |
| F        | 0,400±0,014                        | 89±0,5 |
| G        | 0,381±0,016                        | 85±0,5 |

A= Terra+Sabbia; B= Terra+Sabbia+C.Idrata 5%; C= Terra+Sabbia+C.Idrata 5%; D=Terra+Sabbia+Grassello 5%; E=Terra+Sabbia+Grassello 10%; F=Terra+Sabbia+C. Viva 5%; G=Terra+Sabbia+C.Viva 10%

Tabella 3.3  
Permeabilità residua al vapore acqueo.

Si osserva che solo due stabilizzanti (calce viva 5% e 10%) inducono una diminuzione apprezzabile (circa 10-15%) della permeabilità al vapore acqueo. Per tutti gli altri intonaci stabilizzati la diminuzione di permeabilità resta (<10%) rispetto all'intonaco non stabilizzato. Si noti che gli additivi in percentuale maggiore (C, E, G) inducono una diminuzione della permeabilità leggermente superiore rispetto a quelli in percentuale minore (B, D, F).

### 3.8 MISURE SPETTROFOTOMETRICHE

Di seguito sono riportati i valori medi della luminosità  $L^*$  e delle coordinate cromatiche  $a^*$  e  $b^*$  ottenuti dalle venti misurazioni per ciascuna tipologia di intonaco.

| Intonaco |                  | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ |
|----------|------------------|-------|-------|-------|
| <b>A</b> | Media            | 60.95 | 5.42  | 22.99 |
|          | Deviazione stand | 0.48  | 0.18  | 0.45  |
| <b>B</b> | Media            | 67.91 | 3.81  | 20.17 |
|          | Deviazione stand | 0.43  | 0.13  | 0.38  |
| <b>C</b> | Media            | 69.73 | 3.45  | 17.91 |
|          | Deviazione stand | 1.24  | 0.41  | 0.95  |
| <b>D</b> | Media            | 65.32 | 4.20  | 20.69 |
|          | Deviazione stand | 0.40  | 0.21  | 0.56  |
| <b>E</b> | Media            | 67.49 | 3.71  | 19.22 |
|          | Deviazione stand | 0.57  | 0.12  | 0.34  |
| <b>F</b> | Media            | 65.81 | 3.54  | 19.01 |
|          | Deviazione stand | 0.68  | 0.20  | 0.63  |
| <b>G</b> | Media            | 71.35 | 3.25  | 17.71 |
|          | Deviazione stand | 0.86  | 0.26  | 0.61  |

Tabella 3.4

Valori colorimetrici medi e della deviazione standard degli intonaci ( $L^*$ = luminosità,  $a^*$  e  $b^*$ = coordinate cromatiche)

Le variazioni di colore  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  degli intonaci calcolate rispetto all'intonaco A di riferimento sono restituite nella tabella sottoindicata.

| Intonaco | $\Delta L^*$ | $\Delta a^*$ | $\Delta b^*$ | $\Delta E^*$ |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| B        | 6.95         | -1.61        | -2.82        | 7.67         |
| C        | 8.77         | -1.98        | -5.08        | 10.33        |
| D        | 4.37         | -1.22        | -2.31        | 5.09         |
| E        | 6.54         | -1.72        | -3.77        | 7.74         |
| F        | 7.55         | -1.88        | -3.98        | 8.74         |
| G        | 10.40        | -2.17        | -5.28        | 11.86        |

Tabella 3.5  
Valori di variazione dei parametri colorimetrici rispetto all'intonaco A.

Tali valori ci hanno permesso di calcolare il  $\Delta E^*$ , che esprime la differenza cromatica tra l'intonaco a base di sola terra e gli intonaci caratterizzati dall'aggiunta di stabilizzanti. Il  $\Delta E^*$ , espresso in valore numerico, specifica le dimensioni della differenza di colore ma, tuttavia, non indica in quale modo i colori differiscano.

Sono evidenti le differenze cromatiche tra l'intonaco di riferimento e quelli additivati con gli stabilizzanti.

In generale, per quanto riguarda  $\Delta E^*$ , tutti gli intonaci mostrano differenze cromatiche rispetto all'intonaco di riferimento A visibili a occhio nudo in quanto il valore di  $\Delta E^*$  è superiore a 5. Fa eccezione l'intonaco D stabilizzato con calce idrata 10%, il quale ha un valore di poco superiore a 5.

Per quello che concerne, invece,  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  si può notare che la componente che ha subito maggiori variazioni è la luminosità, la quale per tutti gli intonaci risulta essere maggiore a quella dell'intonaco A; ciò indica quindi un generale schiarimento delle superfici degli intonaci stabilizzati.

Questi dati ottenuti di carattere estetico vanno tenuti in conto nell'ipotesi di un intervento di restauro, in quanto gli stabilizzanti utilizzati tendono a dare delle variazioni cromatiche percepibili rispetto al materiale di riferimento. In caso di integrazione di lacune, questo è positivo per la riconoscibilità dell'intervento.

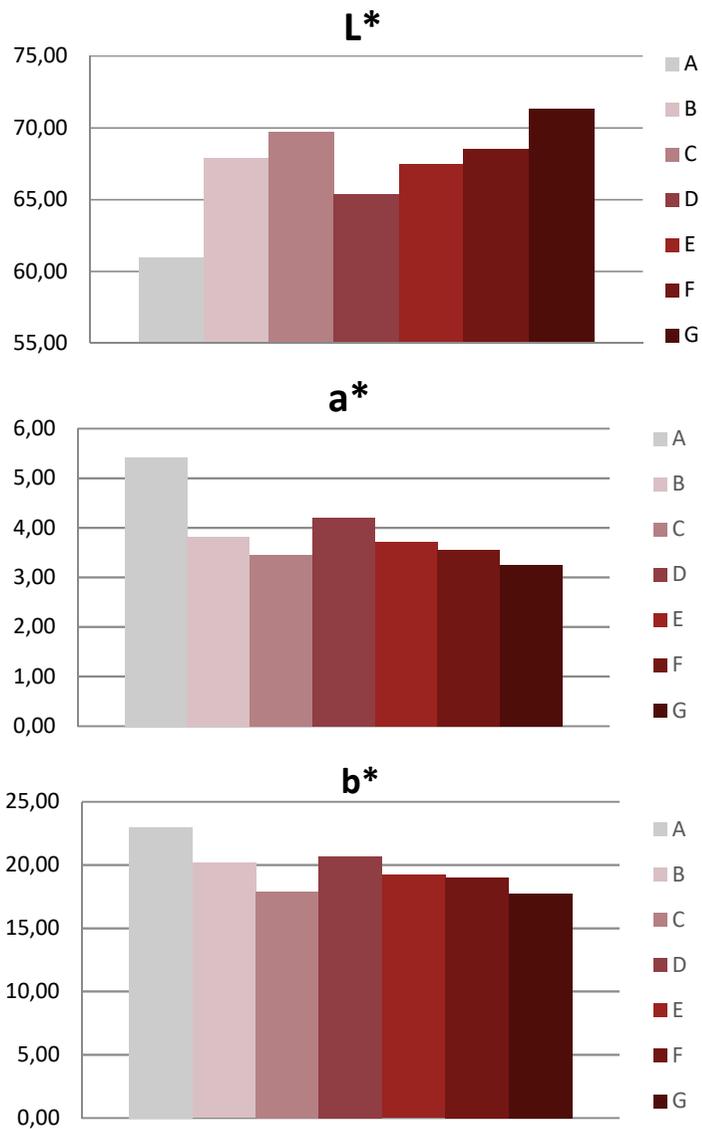


Figura 3.13  
Diagrammi valori di L\* (Luminosità), a\* e b\* (coordinate cromatiche)

### 3.9 RESISTENZA ALLA PERFORAZIONE – DRILLING TEST

Come visibile nei profili riportati nel grafico, gli intonaci risultano disomogenei probabilmente per la presenza dei granelli di sabbia e la paglia, i quali determinano picchi elevati di resistenza alla perforazione. Per chiarezza, si è scelto di riportare i profili significativi (A, B, D, E, F).

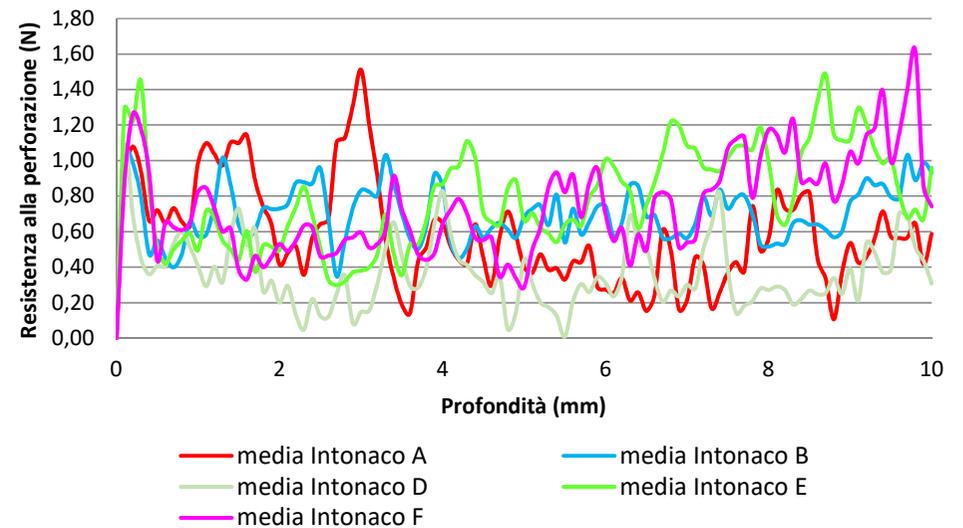


Figura 3.14  
Curve medie della resistenza a perforazione.

