



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI SCIENZE E INGEGNERIA DELLA MATERIA,  
DELL'AMBIENTE ED URBANISTICA

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE (LM-24)

---

Valorizzazione di rifiuti da sedimenti dragati  
per la produzione di materiali da costruzione

*Valorization of dredged sediments in the  
construction materials sector*

Relatore:

*Prof.ssa* Chiara Giosuè

Correlatore:

*Prof.ssa* Valeria Corinaldesi

Candidato:

Alberta Rossi

---

Anno Accademico 2022-2023

*Alla mia famiglia*

# SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	7
1.1	Laterizi: struttura e produzione .....	10
1.1.1	Composizione mineralogica.....	10
1.1.2	Produzione.....	12
1.2	Caratteristiche dei laterizi .....	16
1.3	Sostituzione di materiali tradizionali con rifiuti e sottoprodotti .....	18
2	MATERIALI E METODI .....	20
2.1	Caratterizzazione dei materiali .....	20
2.1.1	Argilla .....	20
2.1.2	Sedimenti dragati.....	23
2.2	Diffrazione di raggi X (XRD) .....	26
2.2.1	Strumenti .....	26
2.2.2	Procedura operativa .....	30
2.3	Termogravimetria.....	32
2.3.1	Analisi termogravimetrica (TGA) .....	32
2.3.2	Analisi termica differenziale (DTA) .....	33
2.3.3	Strumenti .....	34
2.3.4	Procedura operativa .....	35
2.4	Porosimetria.....	36
2.4.1	Strumenti .....	38
2.4.2	Procedura operativa .....	39
2.5	Prova Pundit ad ultrasuoni.....	40
2.5.1	Onde ultrasoniche.....	40
2.5.2	Strumenti .....	41

2.5.3	Procedura operativa .....	44
2.6	Resistenza a compressione .....	47
2.6.1	Strumenti .....	47
2.6.2	Procedura operativa .....	48
2.7	Resistenza a trazione indiretta.....	50
2.7.1	Strumenti .....	50
2.7.2	Procedura operativa .....	51
2.8	Initial rate of absorption (IRA).....	53
2.8.1	Procedura operativa .....	54
2.9	Assorbimento d'acqua .....	56
2.9.1	Procedura operativa .....	56
2.10	Provini preliminari .....	57
2.11	Proporzioni dei componenti.....	62
2.12	Preparazione dei provini.....	64
3	RISULTATI E DISCUSSIONI .....	82
3.1	Provini preliminari.....	82
3.1.1	Risultati prova Pundit ad ultrasuoni .....	82
3.1.2	Risultati prova a compressione.....	83
3.1.3	Discussione dei risultati .....	83
3.2	Diffattometria di raggi X (XRD) .....	85
3.2.1	Risultati delle prove .....	85
3.2.2	Discussione dei risultati .....	86
3.3	Diffattometria di raggi X (XRD) post-cottura .....	87
3.3.1	Risultati delle prove .....	87
3.3.2	Discussione dei risultati .....	88

3.4	Analisi termogravimetrica (TGA).....	89
3.4.1	Risultati delle prove .....	89
3.4.2	Confronto tra i campioni e discussione dei risultati .....	93
3.5	Porosimetria .....	95
3.5.1	Risultati delle prove .....	95
3.5.2	Discussione dei risultati .....	97
3.6	Densità.....	98
3.6.1	Risultati delle prove .....	98
3.6.2	Discussione dei risultati .....	100
3.7	Prova Pundit ad ultrasuoni.....	101
3.7.1	Risultati delle prove .....	101
3.7.2	Discussione dei risultati .....	102
3.8	Resistenza a compressione .....	104
3.8.1	Risultati delle prove .....	104
3.8.2	Discussione dei risultati .....	105
3.9	Resistenza a trazione indiretta.....	107
3.9.1	Risultati delle prove .....	107
3.9.2	Discussione dei risultati .....	108
3.10	Initial rate of absorption (IRA).....	110
3.10.1	Risultati delle prove.....	110
3.10.2	Discussione dei risultati.....	112
3.11	Assorbimento d'acqua.....	114
3.11.1	Risultati delle prove.....	114
3.11.2	Discussione dei risultati.....	116
4	OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO .....	117

4.1	Diffrazione di raggi X (XRD) post-cottura .....	122
4.1.1	Risultati delle prove .....	122
4.1.2	Discussione dei risultati .....	122
4.2	Densità.....	123
4.2.1	Risultati delle prove .....	123
4.2.2	Discussione dei risultati .....	124
4.3	Prova Pundit ad ultrasuoni.....	125
4.3.1	Risultati delle prove .....	125
4.3.2	Discussione dei risultati .....	126
4.4	Resistenza a compressione .....	127
4.4.1	Risultati delle prove .....	127
4.4.2	Discussione dei risultati .....	127
4.5	Resistenza a trazione indiretta.....	130
4.5.1	Risultati delle prove .....	130
4.5.2	Discussione dei risultati .....	130
4.6	Initial rate of absorption (IRA).....	132
4.6.1	Risultati delle prove .....	132
4.6.2	Discussione dei risultati .....	133
4.7	Assorbimento d'acqua .....	134
4.7.1	Risultati delle prove .....	134
4.7.2	Discussione dei risultati .....	135
	CONCLUSIONI.....	136
	BIBLIOGRAFIA.....	141

# 1 INTRODUZIONE

I materiali ceramici tradizionali sono ottenuti per cottura di minerali argillosi che contengono sostanze inerti e fondenti; vengono classificati in base alla microstruttura (definita attraverso la porosità), al colore del supporto e al rivestimento superficiale.

Si dividono in prodotti "a pasta porosa", costituiti da grani separati da un gran numero di pori e interstizi, e prodotti "a pasta compatta", nei quali le particelle sono saldate tra loro in seguito alla parziale fusione subita durante la cottura. La porosità di un prodotto ceramico è fondamentale nel determinare le caratteristiche meccaniche e il comportamento nelle condizioni operative e ambientali.

I laterizi sono prodotti ceramici a pasta porosa, caratterizzati da forma regolare e da dimensioni e peso tali che ne consentono un'agevole posa manuale. Sono materiali da costruzione di vasto uso, impiegati per la realizzazione di murature, solai, coperture e rivestimenti.

Il settore delle costruzioni è ritenuto uno dei maggiori responsabili dell'inquinamento ambientale. Secondo il rapporto stilato dalla Global Alliance for Building and Construction [1] le costruzioni, i materiali e gli edifici del settore edilizio sono responsabili di circa il 40% di emissioni di anidride carbonica disperse nell'ambiente.

In particolare si stima 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.

Tra gli impatti diretti del settore sull'ambiente, il più significativo è il consumo di energia e di risorse naturali non rigenerabili. Il settore delle costruzioni consumerebbe circa metà di tutte le risorse naturali estratte. In molti Paesi la maggior parte dei flussi di materiale appartiene al settore.

Le fasi di estrazione e scavo di materiale naturale generano una larga quantità di consumo delle risorse, emissioni e di rifiuti e le materie prime si stanno esaurendo.

I mattoni di argilla cotta sono uno dei materiali da costruzione più prodotti. Secondo uno studio del Climate and Clean Air Coalition [2], ogni anno vengono prodotti in tutto il mondo circa 1500 miliardi di mattoni, coinvolgendo più di 4000 milioni di tonnellate di argilla estratte per essere lavorate in più di 100.000 forni. Un uso così ampio di mattoni di argilla nelle industrie edili sta causando una scarsità di riserve naturali di argilla. Inoltre, i processi di produzione dei mattoni sono ad alta intensità energetica (2,0 kWh per mattone) e producono grandi volumi di rifiuti e gas serra (0,41 kgCO<sub>2</sub>-eq per mattone) [3].

Nella ricerca sui materiali da costruzione, in accordo con quelli che sono i principi dell'economia circolare, la sostituzione delle materie prime naturali non rinnovabili con rifiuti e sottoprodotti industriali diventa una delle possibili pratiche per poter rendere più sostenibile il settore dell'edilizia. In questo modo, non solo si garantisce un valore aggiunto al rifiuto, ma si potrebbero migliorare anche alcune prestazioni del materiale finale.

## SCOPO

Il presente lavoro è finalizzato allo studio di laterizi innovativi realizzati utilizzando i sedimenti dragati dal porto di Ancona in parziale sostituzione di un'argilla per la produzione di materiali ceramici tradizionali. I materiali ceramici tradizionali sono prodotti ottenuti da materie prime inorganiche non metalliche, formati generalmente a freddo e successivamente consolidati tramite cottura.

In particolare, le attività hanno l'obiettivo di indagare le caratteristiche tecniche e funzionali come proprietà fisiche, chimiche e meccaniche di provini realizzati con diverse percentuali di sostituzione del materiale di rifiuto rispetto all'argilla di riferimento.

A tal fine sono state condotte prove come la porosimetria ad intrusione di mercurio per studiare il volume e il diametro dei pori presenti all'interno del provino, l'analisi delle diverse specie cristalline formate mediante diffrattometria di raggi X, prove di assorbimento d'acqua e di rapporto iniziale di assorbimento (IRA).

Infine, è stata valutata la risposta meccanica in termini di modulo elastico, resistenza a trazione indiretta e compressione di ciascun campione e valutate le diverse caratteristiche e conclusioni.

## 1.1 LATERIZI: STRUTTURA E PRODUZIONE

### 1.1.1 Composizione mineralogica

Secondo quanto riportato nel Manuale di materiali per l'ingegneria [4], per la fabbricazione dei laterizi può essere impiegata qualsiasi argilla, purché sia sufficientemente plastica da permettere la formatura e, dopo cottura, consenta di ottenere un prodotto a pasta porosa con adeguata resistenza meccanica e stabilità agli agenti atmosferici.

L'argilla assolve l'importante funzione plastificante, mentre gli altri componenti, quali sabbie silicee, feldspati, ecc., hanno funzione smagrante e fondente. Le argille sono costituite prevalentemente da silicati idrati di alluminio con struttura reticolare stratificata, la cui formula generale è  $xAl_2O_3 \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$ .

Oltre ai silicati idrati, nelle argille sono presenti anche ossidi idrati, quali la silice idrata ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ), l'allumina idrata ( $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ) e l'ossido ferrico idrato ( $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ ). I silicati idrati di alluminio e, in parte, gli ossidi idrati sono responsabili della plasticità degli impasti argillosi, cioè della loro attitudine ad essere modellati.

Si ha inoltre una parte inerte, costituita principalmente da silice cristallina (quarzi, quarziti e sabbie silicee), feldspati (silico alluminati potassici) e carbonato di calcio (calcare).

Questi costituenti esercitano due importanti funzioni:

- Funzione smagrante ad opera delle sabbie silicee che, avendo particelle di dimensioni notevolmente maggiori dei silicati idrati di alluminio, consentono di regolare il ritiro durante l'essiccazione e la cottura, favorendo inoltre la stabilità del crudo dopo la formatura;
- Funzione fondente del carbonato di calcio. Durante la cottura dei materiali ceramici, è necessario che si formi una fase liquida; questa, in seguito al raffreddamento, solidifica formando un vetro compatto che lega i grani del materiale e riempie i pori tra loro. Il carbonato di calcio porta alla formazione di una fase liquida a 950-1000 °C ed è utilizzato come fondente per i prodotti porosi ottenuti a bassa temperatura.

La caratteristica principale dell'argilla è la plasticità, intesa come capacità di deformarsi sotto l'azione di una pressione esterna e di conservare la forma conseguita anche dopo la rimozione di tale azione meccanica. La plasticità viene acquisita in presenza di acqua in proporzioni opportune e viene perduta dopo l'essiccazione.

La quantità d'acqua necessaria per conferire plasticità a un'argilla dipende principalmente dalla sua struttura mineralogica e dalla granulometria; infatti, le minute particelle dei silicati idrati devono essere circondate da un velo d'acqua sufficientemente spesso per formare un rivestimento viscoso, in grado di consentire il loro movimento reciproco. Inoltre, l'acqua aderisce alla superficie dei cristalli permettendo di conservare, anche dopo la rimozione della sollecitazione esterna, la forma impartita al prodotto.

La plasticità aumenta all'aumentare del tenore d'acqua finché l'impasto diviene fluido. A una maggiore plasticità corrisponde una più semplice sagomatura dei prodotti, però aumenta anche il ritiro durante l'essiccazione (dovuto all'allontanamento del velo d'acqua che si trova fra le particelle); quest'ultimo, se eccessivo, può dar luogo a deformazioni e tensioni di trazione in grado di compromettere l'integrità dei prodotti. La plasticità viene gradualmente perduta durante l'essiccazione, a seguito dell'allontanamento dell'acqua d'impasto. Durante la cottura, poi, la perdita di plasticità tende ad essere sempre meno recuperabile, finché viene perduta completamente a circa 600 - 700 °C, quando si ha la decomposizione dei silicati idrati.

Per la produzione di laterizi si utilizzano argille impure, contenenti:

- Quarzo, con funzione smagrante;
- Carbonato di calcio, con funzione fondente. Non deve essere però essere presente in percentuali eccessive (> 20%) e deve essere finemente macinato e distribuito sulla massa perché, in caso contrario, può formarsi dell'ossido di calcio (CaO) che idratandosi può portare alla disgregazione del materiale;
- Solfati, che possono essere presenti nell'argilla e rimanere inalterati durante la cottura; possono quindi restare come sali solubili nei pori del laterizio e generare efflorescenza sui prodotti in opera ed inoltre possono cristallizzare a contatto con l'acqua producendo sali idrati con effetti espansivi all'interno della massa del materiale;

- Ossido di ferro, che conferisce il tipico colore rosso ai laterizi dopo la cottura; l'eventuale ossido di calcio presente nell'argilla, tuttavia, tende ad attenuare la colorazione del prodotto cotto.

### 1.1.2 Produzione

Il ciclo tecnologico di produzione dei laterizi [5][6] può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Estrazione di materie prime. Per la preparazione dei ceramici tradizionali le materie prime sono costituite da minerali argillosi miscelati con polveri non argillose (quarzo, carbonato di calcio o feldspati).



*Figura 1 Cava di argilla – Estrazione materie prime*



*Figura 2 Argilla e carbonato di calcio in polvere*

- Preparazione dell'impasto. Le materie prime prelevate dalla cava vengono macinate, miscelate e l'impasto così ottenuto viene omogeneizzato. La macinazione può avvenire a secco oppure a umido; i prodotti macinati vengono setacciati e immagazzinati in sili in funzione della granulometria. Successivamente sono miscelati a secco, in pasta oppure a umido, secondo opportuni rapporti in peso o in volume. Il processo a secco è

applicato ai prodotti ottenuti da un'unica materia prima, mentre il processo a umido viene applicato ai prodotti ottenuti da impasti artificiali, in quanto consente la migliore omogeneizzazione delle diverse frazioni.

Per i laterizi spesso si utilizza un metodo di omogeneizzazione allo stato pastoso, cioè con umidità intermedia tra quella dei processi a secco e a umido.



*Figura 3 Preparazione dell'impasto*

- **Formatura.** Si conferisce all'impasto la forma del prodotto desiderato con l'applicazione di una pressione sufficiente a deformarlo plasticamente e stabilmente. Dopo la formatura, il crudo deve essere sufficientemente resistente per sopportare il peso proprio e le sollecitazioni durante la movimentazione.

Per i laterizi si utilizza il sistema di formatura a estrusione, che richiede una pasta sufficientemente plastica con un grado di umidità variabile tra il 15% e il 20%.

L'impasto passa attraverso una matrice con il profilo prestabilito; i prodotti vengono poi tagliati alla lunghezza prefissata.



*Figura 4 Formatura*

- Essiccazione. L'acqua contenuta nel crudo deve essere rimossa prima della cottura mediante un delicato processo di essiccazione, con il quale si rimuove l'acqua che forma un velo attorno alle particelle di argilla conferendo plasticità al materiale.

Durante questo processo si ha una contrazione di volume dovuta a un riavvicinamento delle particelle con un aumento delle forze reciproche d'attrazione e, quindi, della resistenza meccanica del manufatto.

L'essiccazione artificiale inizia in un ambiente molto umido dove il prodotto viene riscaldato senza perdita di acqua, favorendo il flusso dell'acqua dall'interno verso la superficie; in seguito viene gradualmente diminuita l'umidità e aumentata la temperatura, senza superare i 120 °C. Successivamente, anche l'acqua contenuta nei pori interni alle particelle di argilla viene allontanata, ma questo processo non è associato ad alcuna contrazione della pasta.

L'essiccazione prosegue finché l'umidità del manufatto non è inferiore a 1%.



*Figura 5 Essiccazione*

- Cottura. Attraverso la cottura, gli impasti essiccati acquistano le proprietà fisico-meccaniche, le dimensioni e l'aspetto definitivi. La cottura dei laterizi, con temperatura variabile tra 900 °C e 1000 °C, deve essere omogenea e tale da realizzare un materiale con porosità adeguata.

Durante la cottura avviene la disgregazione dell'argilla che libera i suoi ossidi, ovvero silice (SiO<sub>2</sub>) e allumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Al di sopra dei 900 °C si ha la decarbonatazione del calcare e comincia la formazione di un composto tra allumina e silice, detto "mullite"

( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ); in questa fase si ha inoltre la graduale formazione di una fase liquida che riempie i vuoti tra le particelle.

I mattoni poco cotti presentano un'elevata porosità che influisce negativamente sulle loro proprietà meccaniche e di resistenza al gelo. D'altra parte, la porosità troppo bassa dei mattoni troppo cotti, pur aumentando la resistenza meccanica, diminuisce l'adesione della malta ai laterizi.



*Figura 6 Cottura dei laterizi*

- **Stoccaggio.** I laterizi vengono controllati, selezionati per l'imballaggio e quindi messi a deposito, pronti per la spedizione.



*Figura 7 Stoccaggio laterizi*

## 1.2 CARATTERISTICHE DEI LATERIZI

Le caratteristiche da cui dipendono le prestazioni dei laterizi [7], sono le seguenti:

- Fisiche: massa volumica, impermeabilità, conducibilità termica, porosità;
- Meccaniche: resistenza a compressione, resistenza a trazione, resistenza a flessione, resistenza all'urto e resistenza all'usura;
- Tecnologiche: comportamento al fuoco, isolamento termico, isolamento acustico, resistenza al gelo.

La conducibilità termica risente dell'influenza di altre caratteristiche fisiche, in particolare diminuisce proporzionalmente con il peso specifico e con il tenore di umidità, pertanto diminuisce all'aumentare della porosità. Ancora, il peso specifico varia in funzione del contenuto di umidità.

Le caratteristiche meccaniche dei laterizi hanno un'importanza rilevante, soprattutto se impiegati per strutture portanti (murature e solai). Nei laterizi è ottima la resistenza a compressione, mentre sono scarse la resistenza a trazione e quella a flessione; esse presentano valori differenti, a seconda che si tratti di elementi pieni o forati. La resistenza a compressione degli elementi forati può essere determinata in direzione dei fori o perpendicolare ad essi. Per questi laterizi vengono anche considerate la resistenza a trazione e la resistenza a flessione. Per i laterizi da copertura e da pavimentazione vengono inoltre considerate la resistenza all'urto e la resistenza all'usura.

I laterizi hanno un ottimo comportamento nei confronti del fuoco. I mattoni pieni resistono a temperature molto elevate (circa 1100 °C); i mattoni forati sono invece meno resistenti alle alte temperature, a causa della presenza dei vuoti. Per la resistenza al gelo, indispensabile per murature esterne a "faccia vista", sono fattori determinanti la porosità (il diametro critico dei pori è stimato pari a 1,8 µm al di sotto del quale il rischio di gelo è da considerarsi elevato), la permeabilità all'acqua ed il contenuto di carbonati e di quarzo in quanto, durante la cottura, essi tendono a fondere la massa contribuendo a rendere più compatto l'impasto. Per quanto riguarda l'isolamento termico e acustico, per ottenere vantaggi sono determinanti la porosità dell'elemento tecnico, la soluzione

tecnica adottata, la corretta esecuzione dei giunti e la conducibilità termica dell'elemento tecnico.

I laterizi per murature sono sottoposti ad una serie di prove previste per l'accettazione, quali l'esame dell'aspetto, delle dimensioni e dell'uniformità. Tra i principali requisiti sono particolarmente importanti la resistenza meccanica (soprattutto a compressione), l'aderenza alle malte, l'assorbimento d'acqua, la resistenza all'efflorescenza e il rischio di gelività.

### **1.3 SOSTITUZIONE DI MATERIALI TRADIZIONALI CON RIFIUTI E SOTTOPRODOTTI**

Come detto nel capitolo 1, l'industria edile è una delle principali cause di inquinamento e sfruttamento delle materie prime. Le fasi di estrazione e scavo di materiale naturale generano una larga quantità di consumo delle risorse, di emissioni e di rifiuti e le materie prime si stanno esaurendo.

Nella ricerca sui materiali da costruzione, la sostituzione delle materie prime naturali non rinnovabili con rifiuti e sottoprodotti industriali diventa una delle possibili pratiche per poter rendere più sostenibile il settore dell'edilizia. In questo modo, non solo si garantisce un valore aggiunto al rifiuto, ma si potrebbero migliorare anche alcune prestazioni del materiale finale.

Numerosi studi di ricerca hanno valutato il potenziale dell'utilizzo di vari materiali riciclati, come rifiuti di costruzione e demolizione (polvere di mattoni, trucioli di legno, calce, cemento), rifiuti solidi organici e inorganici (tè, mozziconi di sigaretta), rifiuti solidi agricoli (lolla di riso, bagassa di canna da zucchero, scarti di frantoio), rifiuti di plastica (bottiglie di plastica, fibre di polipropilene, briciole di gomma) e rifiuti industriali (residui di lavorazione dell'oro, residui della produzione di carta) per limitare l'utilizzo di argilla naturale [8].

Secondo uno studio del Department Of Civil Engineering del Siddaganga Institute of Technology di Tumakur, India [9], una soluzione potrebbe essere quella di sostituire l'argilla naturale con sedimenti dragati dal porto.

