UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

ELABORAZIONE DI PROVE DI ANALISI DI IMMAGINE EFFETTUATE SU NUOVI TIPI DI MATTONI DA COSTRUZIONE

PROCESSING OF IMAGE ANALYSIS TESTS CARRIED OUT ON NEW TYPES OF BUILDING BRICKS

Relatore:

Prof. **Marco Rossi**

Tesi di Laurea di:

Marco Alfonso

Correlatore:

Prof. **Gianluca Chiappini**

A.A. **2019** / **2020**

Alla mia famiglia…

Sommario

INTRODUZIONE..... 6

1. LA TERRA CRUDA..... 8

1.2 GENERALITÀ E PROCESSO PRODUTTIVO DEI MANUFATTI IN TERRA CRUDA.....10

1.2.1. Caratteristiche delle costruzioni in terra cruda.....11

1.3. TIPOLOGIE COSTRUTTIVE.....14

2.MATERIALI E PREPARAZIONE DEI CAMPIONI.....18

2.1 IL BLOCCO IN TERRA CRUDA.....19

3.DIGITAL IMAGE CORRELATION.....21

3.1 SET UP DELLA DIGITAL IMAGE CORRELATION.....23

4. TEST SUI MATTONI.....27

4.1. TEST PRELIMINARI.....27

4.2 TEST EFFETTUATI SUL MURO.....28

4.3. RISULTATI TEST PRELIMINARI.....29

4.3.1 Test di compressione assiale.....32

5. ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI MEDIANTE MATLAB.....36

5.1 LEGGE DI HOOKE E MODULO DI ELASTICITÀ.....39

5.2 MODULO DI YOUNG NELL'ANALISI DELLE IMMAGINI.....42

6. RISULTATI SPERIMENTALI.....45

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....48

INTRODUZIONE

Nel presente lavoro di tesi viene affrontato lo studio relativo a nuove tipologie di mattoni per murature realizzati in terra compressa.

Lo scopo dello studio è di valutare la resistenza, la rigidezza, il coefficiente di Poisson, il modulo di Young, gli spostamenti e le deformazioni che caratterizzano questi blocchi attraverso prove di compressione assiale, taglio e taglio con precompressione.

Nello specifico verrà analizzato il cambiamento del modulo di Young rispettivamente nei mattoni e nel collante.

Le diverse prove verranno fatte prima sui singoli blocchi in terra cruda e poi su pannelli murari formati da molteplici blocchi inseriti all'interno di un telaio.

Il lavoro che verrà fatto può essere raggruppato essenzialmente in 4 fasi distinte:

- Preparazione dei pannelli murari e montaggio del set up di prova
- Acquisizione del materiale fotografico durante le diverse prove
- Analisi delle immagini mediante il software Matlab
- Scrittura dei codici in MatLab per la caratterizzazione del materiale.

Per fare questo lavoro ci si è avvalsi della Digital Image Correlation (DIC), una nuova tecnologia che ha consentito di analizzare le immagini nelle

diverse prove in modo da poterle rielaborare utilizzando appositi codici MatLab.

Per poter usare la DIC tutti i blocchi e, di conseguenza i muri, sono stati verniciati in modo da creare un pattern a macchioline bianche e nere detto ''speckle''.

In seguito sarà spiegato il funzionamento della Digital Image Correlation e il set up di prova utilizzato.

Tramite questa tecnologia e l'utilizzo del software di MatLab si ottengono delle mappe a colori indicanti gli spostamenti e le deformazioni subite dai singoli blocchi in terra compressa.

In questo modo è possibile ricavare i diagrammi σ-ε per le prove di compressione assiale ed i diagrammi τ-γ per le prove di taglio e taglio con precompressione. Ci si soffermerà sui diagrammi σ-ε inerenti alla compressione assiale per poter ricavare i valori puntuali del modulo di Young e il suo conseguente andamento nel corso delle prove. L'obbiettivo ultimo sarà quello di riuscire a caratterizzare il materiale utilizzato.

1. LA TERRA CRUDA

Secondo il rapporto stilato dalla Global Alliance for Building and Construction (insieme di governi nazionali e locali, imprese e associazioni che hanno lo scopo di lavorare per il raggiungimento di un settore edilizio a emissioni zero, efficiente e resiliente) ad oggi il settore dell'edilizia risulta essere uno dei più dannosi per la salute dell'ambiente. Il 39% delle emissioni di anidride carbonica è dovuto alle costruzioni e al reperimento dei materiali nel settore edilizio.

Si stima altresì che il settore edile sia responsabile del:

- 39% della quantità di anidride carbonica mondiale dispersa nell'aria;
- 36% del consumo globale di energia elettrica;
- 50% per l'estrazione di materie prime;
- 1/3 del consumo globale di acqua potabile.

Alla luce di dati così allarmanti bisogna cambiare rotta.

Uno dei metodi sviluppati per limitare tali effetti negativi è la cosiddetta edilizia circolare. L'obiettivo dell'edilizia circolare è di abbracciare un modello che consuma le risorse naturali in modo più attento ed etico minimizzando la produzione dei rifiuti e reinserendoli nel ciclo produttivo. Quindi con l'edilizia circolare si pone l'obbiettivo di dar vita a manufatti di qualità, caratterizzati da un eccellente rapporto qualità/prezzo e continuamente recuperabili.

La terra cruda, il più antico e diffuso materiale da costruzione utilizzato dall'uomo, risulta essere una valida alternativa su cui puntare con fermezza.

La costruzione in terra cruda è diffusa in tutto il mondo, in regioni diverse tra loro per clima e morfologia. In Asia, lunghi tratti della Grande Muraglia cinese, iniziata nel III secolo a.C., sono in terra cruda (Fig.1.1), in Spagna, a Granada, Halambra, gran parte dell'Alcazaba è realizzata in pisè con torri alte anche 15 m risalenti al XIII secolo (Fig. 1.2).

Figura 1.1. Tratto della Muraglia Cinese in terra cruda

Figura 1.2. Granada (Spagna), Alhambra, 2005.

1.2 Generalità e processo produttivo dei manufatti in terra cruda

La terra utilizzata nelle costruzioni viene estratta dai 20-30 cm di profondità in poi, in modo da evitare lo strato superficiale composto principalmente di materiale organico che può facilmente putrefare e che presenta scarse prestazioni meccaniche. Viene usata una terra composta da argilla, limo e sabbia come componenti principali a cui viene aggiunta acqua in proporzione variabile.

L'argilla è composta da granuli la cui grandezza risulta essere inferiore ai 0.002mm.

Il limo rappresenta la fase fine del prodotto di disgregazione delle rocce, è un materiale dalla buona capacità compattiva poiché le dimensioni delle particelle che lo compongono (si va dai 2 ai 200 µm) sono abbastanza piccole da permettere di riempire pori di media dimensione.

La sabbia è un materiale più grossolano rispetto all'argilla; le dimensioni delle particelle sono comprese tra 0,2 e 2 mm. È preferibile la sabbia di fiume a quella di mare perché quest'ultima può contenere sali solubili da evitare nelle costruzioni.

La ghiaia infine, è un materiale grossolano che presenta granuli di dimensione maggiore di 2 mm. Il materiale grossolano deve essere presente solo in minima parte nella terra cruda usata in costruzione.

Si può migliorare la qualità della terra aggiungendo nell'impasto fibre vegetali (paglia con funzione di rinforzo), calce e sabbia (per incrementare stabilità e resistenza), altri materiali naturali (caucciù, caseina, gomma arabica, olio di cocco o additivi per raggiungere un grado di impermeabilità maggiore). Si può anche ricorrere alla compattazione manuale o meccanica in modo da ridurre la porosità.

Inoltre, si possono adottare varie modalità costruttive cosicché i manufatti ottenuti risultino avere caratteristiche migliori rispetto alle costruzioni in cotto o in cemento armato.

1.2.1. Caratteristiche delle costruzioni in terra cruda

In questo capitolo saranno elencati i vantaggi e gli svantaggi delle costruzioni in terra cruda.

Vantaggi

La terra può essere considerata il più economico e diffuso materiale da costruzione. Il vantaggio principale è la reperibilità in loco e la relativa estrazione, la quale non comporta un importante dispendio economico o l'utilizzo di costose apparecchiature tecnologiche; difatti per effettuare l'estrazione del materiale è necessaria solamente una semplice manovalanza (addirittura si può parlare di autocostruzione). Il consumo energetico legato all'attività di estrazione e alla lavorabilità è pressocchè minimo. La terra è il tipico esempio di materiale 100% ecocompatibile in quanto essa può essere interamente recuperata, reimpastata e rilavorata per essere utilizzata all'infinito.

La terra cruda inoltre è igriscopica ovvero in grado di assorbire l'umidità in eccesso e di restituirla quando l'aria è troppo secca.