L'intonaco di riferimento A (Terra+Sabbia) risulta avere valori di resistenza alla perforazione medi rispetto agli altri campioni, come visibile nel profilo di perforazione in figura 3.9.

Alcuni provini, B (Terra+Sabbia+C.Idrata 5%), E (Terra+Sabbia+Grassello 10%) e F (Terra+Sabbia+C.Viva 5%), mostrano valori superiori all'intonaco A, ma che in generale non superano il 20% di resistenza in più.

| Int | Intervallo di misura (mm) | Resistenza perforazione (N) | Deviazione statistica | Incremento percentuale (%) |
|-----|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| A   | 0-10                      | 0.58                        | 0.29                  |                            |
| B   | 0-10                      | 0.70                        | 0.17                  | 20                         |
| C   | 0-10                      | 0.59                        | 0.23                  | 2                          |
| D   | 0-10                      | 0.36                        | 0.19                  | -38                        |
| E   | 0-10                      | 0.79                        | 0.29                  | 36                         |
| F   | 0-10                      | 0.74                        | 0.28                  | 28                         |
| G   | 0-10                      | 0.56                        | 0.27                  | -3                         |

Tabella 3.6  
Valori medi per prova di resistenza alla perforazione.

### 3.10 PROVE MECCANICHE

La distribuzione dei valori di rottura a flessione, espressi in Newton, dei provini testati è rappresentata nell'istogramma riportato di seguito. I provini appartenenti alla tipologia A (Terra+Sabbia) raggiungono il punto di rottura, tramite il carico applicato a velocità costante, sotto una sollecitazione maggiore rispetto alle altre tipologie di intonaci.

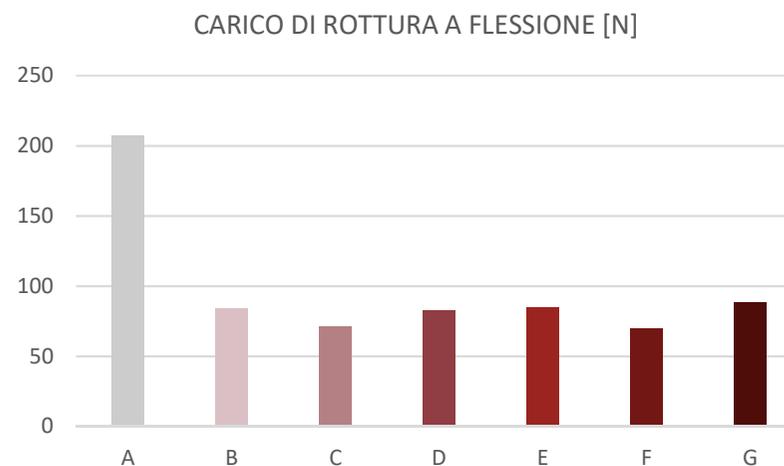


Figura 3.15  
Istogramma valori di carico di rottura a flessione per ogni tipologia di intonaco

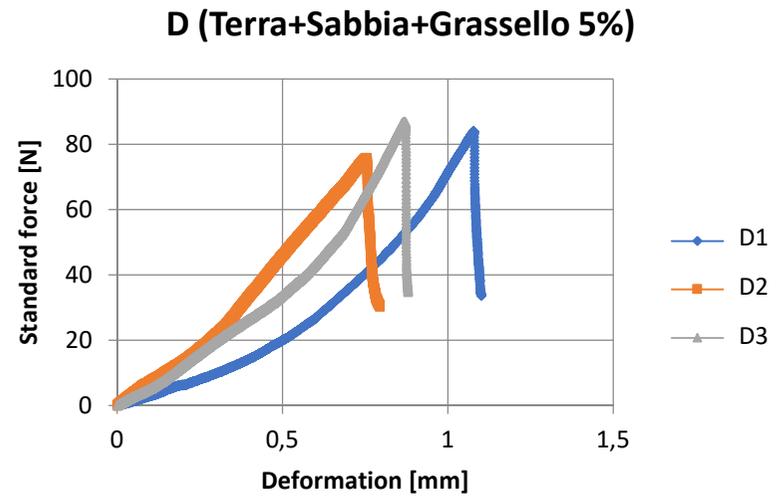
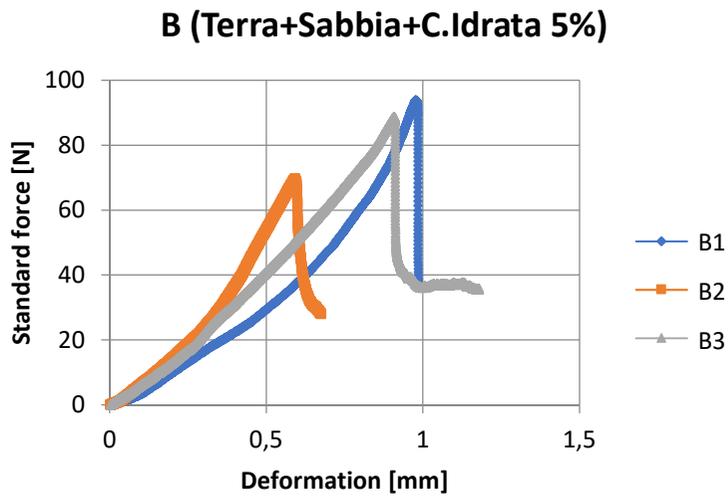
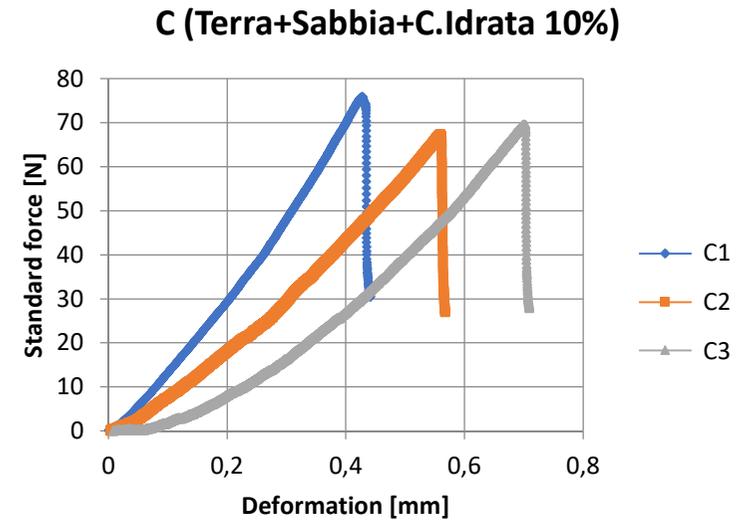
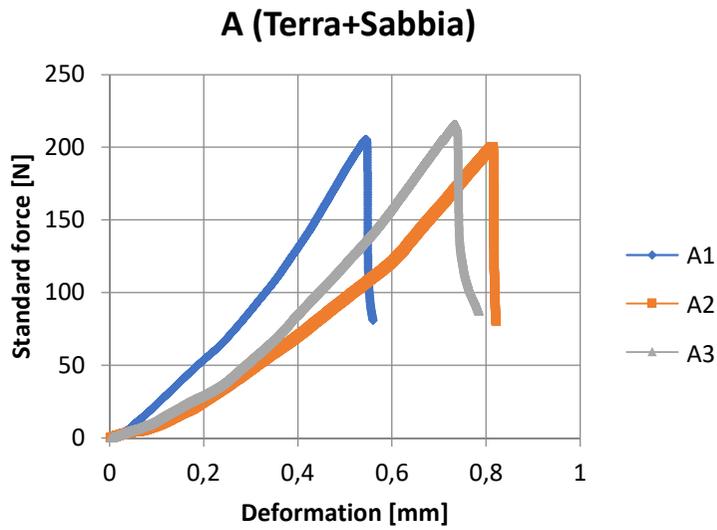
I valori riportati di seguito nella tabella sono stati ricavati dal software di controllo testXpertII e sono stati utilizzati al fine di calcolare la resistenza a flessione  $f$  [N/mm<sup>2</sup>]. I valori  $a_0$  e  $b_0$ , corrispondenti alla larghezza e spessore del prisma, variano da provino a provino in quanto durante il periodo di stagionatura hanno subito un ritiro in media di 2 mm rispetto alla dimensione originale degli stampi.