Le attività di dragaggio lungo la costa per la manutenzione dei canali esistenti o anche per la costruzione di nuovi terminali producono ogni anno milioni di metri cubi di materiale dragato.

I materiali dragati sono una composizione di terreno o materiale di scavo con diverse proporzioni di materiali organici e inorganici che, gradualmente, si accumulano in canali e porti.

Essi vengono considerati una risorsa piuttosto che un rifiuto. Circa l'85-95% del materiale dragato in tutto il mondo è intatto o con pochissima interazione con l'attività umana e pertanto può essere utilizzato per un'ampia gamma di attività.

Il materiale dragato, tuttavia, ha i suoi limiti in termini di tossicità presente nella composizione minerale e nelle inadatte dimensioni della grana da utilizzare come materiale da costruzione.

I ricercatori hanno lavorato ad un processo di separazione per rimuovere i sedimenti più contaminati, effettuando prove di laboratorio e indagini sul campo per verificare le infiltrazioni. In seguito hanno studiato la composizione mineralogica (mediante diffrazione di raggi X) e le proprietà fisiche dei sedimenti raccolti.

Fatto ciò, sono passati alla fase operativa, realizzando diversi provini di mattoni con differenti percentuali di sostituzione dei sedimenti dragati rispetto all'argilla naturale.

I campioni sono stati prima essiccati all'aria per 24 h, quindi essiccati in stufa a 105 °C per 24 h ed infine cotti a diverse temperature (850 °C e 950 °C) per 8 h in un forno Carbolite CSF con una velocità di riscaldamento di 3 °C/min.

I provini sono stati poi testati per indagarne le proprietà fisiche e meccaniche. I risultati hanno mostrato che la porosità del materiale, che aumenta con l'aggiunta di percentuali maggiori di sedimenti dragati, influenza la resistenza meccanica dei provini, la quale rispetta tuttavia i limiti imposti dalle norme vigenti che stabiliscono un valore minimo di resistenza alla compressione di 10 MPa.

Pertanto, questo studio rivela che i sedimenti portuali dragati possono essere utilizzati nel campo dei materiali da costruzione per produrre mattoni ecologici.

Da questo studio si è partiti con la sperimentazione oggetto di tesi.

## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Il lavoro sperimentale è condotto presso il Laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona e si pone come obiettivo la valorizzazione di rifiuti da sedimenti dragati per la produzione di materiali da costruzione, in questo caso specifico di laterizi. Lo scopo è quello di realizzare mattoni utilizzando percentuali sostitutive di sedimenti dragati (DS) diverse e confrontare il loro comportamento con quello di un mattone di riferimento.

In totale verranno preparati 48 provini delle dimensioni 4x4x4 cm, 8 provini per ciascuna percentuale di sostituzione.

I mattoni di argilla senza DS (X = 0% in peso di DS) sono fabbricati come campione di riferimento. Le percentuali di sostituzione prese in esame sono 0%, 5%, 10%, 15%, 30% e 50%.

Per calcolare il quantitativo di materiale necessario per la realizzazione dei provini si è utilizzato un valore della densità reale dell'argilla e dei DS preso da letteratura [10]: la densità reale dell'argilla è di 2,745 g/cm<sup>3</sup> mentre la densità dei DS è di 2,673 g/cm<sup>3</sup>.

Characteristics	HDS	Clay
Real density(kg/m <sup>3</sup> )	2673	2745
Plastic limit (%)	18.80	25.10
Liquid limit (%)	35.06	43.97
Plasticity index	16.26	17.87

Tabella 1 Caratteristiche fisiche delle materie prime

#### 2.1.1 Argilla

L'argilla [11] è una classe di sedimenti non litificati estremamente fini (le dimensioni dei granelli sono inferiori a 2 µm di diametro) costituiti principalmente da alluminosilicati idrati appartenenti alla classe dei fillosilicati.

La genesi dei minerali argillosi nelle rocce è secondaria: per alterazione chimica (in ambiente acido o alcalino) di rocce magmatiche silicee; per deposizione da soluzioni idrotermali; per metamorfismo di basso grado (nel caso delle cloriti).

I minerali argillosi hanno caratteristiche fisico-chimiche peculiari, quali la dimensione micrometrica dei cristalli che comportano notevoli capacità di assorbimento d'acqua, scambio ionico e fissazione di cationi. Queste caratteristiche conferiscono al sedimento argilloso una sensibile plasticità se miscelato con acqua e refrattarietà se disidratato, proprietà che hanno permesso lo sviluppo dell'industria laterizia e ceramica.

Le argille, a causa della ridottissima dimensione delle particelle e alla elevata capacità di assorbimento, sono, assieme a limi e limi argillosi, rocce pseudocoerenti, ovvero rocce le cui caratteristiche meccaniche sono determinate dalla coesione fra le particelle e, quindi, dallo stato di idratazione, piuttosto che dall'attrito fra le stesse.

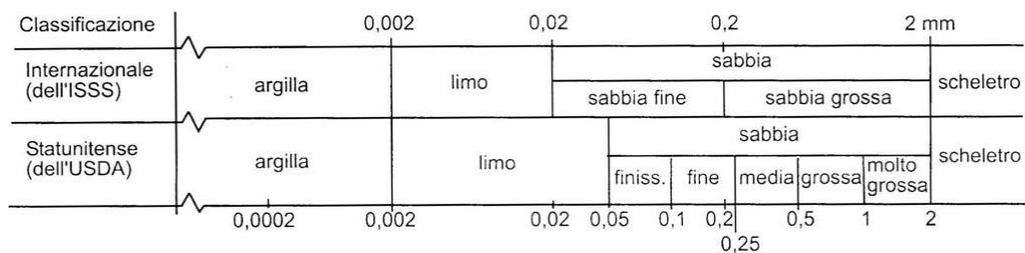


Figura 8 Classificazione terreni

L'argilla utilizzata per la sperimentazione è fornita da un'azienda italiana emiliana, la Fornace Fosdondo sita a Correggio (RE).

L'argilla è arrivata in due blocchi delle dimensioni di 28x9x12 cm di 7,5 kg ciascuno.

Si tratta di blocchi di materiale già pronto al forno per la formatura (argilla + sabbie), così come utilizzato nel processo industriale di produzione dei laterizi della fornace Fosdondo stessa.



Figura 9 Argilla di Fosdondo (RE)

Per la preparazione dei campioni, il materiale viene pesato, messo ad essiccare all'aria e nuovamente pesato.



Figura 10 Argilla essiccata all'aria

Successivamente, il materiale viene messo ad essiccare in stufa a 105 °C per 48 h. Trascorse 48 h, il campione di argilla viene pesato e se ne calcola la percentuale di umidità con la formula:

$$\%Umidità = \frac{P_u - P_s}{P_s} * 100$$

dove

- %Umidità è il contenuto di umidità presente nel campione;
- $P_u$  è il peso del campione umido, in g;
- $P_s$  è il peso del campione secco, in g.

<b>CAMPIONE</b>	<b>PESO UMIDO [g]</b>	<b>PESO SECCO [g]</b>	<b>%UMIDITÀ [%]</b>
<b>RIF</b>	6438	5317	21,60

Tabella 2 Peso e percentuale di umidità dell'argilla di riferimento

Si preleva una porzione del campione di argilla (peso 12 g) che viene macinata e setacciata per ottenere un passante 90 µm ed essere analizzata attraverso TGA e XRD, mentre un'altra porzione (peso 12,41 g) viene macinata e setacciata con un setaccio 250 µm al fine di ottenere una parte fine e una più grossa da analizzare a sua volta mediante TGA.

CAMPIONE	PESO [g]	%
Passante <250 $\mu\text{m}$	8,59	69,22
Trattenuto >250 $\mu\text{m}$	3,82	30,78

Tabella 3 Peso e percentuale di argilla passante e trattenuta dopo setacciamento <250  $\mu\text{m}$



Figura 11 Argilla passante <250  $\mu\text{m}$



Figura 12 Argilla >250  $\mu\text{m}$

### 2.1.2 Sedimenti dragati

Il materiale di rifiuto utilizzato nella sperimentazione rientra nel progetto "ECOSIEDRA - Soluzioni tecnologiche innovative ed eco-efficienti per il trattamento e la valorizzazione circolare dei Sedimenti di Dragaggio" e proviene dal porto di Ancona.

Nello specifico i sedimenti di dragaggio sono stati trattati in laboratorio e risultano rispettare i limiti indicati, ad esempio, nel test di cessione. Appaiono dunque idonei all'utilizzo nella sperimentazione in sostituzione dell'argilla tradizionale.



Figura 13 Campione di sedimenti dragati

In primo luogo, il materiale dragato (denominato DS1) viene messo in un contenitore, pesato e lasciato ad essiccare all'aria. Il materiale viene poi macinato con mortaio e pestello e setacciato per ottenere un passante a 90  $\mu\text{m}$ .



*Figura 14 Campione DS1 essiccato all'aria*



*Figura 15 Campione DS1 macinato e setacciato*

Una parte di campione (DS2) viene invece messa ad essiccare in stufa a 105 °C per 48 h.



*Figura 16 Stufa*



*Figura 17 Campione DS2 essiccato in stufa*

Trascorse le 48 h, il campione DS2 viene pesato e si misura il contenuto di umidità.

CAMPIONE	PESO UMIDO [g]	PESO SECCO [g]	%UMIDITÀ
DS1	1029,4	787,9	30,65
DS2	57,9	45,4	27,53

Tabella 4 Pesì e percentuale di umidità dei sedimenti dragati

Il campione DS2 viene macinato attraverso mortaio e pestello e setacciato per ottenere un passante a 90 µm.



Figura 18 Campione DS2 macinato e setacciato

Sul campione così ottenuto, si effettua un'analisi termogravimetrica (la cui spiegazione dettagliata è rimandata al capitolo 2.3) e la diffrazione di raggi X (XRD) per identificarne la composizione mineralogica (spiegata a sua volta nel capitolo 2.2).



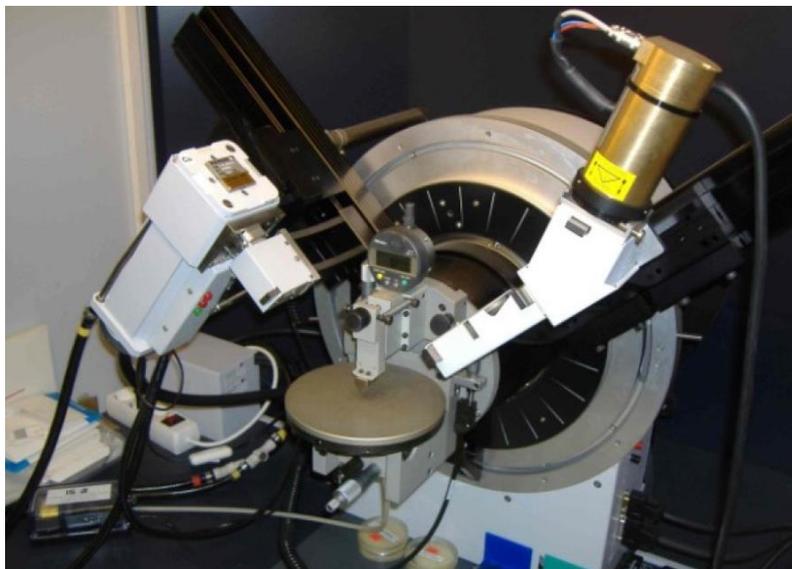
Figura 19 Campioni di argilla e sedimenti dragati mandati ad analizzare

## 2.2 DIFFRATTOMETRIA DI RAGGI X (XRD)

La diffrazione di raggi X, più comunemente conosciuta come XRD (X-Ray Diffraction), è una tecnica di caratterizzazione, non distruttiva, utilizzata per l'analisi microstrutturale di una vasta gamma di materiali tra cui componenti metallici, ceramici e polimerici. La XRD si adatta particolarmente bene anche allo studio di polveri e materiali disaggregati quali cementi e svariate polveri metalliche e ceramiche, permettendo di effettuare, ove richiesto, analisi "in situ", per mezzo di un'adeguata strumentazione portatile.

Tramite tale tecnologia è possibile ricavare informazioni sul tipo di struttura cristallina del campione e sui composti presenti (ossidi superficiali, fasi secondarie). Permette infatti di identificare e quantificare le fasi, con i rispettivi parametri reticolari, presenti nei materiali, conoscere forma e dimensione dei cristalliti che li compongono, oltre che tipologia e densità di difetti come, ad esempio, le dislocazioni indotte nei metalli dalla deformazione plastica.

### 2.2.1 Strumenti



*Figura 20 Diffrattometro Bruker D8 ADVANCE*

La caratterizzazione strutturale dei campioni è stata realizzata tramite spettroscopia XRD nella configurazione convenzionale di Bragg-Brentano, mediante un diffrattometro di

raggi X “Bruker D8 Advance”, facendo uso della radiazione  $\text{CuK}\alpha$ , avente lunghezza d’onda  $\lambda = 0,154056 \text{ nm}$ .

La strumentazione a raggi X è gestita elettronicamente mediante appositi software messi a punto dalla casa produttrice, che provvedono alle impostazioni funzionali, al controllo operativo, all’acquisizione e al trattamento dei dati. In questo caso, è stato impiegato il programma Bruker Diffrac.eva per l’acquisizione e l’indicizzazione dei picchi di diffrazione.

Per l’analisi Rietveld dei pattern di diffrazione acquisiti è stato utilizzato il software MAUD (Material Analysis Using Diffraction), che permette sia di eseguire un’analisi qualitativa/semi-quantitativa delle fasi utilizzando il metodo Rietveld, sia di ricavare informazioni sui parametri reticolari dei campioni di polvere confrontandoli con quelli forniti dal database COD (Chrystallography Open Database). È importante specificare che MAUD è un programma freeware, quindi facilmente reperibile e scaricabile online.

I raggi X costituiscono una gamma di radiazioni elettromagnetiche estremamente penetranti, caratterizzata da lunghezze d’onda minori di quella della luce visibile, comprese all’incirca tra 10 nm e 0,01 nm.

La diffrazione è un fenomeno che si osserva quando una radiazione elettromagnetica incontra un ostacolo di dimensione paragonabile alla propria lunghezza d’onda.

Ogni elettrone di ogni atomo del campione, sia esso mono o poli cristallino, diventa un centro diffusore secondario di raggi X alla stessa  $\lambda$  del fascio incidente (diffusione elastica) [12].

L’interferenza tra le radiazioni diffratte da ogni elettrone risulta costruttiva quando le onde diffuse generate dal reticolo cristallino sono in coincidenza di fase e le condizioni geometriche che garantiscono tale interferenza sono state espresse in due forme equivalenti: a) condizioni di von Laue e b) legge di Bragg.

Il risultante spettro di diffrazione, comprendente sia le posizioni che le intensità degli effetti della diffrazione, è una proprietà fisica fondamentale della sostanza, utile non solo per una sua rapida identificazione, ma anche per una completa interpretazione della sua struttura.

Tale analisi porta alla conoscenza della misura, della forma e dell'orientamento della cella elementare.

Per stabilire le posizioni degli atomi individuali nella cella, debbono essere misurate ed analizzate le intensità dei picchi costituenti lo spettro di diffrazione. Il fattore più importante per stabilire una relazione tra le posizioni atomiche e l'intensità della diffrazione è il fattore di struttura.

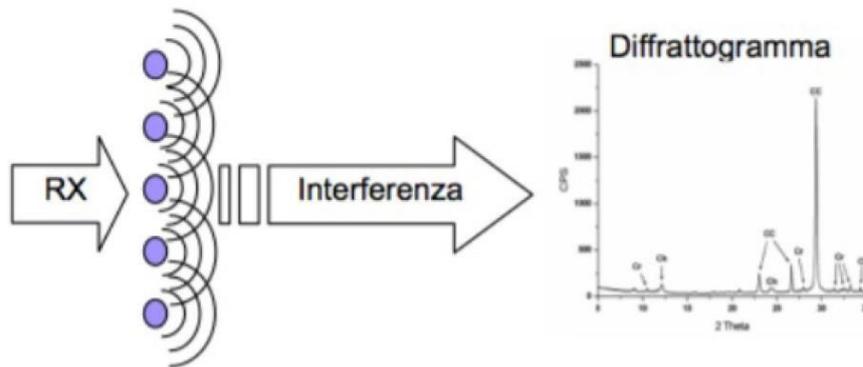


Figura 21 Schema della diffrazione: a sinistra interazione della radiazione X con gli atomi, a destra esempio di diffrattogramma da poli cristallo

Questa procedura parte quindi dal presupposto che ogni prodotto solido cristallino è costituito da piani reticolari, ciascuno dei quali caratterizzato da una certa densità di particelle. La distanza ( $d$ ) fra i piani reticolari tra loro paralleli ha un valore costante e varia passando da una serie di piani ad un'altra ed è tipico di ciascuna sostanza.

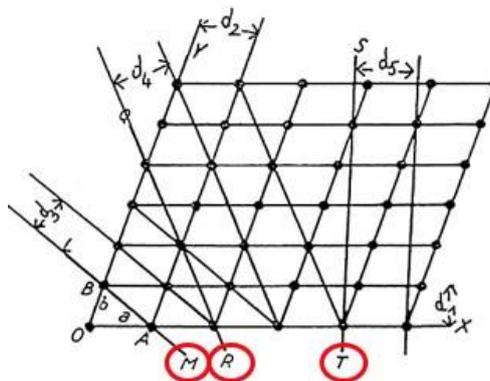


Figura 22 Distanze reticolari

Ogni prodotto solido cristallino è caratterizzato dall'aver una serie di distanze reticolari ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ , ecc.) che sono tipiche di quel prodotto, in quanto dipendono dal tipo di reticolo e dalla dimensione degli atomi o degli ioni. Questa serie di valori  $d_1, d_2, d_3, d_4$ , ecc. è una sorta di impronta digitale di un determinato prodotto cristallino, poiché due distinti prodotti solidi potranno avere al massimo due o tre distanze reticolari simili o uguali, ma non tutte le distanze coincidenti tra loro.

L'XRD vuole sfruttare questo fatto per identificare un prodotto solido cristallino sconosciuto, tenendo conto che le distanze fra i piani di un reticolo cristallino sono dell'ordine di grandezza necessaria a diffrangere i raggi X.

Bragg introdusse il concetto di "riflessione" dei raggi X. Osservò che le onde diffratte si allontanano dal reticolo come se fossero "riflesse" dal piano reticolare. Il potere riflettente di ogni singolo piano è molto debole, ma l'onda riflessa complessivamente, originata da quelle riflesse da un gran numero di piani paralleli, può diventare di intensità rilevabile se le onde si rafforzano perché in fase tra loro.

La legge di Bragg enuncia che solo per certi valori dell'angolo d'incidenza  $\theta$  della radiazione si ottiene riflessione:

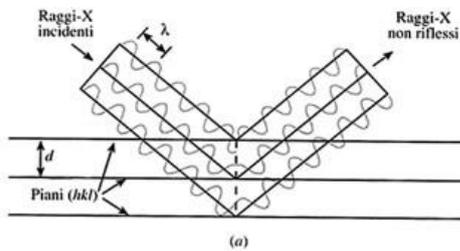
$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

dove

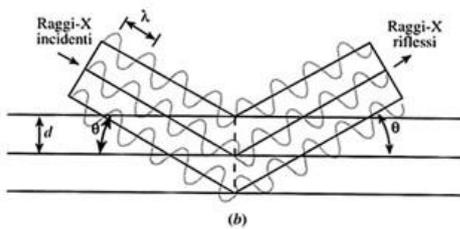
- $\lambda$  è la lunghezza d'onda dei raggi X utilizzati;
- $d$  è la spaziatura tra un particolare insieme di piani;
- $\theta$  è l'angolo di incidenza a cui viene misurato un picco di diffrazione;
- $n$  è un intero che rappresenta l'"ordine armonico" della diffrazione. A  $n=1$ , ad esempio, abbiamo la prima armonica, il che significa che il percorso dei raggi X diffratti attraverso il cristallo è esattamente  $1\lambda$ , mentre a  $n=2$ , il percorso diffratto è  $2\lambda$ .

Poiché le distanze reticolari sono caratteristiche di ogni composto, data una miscela di sostanze solide cristalline, la diffrattometria di raggi X permette di individuare con estrema precisione quali siano i singoli composti.

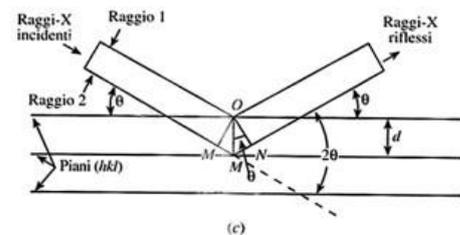
Riflessione di un fascio di raggi X sui piani (hkl) di un cristallo:



(a) per un angolo di incidenza arbitrario non viene prodotto nessun raggio riflesso;



(b) per un angolo di incidenza  $\theta$  che soddisfa la legge di Bragg i raggi riflessi sono in fase e si rinforzano;



(c) simile a (b), solo che la rappresentazione dell'onda è stata omessa.

Dai valori degli angoli corrispondenti ai picchi si risale ai relativi valori delle distanze reticolari; tramite il confronto con valori tabulati è poi possibile riconoscere il composto.

### 2.2.2 Procedura operativa

All'inizio dell'esperimento, il campione di polvere da investigare è stato collocato su una lastrina porta-campione e collocato nello strumento. Quando il raggio incidente proveniente dalla sorgente di raggi X colpisce il campione, la diffrazione ha luogo in tutte le possibili orientazioni  $2\theta$ : i raggi diffratti possono essere rilevati usando un rivelatore mobile (detector).