La terra riesce anche a lavorare sull'inerzia termica in modo da assorbire calore e rilasciarlo nel tempo, per questo troviamo numerose opere in terra cruda nelle zone del Medio Oriente in cui si registrano importanti escursioni termiche tra giorno e notte. Tra le più importanti opere troviamo le famose torri del vento di Dubai (Fig. 1.3).

Un altro vantaggio della terra cruda è quello di migliorare le capacità fonoassorbenti delle pareti in cui si trova. Ha una resistenza al fuoco maggiore rispetto a un muro in calcestruzzo (rientra nella classe di infiammabilità A1) e presenta un'ottima resistenza ai sismi dovuta alla sua buona deformabilità.

Figura 1.3 Torri del vento, Madinat Jumeirah Hotel, Dubai, Emirati Arabi Uniti, Medio Oriente

Svantaggi

In Italia il sistema normativo non permette di utilizzare la terra cruda con funzione portante, contrariamente a quanto accade ad esempio negli Stati Uniti, nei Paesi Bassi e altre nazioni.

La terra cruda presenta una resistenza a compressione che si aggira attorno ai 2-5 MPa e per la flessione intorno ai 0.5-1MPa, valori sensibilmente inferiori rispetto a quelli ottenibili con cemento. Da qui si evince che le prestazioni meccaniche e la resistenza della terra cruda sono al di sotto di quelle che gli altri materiali da costruzione sono in grado di fornire. Per questo non si tende a costruire edifici in terra cruda composti da numerosi piani.

I mattoni in terra cruda dopo la loro formazione vengono lasciati essiccare all'aria aperta. In fase di asciugatura l'inconveniente più dannoso che si potrebbe riscontrare è la fessurazione dovuta al ritiro del materiale, questo accade soprattutto nelle terre in cui la percentuale di argilla è particolarmente elevata. Per evitare ciò si possono aggiungere all'impasto matrici sabbiose che riducono la percentuale di argilla complessiva.

Nelle costruzioni in terra deve essere considerato con attenzione il problema del dilavamento delle piogge, la conseguente erosione del materiale può essere contrastata dall' utilizzo del rivestimento in intonaco o in alternativa si possono utilizzare elementi artificiali come il cemento, la calce, il bitume, il silicato di sodio, delle resine sintetiche, le paraffine e lattice sintetico.

1.3. Tipologie costruttive

In base alla tipologia di materia prima reperibile in loco si sono sviluppate nel corso degli anni diverse tecniche di costruzione di seguito elencate:

- **Pisè o terra battuta.**

L'impasto della terra viene formato con poca acqua e successivamente viene inserito all'interno di casseformi mobili in legno larghe quanto lo spessore del muro. La terra viene battuta in modo da compattarsi e successivamente viene lasciata essiccare (Fig. 1.4).

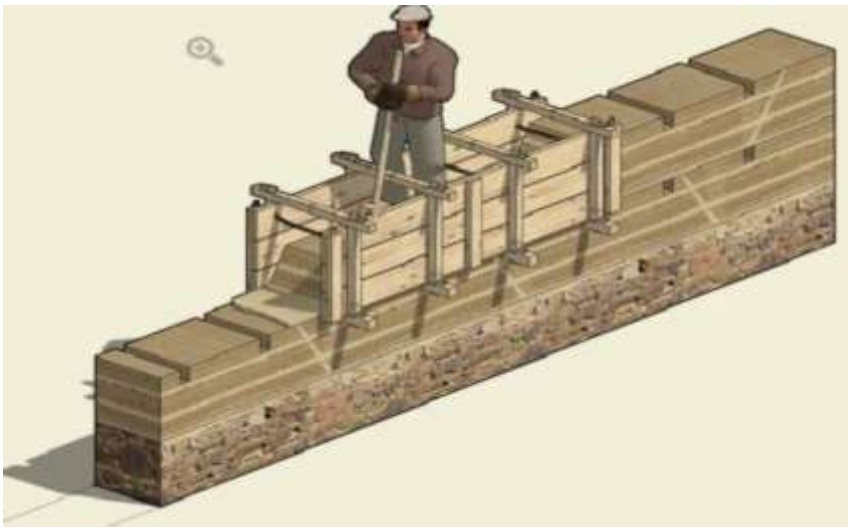


Figura 1.4 costruzione di un muro in terra cruda con la tecnica del pisè.

- **Adobe o mattone crudo.**

Con questa tecnica il mattone viene lavorato a mano con o senza stampo e lasciato essiccare a sole.

Punti di forza: flessibilità nella produzione e facilità di utilizzo. (Fig.1.5)

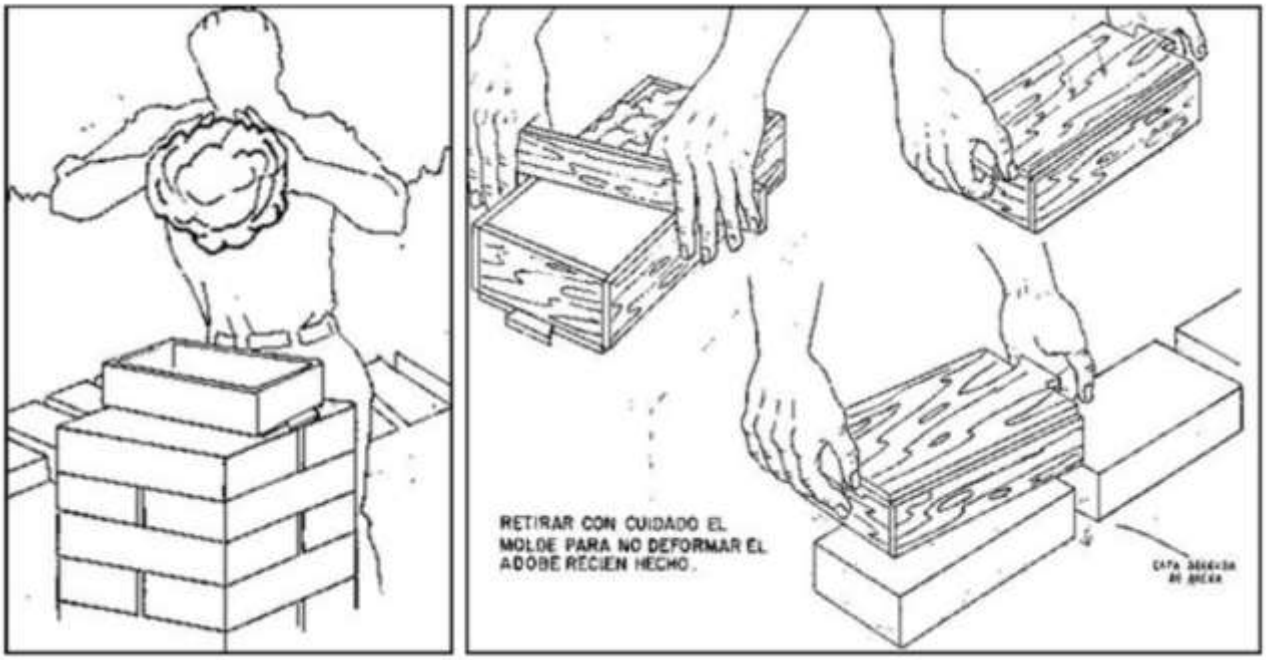


Figura 1.5 la tecnica per realizzare l'adobe

- **Bauge o cob**

Alla terra vengono aggiunti della paglia o altri leganti naturali per poi essere impastati e pressati in filari regolari senza alcun tipo di stampo. Viene modellata e lavorata a piacimento. (Fig. 1.6)

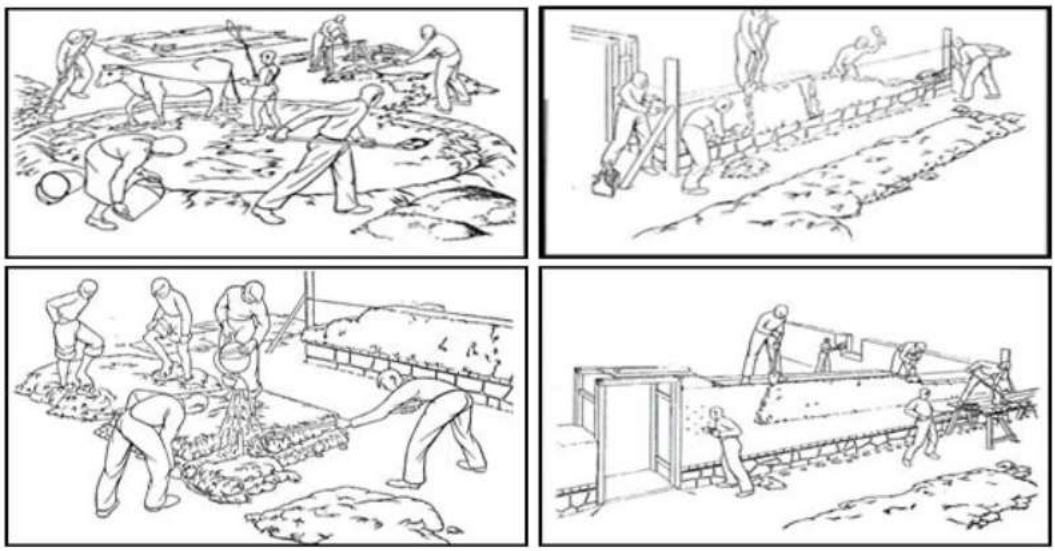


Figura 1.6 costruzione muro in bauge

- **Torchis**

Con questa tecnica occorre un telaio in legno da fissare alla struttura portante e della paglia da aggiungere alla terra dopo averla messa a bagno e fatta scolare. L'impasto così ottenuto viene steso sull'intelaiatura e lisciato. (Fig. 1.7)