|           | $a_0$<br>[mm] | $b_0$<br>[mm] | $S_0$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $F_{max}$<br>[N] | $dL$ at $F_{max}$<br>[%] | $f_{media}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| <b>A1</b> | 37            | 39            | 1443                        | 205,4            | 1,21                     |                                     |
| <b>A2</b> | 38            | 39            | 1482                        | 200,4            | 1,85                     | 0.55                                |
| <b>A3</b> | 38            | 38,5          | 1463                        | 215,6            | 1,67                     |                                     |
| <b>B1</b> | 38            | 38            | 1444                        | 93,8             | 2,22                     |                                     |
| <b>B2</b> | 38            | 38            | 1444                        | 69,7             | 1,35                     | 0.23                                |
| <b>B3</b> | 38            | 39            | 1482                        | 88,6             | 2,06                     |                                     |
| <b>C1</b> | 38            | 38            | 1444                        | 75,9             | 0,97                     |                                     |
| <b>C2</b> | 38            | 39            | 1482                        | 67,3             | 1,27                     | 0.19                                |
| <b>C3</b> | 38,2          | 38            | 1451,6                      | 69,7             | 1,60                     |                                     |
| <b>D1</b> | 38            | 37,5          | 1425                        | 84,1             | 2,45                     |                                     |
| <b>D2</b> | 38,3          | 38            | 1455,4                      | 75,9             | 1,73                     | 0.22                                |
| <b>D3</b> | 38            | 38            | 1444                        | 86,9             | 1,98                     |                                     |

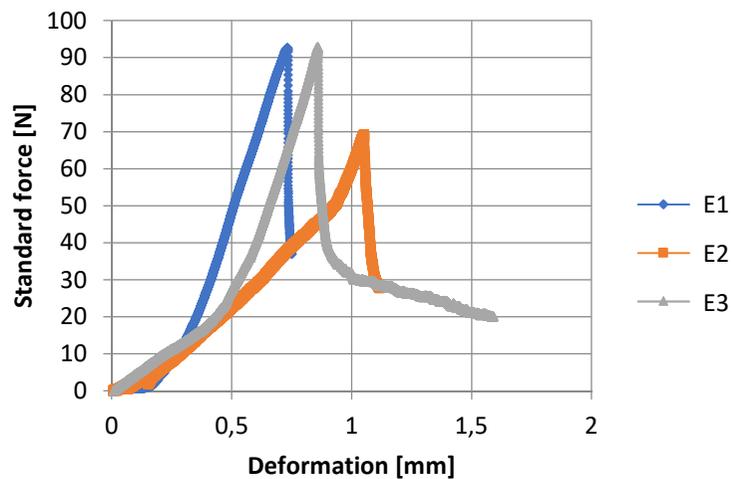
|           |      |      |         |      |      |      |
|-----------|------|------|---------|------|------|------|
| <b>E1</b> | 38   | 37,2 | 1413,6  | 92,7 | 1,66 |      |
| <b>E2</b> | 37,5 | 38   | 1425    | 69,3 | 2,36 | 0.23 |
| <b>E3</b> | 38   | 38   | 1444    | 92,9 | 1,95 |      |
| <b>F1</b> | 39   | 38   | 1482    | 67,9 | 1,21 |      |
| <b>F2</b> | 38,3 | 38,5 | 1474,55 | 67,4 | 1,09 | 0.19 |
| <b>F3</b> | 38,2 | 38,5 | 1470,7  | 74,1 | 0,46 |      |
| <b>G1</b> | 38   | 39   | 1482    | 93,7 | 1,67 |      |
| <b>G2</b> | 38   | 39   | 1482    | 88,8 | 1,45 | 0.23 |
| <b>G3</b> | 38   | 39   | 1482    | 82   | 1,09 |      |

Tabella 3.7  
Risultati della prova a flessione su tre punti UNI EN 1015-11.

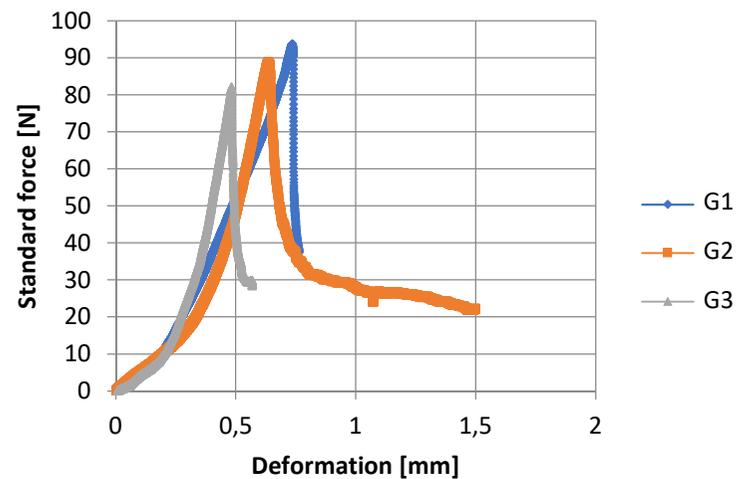
Si riportano di seguito i grafici rappresentanti le curve di sforzo-deformazione dei tre provini, sottoposti alla prova di flessione su tre punti, realizzati per ciascun tipo di intonaco.



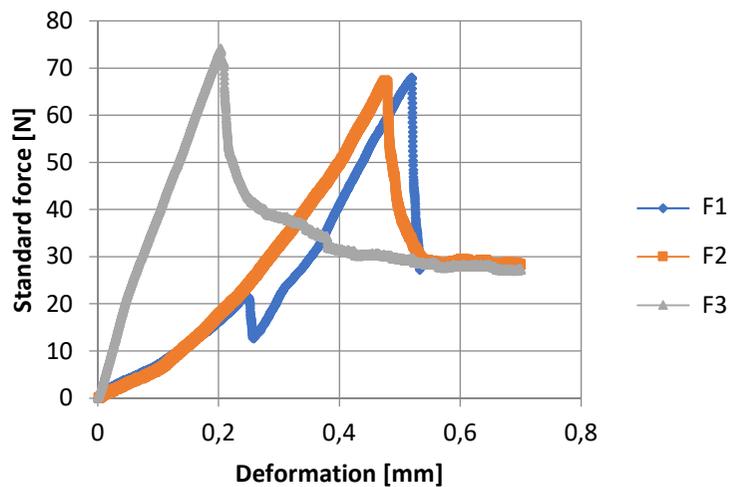
**E (Terra+Sabbia+Grassello 10%)**



**G (Terra+Sabbia+C.Viva 10%)**



**F (Terra+Sabbia+C.Viva 5%)**



Al termine del test, i prismi utilizzati per la prova di flessione su tre punti, risultano essere divisi circa nell'area di mezzaria risultando così quarantadue concii. Come visibile in tabella, i tre provini per ogni tipologia, sono stati numerati in maniera progressiva e affiancati dalla lettera a o b a seconda del concio, dopodiché sottoposti alla prova a compressione.

|             | <b>a<sub>0</sub></b> | <b>b<sub>0</sub></b> | <b>S<sub>0</sub></b> | <b>F<sub>max</sub></b> | <b>σ<sub>M</sub></b> | CARICO DI<br>ROTTURA<br>MEDIO |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|
|             | [mm]                 | [mm]                 | [mm <sup>2</sup> ]   | [N]                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N]                           |
| <b>A1-a</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 2097                   | 1,34                 |                               |
| <b>A1-b</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 2077                   | 1,33                 |                               |
| <b>A2-a</b> | 40                   | 39,5                 | 1580                 | 1863                   | 1,18                 | 745.5                         |
| <b>A2-b</b> | 40                   | 39,5                 | 1580                 | 1756                   | 1,11                 |                               |
| <b>A3-a</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 1820                   | 1,17                 |                               |
| <b>A3-b</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 1834                   | 1,17                 |                               |
| <b>B1-a</b> | 40                   | 38                   | 1520                 | 1007                   | 0,66                 |                               |
| <b>B2-a</b> | 40                   | 38,2                 | 1528                 | 726                    | 0,47                 |                               |
| <b>B2-b</b> | 40                   | 38,6                 | 1544                 | 733                    | 0,47                 | 363                           |
| <b>B3-a</b> | 40                   | 38                   | 1520                 | 897                    | 0,59                 |                               |
| <b>B3-b</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 864                    | 0,55                 |                               |
| <b>C1-a</b> | 40                   | 38,5                 | 1540                 | 605                    | 0,39                 |                               |
| <b>C1-b</b> | 40                   | 39                   | 1560                 | 622                    | 0,40                 |                               |
| <b>C2-a</b> | 40                   | 38,5                 | 1540                 | 668                    | 0,43                 | 263                           |
| <b>C2-b</b> | 40                   | 39,5                 | 1580                 | 611                    | 0,39                 |                               |
| <b>C3-a</b> | 40                   | 38,4                 | 1536                 | 759                    | 0,49                 |                               |
| <b>C3-b</b> | 40                   | 38,4                 | 1536                 | 672                    | 0,44                 |                               |
| <b>D1-a</b> | 40                   | 38                   | 1520                 | 765                    | 0,50                 |                               |
| <b>D1-b</b> | 40                   | 38,5                 | 1540                 | 769                    | 0,50                 |                               |
| <b>D2-a</b> | 40                   | 38,2                 | 1528                 | 784                    | 0,51                 | 325.4                         |
| <b>D2-b</b> | 40                   | 38,2                 | 1528                 | 837                    | 0,55                 |                               |
| <b>D3-a</b> | 40                   | 38                   | 1520                 | 870                    | 0,57                 |                               |
| <b>D3-b</b> | 40                   | 38                   | 1520                 | 826                    | 0,54                 |                               |
| <b>E1-a</b> | 40                   | 38,5                 | 1540                 | 840                    | 0,54                 |                               |