La produzione dei raggi X avviene tramite un sistema ad anodo rotante. Il suo funzionamento è molto simile a quello di un tubo da vuoto (tubo di Coolidge): un filamento di tungsteno (catodo) viene surriscaldato attraverso una corrente dell'ordine dell'Ampère in una camera in condizioni di alto vuoto (pressione da vuoto dell'ordine

105 Pa) che, per effetto termoionico, emette elettroni. Questi elettroni vengono accelerati tramite una differenza di potenziale di varie decine di kV (fino a 60 kV), dal catodo verso l'anodo, l'impatto di questi elettroni altamente energetici con l'anodo di metallo, che viene continuamente raffreddato con acqua, produce raggi X che vanno a colpire il campione.

La caratterizzazione strutturale delle polveri è stata effettuata sulla base dei seguenti passaggi:

- acquisizione degli spettri di diffrazione dei campioni;
- indicizzazione dei picchi di diffrazione mediante software di analisi.

Tramite il software Diffpac sono stati indicizzati i picchi di diffrazione ed estratte informazioni riguardanti le fasi costituenti il campione; la posizione dei picchi e la loro intensità sono infatti una "impronta digitale" della sostanza cristallina che si sta analizzando. Confrontando tali informazioni ricavate dal diffrattogramma con le schede disponibili in apposite banche dati di Diffpac, è stato possibile caratterizzare la miscela identificando i composti presenti nel campione di polvere in esame e la loro struttura cristallina.

## **2.3 TERMOGRAVIMETRIA**

La termogravimetria o analisi termogravimetrica (TGA) [13][14] è una tecnica sperimentale di caratterizzazione dei materiali rientrante nella più ampia famiglia dell'analisi termica.

La tecnica consiste nella misurazione continua nel tempo della variazione di massa di un campione di materiale in funzione del tempo stesso (isoterma) o della temperatura (rampa di riscaldamento/raffreddamento), in condizioni di atmosfera controllata, inerte, riducente od ossidante.

Il risultato di tale analisi, generalmente indicato come Termogramma o Curva di Decomposizione Termica, è un grafico nel quale viene riportata la variazione di peso (asse Y), in valore assoluto o percentuale, in funzione del tempo o della temperatura (asse X).

### **2.3.1 Analisi termogravimetrica (TGA)**

Si basa sulla misura, in funzione della temperatura  $T$ , del peso di un campione posto in un forno riscaldato a velocità costante. Si ottiene una curva a gradini dalla quale si possono valutare quantitativamente le variazioni di peso del campione.

L'apparecchiatura è costituita essenzialmente da un forno, un programmatore di temperature, un registratore e una bilancia analitica. Le variazioni di peso del campione sono misurate valutando la forza necessaria per riportare in posizione orizzontale il braccio della bilancia e la deflessione del braccio.

Il segnale inviato dalla bilancia convertito e opportunamente amplificato, viene registrato contemporaneamente a quello inviato da una termocoppia posta a contatto col campione.

Registrando in funzione della temperatura (o del tempo) la derivata rispetto al tempo delle variazioni del peso del campione si ottengono una serie di picchi (DTG), le cui aree sono proporzionali alle variazioni di peso del campione.

La curva DTG permette di rilevare quelle piccole variazioni di pendenza, cioè di variazione di velocità di trasformazione che possono non essere rilevate dalla TG.

I punti di inizio, di fine e di massimo dei picchi DTG hanno un preciso significato fisico rappresentando rispettivamente le temperature di inizio, di fine e di massima velocità delle trasformazioni.

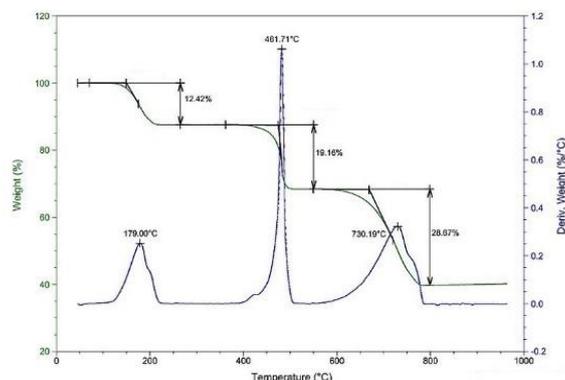


Figura 23 Curva DTG

### 2.3.2 Analisi termica differenziale (DTA)

Quando una sostanza viene riscaldata, possono intervenire delle reazioni le quali avvengono con cessione o assorbimento di calore (reazioni eso/endotermiche).

L'analisi prevede la sistemazione di piccole quantità della sostanza in esame e di una di riferimento in due porta-campioni accoppiati; il riscaldamento delle due sostanze in un forno capace di creare identiche condizioni termiche intorno ai due campioni e la determinazione della differenza di temperatura  $\Delta T$  fra la sostanza in esame e quella di riferimento con termocoppie a contatto con le due sostanze.

La sostanza di riferimento deve essere termicamente inerte nell'intervallo di temperatura esaminato.

I porta-campioni più comuni sono costituiti da crogioli a calice (platino o allumina) da infilare sulle termocoppie. Le termocoppie più comunemente usate sono la cromel/alumel e la platino/platino rodio. La cromel/alumel fornisce un segnale relativamente alto (circa 4 mV per 100 °C) e lineare con la temperatura. Può essere impiegata fino a 800 °C (950 °C in ambiente inerte). La seconda fornisce un segnale molto più debole (circa 1 mV per 100 °C) ma può essere impiegata fino a 1500 °C.

La curva DTA mostra l'andamento del  $\Delta T$  in funzione della temperatura T (o del tempo t). La curva presenta una linea di base che registra il semplice riscaldamento della

sostanza in esame senza che avvengano trasformazioni. Le trasformazioni vengono individuate dalla presenza di picchi verso l'alto o verso il basso o da variazioni di pendenza.

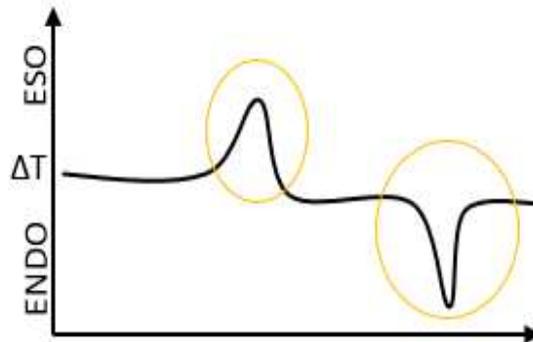


Figura 24 Curva DTA

### 2.3.3 Strumenti



Figura 25 Macchinario per TGA

I principali componenti necessari per lo svolgimento di tale analisi possono essere così riassunti [13][14]:

- Bilancia Termica o Termobilancia: componente chiave atta a monitorare il peso del campione analizzato. La tecnologia comunemente impiegata si basa sull'uso di un sistema di monitoraggio elettronico a fotodiodi, utilizzati per il rilevamento continuo della posizione dei due bracci della bilancia, uno inserito nella fornace contenente il campione e uno sul quale viene posto un porta-campione vuoto di

riferimento. Una variazione di massa del campione produce una deflessione del giogo che interpone un otturatore tra la lampada ed uno dei due fotodiodi. La conseguente variazione di corrente del fotodiodo viene amplificata e inviata ad una bobina situata tra i poli di un magnete permanente.

- Il campo magnetico generato dalla corrente nella bobina riporta il giogo nella sua posizione originale. La corrente amplificata dai fotodiodi viene misurata e tradotta in massa o perdita di massa tramite il sistema di elaborazione.
- Fornace: realizzata generalmente in materiale refrattario (allumina, temperatura di fusione >2000 °C; quarzo, temperatura di fusione >1700 °C; etc.) atto a garantire il raggiungimento di temperature elevate senza rischi di danneggiamento per il materiale stesso.
- Crogioli: contenitori utilizzati per l'inserimento del campione e come contrappeso di riferimento; generalmente in materiale inerte, i più comuni sono realizzati in acciaio (applicazioni per temperature inferiori ai 600-50 °C), platino o allumina.
- Sistema di controllo della temperatura: fondamentale per garantire la corretta realizzazione di differenti programmi termici, dal mantenimento della temperatura (isoterma) ad azioni concatenate di riscaldamento/raffreddamento (rampa di temperatura), gradini termici e molto altro; la misurazione in continuo della temperatura è realizzata mediante l'utilizzo di termocoppie, generalmente in platino rivestite di materiale ceramico, poste all'interno della fornace in prossimità del campione sottoposto ad analisi.
- Sistema di ventilazione e ricircolo dei gas: utile a condizionare e mantenere controllata l'atmosfera all'interno della fornace ed eliminare eventuali gas prodotti a seguito della degradazione del materiale analizzato.
- Sistema di registrazione in continuo del peso del campione.

#### **2.3.4 Procedura operativa**

La strumentazione necessita di controllo e calibrazione e ogni elemento viene opportunamente tarato. Nel forno il campione viene riscaldato progressivamente dalla temperatura ambiente a 25 °C fino ad oltre 1000 °C con un incremento di 10 °C/min.

## 2.4 POROSIMETRIA

Come in tutti i materiali da costruzione, la porosità è un fattore importante nella comprensione della formazione, della struttura e dell'uso di molte sostanze in quanto ne influenza le caratteristiche fisiche e di conseguenza il comportamento meccanico.

Nei ceramici tradizionali la formazione della microstruttura è strettamente legata, oltre che alle materie prime, alle tecniche di fabbricazione, in particolare alle fasi di essiccamento e di cottura. Infatti, nella prima fase avviene lo smaltimento dell'acqua in eccesso, producendo un avvicinamento delle particelle. Questo genera un ritiro del materiale e la formazione di un reticolo di pori sia interconnessi sia chiusi [15].

Infine, nella fase di cottura, avvengono delle trasformazioni irreversibili che portano alla formazione di composti stabili e resistenti con ulteriore riduzione della porosità.

Distinguiamo i prodotti a pasta porosa, cioè permeabili e soggetti a maggiore usura (quali terrecotte, laterizi, refrattari, maioliche, terraglie) e i prodotti a pasta compatta, impermeabili e dotati di maggiore resistenza all'usura (gres e porcellane).

I mattoni di argilla cotta sono mezzi porosi. Un laterizio ha generalmente una percentuale di vuoti che varia nell'intervallo 30÷40% e un diametro medio dei pori compreso tra 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$  [16].

Una tecnica per valutare la dimensione e la distribuzione dei pori è la porosimetria ad intrusione di mercurio (Mercury Intrusion Porosimetry - MIP) [17] che permette di analizzare la specifica porosità di un materiale quantificandola in base a dati relativi al diametro dei pori, al volume totale dei pori, alla loro area superficiale, alla densità di bulk (il rapporto tra la massa del solido e il volume totale da esso occupato) e alla densità assoluta.

Il metodo consiste nell'intrusione forzata di mercurio in campioni di circa 1  $\text{cm}^3$  di volume. Il mercurio essendo un metallo liquido "non bagnante", cioè con un angolo di contatto maggiore di 90°, non può penetrare naturalmente all'interno della matrice

porosa. Pertanto attraverso l'applicazione di una pressione esterna, il liquido è in grado di infiltrarsi all'interno del materiale e raggiungere le cavità più piccole.

La pressione necessaria per permettere l'ingresso del mercurio nella matrice porosa è legata al diametro dei pori, la cui relazione è espressa dall'equazione di Washburn:

$$P_L - P_G = \frac{4\sigma\cos\theta}{D_p}$$

dove

- $P_L$  è la pressione del liquido rilevata, in MPa;
- $P_G$  è la pressione del gas presente all'interno dei pori, pari a 0 atm in quanto il liquido viene introdotto nel campione posto sottovuoto;
- $\sigma$  è la tensione superficiale del liquido, pari a 480 nN/m, per il mercurio sottovuoto a 20 °C;
- $\theta$  è l'angolo di contatto di intrusione del liquido, approssimato a 140° per il mercurio;
- $D_p$  è il diametro dei pori, in  $\mu\text{m}$ .

In base alle debite sostituzioni e approssimazioni, l'equazione di calcolo del diametro dei pori è ottenuto dalla seguente formula:

$$D_p = \frac{1470 (kPa \cdot \mu\text{m})}{P_L}$$

La pressione è inversamente proporzionale alla dimensione dei pori: per penetrare in pori di grandi dimensioni è richiesta solo una leggera pressione mentre pressioni molto maggiori sono necessarie per forzare il mercurio in pori piccoli.

A questo punto, conoscendo la dimensione del diametro dei pori, si calcola il volume dei vuoti e facendo il rapporto con il volume totale del provino si individua la porosità:

$$\phi = \frac{V_v}{V_{tot}}$$

dove

- $V_v$  è il volume dei vuoti, in  $\text{mm}^3$ ;
- $V_{tot}$  è il volume totale del provino, in  $\text{mm}^3$ .

## 2.4.1 Strumenti



Figura 26 Porosimetro

Lo strumento utilizzato per eseguire la prova è un Thermo Fisher 240 Pascal, operante tra pressioni di 0,1 MPa e 200 MPa. Si tratta di un penetrometro a mercurio, costituito da un bulbo porta-campioni connesso a un gambo con capillare forato in vetro e rivestito di metallo [17].

Il campione viene posto nella coppa; durante l'analisi il mercurio riempie sia il capillare che il bulbo. L'aumento della pressione nel penetrometro costringe il mercurio ad intrudere nei pori del campione, cominciando da quelli di maggior diametro. Il mercurio all'interno del capillare diminuisce e così anche la capacità. La diminuzione di capacità è proporzionale al volume di mercurio che lascia il capillare ad ogni variazione di pressione.



Figura 27 Bulbo porta-campioni

## 2.4.2 Procedura operativa

Per la prova sono stati prelevati campioni di circa 10x10x10 mm per ogni tipologia di impasto dai provini utilizzati nei test di resistenza meccanica.

I provini sono stati messi in stufa ad una temperatura di  $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  per garantire la perdita d'acqua contenuta del provino e raggiungere così una condizione secca a massa costante, senza andare a compromettere la natura degli stessi.

La misura della porosimetria a mercurio è l'intrusione progressiva del mercurio nella struttura dei pori di campioni solidi o in polvere in condizioni di pressione strettamente controllate. Dai dati di pressione verso quelli di intrusione, lo strumento genera distribuzioni di volume e dimensioni utilizzando l'equazione di Washburn. Chiaramente più accurata è la misura della pressione più preciso sarà il risultato. In questo modo la dimensione dei pori presenti nel provino può essere determinata in base alla pressione esterna necessaria per forzare il mercurio in un poro, contro la forza opposta alla tensione superficiale del mercurio stesso.

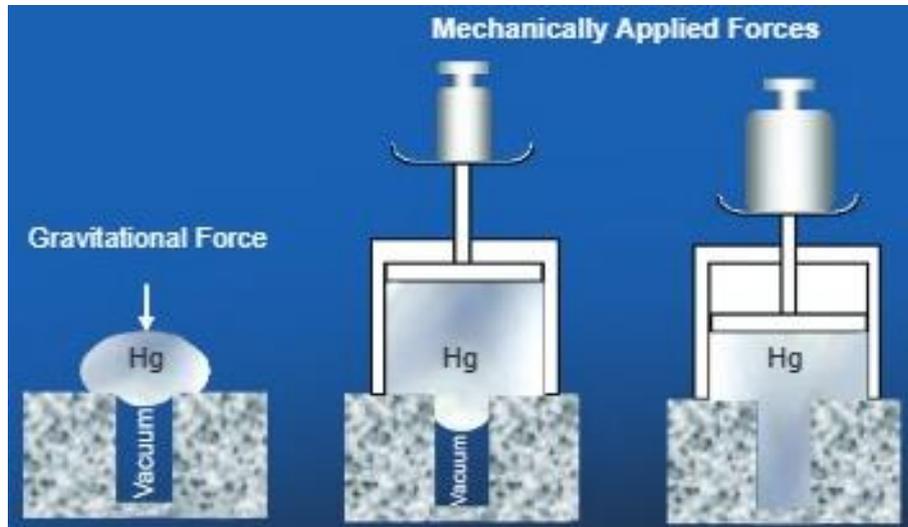


Figura 28 Schema del funzionamento del penetrometro

## 2.5 PROVA PUNDIT AD ULTRASUONI

La prova a ultrasuoni fa parte delle prove non distruttive, ovvero di quelle prove che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame.

Si basa sulla propagazione di onde elastiche all'interno del materiale. In questo modo è possibile avere una stima delle caratteristiche meccaniche della struttura da indagare poiché la velocità di propagazione delle onde in un materiale dipende dalla sua densità, dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson.

Con l'applicazione di questa tecnica si possono ottenere informazioni sulle caratteristiche elasto-meccaniche del mezzo, ossia: il livello di omogeneità del materiale, la sua qualità ed eventuale grado di deterioramento, l'individuazione di "anomalie" quali vuoti o inclusioni.

### 2.5.1 Onde ultrasoniche

Il suono è un'oscillazione, cioè un movimento nello spazio, compiuta dalle particelle in un mezzo; è un'onda elastica, quindi comporta delle deformazioni reversibili. Anche gli ultrasuoni sono onde meccaniche elastiche, ma differiscono dai suoni per le frequenze, che sono superiori a quelle che caratterizzano il fenomeno sonoro; per questo si chiamano ultrasuoni, cioè al di là del suono, oltre il fenomeno fisico udibile dall'essere umano.

La frequenza di 20 kHz divide convenzionalmente le onde soniche da quelle ultrasoniche. Gli ultrasuoni si propagano meglio nei solidi e non si propagano affatto nel vuoto e dal punto di vista fisico sono alterazioni reversibili del mezzo attraversato.

Come tutti i fenomeni ondulatori, anche gli ultrasuoni sono soggetti a fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione.



Figura 29 Onde soniche e onde ultrasoniche

La prova, descritta dalla norma UNI EN 12504-4:2005 [18], si basa sul principio di propagazione delle onde elastiche longitudinali.

Il suono è una tipica onda longitudinale prodotta in un mezzo elastico da un corpo che vibra a una certa frequenza; la velocità di propagazione dipende dalle caratteristiche elastiche del mezzo.

Lo scopo è quello di misurare la velocità di propagazione delle onde nei vari provini per poi ricavarne il modulo elastico dinamico  $E_d$ .

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

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

## 2.5.2 Strumenti



Figura 30 Strumento Pundit per prova ad ultrasuoni

Lo strumento utilizzato per le misure ultrasoniche è il PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester), il quale si compone di una serie di unità che assolvono ognuna un compito specifico:

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

In sintesi, tale strumento è dotato di un trasduttore trasmittente, che trasmette l'impulso ultrasonico al materiale oggetto di studio e di uno ricevente, il quale capta l'impulso ultrasonico che ha attraversato il mezzo, trasformandolo in segnale elettrico.

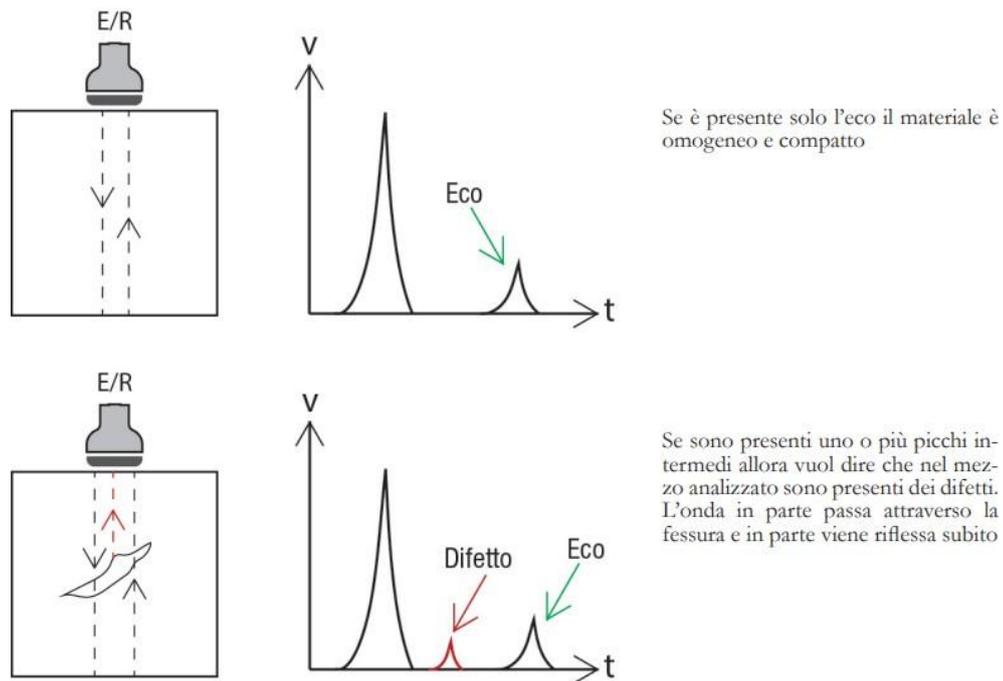


Figura 31 Riflessione dell'onda ultrasonica

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

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

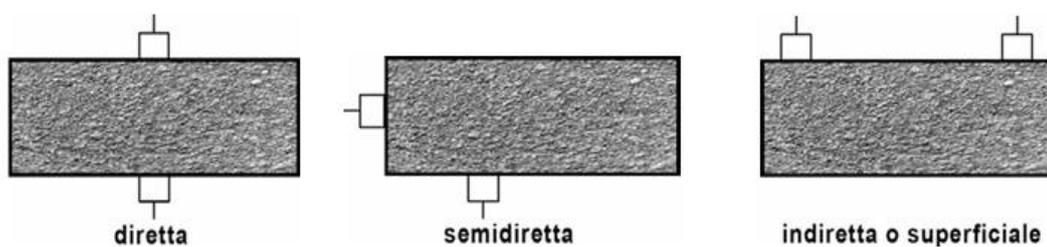


Figura 32 Modalità di trasmissione dell'onda ultrasonica

Poiché la vibrazione ultrasonica è disturbata dalla più piccola imperfezione e discontinuità, occorre assicurare un buon contatto tra la superficie del mezzo e le sonde. Il materiale che dovrà essere interposto tra la superficie della sonda e la superficie del mezzo da indagare viene chiamato mezzo di accoppiamento, il quale può essere scelto tra vari materiali come la vaselina, il grasso, la pasta di caolino/glicerina o la plastilina.