Figura 1.7 realizzazione muratura in torchis

2.MATERIALI E PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

I mattoni su cui verte la trattazione sono fatti da terra a matrice argillosa (70%) e fibre di bucce di riso (30%) come materiale stabilizzante. Le bucce di riso hanno dimensioni di 3mm x 5mm. I blocchi hanno subìto lo stesso processo produttivo meccanico dei comuni mattoni industriali, ad eccezione del fatto che non vengono cotti in forno ed essiccati mediante delle camere artificiali. Mediante l'utilizzo della diffrattometria a raggi X (usata per caratterizzare le fasi cristalline contenute nei materiali) si sono riconosciuti come componenti minerali la calcite, la montmorillonite e il gesso.

La tecnica di assemblaggio utilizzata per il muro, oggetto del lavoro di tesi, è stata caratterizzata dall' adozione di giunti sfalsati orizzontalmente. Questi blocchi vengono allineati verticalmente e collegati insieme attraverso giunti a coda di rondine.

Per la realizzazione di questi piccoli muri (1,07 x 1,03 x 0,11 m^3), l'argilla viene unita con acqua in percentuale di 2:1. La superficie laterale e quella inferiore di ogni blocco vengono livellate per rimuovere il materiale in eccesso in modo da garantire una superficie piana per la conseguente applicazione del carico. Le superfici di contatto risultano essere piane e parallele tra loro. I mattoni vengono uniti mediante l'utilizzo di una

particolare argilla che viene cosparsa sulla superficie superiore e su quella inferiore. Questo collante una volta finita l'essiccazione si lega perfettamente ai blocchi poiché è costituito dello stesso materiale usato nei mattoni con il conseguente raggiungimento di una straordinaria solidità.

2.1 Il blocco in terra cruda

La Ton Gruppe® è un'azienda italiana trentennale specializzata in bioedilizia. In questo paragrafo verranno analizzate le caratteristiche tecnologiche costruttive adottate da questa ditta per quanto riguarda murature realizzate con mattoni di terra cruda.

Il mattone preso in esame nella sperimentazione è il KRIOTON®, un blocco da costruzione semipieno e rettificato, ideato dagli esperti di Ton Gruppe®, i quali hanno usato una speciale miscela di terra cruda composta di argilla e fibre vegetali naturali come paglia, canapa e pula di riso.

Figura 2.1 Blocchi Krioton collegati per mezzo dell'incastro a coda di rondine

Scheda Tecnica di Prodotto

KRIOTON® 120

v.07-17.10

cod. prodotto GEMA12 – GEMA12NR
GEMA122L – GEMA122LNR

Blocco semipieno per muratura di tamponamento in speciale miscela di terra cruda composta di argilla italiana e fibre vegetali naturali (paglia, canapa, pula di riso), di dimensioni 215x230x115 mm, peso specifico apparente di 1450 kg/m³, conduttività termica 0,248 W / m K, percentuale di foratura 22%, schermante contro i campi elettromagnetici, ecosostenibile e riciclabile, regolatore termoigrometrico, rientrante nella classe di reazione al fuoco Euroclasse A1, assorbimento massimo umidità del 4,69% in peso, in opera a giunti verticali e orizzontali con boiacca d'argilla (blocchi rettificati) o con letto di malta in argilla (blocchi non rettificati - NR). I blocchi sono disponibili nella versione con entrambe le superfici laterali lisce (cod. GEMA122L e cod. GEMA122LNR) e in quella con un lato liscio ed uno con nervature verticali (cod. GEMA12 e cod. GEMA12NR). Il lato nervato va utilizzato per migliorare l'aggrappaggio dell'intonaco per esterno. I blocchi possono essere tagliati e lavorati in maniera precisa con gli utensili per legno, quali seghe manuali e a nastro, punte e frese.

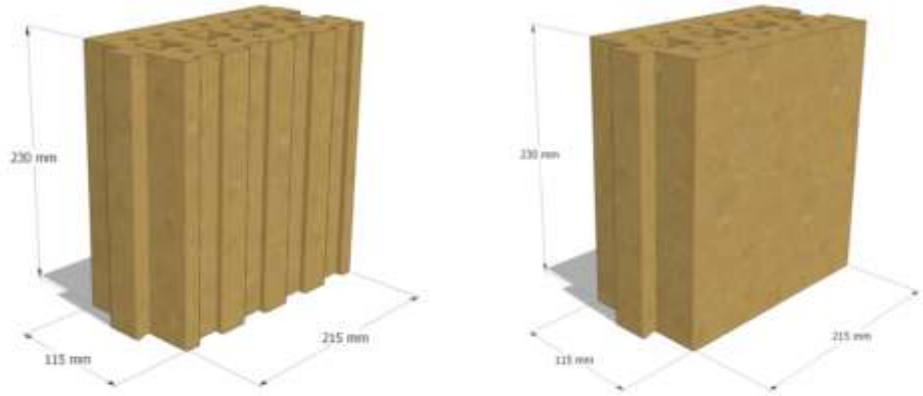
Dati Tecnici	
Forma	Blocchi, rettificati o non rettificati
Colore	Grigio ocra
Forma degli spigoli	Bordi dritti, assenza di spigoli vivi
Impiego previsto	Pareti di tamponamento e divisorie, contropareti
Dimensioni (l x h x sp.)	215 x 230 x 115 mm
Peso specifico apparente	1450 kg/m³
Umidità intrinseca	0 %
Assorbimento umidità	$w\%_{max}$ = 4,69
Conduttività termica dichiarata	λ_D=0,248 W/m K
Calore specifico	1,1 kJ/kg K
Dilatazione termica	8,5 x 10^{-6} °C^{-1}
Resistenza al fuoco	EI 30
Reazione al fuoco	Euroclasse A1
Resistenza a flessione in 3 punti sul pieno	4 MPa
Resistenza a compressione	5,3 MPa
Abbattimento acustico*	R_w = 43 dB
Resistenza alla diffusione del vapore	μ=10
Spessore d'aria equivalente	S_d= 1,15 m

- ✓ Riduce i consumi per il riscaldamento e il raffrescamento del 30%
- ✓ Migliora l'inerzia termica
- ✓ Accumula il calore e lo distribuisce in maniera uniforme
- ✓ Regolazione naturale dell'umidità
- ✓ Evita la formazione di muffa
- ✓ Riduce l'appannamento dei vetri di finestre e vetrate
- ✓ Neutralizza gli odori sgradevoli
- ✓ Soluzione ideale anche per bagni e cucine
- ✓ Riduce l'elettrosmog del 98%**
- ✓ Non trattiene la polvere e riduce lo sviluppo degli acari
- ✓ Ecologico e riciclabile al 100%
- ✓ Basso consumo di energia primaria in fase di produzione
- ✓ Lavorazione semplice e veloce

Figura 2.2 Dati tecnici KRIOTON 120

Dato	Per pezzo	Per mq di parete	Per mc di parete	Per pallet
Consumo	-	20 pz/m²	174 pz/m³	100 pz/pallet
Peso	8,3 kg	167 kg/m²	-	840 kg/pallet

Forma e dimensioni



Krioton® 120 con lato nervato (cod. GEMA12 e cod. GEMA12NR)

Krioton® 120 con lato liscio (cod. GEMA122L e cod. GEMA122LNR)

Figura 2.3 Forma e dimensioni KRIOTON 120

3.DIGITAL IMAGE CORRELATION

Come anticipato precedentemente, la sperimentazione effettuata sul materiale si è servita di una nuova tecnologia che si sta affermando sempre più nell'ambito dell'ingegneria: la Digital Image Correlation (DIC) chiamata anche '' correlazione digitale di immagini ''.