|             |    |      |      |      |      |       |
|-------------|----|------|------|------|------|-------|
| <b>E1-b</b> | 40 | 38   | 1520 | 965  | 0,63 |       |
| <b>E2-a</b> | 40 | 38   | 1520 | 746  | 0,49 |       |
| <b>E2-b</b> | 40 | 38   | 1520 | 842  | 0,55 | 340.4 |
| <b>E3-a</b> | 40 | 38   | 1520 | 853  | 0,56 |       |
| <b>E3-b</b> | 40 | 38   | 1520 | 862  | 0,57 |       |
| <b>F1-a</b> | 40 | 39   | 1560 | 791  | 0,51 |       |
| <b>F1-b</b> | 40 | 39   | 1560 | 756  | 0,48 |       |
| <b>F2-a</b> | 40 | 38,5 | 1540 | 706  | 0,46 | 301   |
| <b>F2-b</b> | 40 | 38,5 | 1540 | 695  | 0,45 |       |
| <b>F3-a</b> | 40 | 38,5 | 1540 | 748  | 0,49 |       |
| <b>F3-b</b> | 40 | 38,5 | 1540 | 817  | 0,53 |       |
| <b>G1-a</b> | 40 | 38   | 1520 | 1021 | 0,67 |       |
| <b>G1-b</b> | 40 | 38   | 1520 | 1122 | 0,74 |       |
| <b>G2-a</b> | 40 | 38,3 | 1532 | 928  | 0,61 | 424.4 |
| <b>G2-b</b> | 40 | 40   | 1600 | 946  | 0,59 |       |
| <b>G3-a</b> | 40 | 39   | 1560 | 1016 | 0,65 |       |
| <b>G3-b</b> | 40 | 39   | 1560 | 948  | 0,61 |       |

Tabella 3.8  
Risultati della prova a compressione UNI EN 1015-11.

Il rapporto tra la forza massima applicata e la superficie del provino, ossia la sollecitazione indotta, risulta maggiore per i provini appartenenti alla tipologia di intonaco A (Terra+Sabbia), seguiti dalla tipologia G (Terra+Sabbia+Calce viva 10%), con uno scarto di circa la metà tra i primi e i secondi.

La prova a compressione non confinata, secondo il dispositivo della UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005, è stata funzionale a calcolare il modulo elastico e definire così la rigidità dei diversi intonaci. La pendenza della curva sforzo-deformazione è stata considerata nell'intervallo compreso tra il 20% e 70% della forza massima.

|          | $F_{Break}$<br>[N] | $a_0$<br>[mm] | $b_0$<br>[mm] | $S_0$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $F_{max}$<br>[N] | $\sigma_M$<br>[MPa] |
|----------|--------------------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------|---------------------|
| <b>A</b> | 670,0449           | 50            | 48,6          | 2430                        | 3350             | 1,38                |
| <b>B</b> | 208,3231           | 50            | 48,5          | 2425                        | 1042             | 0,43                |
| <b>C</b> | 208,3332           | 49,5          | 48,5          | 2400,75                     | 1042             | 0,43                |
| <b>D</b> | 280,9251           | 48,5          | 48            | 2328                        | 1405             | 0,60                |
| <b>E</b> | 234,6841           | 48,5          | 47,2          | 2289,2                      | 1173             | 0,51                |
| <b>F</b> | 213,364            | 48,6          | 48            | 2332,8                      | 1067             | 0,46                |
| <b>G</b> | 215,4491           | 49,2          | 48,4          | 2381,28                     | 1077             | 0,45                |

Tabella 3.9  
Risultati della prova a compressione non confinata UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005.

Va notato che tutti i provini, escluso quello composto da sola terra e sabbia, raggiunto il punto di rottura, hanno mantenuto la loro forma esterna, presentando una superficie di scorrimento più inclinata. Diversamente l'intonaco A (Terra+Sabbia), pur mantenendosi compatto, presenta una fessura diagonale meno inclinata. Tali osservazioni sono visibili nelle immagini riportate di seguito.



Figura 3.16  
Fotografie scattate in data 22/10/2018 presso Centro sui Rischi e Durabilità nelle Costruzioni, Politecnico di Torino.  
Deformazione provini a seguito della prova a compressione.

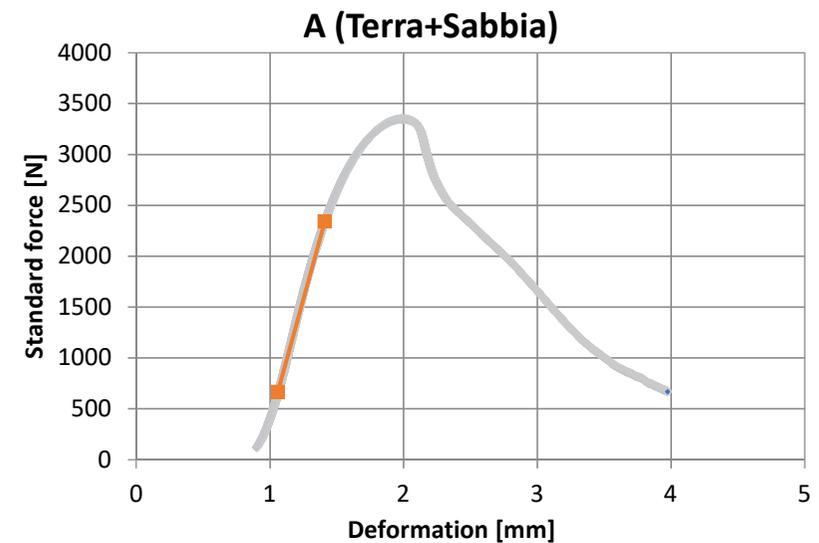
Il modulo secante  $E_{20-70}$  dei diversi intonaci, rappresentante il rapporto tra la sollecitazione e la deformazione, è stato calcolato ed è riportato nella seguente tabella.

Il grafico di ogni tipologia di intonaco, rappresentante la curva sforzo-deformazione fino al punto di rottura corrispondente alla forza massima applicata, mostra il comportamento elastico lineare della deformazione del materiale. La parte iniziale della curva in alcuni casi presenta una piega a ginocchio a causa della fase di assestamento tra la piastra e il provino.

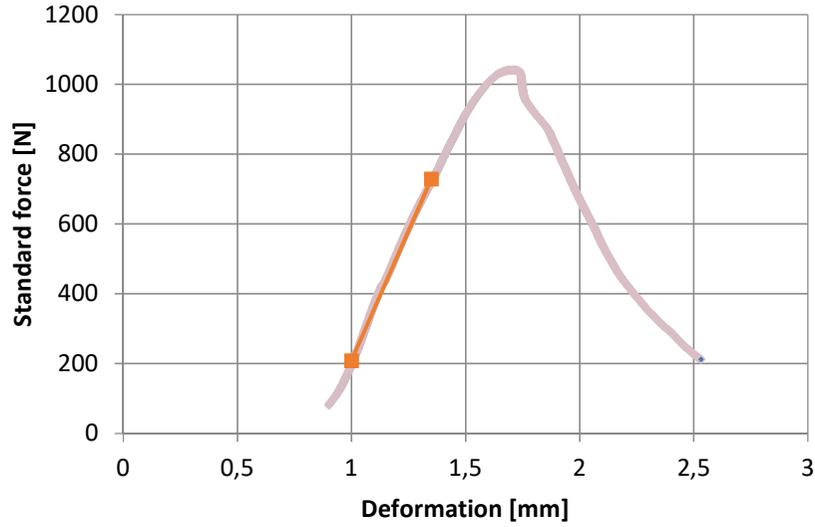
Nei grafici, mediante un segmento di colore arancione, è individuato il tratto di pendenza costante il quale è servito per la valutazione del modulo elastico (pendenza della retta).

| INTONACO                       | $E_{20-70}$ [N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------------------------|----------------------------------|
| A (TERRA+SABBIA)               | 197                              |
| B (TERRA+SABBIA+C.IDRATA 5%)   | 61                               |
| C (TERRA+SABBIA+C.IDRATA 10%)  | 112                              |
| D (TERRA+SABBIA+GRASSELLO 5%)  | 96                               |
| E (TERRA+SABBIA+GRASSELLO 10%) | 50                               |
| F (TERRA+SABBIA+C.VIVA 5%)     | 46                               |
| G (TERRA+SABBIA+C.VIVA 10%)    | 53                               |

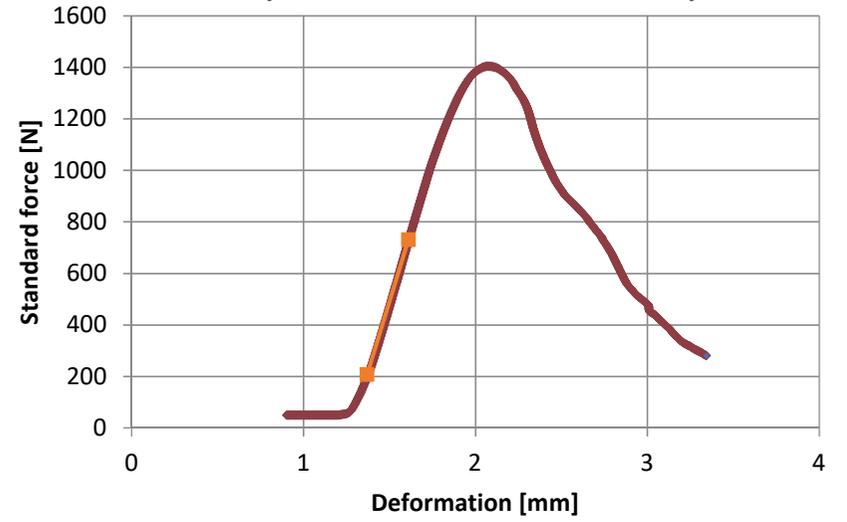
Tabella 3.10  
Modulo elastico di ogni formulazione di intonaco.