### 2.5.3 Procedura operativa

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

- **Calibrazione:** Il primo passo da compiere prima di effettuare la prova è la calibrazione del rilevatore a ultrasuoni. La regolazione della calibrazione del misuratore si effettua collegando le due sonde (della stessa frequenza) al connettore mediante apposito cavo. Dopo di che si accoppiano le sonde al blocco di calibrazione, utilizzando lo stesso mezzo accoppiante che sarà utilizzato nelle prove. A questo punto si agisce sul regolatore fintanto che sullo schermo non compare l'esatta misura ( $25,3 \mu\text{s}$ ). Lo strumento deve essere ricalibrato ogni qualvolta sia cambiata la coppia di sonde o si spenga e si riaccenda lo strumento.



*Figura 33 Modalità di posizionamento delle sonde sul blocco di calibrazione*

- **Preparazione della superficie:** La superficie del mezzo su cui saranno applicate le sonde deve essere pulita, liscia e regolare; nel caso in cui risultasse ruvida e/o irregolare deve essere resa idonea mediante levigatura. Viene quindi applicata sulla superficie del campione che andrà a contatto con le sonde un mezzo accoppiante, in questo caso è stata scelta la vaselina.
- **Applicazione delle sonde:** È opportuno assicurarsi che le sonde siano ben accoppiate alla superficie dell'elemento di prova e che rimangano ben premute

contro il materiale finché non si stabilizza la lettura del tempo di propagazione sullo schermo.

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



Figura 34 Fase di misurazione

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

Il modulo elastico dinamico è ottenuto tramite la valutazione della velocità di attraversamento delle onde ultrasoniche effettuata sui provini. Si sfrutta la relazione esistente tra il modulo elastico dinamico del materiale e la velocità con la quale le onde ultrasoniche, applicate in questo caso con una frequenza di 50 kHz, lo attraversano, come espresso dalla formula:

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

dove

- $v$  è la velocità delle onde, in m/s;
- $E_d$  è il modulo di elasticità dinamico, in N/m<sup>2</sup>;

- $\rho$  è la massa volumica del materiale, in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $k$  è una costante dipendente dal modulo di Poisson ( $\nu$ ), supposto pari a 0,30 per i provini di matrice inorganica e di laterizio.

La velocità di propagazione delle onde dipende dal tempo di volo e dalla lunghezza del percorso delle onde stesse, secondo l'equazione:

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

dove

- $v$  è la velocità di propagazione degli impulsi, in  $\text{Km/s}$ ;
- $L$  è la lunghezza del percorso, in  $\text{mm}$ ;
- $t$  è il tempo impiegato dall'impulso per attraversare la lunghezza, in  $\mu\text{s}$ .

La massa volumica del materiale, invece, è valutata dividendo il peso di ciascun provino per il proprio volume apparente:

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

dove

- $\rho$  è la massa volumica del materiale, in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $m$  è la massa del provino, in  $\text{kg}$ ;
- $V$  è il volume apparente del provino, in  $\text{m}^3$ .

## 2.6 RESISTENZA A COMPRESSIONE

Il requisito più importante richiesto ai materiali da costruzione nelle normali applicazioni è la resistenza a compressione. Una elevata resistenza a compressione, infatti, denota la presenza di una massa compatta, con una bassa presenza di vuoti o irregolarità al suo interno, e garantisce prestazioni elevate anche sotto tutti gli altri aspetti.

Più il materiale è compatto ed omogeneo, maggiore sarà non solo la sua capacità di resistere all'azione degli agenti aggressivi ma anche la sua resistenza meccanica.

### 2.6.1 Strumenti



*Figura 35 Pressa idraulica*

La prova di compressione, descritta dalla norma UNI EN 772-1:2015 [19], utilizza una pressa idraulica munita di cella di carico, collegata ad un terminale.

La cella di carico utilizzata è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione che permette di ottenere i valori relativi alla forza applicata (kN), da cui si ottiene il valore della tensione massima a compressione.

Il dispositivo è costituito da due piastre di appoggio, una sottostante e l'altra sovrastante il provino, e da perni metallici che contribuiscono al contenimento laterale del provino. La piastra superiore è in grado di allinearsi alla superficie del provino non appena essa tocca il campione e ha una superficie di 40x40 mm e spessore di 10 mm. Essa restituisce uniformemente al provino lo sforzo di compressione impresso dal pistone meccanico. La piastra sottostante è costituita invece da un blocco piano non basculante.



*Figura 36 Supporto per la rottura a compressione*

### **2.6.2 Procedura operativa**

Requisito fondamentale per una corretta esecuzione della prova è quello di garantire la planarità delle facce del provino sottoposte a compressione, così come indicato dalla norma UNI EN 772-1.

Si dispone il provino su una superficie rigida e si verifica la complanarità delle facce mediante una livella a bolla. Qualora il provino risulti non planare si procede alla rettifica delle superfici ponendo uno strato di gesso, il quale viene successivamente levigato con carta vetrata a grana grossa una volta asciutto. Si continua a levigare fino a quando le facce risultano perfettamente piane, controllando l'operazione con la livella.



Figura 37 Stesura di uno strato gesso sui provini per conferire planarità

Si procede al controllo dimensionale (lunghezza e larghezza) delle facce dei provini sottoposte a compressione utilizzando un calibro.

Il provino viene posizionato sulla macchina con le facce lisce a contatto con l'acciaio del dispositivo, facendo attenzione al centramento del provino rispetto alle piastre.

Si applica il carico senza urti progressivamente fino ad arrivare a rottura.

Attraverso il terminale collegato alla pressa si ricavano i valori di carico, in KN, e i valori di deformazione assiale. Da essi si ottiene il valore della tensione massima a compressione.

La resistenza a compressione è ottenuta dividendo la forza  $F$  per la superficie  $S$  sulla quale essa è stata applicata secondo la formula:

$$R_c = \frac{F}{S} [MPa]$$

dove

- $R_c$  è la resistenza a compressione, in MPa;
- $F$  è il carico applicato, in kN;
- $S$  è la superficie del provino, in mm<sup>2</sup>.



Figura 38 Rottura di un provino a compressione

## 2.7 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRECTA

La prova di trazione indiretta consiste nel comprimere trasversalmente un provino cilindrico portandolo a rottura per fessurazione parallela alla direzione di compressione. Infatti, per effetto Poisson, il provino cercherà di espandersi andando in trazione quasi uniforme per tutta la sezione mediana.

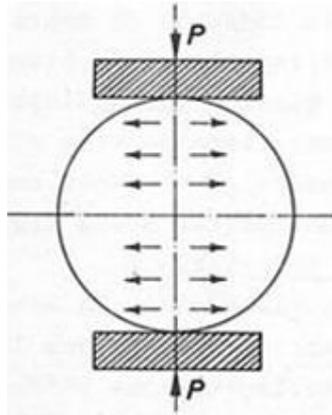


Figura 39 Schema di diffusione delle tensioni in una prova a trazione indiretta

### 2.7.1 Strumenti



Figura 40 Pressa idraulica

La prova di trazione indiretta, descritta dalla norma ASTM D3967:2005 [20], utilizza una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale. La cella di carico utilizzata è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione che permette di ottenere i valori relativi alla forza applicata (kN).



*Figura 41 Supporto per rottura a trazione indiretta*

Il supporto per rottura a trazione indiretta è costituito da due rulli di sostegno di acciaio di lunghezza compresa tra 45 e 50 mm e diametro di  $10 \pm 0,5$  mm, distanziati l'un dall'altro di  $100 \pm 0,5$  mm, ed un terzo rullo di acciaio avente la stessa lunghezza e diametro e posizionato centralmente tra i rulli di sostegno.

I tre piani verticali attraversanti gli assi dei tre rulli devono essere paralleli, equidistanti e perpendicolari alla direzione del prisma sottoposto alla prova.

Uno dei rulli di sostegno e il rullo di carico devono essere in grado di inclinarsi leggermente per consentire un'uniforme distribuzione del carico lungo la larghezza del prisma senza sottoporlo ad alcun sforzo torsionale.

### **2.7.2 Procedura operativa**

Il campione deve essere posizionato con una delle facce lisce sui rulli di sostegno.

Si applica il carico in controllo di spostamento fino alla rottura del provino in due metà.

Si applica il carico senza urti a velocità costante tra 100 e 50 N/s in modo da ottenere la rottura in un periodo di tempo compreso tra 30 e 90 s.

Attraverso il terminale collegato alla pressa si ricavano i valori di carico, in KN, ed i valori di deformazione verticali misurati durante la prova. Da essi si ottiene il valore di tensione massima.

La resistenza a trazione indiretta si ottiene mediante la formula:

$$R_t = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times H} [MPa]$$

dove

- $R_t$  è la resistenza a trazione indiretta, in MPa;
- $F$  è il carico applicato, in kN;
- $L$  è la lunghezza della linea di contatto del provino, in mm;
- $H$  è la dimensione nominale della sezione, in mm.



Figura 42 Rottura dei provini a trazione

## 2.8 INITIAL RATE OF ABSORPTION (IRA)

Il tasso iniziale di assorbimento o IRA è definito come il numero di grammi di acqua assorbiti in un minuto su 30 pollici quadrati di superficie del letto di mattoni (ASTM C67/C67M [23]). È un valore importante perché da esso dipende la posa in opera del mattone in cantiere.

Il mattone a secco con un IRA elevato ( $>3 \text{ g/min/200 cm}^2$ , i valori accettabili di IRA vanno da 1 a  $3 \text{ g/min/200 cm}^2$ ) deve essere bagnato prima della posa. Se l'assorbimento dell'acqua avviene in meno di un minuto e mezzo, il mattone va inumidito prima della posa. Se un mattone è troppo secco, assorbirà troppa acqua dalla malta applicata, indebolendo il legame.

Per spiegare perché l'IRA del mattone ha un effetto variabile sulla forza di adesione flessionale dell'assemblaggio, lo studioso McGinley ha esaminato il meccanismo mediante il quale la malta si lega al mattone [24].

Gli studi indicano che l'adesione tra malta e mattone è dovuta principalmente all'interconnessione meccanica dei prodotti di idratazione del cemento che crescono nei pori del mattone e sulla superficie del mattone, e quelli legati alla pasta di malta.

Un IRA più elevato produrrà una maggiore penetrazione della pasta di malta nel mattone e, quindi, una maggiore forza di adesione. Tuttavia, se l'IRA è troppo alto, la forza di adesione sarà ridotta a causa di un aumento delle microfessurazioni indotte dal ritiro all'interfaccia mattone/malta. Un'ovvia estensione di queste teorie suggerirebbe che vi è una bassa penetrazione della pasta di malta in un mattone con basso IRA e di conseguenza minori forze di adesione.

È generalmente riconosciuto che l'IRA del mattone riduce la resistenza del legame alla flessione se è troppo alta o troppo bassa.

Con una malta a basso flusso, è ovvio che all'interfaccia sarà disponibile acqua sufficiente per una buona adesione su un intervallo più ristretto di mattone IRA. Lo scorrimento della malta e il tasso iniziale di assorbimento del mattone influenzano entrambi l'acqua disponibile all'interfaccia e, pertanto, influenzano entrambi la forza di adesione a trazione flessionale dell'assemblaggio. Il mattone ad alto IRA richiederà una malta ad alto flusso per fornire condizioni ottimali per lo sviluppo del legame a flessione.

La dipendenza del legame flessionale da una combinazione di flusso di malta e mattone IRA è, almeno in parte, confermata dall'indagine sperimentale che ha mostrato un aumento significativo della forza di adesione del mattone ad alto IRA con flussi di malta crescenti.

### **2.8.1 Procedura operativa**

Per effettuare la prova per prima cosa occorre essiccare i provini in stufa a 105 °C per 24 h e successivamente farli raffreddare a temperatura ambiente.

Determinare le dimensioni (lunghezza e larghezza) della superficie piana del provino che sarà a contatto con l'acqua e pesare i provini.

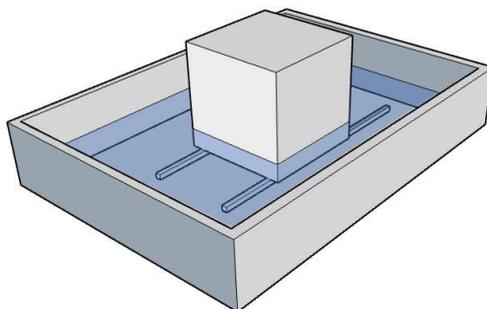
Regolare la posizione del vassoio per il test di assorbimento in modo che la superficie superiore del suo fondo sia livellata quando viene testato con una livella a bolla d'aria e sistemare il mattone di riferimento sui supporti.

Aggiungere acqua fino a quando il livello dell'acqua è  $3,00 \pm 0,25$  mm sopra la parte superiore dei supporti.

Dopo aver rimosso il mattone di riferimento, posizionare il mattone di prova in posizione piana, contando come tempo zero il momento di contatto del mattone con l'acqua.

Durante il periodo di contatto ( $1 \text{ min} \pm 1 \text{ s}$ ) mantenere il livello dell'acqua entro i limiti prescritti, aggiungendo acqua secondo necessità. Alla fine di  $1 \text{ min} \pm 1 \text{ s}$ , sollevare il mattone, pulire l'acqua superficiale con un panno umido e ripesare il mattone.

La pulizia deve essere completata entro 10 s dalla rimozione dal contatto con l'acqua e la pesatura deve essere completata entro 2 min.



*Figura 43 Schematizzazione della prova IRA*

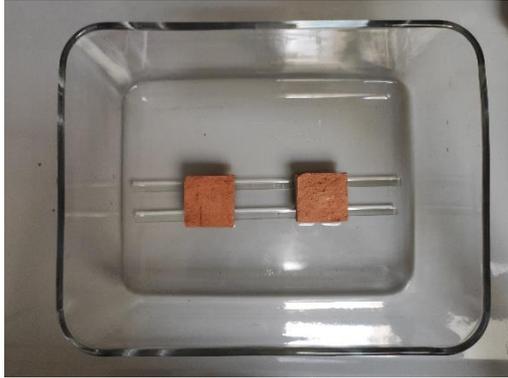


Figura 44 Provini sottoposti alla prova IRA

La differenza di peso in grammi tra la pesatura iniziale e quella finale è il peso in grammi di acqua assorbita dal mattone durante il contatto di 1 minuto con l'acqua.

Quando l'area della sua superficie piana differisce di più di 5 cm<sup>2</sup> (62,5%) da 200 cm<sup>2</sup>, calcolare l'equivalente aumento di peso da 200 cm<sup>2</sup> di ciascun campione allo 0,1 g più vicino come segue:

$$X = \frac{200W}{LB} [g/min/200cm^2]$$

dove:

- X è l'aumento di peso corretto sulla base di un'area piana di 200 cm<sup>2</sup>;
- W è il guadagno effettivo in peso del campione, in g;
- L è la lunghezza del provino, in cm;
- B è la larghezza del provino, in cm.

In caso contrario (area della superficie < 200 cm<sup>2</sup>)  $X = W$ .

## 2.9 ASSORBIMENTO D'ACQUA

La prova di assorbimento è una prova che serve a determinare quanta acqua è in grado di assorbire un materiale, in questo caso un laterizio, ed è descritta dalla norma ASTM C67/C67M [21] e dalla UNI EN 771-1 Appendice C [22].

### 2.9.1 Procedura operativa

Per prima cosa, occorre determinare le dimensioni (lunghezza, larghezza e altezza) di ciascun provino. I provini vengono messi in stufa a 105 °C per 24 h e successivamente lasciati raffreddare a temperatura ambiente e pesati.

Il campione asciutto e raffreddato viene immerso in acqua pulita (dolce, distillata o piovana) a una temperatura compresa tra 15,5 e 30 °C per 24 h, assicurandosi che l'acqua sia a contatto con tutte le facce dell'elemento.

Viene rimosso il campione, asciugata l'acqua superficiale con un panno umido e pesato il campione. La pesatura di ciascun campione deve avvenire entro 5 minuti dalla rimozione dello stesso dal bagno.

A questo punto si calcola la percentuale di assorbimento di ciascun provino con la formula:

$$\%Assorbimento = \frac{W_s - W_d}{W_d} * 100$$

dove

- %Assorbimento è la percentuale di assorbimento del campione;
- $W_s$  è il peso del campione saturo, in g;
- $W_d$  è il peso del campione secco, in g.

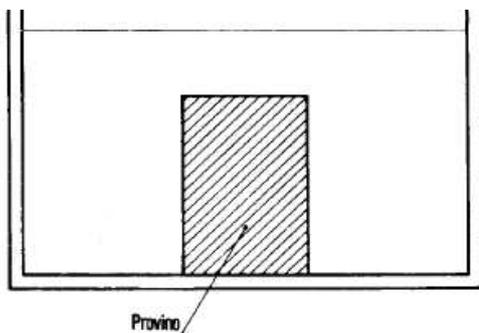


Figura 45 Prova di assorbimento

## 2.10 PROVINI PRELIMINARI

Per determinare la metodologia corretta di realizzazione dei mattoni, sono stati fatti dei provini preliminari, i quali sono stati poi sottoposti alla prova Pundit ad ultrasuoni per l'individuazione del modulo elastico dinamico e alla prova di compressione per determinarne la resistenza meccanica.

Si preparano cinque provini partendo dal blocco di argilla. Questi provini vengono numerati e lasciati 48h ad essiccare all'aria, 24 h ad essiccare in stufa a 105 °C e successivamente vengono cotti in una muffola a 900 °C per 8 h, di cui 6 h per raggiungere la temperatura di 900 °C (con una rampa di circa 2,4 °C/min) e 2 h di mantenimento a tale temperatura.

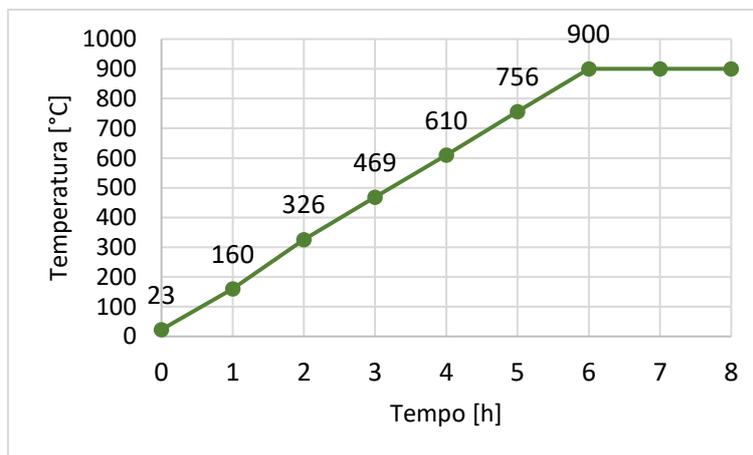


Grafico 1 Andamento della temperatura in funzione del tempo

Dopo la cottura, i campioni vengono lasciati raffreddare fino alle condizioni ambientali (20 °C).



Figura 46 Blocco di argilla



Figura 47 Provino preliminare

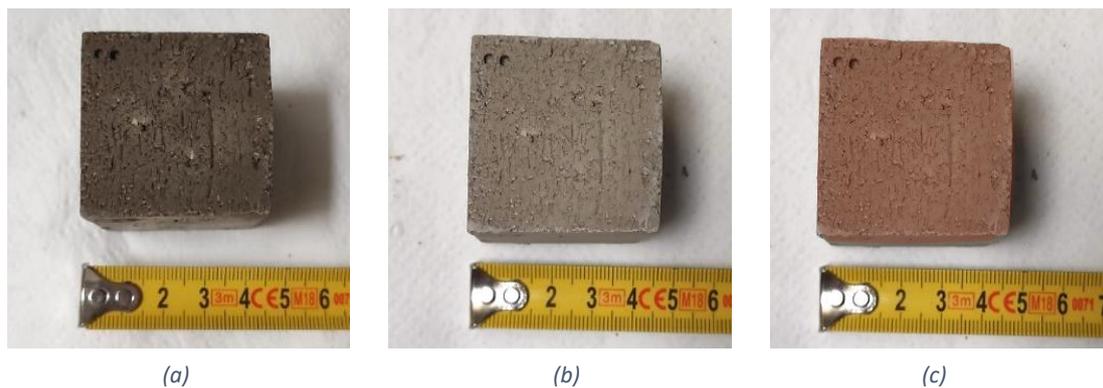


Figura 48 Provino preliminare messo ad essiccare all'aria per 48 h (a), in stufa per 24 h (b) e cotto (c)

Si preparano altri tre provini, sempre partendo dal blocco di argilla, ma questa volta i provini vengono posti in una pressa così da esercitare una pressione sui provini stessi e renderli più compatti.



Figura 49 Provino sottoposto a pressione

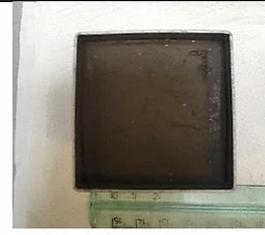


Figura 50 Provino preliminare pressato (a), essiccato all'aria per 48 h (b), in stufa per 24 h (c) e cotto (d)

Una volta cotti, i provini sono sottoposti alla prova Pundit per calcolare il modulo elastico dinamico e successivamente alla prova a compressione per calcolare la resistenza meccanica a compressione.

Di seguito si riporta una tabella (Tabella 5) con i valori delle dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini realizzati.