Si tratta di una tecnica ottica che permette di analizzare senza contatto e quindi in maniera non distruttiva, lo stato di deformazione che interessa una superficie. Si è preferito la Digital Image Correlation ai comuni trasduttori induttivi/capacitivi (ad esempio l'LVDT) perché questi ultimi non risultano esaustivi e si dimostrano costosi (poiché ne servirebbero troppi) e poco pratici.

Questo metodo è applicabile ad ogni materiale che subisce deformazioni a causa di qualsiasi tipo di tensione, sia meccanica che termica. Grazie al confronto delle immagini acquisite in istanti temporali diversi si riescono a ricavare mappe di spostamenti e di deformazioni con alta precisione.

Vengono utilizzate due telecamere angolate in maniera diversa e poste davanti al blocco murario in modo da catturare le stesse immagini da posizioni differenti. Dal confronto delle immagini si ottengono mappe bidimensionali o tridimensionali di deformazioni e spostamenti.

La tecnologia DIC si basa sul concetto della stereoscopia. Per comprendere in maniera più semplice questo concetto proviamo a compiere un parallelismo tra le due telecamere e i nostri due occhi. La sensazione di tridimensionalità che percepiamo quando guardiamo un oggetto ci è fornita dai nostri occhi. Questo succede perché gli occhi sono

distanti tra di loro e ognuno di essi ci fornisce un'immagine bidimensionale che poi il cervello rielabora in un'unica immagine in rilievo e di conseguenza tridimensionale.

Quindi la stereoscopia è un effetto percettivo legato all'angolo di convergenza degli assi visuali che dalle pupille si incontrano sull'oggetto osservato. (Vedi fig. 3.1)

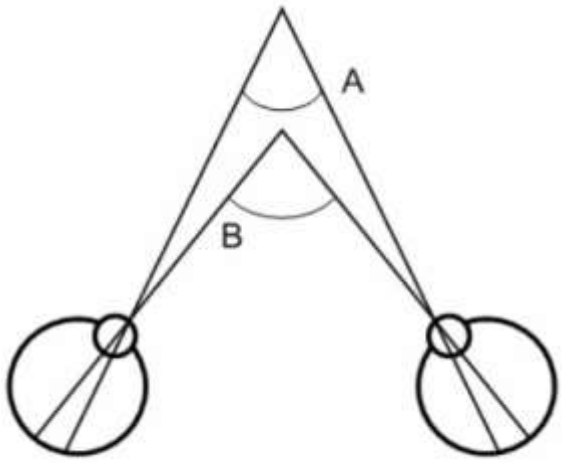


Figura 3.1 Assi visuali e convergenza

L'angolo sarà più piccolo quando l'oggetto sarà più lontano. Quando però l'oggetto si trova nelle immediate vicinanze del punto di vista, l'angolo sarà troppo ampio, superato un certo limite l'immagine si sdoppia perché gli assi visuali non riescono a convergere nello stesso punto ottenendo così due immagini distinte.

Grazie alla diversa angolazione delle telecamere è possibile associare ogni pixel dell'immagine ad un punto della superficie fotografata e di conseguenza anche conoscere le coordinate dei singoli punti.

3.1 Set up della Digital Image Correlation

Come già detto in precedenza i pannelli in terra cruda dovranno subire le prove di compressione assiale, compressione diagonale e taglio con precompressione. Per poter semplificare la corrispondenza pixel-punti della superficie si deve effettuare una verniciatura dei lati di ogni muro. In questo modo l'analisi delle deformazioni e degli spostamenti sul muro risulterà più chiara e precisa. Si realizza quindi uno ''speckle'', ovvero un pattern generato attraverso una vernice spray, nel nostro caso bianca e nera; si possono usare anche altri colori, l'obbiettivo è ottenere un contrasto che risulti evidente. (Fig. 3.2).

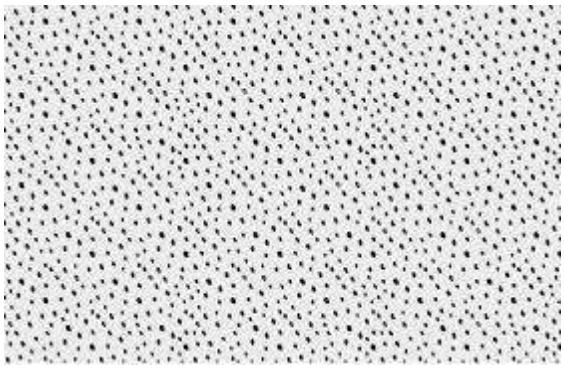


Figura 3.2 esempio di speckle

Al fine di ottenere lo speckle per prima cosa si colora la superficie dei pannelli murari con della vernice bianca e poi si creano delle piccole macchie circolari con la vernice nera in modo da ricreare la situazione in figura 3.2.

In questo modo ogni punto dello speckle potrà essere ''seguito'' dalle videocamere in maniera più precisa.

Una volta note le coppie di punti coniugati delle due immagini e noti i parametri delle telecamere scelti in sede di calibrazione (posizionamento, orientazione e caratteristiche interne del sensore), è possibile ricostruire la posizione dei punti proiettati sulle due immagini (ricostruzione della struttura 3D).

Eseguita la stereoscopia e la calibrazione, si dà inizio all'elaborazione dei dati attraverso l'utilizzo di appositi codici MatLab che permettono di applicare la tecnologia DIC (Digital Image Correlation).

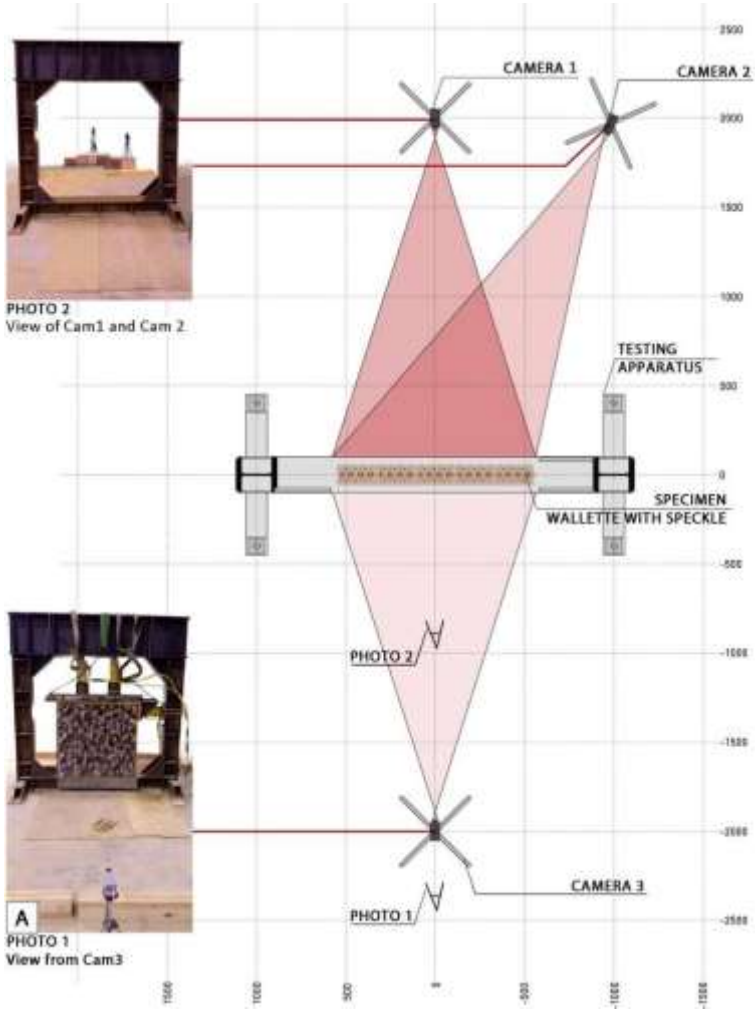


Figura 3.3 Set up Digital Image Correlation

L'immagine 3.3 mostra il set-up della Digital Image Correlation usato durante le singole prove. Ci sono 2 fotocamere rivolte da un lato del muro e una terza è stata direzionata alle spalle dello stesso per studiare con DIC-2D lo spostamento fuori asse e la deformazione di quella superficie.

Riassumendo, per mettere in pratica la tecnologia della Correlazione Digitale di Immagini è necessario passare attraverso 3 fasi:

- Preparazione dei provini (stesura dello speckle) e allestimento del set-up di prova

- Acquisizione delle immagini durante le singole prove
- Analisi delle immagini ottenute mediante un software capace di stilare mappe a colori rappresentanti gli spostamenti e le deformazioni che interessano le superfici in esame.

4. TEST SUI MATTONI

4.1. Test preliminari

La resistenza alla compressione di nove blocchi in terra è stata determinata secondo la norma UNI EN 772-1:2015. I test sono stati fatti con l'utilizzo di una pressa idraulica con carico massimo di 5000 kN. Il tasso di compressione è stato tarato a 0,05 (N/(mm^2))/s. I blocchi sono stati testati nella direzione di estrusione (fig 4.a).