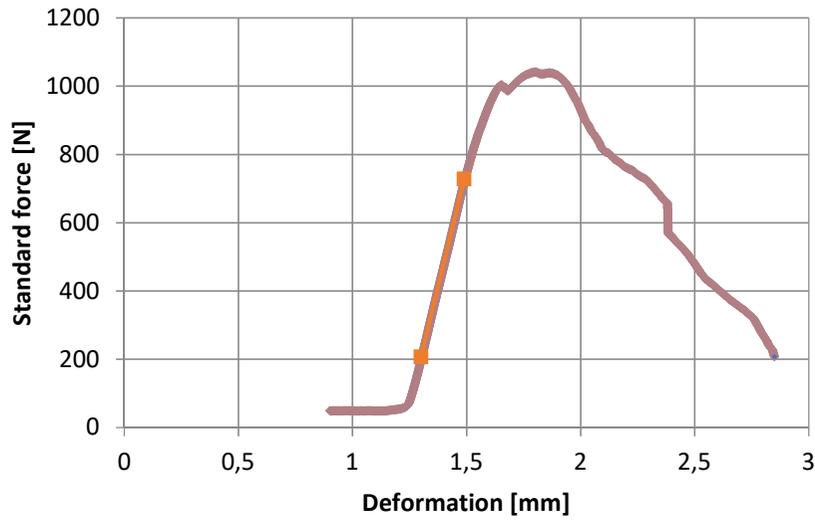
**B (Terra+Sabbia+C.Idrata 5%)**



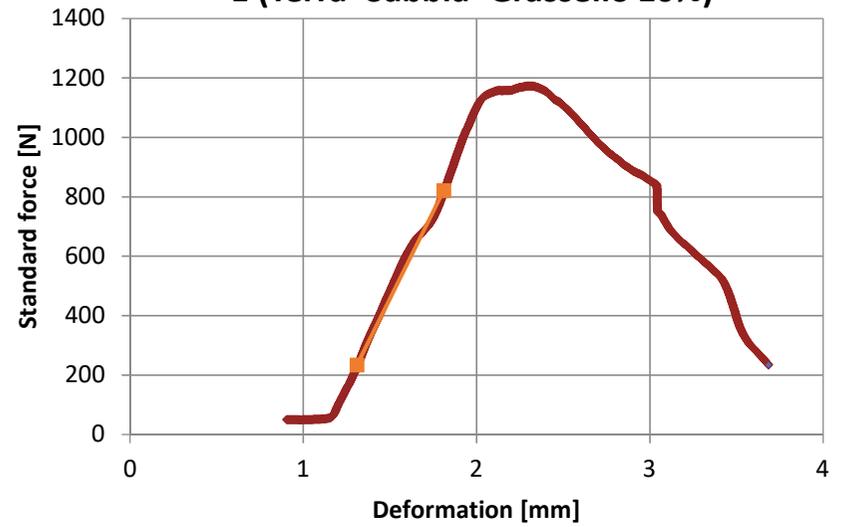
**D (Terra+Sabbia+Grassello 5%)**

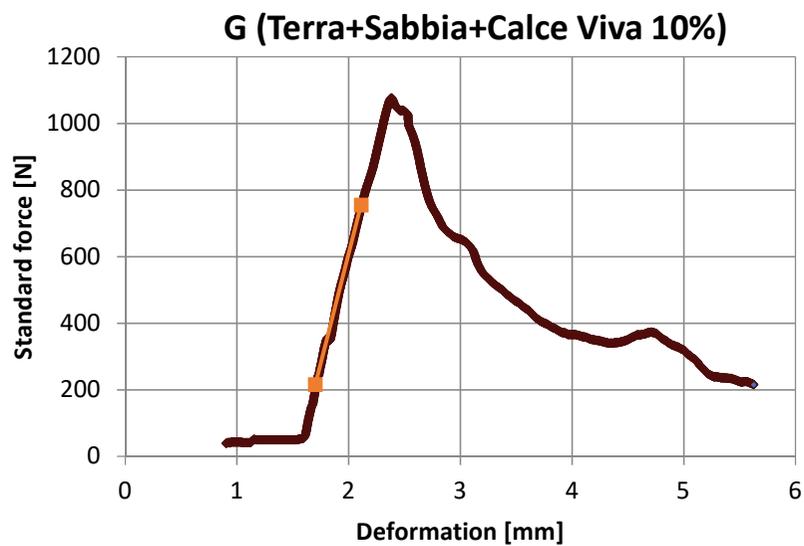
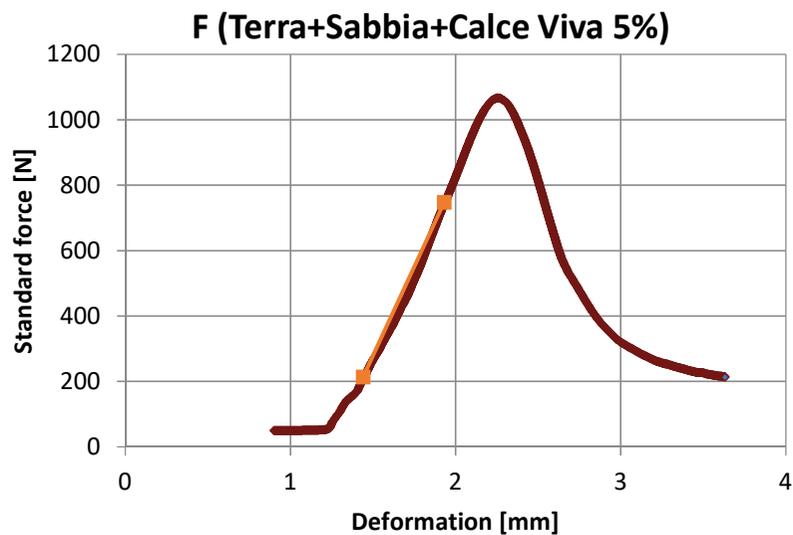


**C (Terra+Sabbia+C.Idrata 10%)**



**E (Terra+Sabbia+Grassello 10%)**





Al fine di evidenziare la comparabilità tra i risultati di resistenza a compressione e modulo di Young dell'intonaco di riferimento (A) rispetto agli intonaci stabilizzati, si riportano di seguito i diagrammi in cui è visibile tale rapporto. Un andamento analogo era già stato riscontrato per la resistenza a flessione.

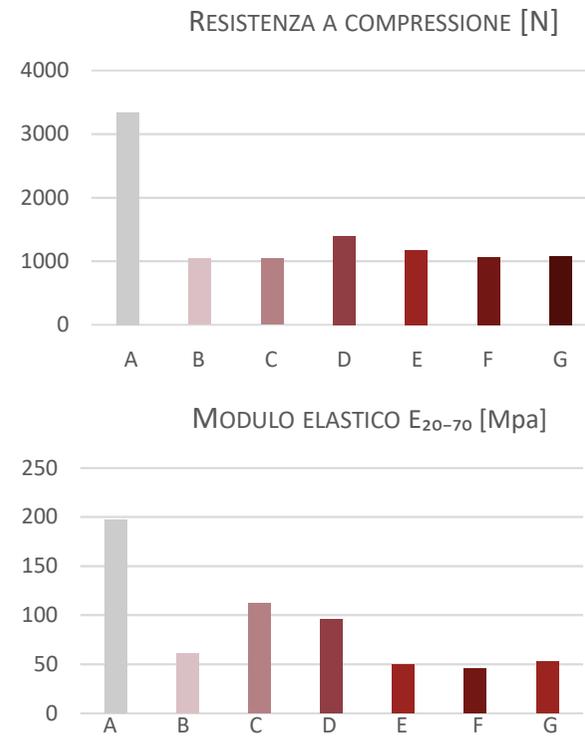


Figura 3.17  
Istogramma valori di resistenza a compressione e modulo di Young per ogni tipologia di intonaco.

In conclusione, così come previsto dalla Normativa DIN 18947<sup>41</sup> l'intonaco A rientra nella classe di resistenza SI, in quanto presenta rispettivamente valori maggiori a 1 N/mm<sup>2</sup> di resistenza a compressione e maggiori a 0,3 N/mm<sup>2</sup> di resistenza a flessione.

Inoltre, si osserva che le prove di resistenza meccanica sono state eseguite come da normativa al ventottesimo giorno di stagionatura, periodo sufficiente per la presa della calce, ma durante il quale, più lentamente, la reazione della calce con i minerali argillosi (reazione pozzolanica) è ancora in corso generando silicati e alluminati di calcio, composti idraulici simili a quello del cemento.