N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 PESO [g]: 129,75	 PESO [g]: 114,07 %perdita peso 0-48h: 12,08	 PESO [g]: 112,07 %perdita peso 48h-24h: 1,75	 PESO [g]: 104,80 %perdita peso 24h-cottura: 6,49 Dim [mm]: 38x39x39
2	 PESO [g]: 120,31	 PESO [g]: 105,95 %perdita peso 0-48h: 11,94	 PESO [g]: 103,85 %perdita peso 48h-24h: 1,98	 PESO [g]: 97,07 %perdita peso 24h-cottura: 6,53 Dim [mm]: 38x38x39
3	 PESO [g]: 119,26	 PESO [g]: 103,64 %perdita peso 0-48h: 13,10	 PESO [g]: 101,76 %perdita peso 48h-24h: 1,81	 PESO [g]: 94,68 %perdita peso 24h-cottura: 6,96 Dim [mm]: 37x38x39

4				
	PESO [g]: 128,02	PESO [g]: 112,69 %perdita peso 0-48h: 11,97	PESO [g]: 110,33 %perdita peso 48h-24h: 2,09	PESO [g]: 102,60 %perdita peso 24h-cottura: 7,01 Dim [mm]: 38x38x39
5				
	PESO [g]: 170,17	PESO [g]: 155,30 %perdita peso 0-48h: 8,74	PESO [g]: 152,87 %perdita peso 48h-24h: 1,56	PESO [g]: 142,12 %perdita peso 24h-cottura: 7,03 Dim [mm]: 40x40x50
6				
	PESO [g]: 153,75	PESO [g]: 137,76 %perdita peso 0-48h: 10,40	PESO [g]: 135,54 %perdita peso 48h-24h: 1,61	PESO [g]: 125,43 %perdita peso 24h-cottura: 7,46 Dim [mm]: 45x45x47
7				
	PESO [g]: 146,53	PESO [g]: 132,30 %perdita peso 0-48h: 9,71	PESO [g]: 130,33 %perdita peso 48h-24h: 1,49	PESO [g]: 120,62 %perdita peso 24h-cottura: 7,45 Dim [mm]: 45x45x46

8				
	PESO [g]: 151,42	PESO [g]: 135,31	PESO [g]: 133,44	PESO [g]: 123,55
		%perdita peso 0-48h: 10,64	%perdita peso 48h-24h: 1,38	%perdita peso 24h-cottura: 7,41
				Dim [mm]: 46x46x49

*Tabella 5 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini*

## 2.11 PROPORZIONI DEI COMPONENTI

Nel caso oggetto di studio, sono stati realizzati 6 impasti con proporzioni dei componenti differenti, corrispondenti alle percentuali di sostituzione dei sedimenti dragati rispetto all'argilla di riferimento, e per ogni impasto sono stati realizzati 8 provini.

La percentuale di sedimenti dragati utilizzati in parziale sostituzione dell'argilla di riferimento è stata aumentata progressivamente in modo da studiare il comportamento di questi laterizi rispetto al comportamento dei mattoni di riferimento.

Le percentuali di sostituzione studiate sono 0%, 5%, 10%, 15%, 30% e 50% come mostrato in tabella 6.

PERCENTUALI SOSTITUZIONE	%ARGILLA DI RIFERIMENTO	%DS
RIF_0	100	/
DS_5	95	5
DS_10	90	10
DS_15	85	15
DS_30	70	30
DS_50	50	50

*Tabella 6 Percentuali di sostituzione dei DS rispetto all'argilla*

Nella tabella di seguito riportata (Tabella 8), sono identificate le proporzioni dei diversi componenti impiegati nelle miscele:

- l'argilla di riferimento, distinta tra la percentuale della parte fine  $\varnothing < 250 \mu\text{m}$  e la percentuale della parte grossa  $\varnothing > 250 \mu\text{m}$ ;
- i sedimenti dragati DS;
- la sabbia del Po;
- l'acqua.

I quantitativi in massa di ogni materiale sono calcolati considerando le densità specifiche dei materiali, come definito in tabella 7.

<b>MATERIALE</b>	<b>DENSITÀ SPECIFICA [g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>ARGILLA</b>	2,745
<b>DS</b>	2,673
<b>SABBIA</b>	1,460
<b>ACQUA</b>	1,000

*Tabella 7 Densità specifica dei materiali*

<b>PERCENTUALI SOSTITUZIONE</b>	<b>ARGILLA FINE (&lt;250µm) [g/L]</b>	<b>ARGILLA GROSSA (&gt;250µm) [g/L]</b>	<b>DS [g/L]</b>	<b>SABBIA [g/L]</b>	<b>ACQUA [g/L]</b>
<b>RIF_0</b>	178,96	95,54	/	/	21,60
<b>DS_5</b>	170,01	90,76	8,71	2,54	21,60
<b>DS_10</b>	161,07	85,98	17,43	5,08	21,60
<b>DS_15</b>	152,12	81,21	26,14	7,62	21,60
<b>DS_30</b>	125,27	66,88	52,28	15,24	21,60
<b>DS_50</b>	89,48	47,77	87,13	25,41	21,60

*Tabella 8 Proporzione delle componenti per percentuale di sostituzione*

## 2.12 PREPARAZIONE DEI PROVINI

Per la realizzazione dei provini si è proceduto macinando, mediante mortaio e pestello, l'argilla di riferimento lasciata ad essiccare, dopo averla precedentemente pesata e averne calcolato il contenuto di umidità.



*Figura 51 Argilla macinata*

L'argilla così macinata viene setacciata con un setaccio 250  $\mu\text{m}$ , separando la parte fine (il passante <250  $\mu\text{m}$ ) da quella grossa e pesata nuovamente.



*Figura 52 Setaccio <250  $\mu\text{m}$*

In tabella 9 sono riportati i valori dei pesi dell'argilla umida e secca e del conseguente contenuto di umidità ed il peso dell'argilla in seguito alla macinazione e al setacciamento tramite setaccio <250  $\mu\text{m}$ .

Dopo essiccazione all'aria	PESO UMIDO [g]	PESO SECCO [g]	%UMIDITÀ	
RIF	6438	5317	21,60	
Dopo macinazione e setacciamento	PESO [g] PARTE FINE (<250µm)	PESO [g] PARTE GROSSA (>250µm)	%FINE	%GROSSA
RIF	3431	1832	65,20	34,80

*Tabella 9 Pesì e percentuale di umidità dell'argilla dopo essiccazione, macinazione e setacciamento*

Si procede così alla preparazione dei provini, seguendo la procedura seguente, ottimizzata dopo le prove preliminari.

La prima fase consiste nella predisposizione degli stampi di dimensioni 4x4x16 cm.

Gli stampi sono costituiti da un telaio aperto di elementi removibili, formanti, quando assemblati, due scomparti. Le pareti divisorie devono essere abbastanza rigide da prevenire distorsioni o danni ai campioni al momento della rimozione e devono essere fissate a una piastra base rigida.

Il montaggio avviene per incastro dei singoli componenti di acciaio modulari e serraggio attraverso dei tiranti con bloccaggio a dadi ai lati.

La struttura è concepita in modo da contenere l'espansione della miscela quando si esercita una pressione sul provino per favorirne la compattazione.



*Figura 53 Stampi 4x4x16 cm*

Si prosegue con la preparazione dell'impasto.

Si mescolano le diverse componenti (argilla, sedimenti dragati, sabbia silicea del Po e acqua) secondo le proporzioni viste nel capitolo precedente (2.11) e si impasta il tutto fino ad ottenere un composto omogeneo.



*Figura 54 Impasto di argilla, sedimenti dragati, sabbia e acqua*

Si pre-forma il composto e lo si inserisce all'interno dello stampo. Per facilitare la successiva rimozione del provino dallo stampo si utilizza un foglio di pellicola, così che l'impasto non rimanga attaccato allo stampo.



*Figura 55 Inserimento del composto all'interno dello stampo*

Per compattare il provino si dispone lo stampo sul piano di una pressa a colpo in ghisa con sezione quadrata 50x40 cm. La compattazione è molto importante perché serve a minimizzare i vuoti d'aria all'interno del provino. Poiché la pressa idraulica utilizzata non

ha indicatori, si garantisce la stessa pressione per tutti i provini girando manualmente il volante fino a che la piastra semovente non tocca le pareti laterali dello stampo.



*Figura 56 Pressa manuale*



*Figura 57 Predisposizione dello stampo sul piano della pressa*

Si rimuove il provino dal piano della pressa, avendo cura di eliminare l'impasto in eccesso, e si preleva dallo stampo.



*Figura 58 Rimozione del provino dallo stampo*

Si ritaglia il provino per ottenere quattro provini delle dimensioni 4x4x4 cm.



*Figura 59 Provini 4x4x4 cm*

I provini così realizzati vengono pesati e messi ad essiccare prima all'aria per 48 h, poi in stufa a 105 °C per 24 h per evitare la fessurazione del campione durante la cottura e infine cotti.

La cottura avviene in una muffola a 900 °C per 8 h, di cui 6 h per raggiungere la temperatura di 900 °C (con una rampa di circa 2,5 °C/min) ed ulteriori 2 h di mantenimento a tale temperatura.

Dopo cottura, i campioni vengono fatti raffreddare fino a condizioni ambientali (20 °C).



*Figura 60 Muffola*

La pesatura viene ripetuta dopo ogni step: i provini vengono pesati appena realizzati, dopo l'essiccazione all'aria, in stufa e dopo la cottura; viene calcolata la percentuale di perdita in peso di ciascun provino tra uno step e un altro.

Le dimensioni dei provini cotti sono individuate grazie ad un calibro.

Il procedimento viene ripetuto per tutte le percentuali di sostituzione.

Di seguito sono riportate delle tabelle riassuntive (Tabelle 10-15) con tutti i valori delle dimensioni medie, dei pesi e delle percentuali di perdita in peso dei provini confezionati con le diverse percentuali di sostituzione.

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 0%: RIF_0				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1				
	PESO [g]: 128,75	PESO [g]: 114,84 %perdita peso 0-48h: 10,80	PESO [g]: 107,13 %perdita peso 48h-24h: 6,71	PESO [g]: 97,98 %perdita peso 24h-cottura: 8,54 Dim [mm]: 38x39x40
2				
	PESO [g]: 126,77	PESO [g]: 112,25 %perdita peso 0-48h: 11,45	PESO [g]: 105,50 %perdita peso 48h-24h: 6,01	PESO [g]: 94,48 %perdita peso 24h-cottura: 8,55 Dim [mm]: 38x38x40
3				
	PESO [g]: 139,37	PESO [g]: 124,96 %perdita peso 0-48h: 10,34	PESO [g]: 116,17 %perdita peso 48h-24h: 7,03	PESO [g]: 106,27 %perdita peso 24h-cottura: 8,52 Dim [mm]: 40x41x37
4				
	PESO [g]: 128,04	PESO [g]: 115,01 %perdita peso 0-48h: 10,18	PESO [g]: 107,03 %perdita peso 48h-24h: 6,94	PESO [g]: 97,90 %perdita peso 24h-cottura: 8,53 Dim [mm]: 38x38x39

5				
	PESO [g]: 131,47	PESO [g]: 116,85 %perdita peso 0-48h: 11,12	PESO [g]: 109,44 %perdita peso 48h-24h: 6,34	PESO [g]: 100,10 %perdita peso 24h-cottura: 8,53 Dim [mm]: 39x39x40
6				
	PESO [g]: 135,08	PESO [g]: 119,86 %perdita peso 0-48h: 11,27	PESO [g]: 112,21 %perdita peso 48h-24h: 6,38	PESO [g]: 102,64 %perdita peso 24h-cottura: 8,53 Dim [mm]: 40x40x37
7				
	PESO [g]: 129,65	PESO [g]: 116,19 %perdita peso 0-48h: 10,38	PESO [g]: 107,06 %perdita peso 48h-24h: 7,86	PESO [g]: 98,57 %perdita peso 24h-cottura: 7,93 Dim [mm]: 38x39x40
8				
	PESO [g]: 129,71	PESO [g]: 117,47 %perdita peso 0-48h: 9,44	PESO [g]: 107,79 %perdita peso 48h-24h: 8,24	PESO [g]: 98,70 %perdita peso 24h-cottura: 8,43 Dim [mm]: 38x38x40

Tabella 10 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini RIF\_0

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 5%: DS_5				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 <p>PESO [g]: 125,40</p>	 <p>PESO [g]: 106,18 %perdita peso 0-48h: 15,33</p>	 <p>PESO [g]: 104,32 %perdita peso 48h-24h: 1,75</p>	 <p>PESO [g]: 95,68 %perdita peso 24h-cottura: 8,28 Dim [mm]: 37x37x41</p>
2	 <p>PESO [g]: 119,18</p>	 <p>PESO [g]: 101,95 %perdita peso 0-48h: 14,46</p>	 <p>PESO [g]: 99,54 %perdita peso 48h-24h: 2,36</p>	 <p>PESO [g]: 91,48 %perdita peso 24h-cottura: 8,10 Dim [mm]: 40x40x32</p>
3	 <p>PESO [g]: 134,98</p>	 <p>PESO [g]: 114,95 %perdita peso 0-48h: 14,84</p>	 <p>PESO [g]: 112,57 %perdita peso 48h-24h: 2,07</p>	 <p>PESO [g]: 103,27 %perdita peso 24h-cottura: 8,26 Dim [mm]: 40x41x37</p>
4	 <p>PESO [g]: 126,86</p>	 <p>PESO [g]: 107,79 %perdita peso 0-48h: 15,03</p>	 <p>PESO [g]: 105,79 %perdita peso 48h-24h: 1,86</p>	 <p>PESO [g]: 97,06 %perdita peso 24h-cottura: 8,25 Dim [mm]: 38x38x40</p>

5				
	PESO [g]: 121,58	PESO [g]: 103,00 %perdita peso 0-48h: 15,28	PESO [g]: 101,09 %perdita peso 48h-24h: 1,85	PESO [g]: 92,72 %perdita peso 24h-cottura: 8,28 Dim [mm]: 38x36x40
6				
	PESO [g]: 139,99	PESO [g]: 118,62 %perdita peso 0-48h: 15,27	PESO [g]: 116,42 %perdita peso 48h-24h: 1,85	PESO [g]: 106,79 %perdita peso 24h-cottura: 8,27 Dim [mm]: 39x39x40
7				
	PESO [g]: 136,37	PESO [g]: 116,38 %perdita peso 0-48h: 14,66	PESO [g]: 113,81 %perdita peso 48h-24h: 2,21	PESO [g]: 104,40 %perdita peso 24h-cottura: 8,27 Dim [mm]: 39x39x41
8				
	PESO [g]: 118,09	PESO [g]: 100,29 %perdita peso 0-48h: 15,07	PESO [g]: 98,41 %perdita peso 48h-24h: 1,87	PESO [g]: 90,40 %perdita peso 24h-cottura: 8,14 Dim [mm]: 38x40x34

Tabella 11 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_5

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 10%: DS_10				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 PESO [g]: 140,12	 PESO [g]: 120,31 %perdita peso 0-48h: 14,14	 PESO [g]: 117,25 %perdita peso 48h-24h: 2,54	 PESO [g]: 107,51 %perdita peso 24h-cottura: 8,31 Dim [mm]: 39x39x40
2	 PESO [g]: 140,75	 PESO [g]: 121,42 %perdita peso 0-48h: 13,73	 PESO [g]: 117,65 %perdita peso 48h-24h: 3,10	 PESO [g]: 107,88 %perdita peso 24h-cottura: 8,30 Dim [mm]: 39x40x40
3	 PESO [g]: 135,99	 PESO [g]: 118,03 %perdita peso 0-48h: 13,21	 PESO [g]: 113,72 %perdita peso 48h-24h: 3,65	 PESO [g]: 104,51 %perdita peso 24h-cottura: 8,10 Dim [mm]: 40x40x35
4	 PESO [g]: 139,54	 PESO [g]: 120,17 %perdita peso 0-48h: 13,88	 PESO [g]: 116,84 %perdita peso 48h-24h: 2,77	 PESO [g]: 107,16 %perdita peso 24h-cottura: 8,28 Dim [mm]: 39x39x39

5				
	PESO [g]: 131,02	PESO [g]: 112,58 %perdita peso 0-48h: 14,07	PESO [g]: 109,72 %perdita peso 48h-24h: 2,54	PESO [g]: 100,61 %perdita peso 24h-cottura: 8,30 Dim [mm]: 37x37x43
6				
	PESO [g]: 143,51	PESO [g]: 123,94 %perdita peso 0-48h: 13,64	PESO [g]: 120,01 %perdita peso 48h-24h: 3,17	PESO [g]: 100,31 %perdita peso 24h-cottura: 8,08 Dim [mm]: 41x43x37
7				
	PESO [g]: 135,89	PESO [g]: 117,60 %perdita peso 0-48h: 13,46	PESO [g]: 113,75 %perdita peso 48h-24h: 3,27	PESO [g]: 104,31 %perdita peso 24h-cottura: 8,30 Dim [mm]: 37x38x43
8				
	PESO [g]: 147,39	PESO [g]: 127,10 %perdita peso 0-48h: 13,77	PESO [g]: 123,118 %perdita peso 48h-24h: 3,08	PESO [g]: 113,00 %perdita peso 24h-cottura: 8,26 Dim [mm]: 41x42x38

Tabella 12 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_10

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 15%: DS_15				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1				
	PESO [g]: 127,00	PESO [g]: 120,31 %perdita peso 0-48h: 14,14	PESO [g]: 105,21 %perdita peso 48h-24h: 6,41	PESO [g]: 95,28 %perdita peso 24h-cottura: 9,44 Dim [mm]: 37x38x40
2				
	PESO [g]: 130,09	PESO [g]: 112,42 %perdita peso 0-48h: 11,48	PESO [g]: 107,60 %perdita peso 48h-24h: 6,40	PESO [g]: 97,75 %perdita peso 24h-cottura: 9,15 Dim [mm]: 40x40x37
3				
	PESO [g]: 134,30	PESO [g]: 119,43 %perdita peso 0-48h: 11,07	PESO [g]: 111,17 %perdita peso 48h-24h: 6,92	PESO [g]: 101,03 %perdita peso 24h-cottura: 9,12 Dim [mm]: 40x40x38
4				
	PESO [g]: 130,76	PESO [g]: 118,13 %perdita peso 0-48h: 9,66	PESO [g]: 108,20 %perdita peso 48h-24h: 8,41	PESO [g]: 98,31 %perdita peso 24h-cottura: 9,14 Dim [mm]: 40x40x38

5				
	PESO [g]: 125,80	PESO [g]: 112,84 %perdita peso 0-48h: 10,30	PESO [g]: 104,05 %perdita peso 48h-24h: 7,79	PESO [g]: 94,54 %perdita peso 24h-cottura: 9,14 Dim [mm]: 36x37x41
6				
	PESO [g]: 125,20	PESO [g]: 110,78 %perdita peso 0-48h: 11,52	PESO [g]: 103,58 %perdita peso 48h-24h: 6,50	PESO [g]: 94,12 %perdita peso 24h-cottura: 9,13 Dim [mm]: 39x39x37
7				
	PESO [g]: 135,92	PESO [g]: 121,89 %perdita peso 0-48h: 10,32	PESO [g]: 112,40 %perdita peso 48h-24h: 7,79	PESO [g]: 100,69 %perdita peso 24h-cottura: 10,42 Dim [mm]: 40x42x35
8				
	PESO [g]: 134,08	PESO [g]: 121,88 %perdita peso 0-48h: 9,10	PESO [g]: 110,93 %perdita peso 48h-24h: 8,98	PESO [g]: 102,12 %perdita peso 24h-cottura: 7,94 Dim [mm]: 40x40x38

Tabella 13 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_15

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 30%: DS_30				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 PESO [g]: 129,52	 PESO [g]: 109,57 %perdita peso 0-48h: 15,40	 PESO [g]: 108,16 %perdita peso 48h-24h: 1,29	 PESO [g]: 97,51 %perdita peso 24h-cottura: 9,85 Dim [mm]: 39x39x38
2	 PESO [g]: 131,07	 PESO [g]: 111,95 %perdita peso 0-48h: 14,59	 PESO [g]: 109,37 %perdita peso 48h-24h: 2,30	 PESO [g]: 98,51 %perdita peso 24h-cottura: 9,93 Dim [mm]: 39x39x38
3	 PESO [g]: 133,58	 PESO [g]: 112,71 %perdita peso 0-48h: 15,62	 PESO [g]: 111,37 %perdita peso 48h-24h: 1,19	 PESO [g]: 100,30 %perdita peso 24h-cottura: 9,94 Dim [mm]: 39x39x40
4	 PESO [g]: 136,13	 PESO [g]: 115,28 %perdita peso 0-48h: 15,32	 PESO [g]: 113,76 %perdita peso 48h-24h: 1,32	 PESO [g]: 102,47 %perdita peso 24h-cottura: 9,92 Dim [mm]: 38x39x41

5				
	PESO [g]: 122,16	PESO [g]: 102,52 %perdita peso 0-48h: 16,08	PESO [g]: 101,37 %perdita peso 48h-24h: 1,12	PESO [g]: 91,25 %perdita peso 24h-cottura: 9,98 Dim [mm]: 40x41x35
6				
	PESO [g]: 122,87	PESO [g]: 103,34 %perdita peso 0-48h: 15,89	PESO [g]: 102,18 %perdita peso 48h-24h: 1,12	PESO [g]: 92,05 %perdita peso 24h-cottura: 9,91 Dim [mm]: 39x41x35
7				
	PESO [g]: 129,68	PESO [g]: 108,74 %perdita peso 0-48h: 16,15	PESO [g]: 107,55 %perdita peso 48h-24h: 1,09	PESO [g]: 96,88 %perdita peso 24h-cottura: 9,92 Dim [mm]: 39x41x36
8				
	PESO [g]: 118,72	PESO [g]: 99,49 %perdita peso 0-48h: 16,20	PESO [g]: 98,48 %perdita peso 48h-24h: 1,02	PESO [g]: 88,70 %perdita peso 24h-cottura: 9,93 Dim [mm]: 40x48x37

Tabella 14 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_30

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 50%: DS_50				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 PESO [g]: 128,95	 PESO [g]: 108,25 %perdita peso 0-48h: 16,05	 PESO [g]: 107,21 %perdita peso 48h-24h: 0,96	 PESO [g]: 95,40 %perdita peso 24h-cottura: 11,02 Dim [mm]: 37x37x42
2	 PESO [g]: 125,73	 PESO [g]: 105,61 %perdita peso 0-48h: 16,00	 PESO [g]: 104,50 %perdita peso 48h-24h: 1,05	 PESO [g]: 92,95 %perdita peso 24h-cottura: 11,05 Dim [mm]: 39x40x37
3	 PESO [g]: 120,10	 PESO [g]: 101,08 %perdita peso 0-48h: 15,84	 PESO [g]: 100,04 %perdita peso 48h-24h: 1,03	 PESO [g]: 88,97 %perdita peso 24h-cottura: 11,07 Dim [mm]: 37x37x41
4	 PESO [g]: 113,80	 PESO [g]: 95,90 %perdita peso 0-48h: 15,73	 PESO [g]: 95,02 %perdita peso 48h-24h: 0,92	 PESO [g]: 84,49 %perdita peso 24h-cottura: 11,08 Dim [mm]: 37x39x35

5				
	PESO [g]: 131,90	PESO [g]: 111,17 %perdita peso 0-48h: 15,72	PESO [g]: 110,14 %perdita peso 48h-24h: 0,93	PESO [g]: 97,95 %perdita peso 24h-cottura: 11,07 Dim [mm]: 37x39x41
6				
	PESO [g]: 131,84	PESO [g]: 111,24 %perdita peso 0-48h: 15,63	PESO [g]: 110,04 %perdita peso 48h-24h: 1,08	PESO [g]: 97,87 %perdita peso 24h-cottura: 11,06 Dim [mm]: 37x38x41
7				
	PESO [g]: 133,70	PESO [g]: 112,56 %perdita peso 0-48h: 15,81	PESO [g]: 111,32 %perdita peso 48h-24h: 1,10	PESO [g]: 98,92 %perdita peso 24h-cottura: 11,14 Dim [mm]: 38x39x42
8				
	PESO [g]: 134,99	PESO [g]: 113,77 %perdita peso 0-48h: 15,72	PESO [g]: 112,64 %perdita peso 48h-24h: 0,99	PESO [g]: 100,15 %perdita peso 24h-cottura: 11,09 Dim [mm]: 38x38x40

Tabella 15 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_50

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalle prove descritte nel capitolo 2 – Materiali e metodi.