La resistenza a taglio parallelo ai giunti a coda di rondine è stata determinata su 3 campioni secondo la norma UNI EN 1052-3:2007 (fig. 4.b).

È stato applicato il carico di compressione sulla piastra superiore tramite la macchina Zwick Roell Z050 con carico massimo di 1000kN ad una velocità di 2645 N/min fino a rottura.

La resistenza al taglio perpendicolare alle giunzioni a coda di rondine, in presenza di un carico fuori piano è stata valutata su 3 provini adottando la stessa norma UNI EN 1052-3:2007 (fig 4.c).

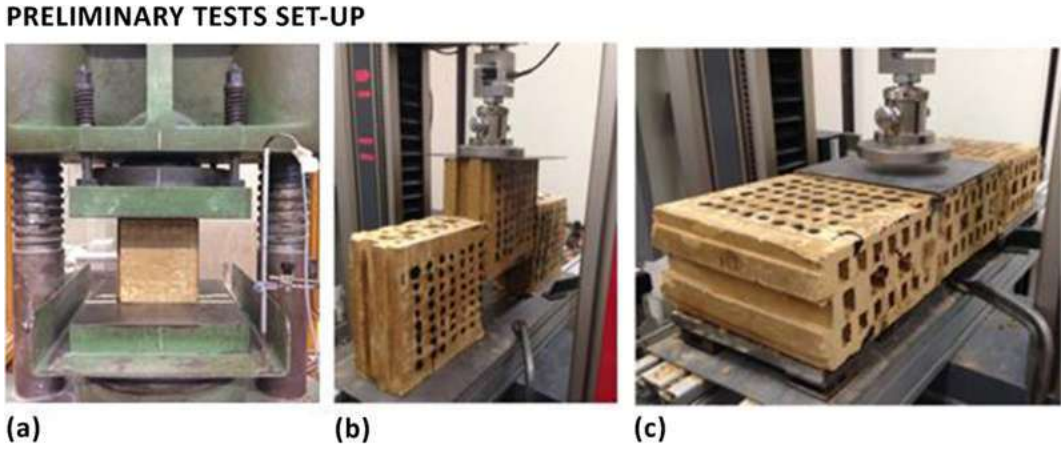


Figura 4 test preliminari sui mattoni

4.2 Test effettuati sul muro

La resistenza alla compressione sui muri è stata determinata su 3 provini secondo la UNI EN 1052-1. I campioni sono stati sottoposti a un carico di compressione per mezzo di due martinetti idraulici capaci di applicare 500kN, distribuiti uniformemente tramite una piastra d'acciaio di spessore 25 mm. Le deformazioni nominali sono state ottenute facendo la media dei valori di deformazione registrati tramite DIC su tutta l'area del provino (Fig 4.2.a).

Si è ottenuta la resistenza al taglio dei muri (Fig. 4.2.b) attraverso prove di compressione diagonale su 3 campioni a seguito della norma ASTM E519 - 07.

La forza di taglio dei muri sotto un costante carico di precompressione (Fig. 4.2.c) è stata ottenuta su 3 campioni utilizzando un carico di precompressione di 0,2 N/mm^2. Un profilo in acciaio a forma di 'L' è stato posto sulla parte superiore del campione per trasmettere la forza orizzontale.

.

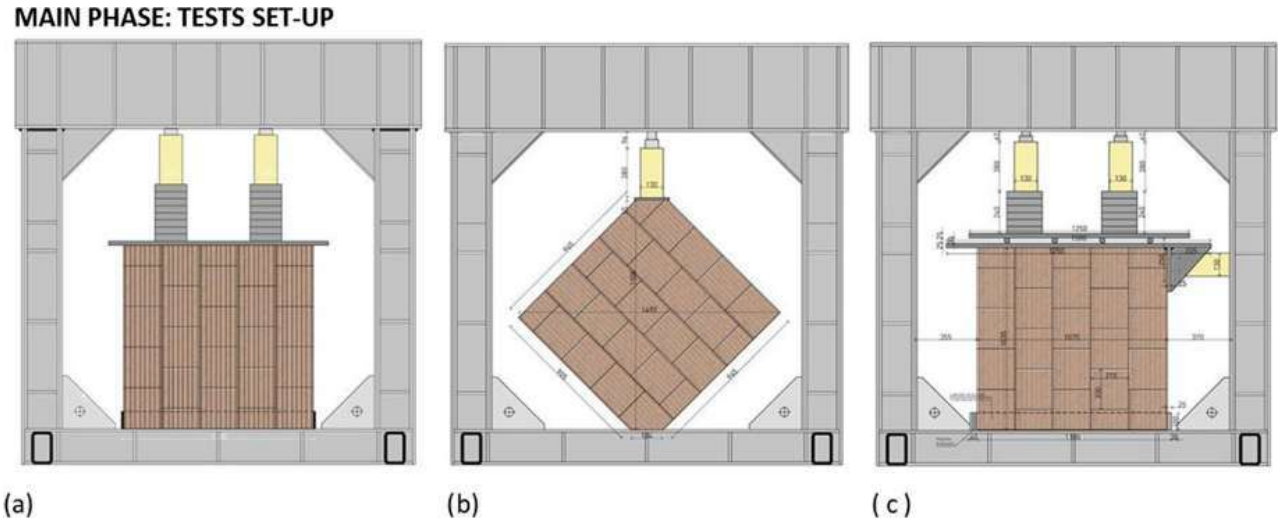


Figura 4.2.(a) prova di compressione sul muro

(b) prova di compressione diagonale

(c) prova di compressione diagonale con precompressione iniziale

4.3. Risultati test preliminari

La resistenza a compressione netta media riferita all'area della superficie su cui viene applicato il carico, esclusi i vuoti, risulta essere uguale a 3,4 N/mm^2. Come previsto, questo valore è piuttosto basso rispetto al valore della resistenza alla compressione dei tradizionali mattoni cotti al forno che è circa 16 N/mm^2.

La modalità di rottura è la stessa per tutti i campioni testati: le cricche hanno origine prima del carico di punta e si collocano sul fronte e sul retro dei blocchi, vicino al punto di applicazione del carico. (Fig 4.3).

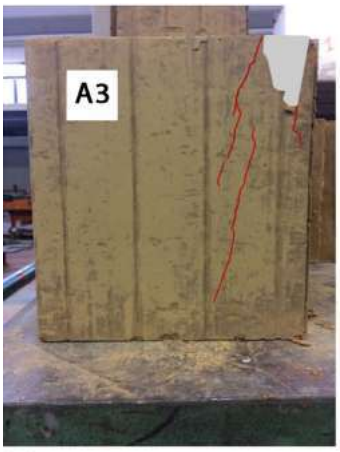


Figura 4.3 origine delle cricche sul mattone

La resistenza al taglio iniziale, parallelo ai giunti a coda di rondine è di 0,03 N/mm^2. Il coefficiente di variazione (COV) è risultato essere relativamente alto, tipico delle costruzioni assemblate a mano.
La modalità di rottura è riportata in Fig.4.4.

Figura 4.4

La forza di taglio iniziale perpendicolare alle giunture a coda di rondine era di 1,9 N/mm^2. La modalità di rottura è riportata in figura 4.5 e in

questo caso si denota un buon effetto di incastro grazie alle suddette giunture.

Figura 4.5

4.3.1 Test di compressione assiale

In figura 4.6a. si vede il grafico tensione-deformazione inerente a 3 mattoni. I valori di deformazione sono stati ottenuti tramite tecnologia DIC e successivamente processati tramite MATLAB. I campioni hanno presentato un andamento quasi lineare fino al carico massimo e una volta superato sono arrivati a rottura.

La tensione di compressione σ, il modulo di Young determinato a 1/3 del carico massimo Ei e il coefficiente di Poisson ν sono riportati in fig 4.6b.

Il valore medio di σ è di 2N/mm^2.