---

<sup>41</sup> DIN 18947:2013-08 Lehmputzmörtel - Begriffe, Anforderungen, Prüfverfahren, p.9

<sup>42</sup> F. STAZI ET AL., *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016, p.34,36

<sup>43</sup> M.I. GOMES, ET AL., Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers, Journal of Cleaner Production (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>, p.11

<sup>44</sup> S. DEMIRCI, A. DÜZGÜNEŞ, ET AL., *Compatibility assessment of exterior finish coats for insulated walls*, METU JFA 2003/1 (30:1), p.80

Tuttavia, gli intonaci stabilizzati presentano un modulo elastico inferiore al supporto in terra sul quale dovrebbero essere applicati. La maggiore elasticità consentirebbe loro, così come riportato nella bibliografia (Stazi<sup>42</sup>, Gomes<sup>43</sup>, Demirci<sup>44</sup>, Paulina<sup>45</sup>, Minke<sup>46</sup>) di assecondare le naturali deformazioni del supporto al variare delle condizioni termoigrometriche. Dall'esame della bibliografia emerge che i moduli elastici di paramenti murari in terra sono:

- muro di adobe stabilizzato con calce idraulica (E= 170 MPa)<sup>47</sup>;
- muro *pisè* (E= 201 MPa)<sup>48</sup>;
- muro *torchis* (E= 101 MPa)<sup>48</sup>.

<sup>45</sup> P. FARIA, T. SANTOS, ET AL., *Earth-based mortars for masonry plastering*, 9<sup>th</sup> International Masonry Conference 2014 in Guimarães, 2014, p.7

<sup>46</sup> G. MINKE, *Earth Construction Handbook*, The building Material Earth in Modern Architecture, WIT PRESS, Southampton 2000, p.110

<sup>47</sup> S. INVERNIZZI, M.MATTONI, *Experimental study of adobe walls with geogrid reinforced mud plaster*, in C.MILETO ET AL., *Vernacular and Earthen Architecture: Conservation and Sustainability*, Taylor & Francis Group, Londra 2018, p.765

<sup>48</sup> F. STAZI ET AL., *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016, p.34

I risultati ottenuti evidenziano dunque una maggiore duttilità degli intonaci, riducendo la probabilità di un loro distacco dal supporto al variare delle condizioni termoigrometriche.

---

## CONCLUSIONI

La terra, caratterizzata dal punto di vista della composizione mineralogica per mezzo della diffrazione a raggi X, ha consentito di identificare l'effetto degli stabilizzanti sulla frazione argillosa. Dalla lettura dei diffrattogrammi si è osservato che la stabilizzazione con Calce Idrata, Grassello di Calce e Calce Viva in percentuale del 10% ha contribuito al miglioramento dell'intonaco in quanto, i minerali a reticolo espandibile (Clorite-Vermiculite e Illite-Smectite), pericolosi per la loro espandibilità in presenza di acqua, sembrano non essere più identificabili. Diversamente, negli intonaci stabilizzati con Calce Idrata, Grassello di Calce e Calce Viva in percentuale del 5%, sembrerebbe essere stata attaccata solo la Clorite-Vermiculite.

Le prove condotte per la caratterizzazione prestazionale dei sei provini hanno mostrato il miglioramento di certe caratteristiche rispetto all'intonaco di riferimento A composto di sola terra e sabbia:

- gli stabilizzanti scelti hanno contribuito in modo positivo alla resistenza all'erosione d'acqua. In particolare, per

- quanto riguarda lo spray erosion test i risultati migliori si sono ottenuti dagli intonaci C (C.Idrata 10%), E (Grassello 10%), F (C.Viva 5%) e G (C.Viva 10%) i quali sono stati soggetti a erosione che non supera 0,5 mm;
- le prove di assorbimento d'acqua mostrano anche in questo caso che l'intonaco E seguito da F e B hanno subito una riduzione dell'assorbimento d'acqua rispetto ad A;
  - per la prova di adesione al supporto, valori maggiori rispetto ad A sono stati raggiunti solamente dalla miscela B a base di terra, sabbia e calce idrata 5%. È stato constatato che la prova di adesione al supporto - con le dimensioni dei provini utilizzati (50x40 mm) - sarebbe stata più precisa e veritiera qualora fossero stati testati cinque provini in luogo dei tre utilizzati, ciascuno per ogni formulazione, in modo da escludere gli estremi ed ottenere un margine minore di errore;

- la prova di coesione superficiale, stabilita con il drilling test, ha stabilito un incremento della resistenza maggiore del 20% rispetto ad A degli intonaci E, F e B;
- tutti gli stabilizzanti utilizzati in questa sperimentazione hanno apportato uno schiarimento del colore superficiale degli intonaci. Ciò è significativo dal punto di vista estetico in quanto consente la riconoscibilità dell'intervento;
- dal punto di vista meccanico tutti gli intonaci sperimentati risultano essere compatibili con il tipo di supporto.

Alla luce dei risultati emersi dall'attività sperimentale svolta si può ipotizzare che per gli intonaci che non hanno mostrato miglioramenti, rispetto all'intonaco di riferimento, ciò si possa attribuire al quantitativo di stabilizzante che parrebbe non essere sufficiente.

Inoltre, per ottimizzare maggiormente i risultati ottenuti si potrebbe approfondire la ricerca sul quantitativo d'acqua ottimale da utilizzare per le diverse miscele in modo da

prevenire la formazione di fessure e il ritiro in fase di asciugatura.

---

**ALLEGATI**

## ALLEGATO A - SCHEDA TECNICA CALCE IDRATA



### DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE

N. 137-CPR-16-10

1. Codice di identificazione del prodotto-tipo: **Calce Idrata CL90-S**
2. Usi previsti: **Calce da costruzione utilizzata come legante per malte, altri prodotti da costruzione, e per applicazioni in ingegneria civile**
3. Fabbricante: **FASSA S.r.l. – Via Lazzaris, 3 – 31027 Spresiano (TV) – ITALY – www.fassabortolo.it**
4. Mandatario: Non applicabile
5. Sistemi di Valutazione e Verifica della Costanza di Prestazione (VVCP): **2+**
6. Norma armonizzata: **EN 459-1:2010**

Organismi notificati: **ICMQ (n.1305)**

7. Prestazioni dichiarate:

| Costituenti  | CaO + MgO: ≥ 90 % | Granulometria<br>(Residuo in massa) | Pass           |
|--------------|-------------------|-------------------------------------|----------------|
|              |                   |                                     |                |
| Calce libera | ≥ 80 %            | Penetrazione                        | > 10 e < 50 mm |
| Stabilità    | Passa             | Durabilità                          | NPD            |
|              |                   | Sostanze pericolose                 | Vedi SDS       |

8. Non applicabile

La prestazione del prodotto sopra identificato è conforme all'insieme delle prestazioni dichiarate. La presente dichiarazione di responsabilità viene emessa, in conformità al regolamento (UE) n.305/2011, sotto la sola responsabilità del fabbricante sopra identificato.

Firmato a nome e per conto del fabbricante da:

**Dott. Samuele Beraldo**

Direzione Ricerca Sviluppo e Sistema Qualità – Responsabile Area Prodotti Inorganici

Spresiano (TV), 03/10/2016

FASSA S.r.l.  
Via Lazzaris, n° 3  
31027 SPRESIANO (TV)  
Partita IVA: 03016020268

## ALLEGATO B - SCHEDA TECNICA CALCE VIVA



### DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE

N. 126-CPR-16-10

1. Codice di identificazione del prodotto-tipo: **Calce Ossido CL-90-Q (R5 - Psv)**
2. Usi previsti: **Calce da costruzione utilizzata come legante per malte, altri prodotti da costruzione, e per applicazioni in ingegneria civile**
3. Fabbricante: **FASSA S.r.l. – Via Lazzaris, 3 – 31027 Spresiano (TV) – ITALY – www.fassabortolo.it**
4. Mandatario: Non applicabile
5. Sistemi di Valutazione e Verifica della Costanza di Prestazione (VVCP): **2+**
6. Norma armonizzata: **EN 459-1:2010**

Organismi notificati: **ICMQ (n.1305)**

7. Prestazioni dichiarate:

| Costituenti  | CaO + MgO: ≥ 90 % | Granulometria<br>(Residuo in massa) | Psv      |
|--------------|-------------------|-------------------------------------|----------|
|              |                   |                                     |          |
| Calce libera | ≥ 80 %            | Penetrazione                        | NPD      |
| Stabilità    | Passa             | Durabilità                          | NPD      |
|              |                   | Sostanze pericolose                 | Vedi SDS |

8. Non applicabile

La prestazione del prodotto sopra identificato è conforme all'insieme delle prestazioni dichiarate. La presente dichiarazione di responsabilità viene emessa, in conformità al regolamento (UE) n.305/2011, sotto la sola responsabilità del fabbricante sopra identificato.