#### 3.1 PROVINI PRELIMINARI

I provini sono stati sottoposti alla prova Pundit ad ultrasuoni per calcolarne il modulo elastico dinamico e alla prova a compressione per determinarne la resistenza meccanica a compressione.

##### 3.1.1 Risultati prova Pundit ad ultrasuoni

PROVINI	TEMPO [μs]	VELOCITÀ [m/s]	PESO [kg]	DENSITÀ [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO DINAMICO [GPa]
1	16,9	2307,69	0,1048	1766,72	7,0
2	21,9	1780,82	0,0971	1746,65	4,1
3	13,8	2826,09	0,0947	1727,89	10,3
4	16,9	2307,69	0,1026	1751,51	6,9
5	15,9	3144,65	0,1421	1424,76	10,5
6	15,7	2993,63	0,1254	1274,46	8,5
7	17,2	2674,42	0,1206	1294,90	6,9
8	17,0	2882,35	0,1236	1096,27	6,8

Tabella 16 Risultati prova Pundit sui provini preliminari

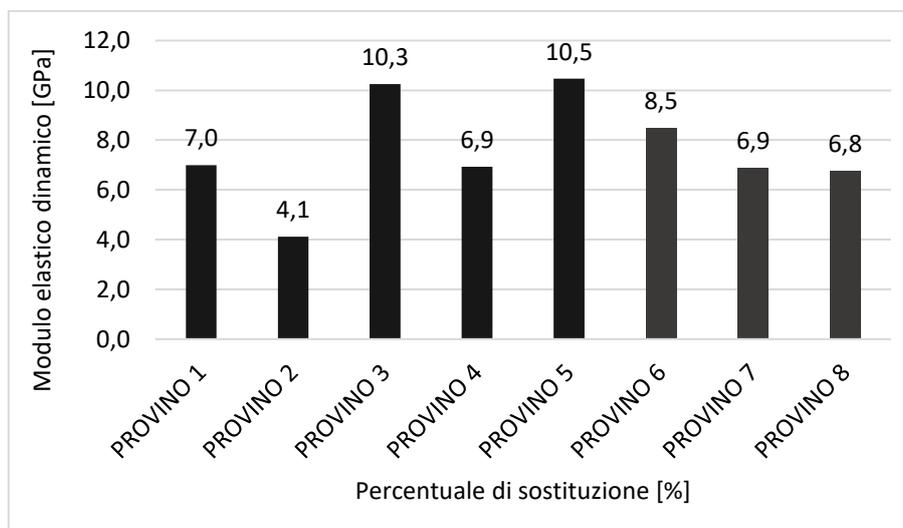


Grafico 2 Modulo elastico dinamico dei provini preliminari

### 3.1.2 Risultati prova a compressione

PROVINI	AREA MEDIA [mm <sup>2</sup> ]	FORZA [KN]	RESISTENZA A COMPRESIONE [MPa]
1	1521	27,20	17,88
2	1425	27,69	19,44
3	1405	34,96	24,89
4	1502	35,79	23,84
5	1995	97,39	48,82
6	2094	40,57	19,38
7	2025	27,19	13,43
8	2300	38,25	16,63

Tabella 17 Risultati prova a compressione sui provini preliminari

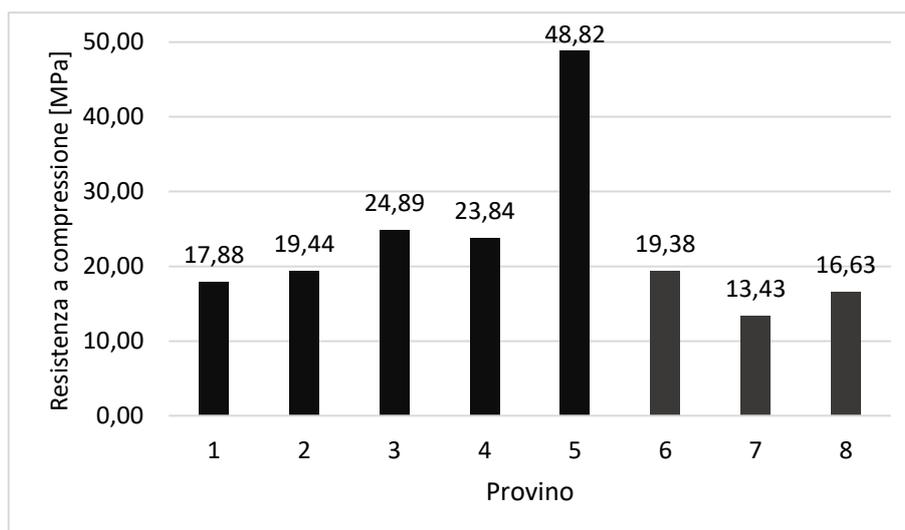


Grafico 3 Resistenza a compressione dei provini preliminari

### 3.1.3 Discussione dei risultati

Il grafico 2 mostra un andamento molto variabile del modulo elastico nei primi cinque provini. Ciò, probabilmente, è dovuto al fatto che i provini non sono stati compattati in fase di realizzazione, a differenza di quanto fatto con i provini 6, 7 e 8 i quali hanno valori di modulo elastico più simili.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, il grafico 3 mostra tuttavia una maggiore resistenza meccanica nei provini non compattati, andando a contraddire di fatto i risultati ottenuti dalla prova ad ultrasuoni poiché, generalmente, a un modulo elastico elevato corrisponde una resistenza meccanica maggiore.

Di conseguenza si è scelto di abbandonare questa metodologia di realizzazione dei provini, studiando un nuovo procedimento che avrebbe garantito risultati più coerenti con i valori attesi.

La nuova procedura è riportata nel capitolo 2.12.

### 3.2 DIFFRATTOMETRIA DI RAGGI X (XRD)

Di seguito sono riportati i risultati della diffrazione di raggi X eseguita sui campioni di sedimenti dragati e argilla.

#### 3.2.1 Risultati delle prove

##### Sedimenti dragati

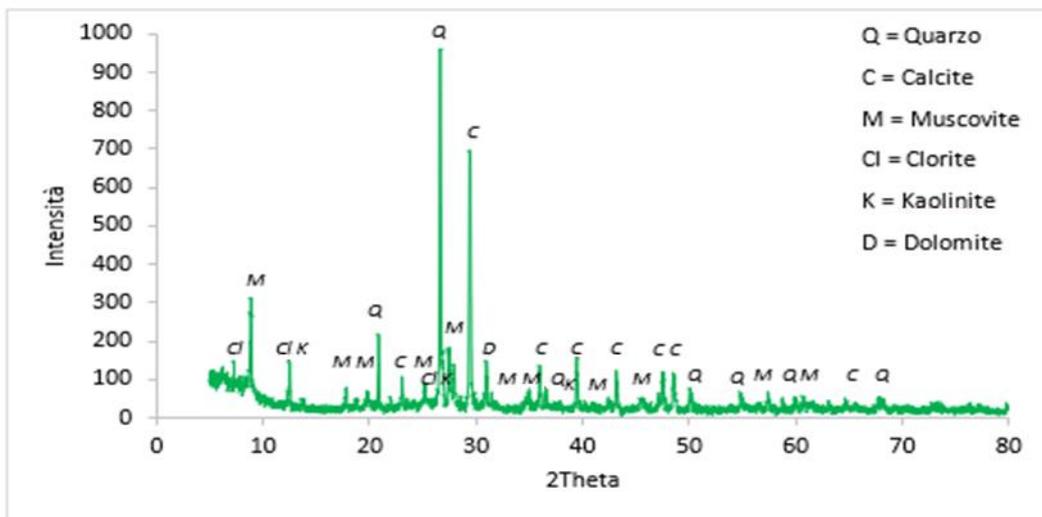


Grafico 4 Diffrazione di raggi X di un campione di DS, macinato e setacciato con passante <90µm

##### Argilla

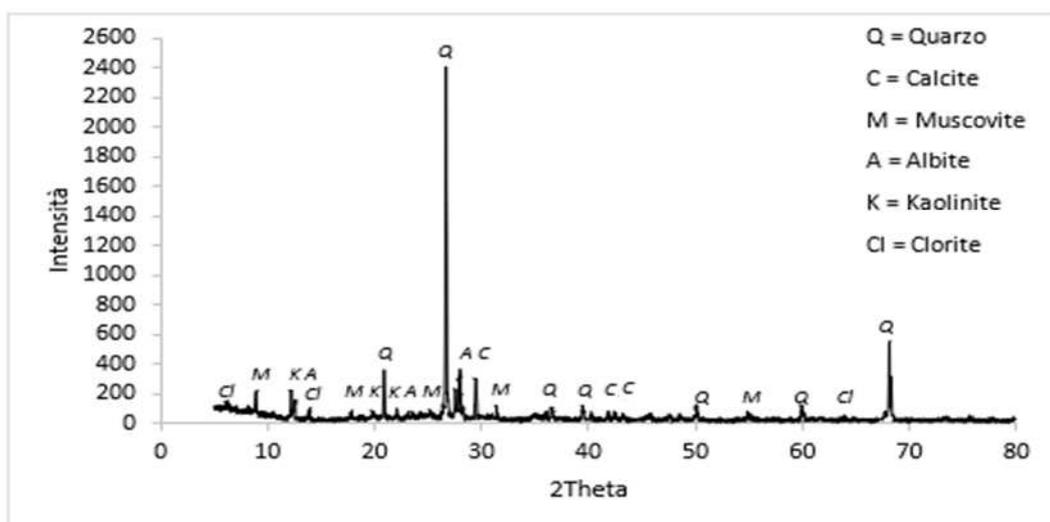


Grafico 5 Diffrazione di raggi X di un campione di materiale argilla

### 3.2.2 Discussione dei risultati

I campioni sono formati da materia prima costituita da una fase argillosa, i cui costituenti mineralogici principali sono la caolinite e la clorite, e da una frazione sabbiosa costituita da quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), muscovite e carbonati, solitamente calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). L'incidenza del quarzo è assai variabile, mediamente dell'ordine del 15-30%, mentre la percentuale di carbonati può superare anche il 20% [4].

L'analisi mineralogica ha rivelato che entrambe le materie prime contengono quarzo, calcite, muscovite, caolinite e clorite.

In particolare, si osserva come le principali specie mineralogiche presenti nei sedimenti dragati siano quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e muscovite, con picchi di dolomite, caolinite e clorite, mentre le principali specie presenti nell'argilla siano quarzo ( $\text{SiO}_2$ ) e calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), con picchi di muscovite, albite, caolinite e clorite.

Secondo i risultati, quindi, le materie prime sono di natura simile. Ciò indica che i sedimenti dragati possono essere utilizzati come materia prima nella produzione di mattoni di argilla cotta.

### 3.3 DIFFRATTOMETRIA DI RAGGI X (XRD) POST-COTTURA

Campioni di un provino per ciascuna percentuale di sostituzione vengono mandati in laboratorio per la diffrazione di raggi X (XRD) al fine di vedere quali specie mineralogiche sono rimaste nei provini post cottura.



Figura 61 Campioni per XRD

#### 3.3.1 Risultati delle prove

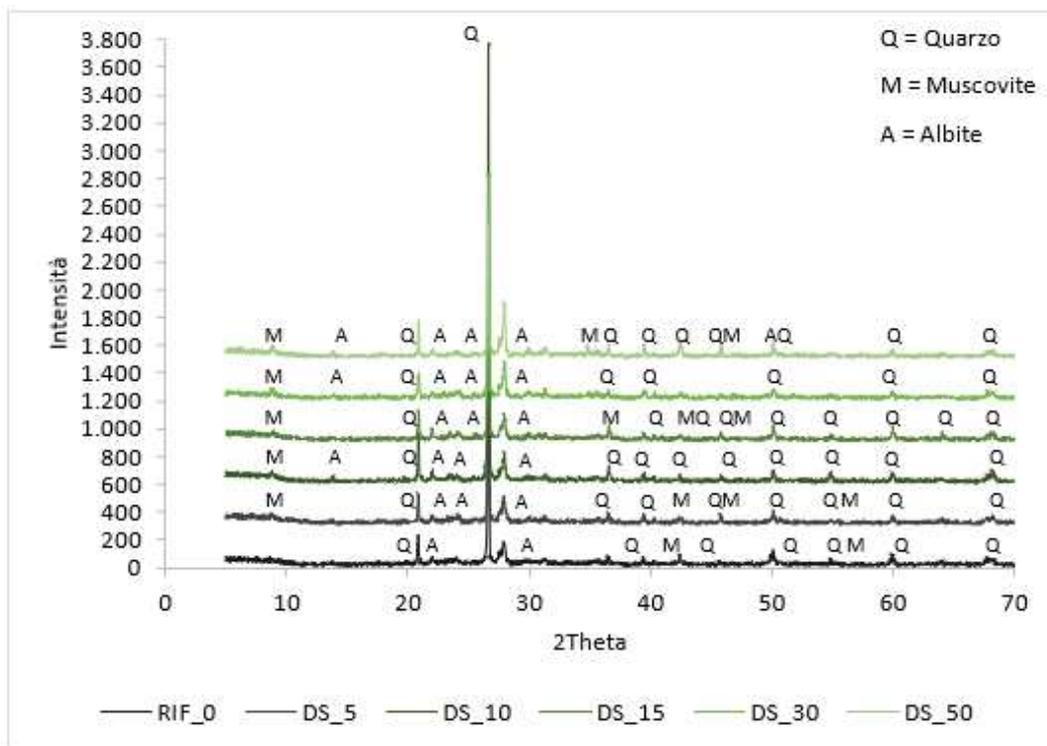


Grafico 6 Diffrazione di raggi X di un campione di mattone cotto per ciascuna percentuale di sostituzione

### **3.3.2 Discussione dei risultati**

Dalla diffrattometria di raggi X (XRD) si osserva come dopo la fase di cottura la principale specie mineralogica presente nel provino sia ancora il quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), con picchi di muscovite e albite, mentre la calcite, che era presente nell'argilla prima della cottura, ha subito un processo di decomposizione, liberando anidride carbonica.

Si può notare come all'aumentare della percentuale di sostituzione, da 0% a 50%, dei DS rispetto all'argilla di riferimento, i picchi di muscovite e albite aumentino di intensità.

### 3.4 ANALISI TERMOGRAVIMETRICA (TGA)

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi termogravimetrica eseguita sui campioni di sedimenti dragati, setacciati mediante setaccio <90 µm, e sull'argilla, distinta in parte fine, ottenuta setacciando il materiale con setaccio <250 µm, e parte grossa, ossia con diametro >250 µm.

#### 3.4.1 Risultati delle prove

##### 3.4.1.1 Sedimenti dragati

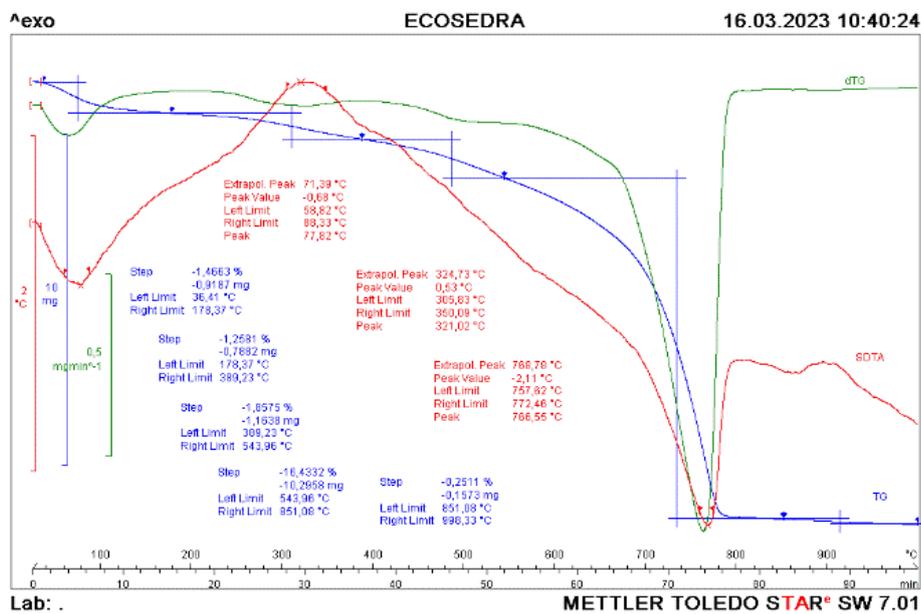


Figura 62 TGA di un campione di DS

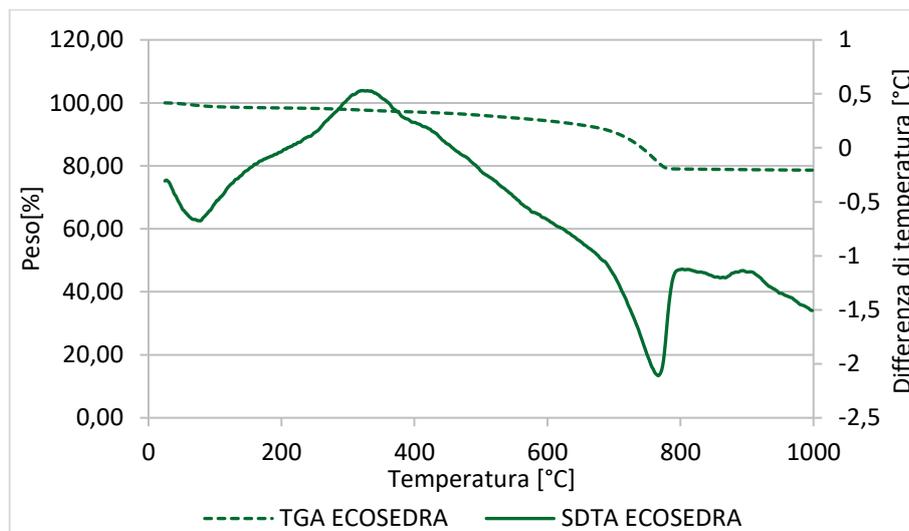


Grafico 7 Confronto tra la curva TGA e la curva SDTA di un campione di DS

### 3.4.1.2 Discussione dei risultati

Quello che si osserva nel corso dell'analisi termogravimetrica è una curva a scalini dove ogni gradino rappresenta una perdita di peso dovuta all'evaporazione di uno dei componenti del campione analizzato, in questo caso dovuta all'ossidazione, poiché eseguita in aria, quindi con presenza di ossigeno.

Osservando la curva, si può notare una iniziale diminuzione di peso dovuta al contenuto di umidità che evapora. Tra 35 °C e 180 °C si registra infatti una perdita di peso pari a 1,47%. Negli step successivi si ha una perdita di peso di 1,26% e 1,86% rispettivamente negli intervalli di temperatura 180 - 390 °C e 390 - 550 °C, fino ad arrivare all'intervallo di temperature compreso tra 550 °C e 850 °C dove si verifica una perdita di peso pari a 16,43%.

Si tratta di una reazione endotermica con perdita di massa da parte del campione: la linea blu infatti definisce la perdita percentuale di massa rispetto al valore iniziale.

Dalla chimica sappiamo che il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) subisce un processo di calcinazione che porta alla liberazione di anidride carbonica e alla produzione dell'ossido di calcio a 750 °C. Altra perdita di peso è dovuta alla deidrossilazione di muscovite, caolinite e clorite. Non ci sono perdite di peso significative al di sopra di 900 °C.

Durante l'analisi termica si registra una perdita di peso totale pari a 21,35%.