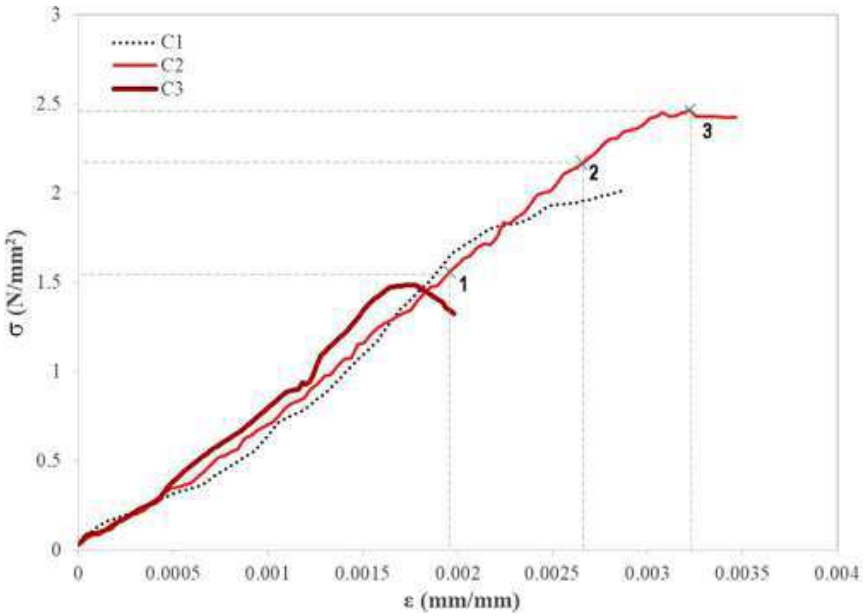


Figura 4.6 a. grafici σ-ε dei 3 mattoni in esame

Provino	**σ (N/mm^2)**	**Ei (N/mm^2)**	**ν**
C1	2.02	591	0.22
C2	2.46	703	O,23
C3	1.48	740	0.28
Mean Values	1.99	678	0.24
SD	0.49	78	0.03
COV	25%	11%	13%

Figura 4.6.b. tabella σ, Ei, ν dei 3 mattoni in esame

La tecnologia DIC ha permesso di ricostruire il campo delle deformazioni in ogni punto del muro. L'evoluzione nel tempo dello spostamento verticale sy, la deformazione verticale εy e la forza di taglio γxy sono riportati in tre differenti foto (fig. 4.7). Tali foto si riferiscono alle grandezze calcolate nei punti evidenziati in figura 4.6.a.

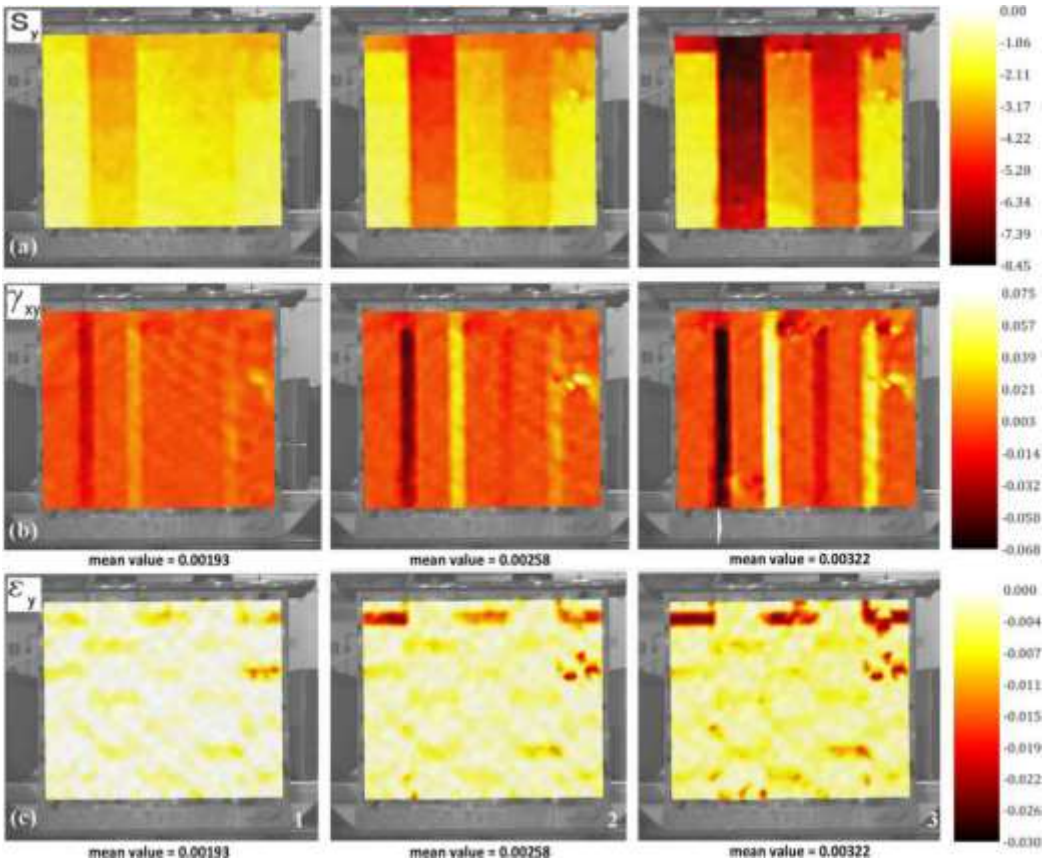


Figura 4.7

Dall'evoluzione di sy si nota che la tendenza del muro sia quella di comportarsi come una serie di colonne adiacenti e indipendenti tra loro. L'allineamento dei giunti verticali evita la distribuzione uniforme del carico verso il basso. Questo comportamento porta ad un modesto fenomeno di instabilità fuori piano (confermato dal 3D-DIC), che è attenuato dalla presenza delle giunture a coda di rondine. ''L'effetto colonna'' è visibile anche dall'evoluzione di γxy che ha registrato un elevato scorrimento relativo tra gli elementi verticali.

In seguito è stato effettuato un confronto tra la mappa delle cricche sotto carico di compressione monoassiale e la mappa delle deformazioni secondo Von Mises ottenuta con il DIC (fig.4.8). La deformazione

equivalente di Von Mises è stata calcolata in condizioni di deformazione piana (ε3=0) come segue:

$$\varepsilon_{VM} = \sqrt{\frac{2\left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2\right]}{3}}$$

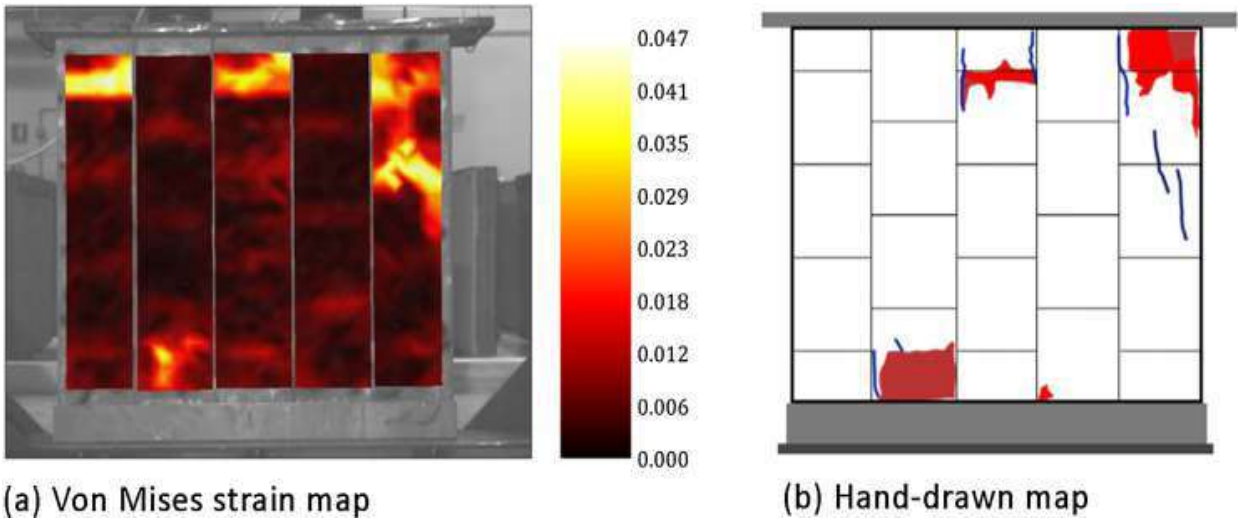


Figura 4.8 mappa delle deformazioni secondo Von Mises durante il test di compressione monoassiale

Le crepe si propagano dalla regione superiore dei campioni lungo la superficie della muratura, con espulsioni di argilla in prossimità della forza applicata.

5. Acquisizione delle immagini mediante MatLab.

In questo capitolo viene affrontata l'analisi delle immagini acquisite attraverso l'uso di un software che si basa su un linguaggio di programmazione ad alte prestazioni per la gestione di calcoli, visualizzazioni e simulazioni (MatLab), finalizzato in questo caso alla misura degli spostamenti e delle deformazioni. L'ente di base di MatLab (Matrix Laboratory) è la matrice (array) ed è questo il motivo principale per il quale il programma viene usato per fare simulazioni matematiche.
Anche un'immagine viene tradotta in forma matriciale ed ogni elemento della matrice corrisponde a un pixel dell'immagine.
MatLab permette l'elaborazione di dati mediante degli algoritmi di calcolo. Si possono eseguire iterazioni finché non si ottengono i risultati desiderati andando a scrivere appositi 'codici' per riprodurre e automatizzare il lavoro. Il codice utilizzato per lo studio è stato sviluppato nel Gruppo di Costruzione di Macchine e Progettazione Meccanica dell'Università Politecnica delle Marche; esso grazie all'impiego di algoritmi per la correlazione numerica delle immagini prese in esame, permette di determinare sperimentalmente deformazioni e spostamenti.