Firmato a nome e per conto del fabbricante da:

**Dott. Samuele Beraldo**

Direzione Ricerca Sviluppo e Sistema Qualità – Responsabile Area Prodotti Inorganici

Spresiano (TV), 03/10/2016

FASSA S.r.l.  
Via Lazzaris, n° 3  
31027 SPRESIANO (TV)  
Partita IVA: 03016020268

## ALLEGATO C - SCHEDA TECNICA GRASSELLO DI CALCE



### GRASSELLO DI CALCE

Pasta di calce idrata



Sacco



Spatola metallica



#### Composizione

GRASSELLO DI CALCE è una pasta di calce idrata ottenuta per spegnimento con acqua della calce viva.

#### Fornitura

- Sfuso in contenitori da ca. 1 t
- Sacchi da ca. 20 e da 33 kg

#### Impiego

GRASSELLO DI CALCE è principalmente impiegato come rasante sulla "Malta Fina" quando si vogliono ottenere particolari finiture, come stucchi, "marmorini", decorazioni lisce in genere, ecc. Viene anche utilizzato come legante per preparare malte tradizionali.

#### Preparazione del fondo

GRASSELLO DI CALCE viene applicato sulla "Malta Fina" ancora umida, avendo cura di eliminare preventivamente eventuali imperfezioni superficiali. Normalmente il tempo di attesa per l'applicazione di GRASSELLO DI CALCE varia tra le 4 e le 24 ore dalla stesura della "Malta Fina", a seconda delle condizioni ambientali.

#### Lavorazione

GRASSELLO DI CALCE utilizzato come rasante sulla "Malta Fina" fresca si stende con la spatola metallica, fino ad ottenere uno strato liscio. Successivi passaggi con il materiale permettono di ottenere una superficie con un grado di lucentezza crescente.

Lo spessore massimo di applicazione è di 1 mm.

Se utilizzato come legante per il confezionamento di malte tradizionali, GRASSELLO DI CALCE va miscelato con sabbia e cemento in betoniera aggiungendo acqua fino ad ottenere un impasto della consistenza desiderata.

#### Avvertenze

- GRASSELLO DI CALCE fresco va protetto dal gelo.
- Evitare l'applicazione a temperature inferiori ai +5°C.
- È sconsigliata l'applicazione su "Malta Fina" già indurita ed asciutta, in quanto si possono manifestare screpolature con conseguente scarsa adesione al sottofondo.

#### Conservazione

Se protetto dal gelo non ha limiti di durata.

#### Qualità

GRASSELLO DI CALCE è sottoposto ad accurato e costante controllo presso i nostri laboratori. Le materie prime impiegate vengono rigorosamente selezionate e controllate.

Fassa S.r.l. - Via Lazzaris, 3 - 31027 Spresiano (TV) - [www.fassabortolo.com](http://www.fassabortolo.com)



GRASSELLO DI CALCE - 03/2016



#### Dati Tecnici

|                                       |                             |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Peso Specifico                        | ca. 1.300 kg/m <sup>3</sup> |
| Granulometria                         | min. 98% inferiore a 0,1 mm |
| Contenuto in CaCO <sub>3</sub>        | max 4%                      |
| Conforme alla Norma UNI EN 459-1:2001 |                             |

I dati riportati si riferiscono a prove di laboratorio; nelle applicazioni pratiche di cantiere questi possono essere sensibilmente modificati a seconda delle condizioni di messa in opera. L'utilizzatore deve comunque verificare l'adeguatezza del prodotto all'impiego previsto, assumendosi ogni responsabilità derivante dall'uso. La ditta Fassa si riserva di apportare modifiche tecniche, senza alcun preavviso.

Fassa S.r.l. - Via Lazzaris, 3 - 31027 Spresiano (TV) - [www.fassabortolo.com](http://www.fassabortolo.com)



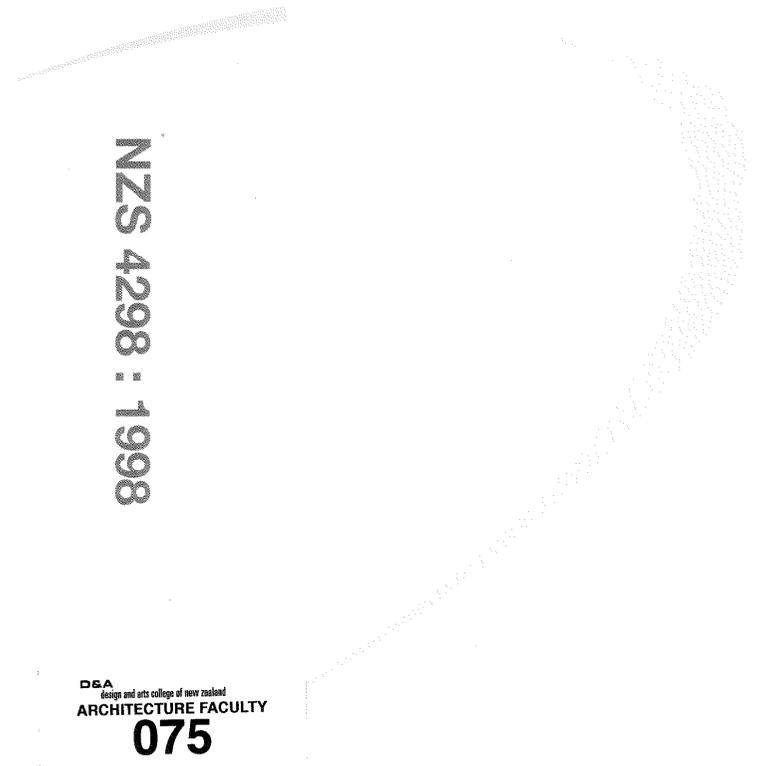
GRASSELLO DI CALCE - 03/2016

**ALLEGATO D – NORMATIVA NEOZELANDESE 4298:1998**  
PER PROVE DI RESISTENZA ALL'EROSIONE DELL'ACQUA -SPRAY  
EROSION TEST E GEELONG TEST

NZS 4298 : 1998



New Zealand Standard  
**Materials and Workmanship  
For Earth Buildings**



**NZS 4298 : 1998**

**DSA**  
Design and arts college of new zealand  
**ARCHITECTURE FACULTY**  
**075**

**APPENDIX D  
EROSION TEST (PRESSURE SPRAY METHOD)**  
(Normative)

**D1 GENERAL**

The test consists of spraying the face of a prepared sample of the soil for a period of 1 hour or until the specimen is penetrated.

**CD1**

*The test is an empirical one developed by the former National Building Technology Centre now CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – Australia).*

**D2 PROCEDURE**

**D2.1**

The components of the equipment are shown in figure D1.

**D2.2**

The specimen shall be cured a minimum of 28 days before testing.

The exposed section of the specimen is subjected to the standard spray for 1 hour or until the specimen is eroded through. The test is interrupted at 15-minute intervals and the depth of erosion recorded.

**D3 RESULTS**

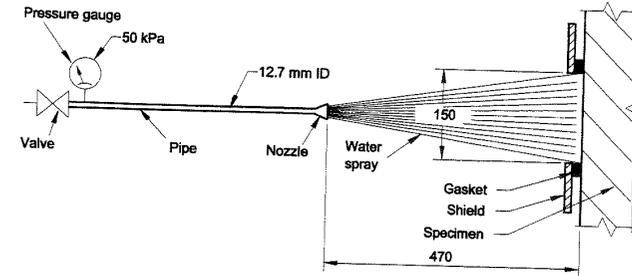
The maximum depth of erosion of the deepest pit in one hour is measured in millimetres with a 10 mm diameter flat-ended rod. When the spray bores a hole right through the specimen in less than one hour the rate of erosion is obtained by dividing the thickness of the specimen by the time taken for full penetration to occur. The erodibility index shall be determined by reference to table D1 below.

**Table D1 – Erodibility indices from pressure spray erosion test**

| Property  | Criteria          | Erodibility index |
|---|-------------------|-------------------|
| Depth of erosion <i>D</i> (mm/hr)   | $0 \leq D < 20$   | 1                 |
|   | $20 \leq D < 50$  | 2                 |
|   | $50 \leq D < 90$  | 3                 |
|   | $90 \leq D < 120$ | 4                 |
|   | $D \leq 120$      | 5 (Fail)          |
| Depth of penetration (break sample immediately after completion of above tests) if sample thicker than 120 mm | $< 120$           | Pass              |
|   | $\geq 120$        | Fail              |

**D4 PENETRATION OF MOISTURE**

After completion of the spray test, penetration of moisture is measured by breaking the specimen across the point where erosion is deepest and inspecting the break surface if the sample is more than 120 mm thick.



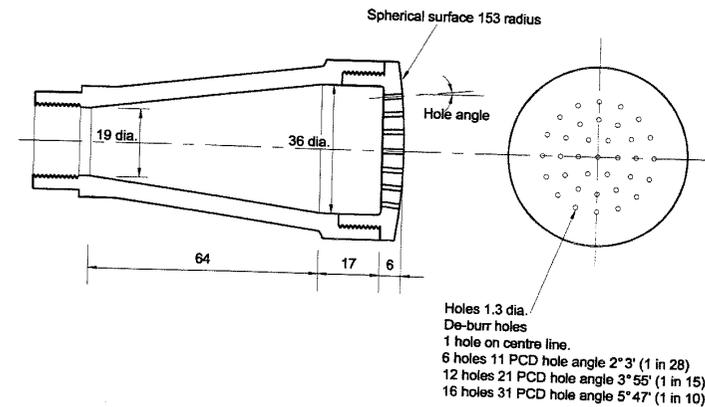
**Figure D1 – Pressure spray test general arrangement**

**D5 CYCLIC WET/DRY APPRAISAL TEST**

The cyclic wet and dry appraisal test as specified in Appendix C is required to eliminate reactive and dispersive soils.