### 3.4.1.3 Argilla

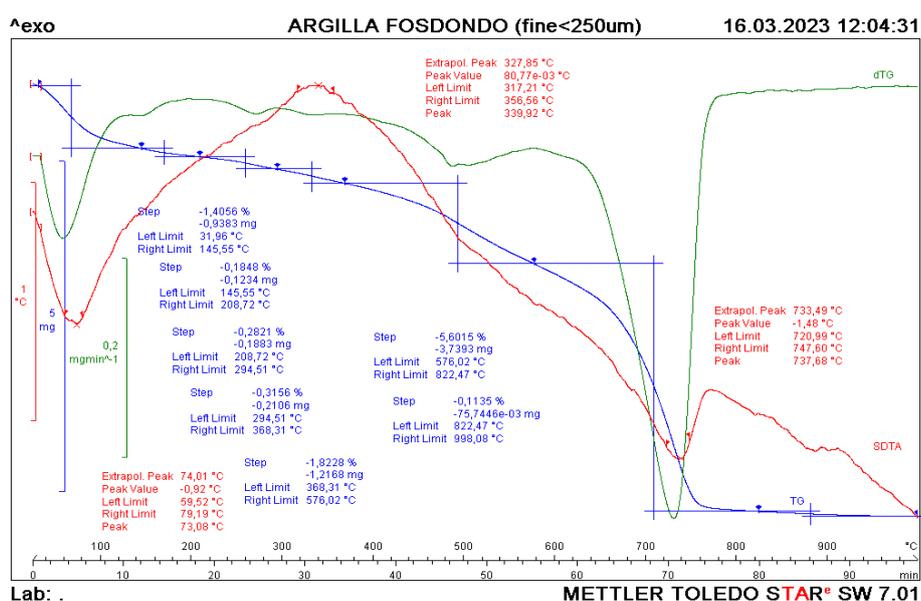


Figura 63 TGA di un campione di argilla fine <250 μm

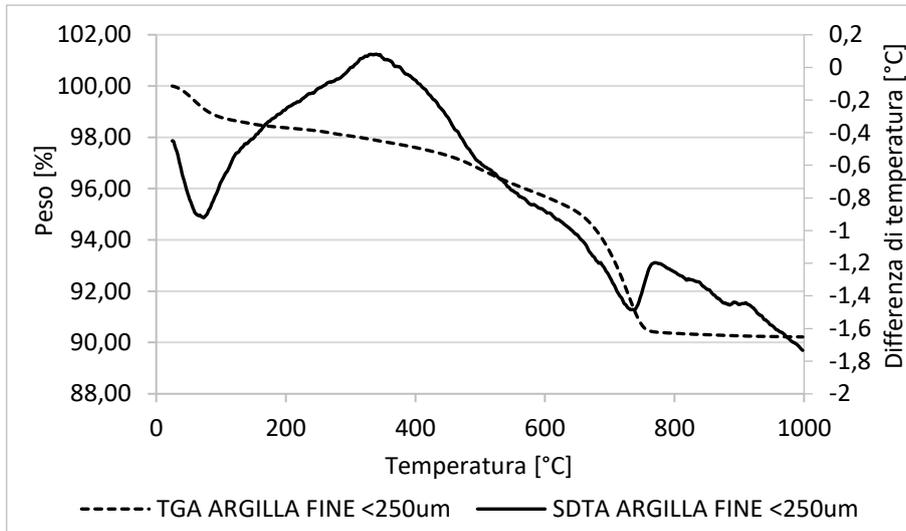


Grafico 8 Confronto tra la curva TGA e la curva SDTA di un campione di argilla fine <250 μm

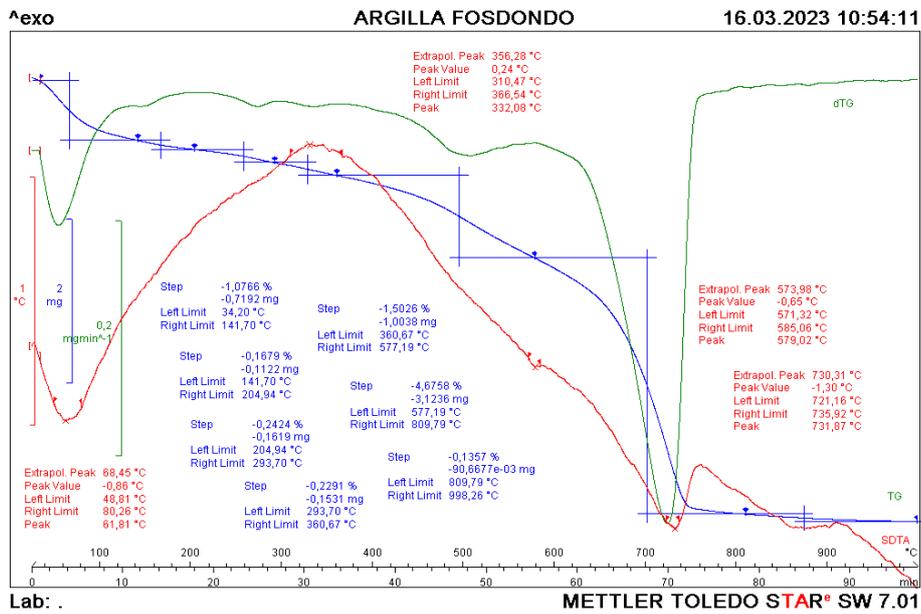


Figura 64 TGA di un campione di argilla >250 μm

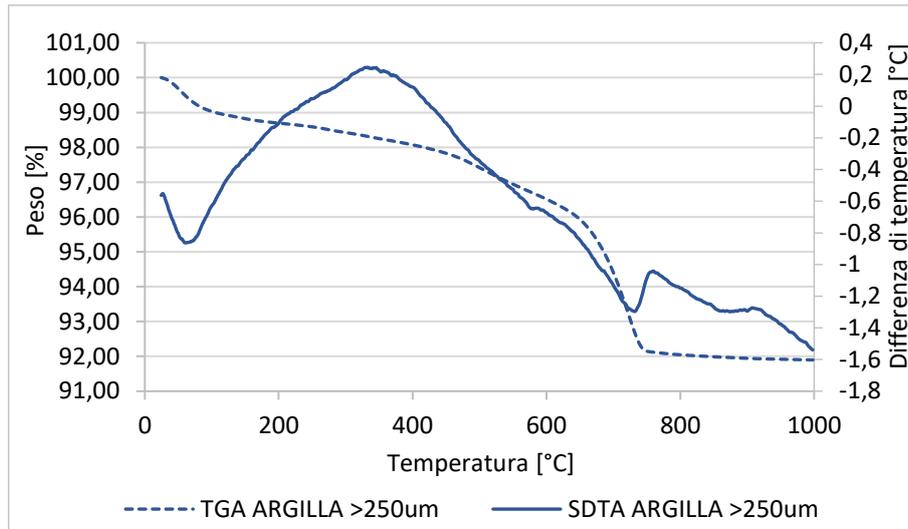


Grafico 9 Confronto tra la curva TGA e la curva SDTA di un campione di argilla >250 μm

#### 3.4.1.4 Discussione dei risultati

I risultati dell'analisi termogravimetrica dell'argilla fine (<250 μm) hanno evidenziato una iniziale diminuzione di peso dovuta al contenuto di umidità che evapora. Tra la temperatura ambiente e 145 °C si osserva infatti una perdita di peso pari a 1,4%.

Negli step successivi si registrano perdite di peso molto esigue fino ad arrivare all'intervallo di temperature compreso tra 580 °C e 830 °C dove si verifica una perdita di peso pari al 5,6%, dovuta alla reazione di calcinazione del carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>) e alla deidrossilazione di muscovite, caolinite e clorite.

Non ci sono perdite di peso significative al di sopra di 900 °C.

Durante l'analisi termica si registra una perdita di peso totale pari a 9,78%.

Per quanto riguarda l'argilla >250 μm, la curva mostra una iniziale diminuzione di peso pari a 1,07% tra i 30 °C e i 150 °C.

Negli step successivi si registrano perdite di peso molto basse fino all'intervallo di temperature 580 - 810 °C dove si ha una perdita di peso pari al 4,67% dovuta decomposizione del carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>), alla deidrossilazione di muscovite, caolinite e clorite.

Non ci sono perdite di peso significative al di sopra di 900 °C.

Si osserva una perdita di peso totale pari a 8,1%.

### 3.4.2 Confronto tra i campioni e discussione dei risultati

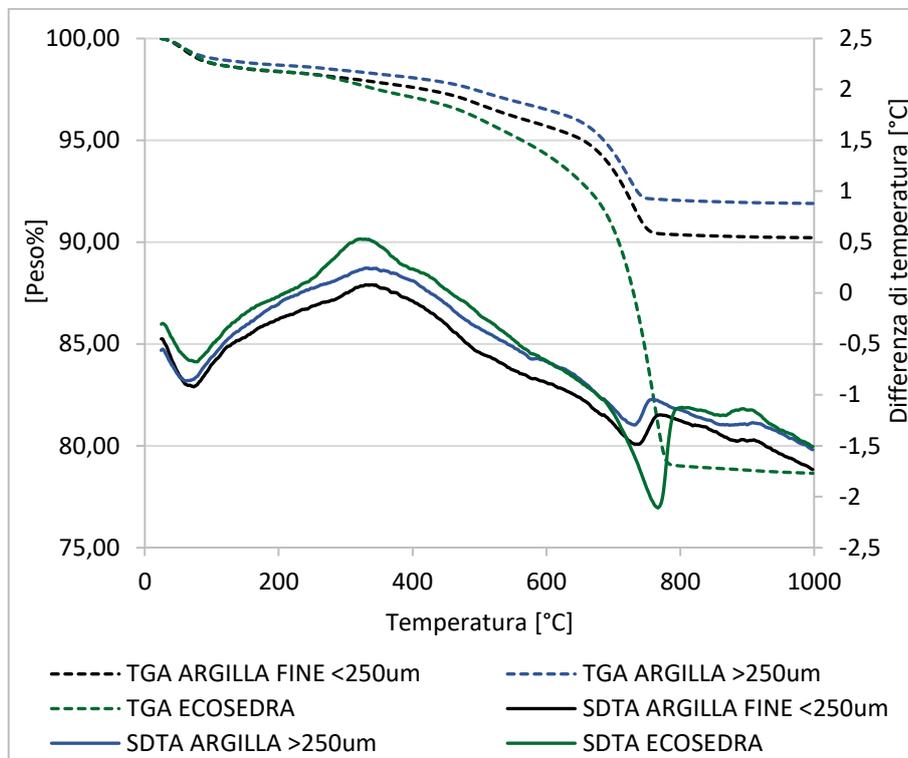
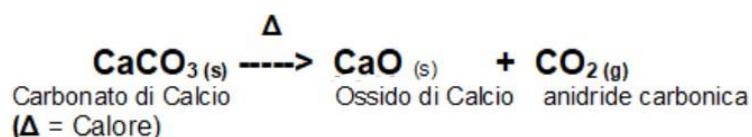


Grafico 10 Confronto curve TGA e SDTA dei campioni in esame

Confrontando i risultati dell'analisi termogravimetrica dei tre campioni si può osservare che i grafici di argilla fine <250 μm e argilla >250 μm sono molto simili tra loro mentre il grafico dei sedimenti dragati presenta una perdita di peso molto maggiore.

Come detto, la perdita di peso è dovuta principalmente alla decomposizione del carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) in ossido di calcio, la quale avviene a 750 °C con liberazione di anidride carbonica, mentre la decomposizione di muscovite avviene a 800 °C, quella della caolinite inizia a 500 °C e quella della clorite a 760 °C [25].



Si presuppone quindi che la perdita di peso registrata nella prova sia proprio quella di CO<sub>2</sub>. Pertanto, è sufficiente valutare la perdita di CO<sub>2</sub> per risalire alla quantità di carbonato presente originariamente nel campione.

La percentuale di carbonati viene individuata utilizzando la formula:

$$\%carbonati = 2,273 * X$$

dove X è la perdita in peso percentuale di CO<sub>2</sub>.

<b>CAMPIONE</b>	<b>INTERVALLO DI TEMPERATURA [°C]</b>	<b>PERDITA DI PESO X [%]</b>	<b>%CARBONATI [%]</b>
<b>DS</b>	550 - 850	16,43	37,35
<b>ARGILLA FINE &lt;250 µm</b>	580 - 830	5,60	12,73
<b>ARGILLA &gt;250 µm</b>	580 - 810	4,67	10,63

*Tabella 18 Percentuale di carbonati presente nei campioni di DS e argilla*

La prova ci consente quindi di calcolare la percentuale di CaCO<sub>3</sub> nel campione considerando la sua decomposizione ad alte temperature.

Dai risultati si osserva come il campione di DS presenti un maggior contenuto di CaCO<sub>3</sub> rispetto all'argilla, come anche evidenziato dalla maggior intensità dei picchi attribuiti alla calcite rilevata nei sedimenti dragati durante la prova XRD.

### 3.5 POROSIMETRIA

Per ogni percentuale di sostituzione sono stati testati tre piccoli frammenti e sono riportati i risultati medi.

#### 3.5.1 Risultati delle prove

PROVINI	POROSITÀ [%]	DIAMETRO MEDIO [ $\mu\text{m}$ ]	DIAMETRO MODALE [ $\mu\text{m}$ ]
RIF_0	30,89	0,54	0,90
DS_5	31,62	0,58	1,01
DS_10	32,19	0,63	1,14
DS_15	32,53	0,58	1,10
DS_30	34,71	1,20	1,17
DS_50	35,88	0,70	1,23

Tabella 19 Porosità %, diametro medio e diametro modale dei diversi provini

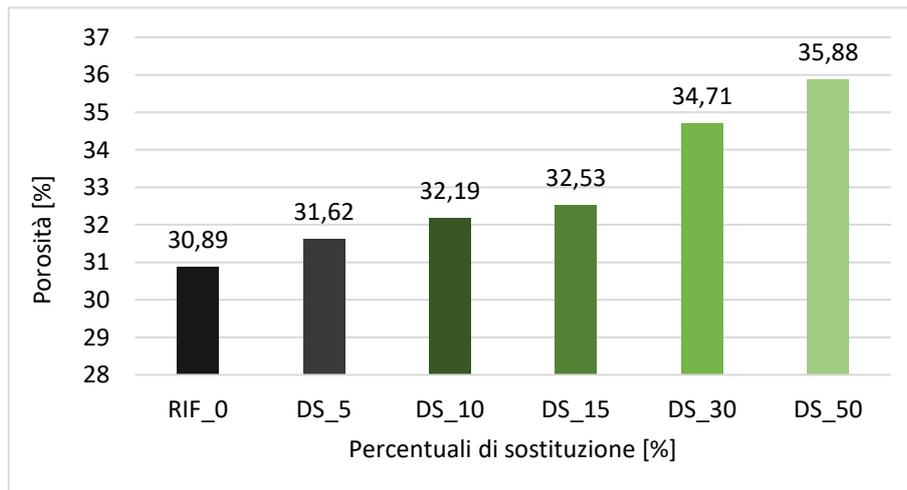


Grafico 11 Porosità percentuale dei provini per percentuale di sostituzione

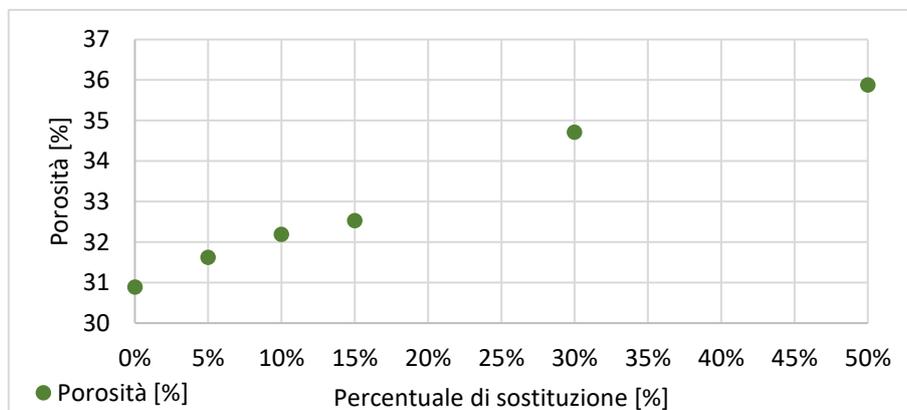


Grafico 12 Distribuzione della porosità per percentuale di sostituzione

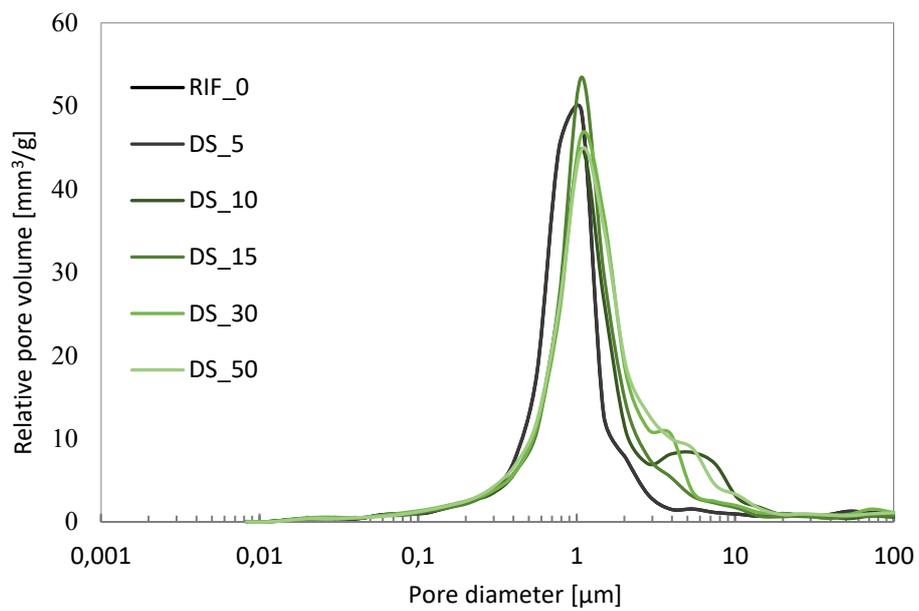


Grafico 13 Distribuzione (relativa) porosimetrica

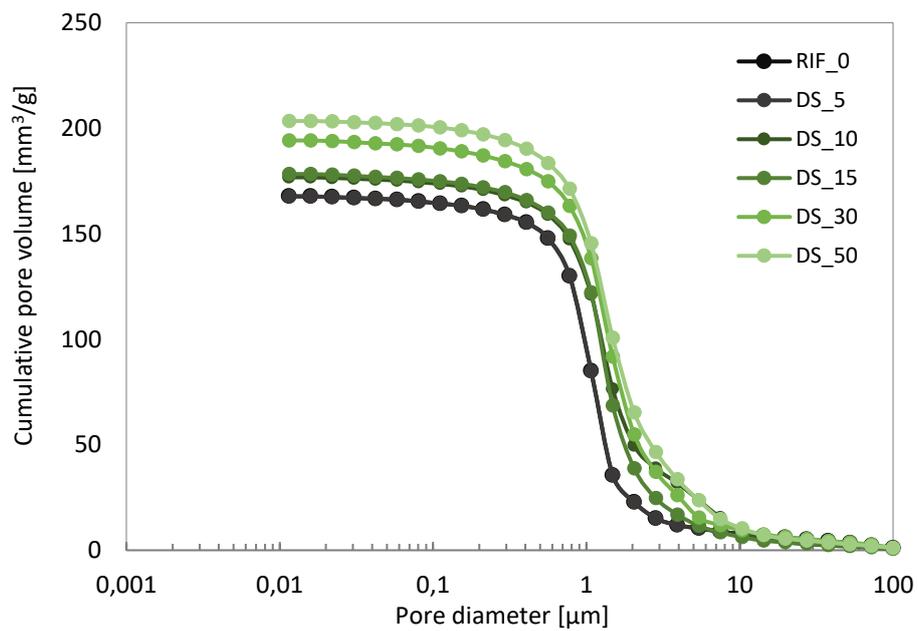


Grafico 14 Distribuzione (assoluta) porosimetrica

### 3.5.2 Discussione dei risultati

I provini più porosi sono quelli in cui l'argilla è stata sostituita da sedimenti dragati con percentuali di sostituzione maggiori: come si può vedere dal grafico 11, infatti, la porosità cresce all'aumentare della percentuale di sostituzione, fino ad un massimo di 5%.

La porosità segue un andamento pressoché lineare.

Tutti i provini hanno una porosità compresa tra diametri che vanno da 0,01 a 10  $\mu\text{m}$  e presentano una distribuzione mono o bi dimensionale prevalente: i picchi che nel grafico della porosità relativa (grafico 13) rappresentano il maggior numero di pori, si concentrano dove il diametro dei pori è nell'intorno di 1  $\mu\text{m}$ .

La dimensione dei pori aperti risulta però problematica nei confronti del rischio di gelività.

La resistenza al gelo, ossia la resistenza alle rotture indotte dalla solidificazione dell'acqua penetrata nei pori allorché la temperatura scende al di sotto di 0 °C, dipende in misura significativa dalla distribuzione delle dimensioni dei pori. Esiste infatti un diametro critico, stimato pari a 1,8  $\mu\text{m}$ , al di sotto del quale il rischio di gelo è da considerarsi elevato [4].

Essendo in questo caso il diametro medio dei pori minore di 1,8  $\mu\text{m}$ , il rischio che l'acqua presente all'interno dei pori aumenti di volume quando gela, causando fessure se non addirittura la rottura del mattone, si mitiga poiché non avrebbe sufficiente spazio per gelare. Se è troppo grande o troppo piccolo, infatti, non ci sono grossi problemi: nel primo caso ha 'spazio' sufficiente per espandere, nel secondo non si gela (soglia 0,1 mm).