In questo lavoro di tesi si sono presi in considerazione dati riguardanti test di compressione fatti su mattoni C2 raggruppati nel file C2_tc_DATI.
Nel file si trovano le seguenti grandezze:

sigma	Sigma corrispondente ad ogni immagine acquisita
nodi_array1	Matrice dei nodi, punti di misura
nodi3D	Struttura con i risultati del calcolo DIC
num_tot_img	Numero di immagini analizzate
nh	Numero di nodi in orizzontale
nv	Numero di nodi in verticale

Nella struttura nodi3D ad ogni nodo n corrisponde una matrice chiamata coord3D nella quale vi sono le coordinate X, Y, Z, espresse in millimetri, di ogni immagine e una matrice def. Tale matrice ha un numero di righe uguale al numero di immagini acquisite e 11 colonne che sono:

Colonna 1	Coordinata x in pixel del nodo sulla camera 1
Colonna 2	Coordinata y in pixel del nodo sulla camera 1
Colonna 3	$\varepsilon 1$
Colonna 4	$\varepsilon 2$

Colonna 5	ε3
Colonna 6	εy
Colonna 7	εx
Colonna 8	εxy
Colonna 9	εeqv
Colonna 10	Coordinata x in pixel del nodo sulla camera 2
Colonna 11	Coordinata y in pixel del nodo sulla camera 2

Come si evince dal grafico in figura 5.1, l'andamento della curva σ-ε nel primo tratto (1/3 del carico massimo) è quasi lineare.

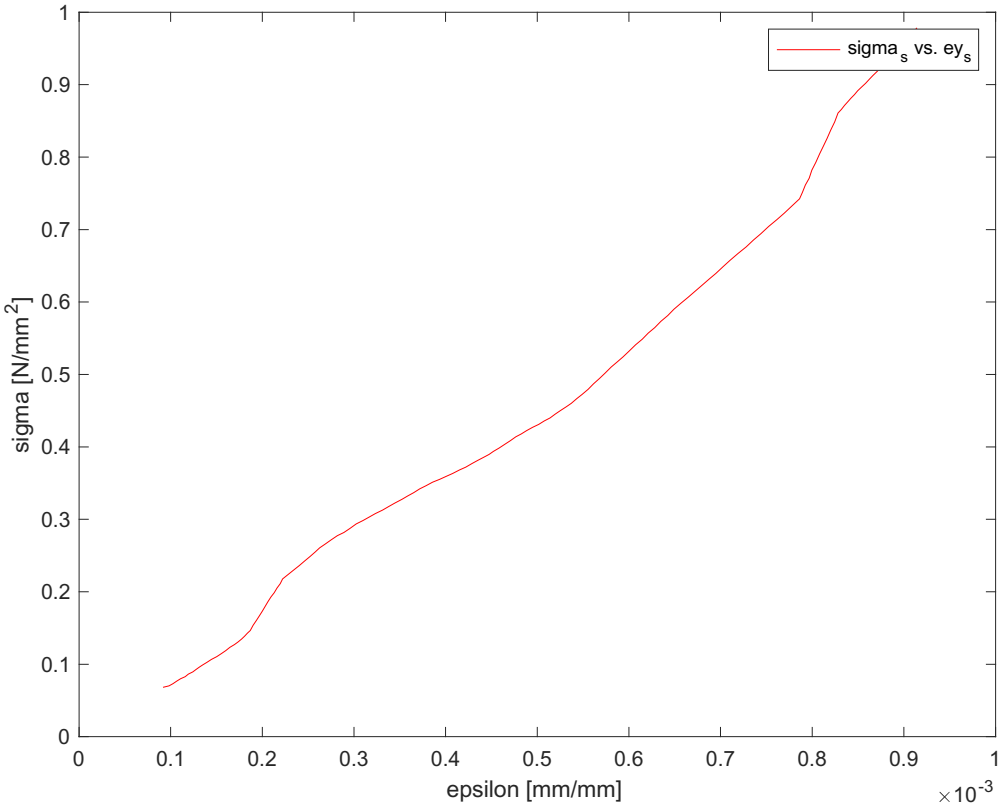


Figura 5.1 grafico σ-ε riferito a 1/3 del carico massimo applicato sulla muratura in blocchi C2

Conoscendo già il comportamento globale della muratura soggetta a compressione assiale, nella tesi ci si è focalizzati sul comportamento puntuale dei blocchi della muratura in modo da poter caratterizzare il materiale in maniera più precisa.

5.1 Legge di Hooke e modulo di elasticità

Un corpo si dice elastico quando dopo aver subito una deformazione in un dato istante temporale riesce a riacquistare la sua forma originaria. Le molle ad esempio sono dispositivi capaci di esplicare bene questo fenomeno.

A fronte di un cambiamento di temperatura o di una forza esterna, un solido può variare il suo volume e le sue dimensioni subendo così una deformazione. La deformazione può essere elastica quando scompare nel momento in cui cessa la sollecitazione o plastica nel caso in cui, una volta tolto il carico, risulti essere permanente. Indicheremo la deformazione con ε e la tensione (F/A) di sollecitazione con σ.

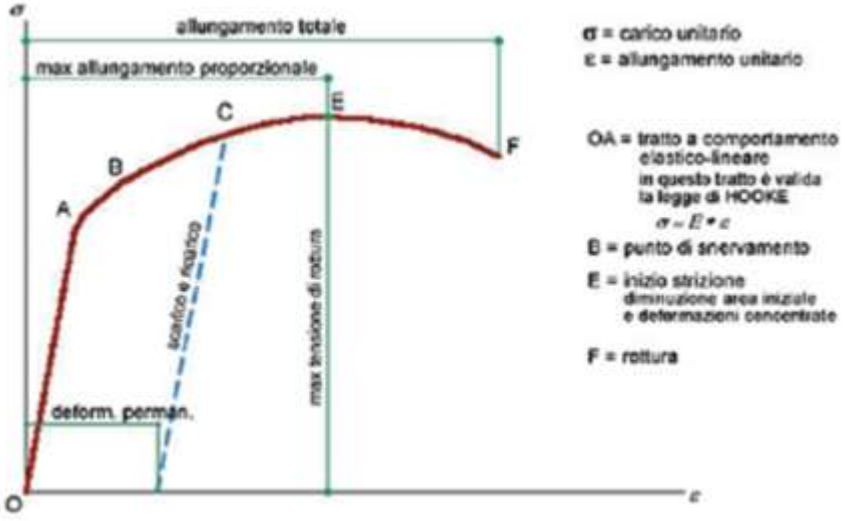


Figura 5.2. Grafico tensione-deformazione inerente ad una prova di trazione

In figura 5.2 è illustrato un comune grafico di tensione-deformazione in seguito ad una prova di trazione.

Si distinguono qui tre tipi di deformazioni.

Nel primo tratto (fino ad A) il corpo si deforma ma ritorna alla posizione originaria una volta finita la sollecitazione. Questa deformazione è detta elastica.

Nel secondo tratto (quello che va da A ad F) il corpo una volta cessata la sollecitazione non torna allo stato originario e si verifica una deformazione permanente (plastica).

Infine, dopo la tensione dovuta al carico massimo sopportato dal materiale, la sollecitazione è troppo elevata e il materiale arriva a rottura (F).

Esiste una relazione nel tratto lineare del grafico: la legge di Hooke.

La legge di Hooke afferma che un corpo elastico subisce una deformazione direttamente proporzionale alla forza agente sul corpo stesso.

Modulo di elasticità

Il modulo di elasticità è una grandezza che esprime il rapporto tra tensione e deformazione nel caso di condizioni di carico monoassiale ed in caso di materiale con comportamento elastico. Non dipende dalla geometria del provino ed è quindi una caratteristica del materiale. È definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che ne deriva.

Esistono vari tipi di moduli di elasticità:

- Modulo di elasticità longitudinale
- Modulo di elasticità tangenziale
- Modulo di comprimibilità

Il modulo di elasticità longitudinale, chiamato anche modulo di Young o modulo di rigidezza longitudinale, è definito come la costante della legge di Hooke: $E=\sigma/\varepsilon$.

Con σ (tensione) che si misura in [MPa] ed ε (deformazione) che è il rapporto tra la variazione della lunghezza e la lunghezza iniziale (in assenza di carico) del provino; essa è una grandezza adimensionale.