**D6 SURFACE COATINGS**

The sample shall be tested without any surface coating. (See clauses L5.2, L5.3, L5.4 and L5.6).



**Figure D2 – Pressure spray test nozzle**

**APPENDIX E  
EROSION TEST  
(Geelong method)**  
(Normative)

**E1 GENERAL**

**E1.1**

For rammed earth testing, "bricks" 300 mm square by 125 mm thick shall be made by ramming earth on edge in a mould with these internal dimensions.

**E1.2**

Poured earth samples can be made by casting "bricks" in a similar sized mould.

The person making the test shall determine which face to test. However, it is generally accepted that the "off-form" side of the face of the wall/sample facing toward the weather is to be tested.

**E1.3**

Samples may be cut from existing walls of any dimension and tested with the drip onto an uncut wall face.

**E1.4**

The specimen shall be cured a minimum of 28 days before testing.

**E1.5**

This test must be carried out in a location sheltered from wind and direct sun.

**CE1**

*Other convenient mould or rammed earth "brick" sizes may be used if desired.*

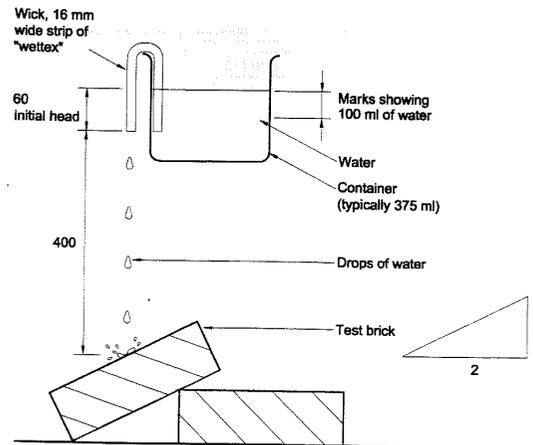


Figure E1 – Geelong method erosion test details

**E2 SAMPLE BRICKS**

For adobe or pressed bricks, randomly selected bricks shall be used.

**E3 MEASUREMENT OF PIT DEPTH**

**E3.1**

The pit depth is to be measured with a cylindrical probe with an end diameter of 3.15 mm.

The method is as follows:

**E3.2**

Allow 100 ml of water to drop 400 mm on to sloped face of test brick.

**E3.3**

Time taken for 100 ml to drip from container to be 20 minutes minimum to 60 minutes maximum.

**CE3**

*The pit depth probe may be made from a 3.15 mm diameter ungalvanized nail filed to a square end.*

**E4 CYCLIC WET/DRY APPRAISAL TEST**

The cyclic wet/dry appraisal test as specified in Appendix C is required to eliminate reactive and dispersive soils.

**E5 SURFACE COATINGS**

The sample shall be tested without any surface coating. (See clauses L5.2, L5.3, L5.4 and L6).

**E6 MOISTURE PENETRATION**

**E6.1**

Immediately after completion of the drip test, penetration of moisture is measured by breaking the specimen across the point where erosion is deepest and inspecting the break surface if the brick is thicker than 120 mm.

**E6.2**

Dry the sample after testing and check for the conditions noted in Appendix C3.4. The appearance of these conditions is grounds for rejection of the material.

**E7 Results**

The erodibility index shall be determined by reference to table E1 below. An erodibility index of 1 shall be determined only by use of the pressure spray erosion test given in Appendix D.

Table E1 – Erodibility indices from Geelong method erosion test

| Property            | Criteria  | Erodibility index  |
|---------------------|---|--|
| Pit depth, $D$ (mm) | $0 < D < 5$   | 2  |
|                     | $5 \leq D < 10$   | 3  |
|                     | $10 \leq D < 15$  | 4  |
|                     | $D \geq 15$   | 5 (fail)   |
|                     | Depth of penetration (break sample immediately after completion of above tests) if sample thicker than 120 mm | $< 120$ mm<br>$\geq 120$ mm<br>(measured from face of brick) |

**CE8 Acknowledgement**

*This test was developed by Peter Yttrup and students at Deakin University, Geelong, Victoria, Australia.*



C. AUGARDE, P. JAQUIN, *Earth Building, History, science, and conservation*, HIS BRE Press, Bracknell 2012, p.44

A. CAMOES, R. EIRES, S. JALALI, *Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil*, Journal of Cleaner Production, n° 142, 2017

F.U. CONTRERAS, L.F.GUERRERO BACA, *The use of lime in the conservation of earth construction*, in Fourth International Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest, New Mexico 2007

A. DEMERCI, A. DÜZGÜNEŞ, ET AL., *Compatibility assessment of exterior finish coats for insulated walls*, METU JFA 2003/1 (30:1)

P. DOAT, A. HAYS, H. HOUBEN, *Building with earth*, The Mud Village Society, New Delhi 1991

O.B. FARIA, C. NEVES, *Técnicas de construcción con tierra*, FEB UNESP/PROTERRA, Bauru 2011

P. FARIA, T. SANTOS, ET AL., *Earth-based mortars for masonry plastering*, 9<sup>th</sup> International Masonry Conference 2014 in Guimarães, 2014

M.I. GOMES, ET AL., *Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers*, Journal of Cleaner Production (2017), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>

L.F. GUERRERO BACA, R.S.R. GUTIÉRREZ, F.J.S. LOPEZ, *Constructive advantages of use of compressed earth stabilized with lime in Mexico*, Palapa Revista de Investigación Científica en Arquitectura, v.V, n.1 [10], 2011

H. HAMARD, J.C. MOREL, F. SALGADO, *A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture*, WIT Press, vol 118, 2011

H. HOUBEN, H. GUILLAUD, *Traité de construction en terre*, L'Encyclopedie de la construction en terre, vol 1, Editions Parenthèses, Marseille 1989

M. MATTONE, *Stabilization of earthen plasters: Exchange of knowledge and experiences between Italy and Morocco*, JMES, 2016

M. MATTONE, R. MATTONE, C. ROBBONI, *Il paesaggio delle case in terra cruda*, L'artistica Editrice, Savigliano 2010

G. MINKE, *Earth Construction Handbook*, The building Material Earth in Modern Architecture, WIT PRESS, Southampton 2000

G. MINKE, *Building with earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*, BIRKHÄUSER, 2006

A.NACCI, E.PASQUALINI, F. STAZI et.al., *An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments*, Journal of Cultural Heritage n.17, 2016

B.NARICI, G. SCUDO, C. TALAMO, *Costruire con la terra. Tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*, Sistemi editoriali, 2011

NZS 4298, *Materials and Workmanship For Earth Buildings*, 1998

G. W. PALESTRA, *Intonaco: una superficie di sacrificio*, ETASLIBRI, Milano, 1995

C. A. REYNERI, *Intonaci in bioedilizia*, EdicomEdizioni, Monfalcone 2003

O. RUSKULIS, *Mud plasters and renders*, Technical Brief by Practical Action, Technology challenging poverty, Appropriate Technology Journal, 2009

S. SABBADINI, *Intonaci e finiture in terra*, in *Scritti sulla terra*, il Prato casa editrice, n. 4/10 Didattica & Ricerca, Saonara 2010

UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005 Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 7: Prova di compressione non confinata su terreni a grana fine

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

UNI EN 15803, *Conservazione dei beni culturali - Metodi di prova  
- Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua (dp),  
2009*

UNI EN 15886:2010 *Conservazione dei Beni Culturali - Metodi di  
prova - Misura del colore delle superfici*

J. WARREN, *Conservation of Earth Structures*, Butterworth  
Heinemann, Oxford 1999

*Diffrattometro a raggi X modello X'Pert PRO della PANalytical,*  
in [www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Difrattometro\\_RX.html](http://www.icvbc.cnr.it/Strumentazione/Difrattometro_RX.html),  
consultato il 29/10/2018

## **SITOGRAFIA**

C. CARDUCCI, *Cause di degrado*, in  
<http://www.studiotorresi.it/sito/it/testi-pubblicazioni.html>,  
consultato il 02/07/2018

## **RINGRAZIAMENTI**

In conclusione di questo quinquennio universitario in cui ho avuto modo di conoscere e apprezzare le qualità di persone, quali docenti e compagni di corso, che hanno contribuito in modo determinante al raggiungimento di questo ambito traguardo, ci tengo ad esprimere la mia gratitudine e ringraziamento.

In particolare alla mia relatrice Professoressa Manuela Mattone, la quale ha saputo coinvolgermi e trasmettermi il suo entusiasmo indirizzandomi nel mondo della ricerca, per me nuovo. Fondamentale la sua eccezionale disponibilità e gentilezza nei miei confronti.

Ai miei cordiali correlatori nelle persone dei Prof. Invernizzi Stefano, Dott.ssa Rescic Silvia, Dott.Fratini Fabio e Dott.ssa Restuccia Luciana, vanno i miei sinceri ringraziamenti per aver contribuito con la loro professionalità specifica alla stesura della mia tesi.