5.2 Modulo di Young nell'analisi delle immagini.

Per calcolare il modulo di Young in ogni nodo (o punto di misura) si è diviso il muro in 5 macro-colonne di dimensioni uguali. L'intero muro è composto da 35 nodi posti in orizzontale e 29 nodi posti in verticale; da un punto di vista matematico la parete è assimilabile a una matrice con 29 righe e 35 colonne. Le 5 macro-colonne saranno formate da 29 righe e 7 colonne ognuna. In ogni macro-colonna si individuano le zone in cui si trova il mattone e le zone in cui si trova il collante.

La σ è unica per ogni immagine, mentre la εy cambia in ogni nodo e per ogni immagine analizzata. Tenendo conto di ciò una volta creati con MatLab degli appositi cicli for (vedi riquadri in rosso nelle figure 5.3 e 5.4) e delle strutture, per mezzo della funzione ''polyfit'' (riquadro blu in figura 5.3) sono stati calcolati i moduli di Young relativi ai singoli mattoni e alle zone in cui è presente il collante.

```
%%%
```

```
%%
for i=1:num_tot_img

    for n=1:N_tot
        E(nodi_array1(n,2),nodi_array1(n,3))=nodi3D(n).def(i,n_eps);
    end

    f(1).collante=E(1:2,1:7);
    f(2).collante=E(6:10,1:7);
    f(3).collante=E(14:18,1:7);
    f(4).collante=E(22:29,1:7);
    f(5).collante=E(1:6,8:14);
    f(6).collante=E(10:13,8:14);
    f(7).collante=E(17:21,8:14);
    f(8).collante=E(25:29,8:14);
    f(9).collante=E(1:2,15:21);
    f(10).collante=E(6:10,15:21);
    f(11).collante=E(14:18,15:21);
    f(12).collante=E(22:29,15:21);
    f(13).collante=E(1:6,22:28);
    f(14).collante=E(10:13,22:28);
    f(15).collante=E(17:21,22:28);
    f(16).collante=E(25:29,22:28);
    f(17).collante=E(1:2,29:35);
    f(18).collante=E(6:10,29:35);
    f(19).collante=E(14:18,29:35);
    f(20).collante=E(22:29,29:35);

    for r=1:20
        deformazione_c=abs(mean(f(r).collante,'all'));
        defor_c(r,i)=deformazione_c;
    end
end

for r=1:20
    Ecollante(r,1:2)=polyfit(defor_c(r,1:268),sigma(1:268)',1);
end

Ecollante=Ecollante(:,1);

Emediomattone=mean(Emattone);
Emediocollante=mean(Ecollante);
```

Figura 5.4 Codice MatLab

6. RISULTATI SPERIMENTALI

Il comando polyfit.

La funzione polyfit calcola i coefficienti del polinomio di interpolazione.

La sintassi è:

>> p=polyfit(x,fx,n)

Dove:

x è il vettore che contiene i nodi di griglia;

fx è il vettore che contiene i valori da interpolare sui nodi di griglia;

n è il grado del polinomio di interpolazione.

Il comando polyfit fornirà quindi il coefficiente di x che è esattamente il modulo di Young.

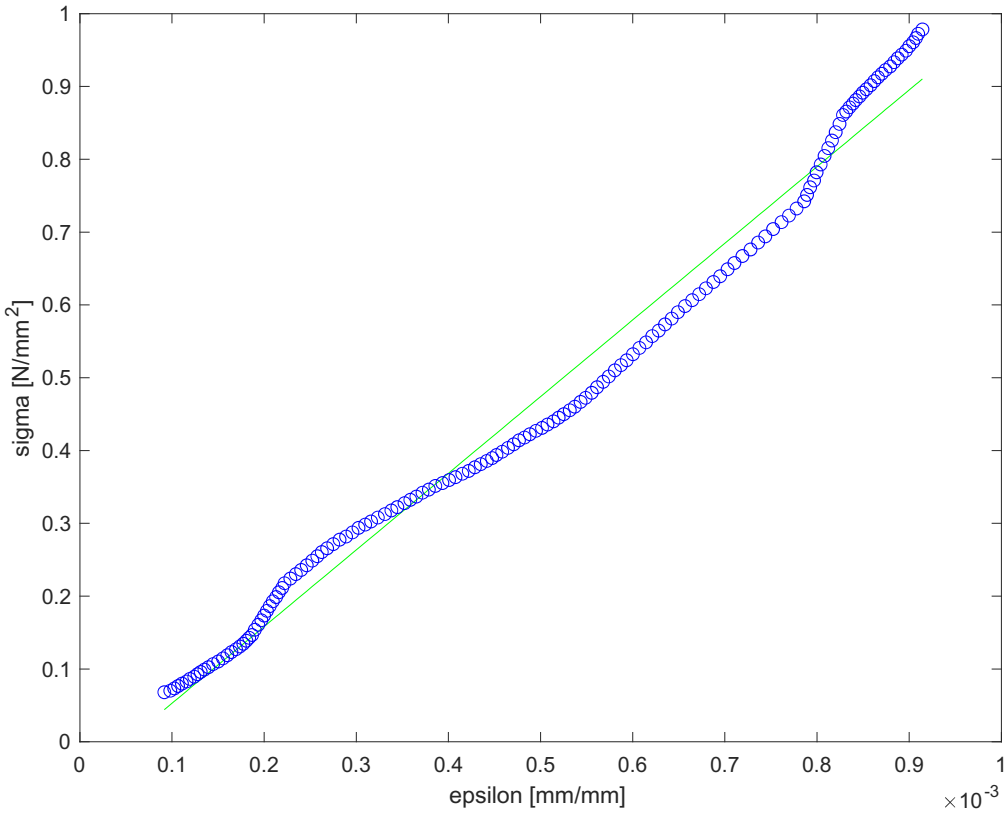


Figura 5.2 grafico tensione-deformazione del muro nelle varie prove

In figura 5.2 la retta verde è stata ottenuta tramite il polyfit e la pendenza di tale retta coincide con il modulo di Young.

Il valore medio del modulo di Young dei mattoni per ogni immagine acquisita è pari a 637,5230 MPa che si avvicina molto ai 703 MPa, valore del modulo di Young dei 3 mattoni C2, come riportato nella tabella in figura 4.6b.

Il valore medio del modulo di Young del collante invece è più che doppio rispetto a quello del mattone (circa 1601,5 MPa).

In generale, lo studio ha mostrato la necessità di migliorare le proprietà meccaniche dei blocchi di terra e la capacità di connessione dei giunti a coda di rondine al fine di ottenere capacità strutturali portanti delle pareti formate da mattoni KRIOTON.

La tecnologia DIC è stata estremamente importante per determinare lo stato di deformazione e di rottura dei blocchi di muratura in terra. Il DIC è promettente e ha dimostrato un alto potenziale nel monitoraggio del campo di tensioni-deformazioni.

In conclusione, la terra cruda è un materiale sul quale bisogna fare affidamento esclusivamente per carichi di compressione ed a secco.

I valori della resistenza meccanica dipendono da molti fattori che vanno dalla qualità della manodopera, alla granulometria (frazione di elementi fini e grossi) ed alla forma degli inerti grossi; fondamentale è il tenore di acqua presente nell' impasto: minore è la sua quantità e minori risulteranno i micropori e quindi tanto più alta la resistenza meccanica.

La moderna produzione di mattoni pressati porta ad un guadagno di resistenza con conseguente miglioramento di compattezza.

La resistenza a compressione uniassiale determinata in laboratorio su mattoni in terra cruda, allo stato secco, fornisce generalmente valori compresi nell'intervallo tra 1 e 3 MPa.

Questi valori, per quanto riguarda i muri portanti, impongono l'utilizzo di uno spessore di almeno 40-50 cm e la limitazione della costruzione degli edifici ad un solo piano di elevazione. Bisogna altresì evitare il contatto diretto della struttura con gli agenti atmosferici e in particolare con l'acqua. L'utilizzo di apposite presse per la compattazione della terra consente di lavorare impasti relativamente asciutti; ciò permette di aumentare la resistenza meccanica dei mattoni senza alterare la natura del materiale.

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] architetturadellaterra.it

[2] www.edilizia.com

[3] Tecknoring, terra cruda, architettura,M.Lasandra

[4] ‘’Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry’’ Francesca Stazi , Michele Serpilli, Gianluca Chiappini, Marianna Pergolini, Evelina Fratalocchi, Stefano Lenci.

[5] Bobina B.A.C.-Autosufficienza-Risparmio energetico

[6] TON GRUPPE Healthy Buildings

[7] meccanicanews.com

[8] NDT.net, E.Gabrielli, C.Colla

[9] Giovanardi-Resistenza alla trazione.

[10] Anger, Fontaine, 2009, ‘’Trattato di costruzione in terra’’.

[11] Baldacci O. 'L'ambiente geografico della casa di terra in Italia'