### 3.6 DENSITÀ

Prima che vengano effettuate le prove meccaniche distruttive, i campioni vengono misurati con un calibro in più punti per avere la dimensione media del lato e pesati per valutarne la densità. Si può approssimare il provino ad un cubo considerando la sua geometria. È stata calcolata quindi la densità media dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione e la relativa deviazione standard, la quale rappresenta l'errore assoluto, importante per determinare con correttezza l'entità delle fluttuazioni riscontrate nella misura.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

#### 3.6.1 Risultati delle prove

PROVINI	PESO [g]	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	DENSITÀ [g/cm <sup>3</sup> ]	DENSITÀ MEDIA [g/cm <sup>3</sup> ]	SD [-]	
RIF_0	1	97,98	58,56	1,67	1,72	0,03
	2	96,48	55,96	1,72		
	3	106,27	60,85	1,75		
	4	97,90	55,60	1,76		
	5	100,10	57,81	1,73		
	6	102,64	61,24	1,68		
	7	98,57	57,81	1,71		
	8	98,70	57,81	1,71		
DS_5	1	95,68	55,23	1,73	1,72	0,03
	2	91,48	52,73	1,73		
	3	103,27	59,32	1,74		
	4	97,06	57,81	1,68		
	5	92,72	54,51	1,70		
	6	106,79	60,85	1,75		
	7	104,40	60,08	1,74		
	8	90,40	53,09	1,70		
DS_10	1	107,51	61,63	1,74	1,76	0,03
	2	107,88	62,41	1,73		
	3	104,51	58,19	1,80		
	4	107,16	59,32	1,81		
	5	100,61	57,25	1,76		
	6	110,31	63,80	1,73		
	7	104,31	59,70	1,75		
	8	113,00	64,40	1,75		

DS_15	1	95,28	56,33	1,69	1,70	0,03
	2	97,75	57,81	1,69		
	3	101,03	58,94	1,71		
	4	98,31	59,70	1,65		
	5	94,54	54,15	1,75		
	6	94,12	55,23	1,70		
	7	100,69	60,08	1,68		
	8	102,12	58,56	1,74		
DS_30	1	97,51	61,63	1,58	1,64	0,04
	2	98,51	58,56	1,68		
	3	100,30	60,85	1,65		
	4	102,47	60,47	1,69		
	5	91,25	56,33	1,62		
	6	92,05	55,23	1,67		
	7	96,88	59,32	1,63		
	8	88,70	55,23	1,61		
DS_50	1	95,40	58,56	1,63	1,66	0,02
	2	92,95	56,33	1,65		
	3	88,97	54,15	1,64		
	4	84,49	50,65	1,67		
	5	97,95	58,94	1,66		
	6	97,87	57,44	1,70		
	7	98,92	59,32	1,67		
	8	100,15	60,47	1,66		

Tabella 20 Risultati della densità per ciascuna percentuale di sostituzione

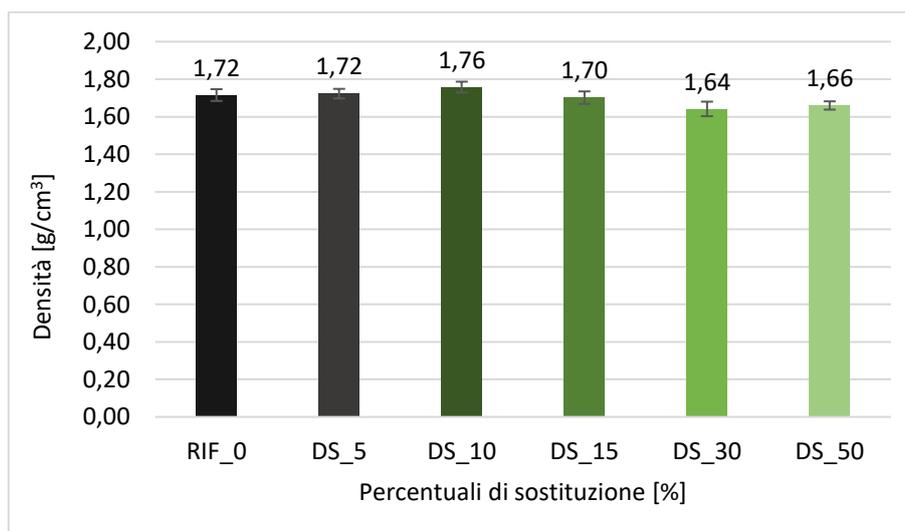


Grafico 15 Densità dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

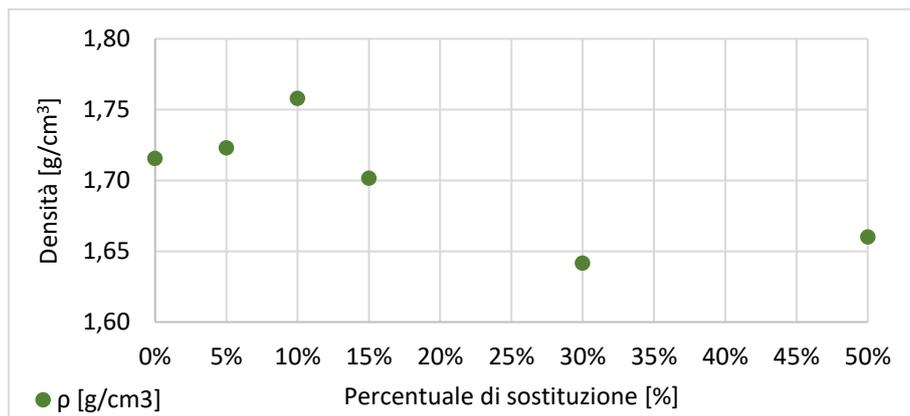


Grafico 16 Distribuzione della densità per percentuale di sostituzione

### 3.6.2 Discussione dei risultati

Dai risultati si osserva che i valori di densità ottenuti sono in accordo con la norma UNI 8942:1986 [26], la quale attesta i valori della massa volumica dei laterizi pieni nell'intervallo  $1,3 \div 1,8 \text{ g/cm}^3$ .

Il grafico 15 mostra come i valori della densità non cambino in modo significativo all'aumentare della percentuale di sostituzione questo perché, come dimostrato dalla prova diffrattometrica di raggi X, i mattoni cotti sono costituiti delle medesime specie minerali, seppur con proporzioni differenti.

### 3.7 PROVA PUNDIT AD ULTRASUONI

Per questa prova sono stati testati due provini per ciascuna percentuale di sostituzione.

Di seguito sono riportati i risultati.

#### 3.7.1 Risultati delle prove

PROVINI	TEMPO [μs]	VELOCITÀ [m/s]	PESO [kg]	DENSITÀ [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO DINAMICO [GPa]	MODULO ELASTICO DINAMICO MEDIO [GPa]	SD [-]
RIF_0	7	15,3	2549,02	0,0986	1728,16	8,3	1,18
	8	13,0	2769,23	0,0987	1757,48	10,0	
DS_5	2	15,3	2614,38	0,0915	1786,72	9,1	2,38
	8	18,5	2054,05	0,0904	1820,86	5,7	
DS_10	3	16,3	2147,24	0,1045	1842,64	6,3	0,22
	6	19,4	2113,40	0,1103	1806,61	6,0	
DS_15	7	16,7	2395,21	0,1007	1775,84	7,6	0,38
	8	15,3	2483,66	0,1021	1769,75	8,1	
DS_30	7	19,4	2010,31	0,0969	1703,77	5,1	1,07
	8	16,3	2269,94	0,0887	1732,15	6,6	
DS_50	2	16,0	2437,50	0,0930	1678,40	7,4	0,63
	4	15,6	2243,59	0,0845	1743,59	6,5	

Tabella 21 Risultati prova Pundit sui provini

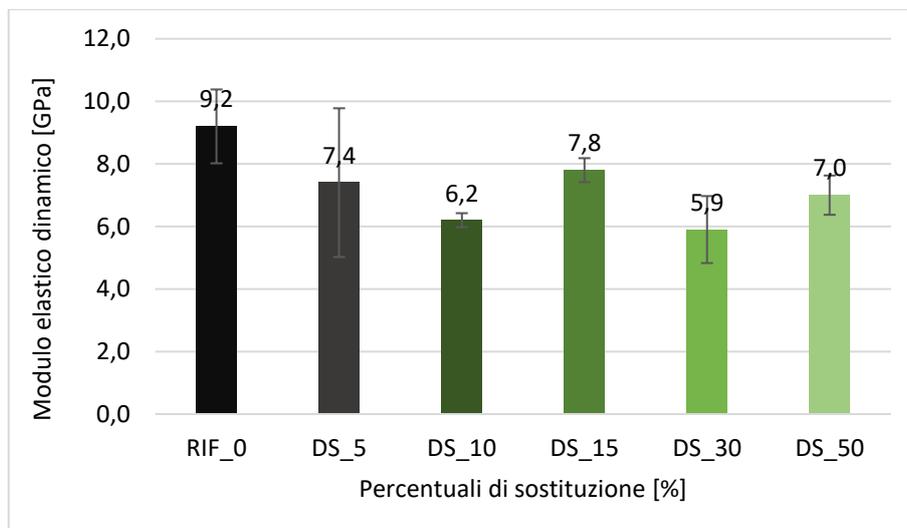


Grafico 17 Modulo elastico dinamico dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

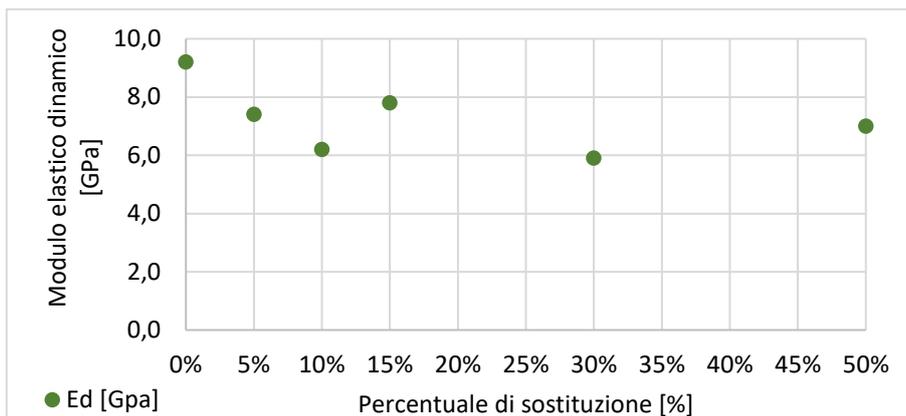


Grafico 18 Distribuzione del modulo elastico dinamico per percentuale di sostituzione

### 3.7.2 Discussione dei risultati

Come si può notare dal grafico 17, i provini caratterizzati da un maggiore tempo di volo sono quelli che presentano porosità maggiore, come viene specificato anche nel capitolo 3.4: questi provini sono caratterizzati da un basso valore di modulo elastico, essendo quest'ultimo inversamente proporzionale al quadrato del tempo.

I valori del modulo elastico tendono a diminuire man mano che la percentuale di sostituzione dei sedimenti dragati rispetto all'argilla di riferimento aumenta.

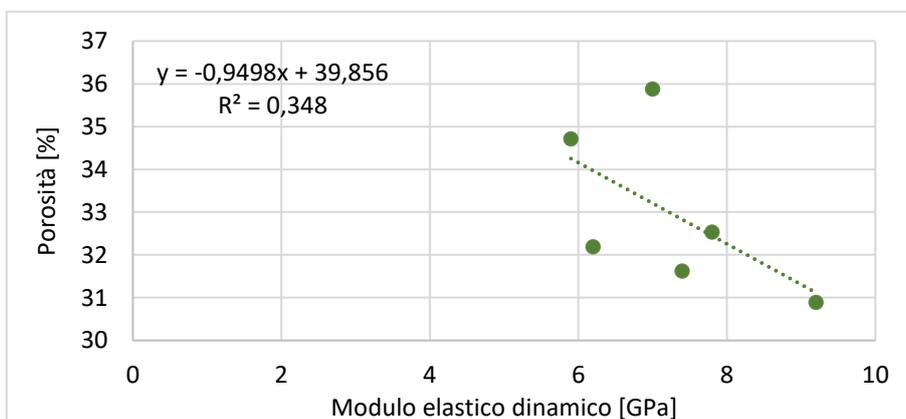


Grafico 19 Confronto tra modulo elastico e porosità dei provini per percentuale di sostituzione

Il grafico 19 mostra la relazione tra la porosità del campione e il modulo elastico: maggiore è la porosità e minore è il modulo elastico.

Il metodo Pundit è una prova non distruttiva che ci consente di prevedere l'uniformità e la qualità del calcestruzzo poiché c'è una relazione esponenziale tra il tempo di volo e

la porosità. Tempi di volo maggiori nei provini rispetto al provino di riferimento potrebbero stare ad indicare la presenza di vuoti o difetti all'interno del campione che vanno a condizionare la resistenza meccanica.

### 3.8 RESISTENZA A COMPRESSIONE

I test per valutare la resistenza a compressione dei mattoni sono stati condotti su tre provini per ciascuna percentuale di sostituzione e se ne è calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

#### 3.8.1 Risultati delle prove

PROVINI		AREA MEDIA [mm <sup>2</sup> ]	FORZA [KN]	RESISTENZA A COMPRESSIONE [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	SD [-]
RIF_0	1	1338,25	18,86	14,09	20,85	7,34
	2	1351,38	41,94	31,04		
	3	1550,25	26,40	17,03		
DS_5	1	1517,00	48,73	32,12	22,13	9,45
	3	1499,25	20,00	13,34		
	4	1311,50	27,44	20,92		
DS_10	1	1530,00	18,61	12,16	12,86	0,79
	2	1396,75	17,73	12,70		
	4	1425,25	19,55	13,72		
DS_15	1	1365,75	26,34	19,29	13,91	4,70
	2	1397,38	16,66	11,92		
	3	1461,75	15,40	10,54		
DS_30	1	1406,25	21,89	15,57	15,18	2,93
	2	1415,75	17,10	12,08		
	3	1444,25	25,85	17,90		
DS_50	1	1161,88	15,66	13,48	13,53	0,61
	3	1323,00	18,74	14,16		
	5	1405,63	18,20	12,95		

Tabella 22 Risultati della prova a compressione sui provini

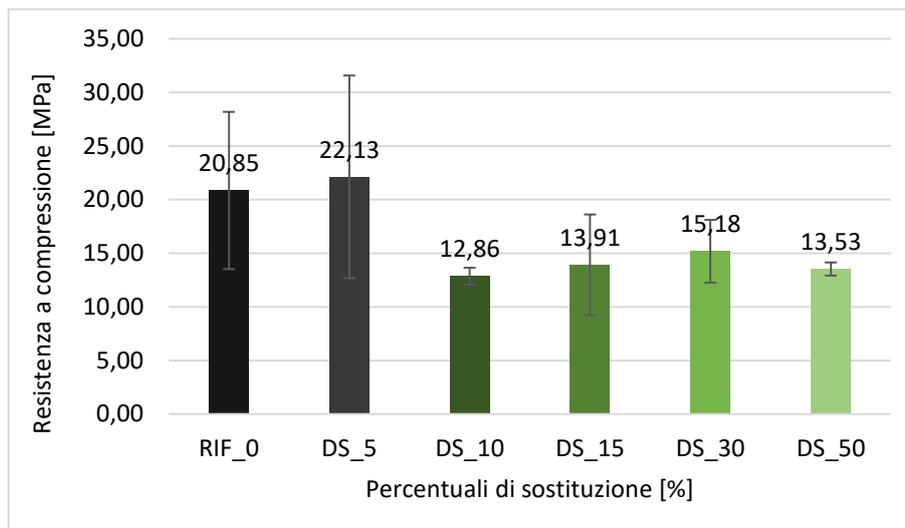


Grafico 20 Resistenza a compressione dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

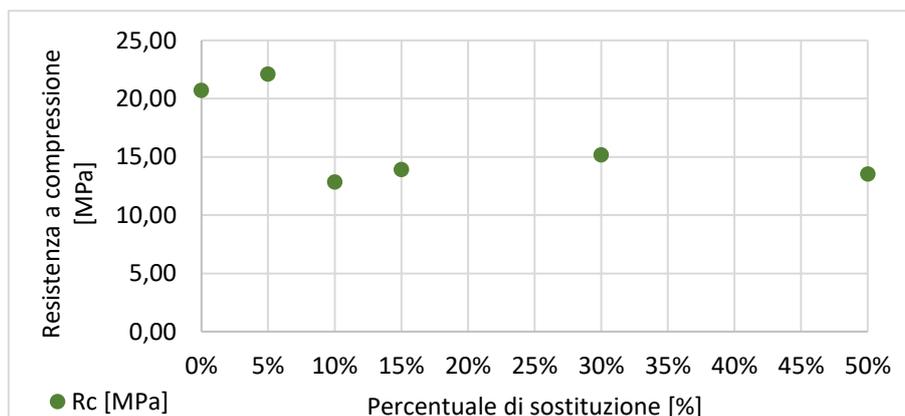


Grafico 21 Distribuzione della resistenza a compressione per percentuale di sostituzione

### 3.8.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 20, la resistenza a compressione varia man mano che la percentuale di sostituzione aumenta.

Si può vedere come rispetto al campione di riferimento RIF\_0, ad un iniziale miglioramento della resistenza pari a 7% dovuto alla sostituzione del 5% dell'argilla con sedimenti dragati (DS\_5), segue un peggioramento del 38% in DS\_10, del 33% in DS\_15, del 27% in DS\_30 ed infine del 35% in DS\_50.

I risultati dalla prova Pundit ad ultrasuoni rivelano che i campioni confezionati con un'alta percentuale di sostituzione avevano un modulo elastico basso, e questo si

traduce in maggiore porosità e minore resistenza meccanica, come viene accertato dalle prove di rottura.

I bassi valori di resistenza meccanica ottenuti rispettano, tuttavia, i limiti imposti dalle norme vigenti che stabiliscono un valore minimo di resistenza alla compressione di 10 MPa [19].

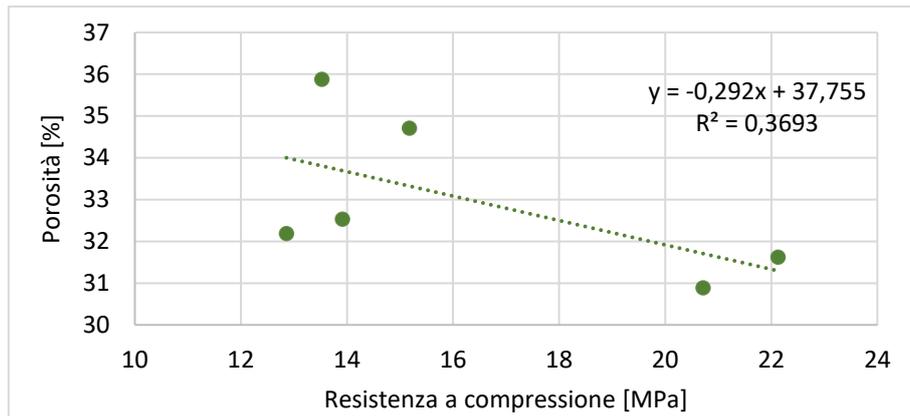


Grafico 22 Confronto tra resistenza a compressione e porosità dei provini per percentuale di sostituzione

Il grafico 22 pone l'attenzione sulla relazione che lega la resistenza meccanica e la porosità: a valori alti di porosità corrisponde una resistenza meccanica bassa.

Interessante infine vedere come la resistenza meccanica sia legata al modulo elastico del materiale. Un modulo elastico elevato indica la presenza di vuoti o difetti all'interno del campione che vanno a condizionare la resistenza meccanica. Nel grafico 23 si osserva che a un basso valore di modulo elastico corrisponde un basso valore di resistenza a compressione.

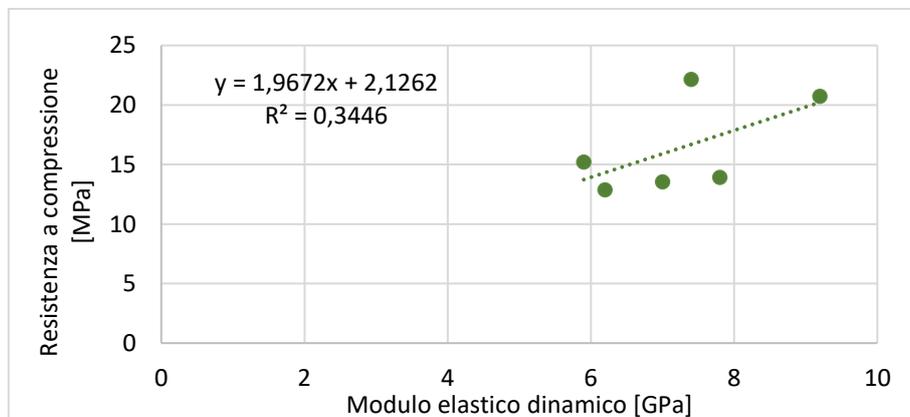


Grafico 23 Confronto tra modulo elastico e resistenza a compressione dei provini per percentuale di sostituzione

### 3.9 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRECTA

I test per valutare la resistenza a trazione dei mattoni sono stati condotti su tre provini per ciascuna percentuale di sostituzione e per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

#### 3.9.1 Risultati delle prove

PROVINI		LUNGHEZZA MEDIA [mm]	FORZA [KN]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	RESISTENZA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	SD [-]
RIF_0	4	37,5	2,00	0,97	2,48	1,40
	5	39,0	8,47	3,74		
	6	39,0	5,84	2,73		
DS_5	5	34,5	4,99	2,42	2,15	0,95
	5	37,5	6,56	2,93		
	7	38,0	2,29	1,10		
DS_10	5	34,5	2,69	1,38	1,39	0,36
	7	35,0	2,06	1,04		
	8	40,0	3,97	1,76		
DS_15	4	35,5	3,29	1,55	1,35	0,24
	5	40,0	2,99	1,40		
	6	33,5	2,17	1,09		
DS_30	4	35,5	3,39	1,60	1,41	0,50
	5	38,0	4,04	1,78		
	6	33,5	1,71	0,83		
DS_50	6	36,5	1,80	0,85	1,14	0,55
	7	37,0	1,90	0,80		
	8	36,5	3,76	1,77		

Tabella 23 Risultati della prova a trazione sui provini

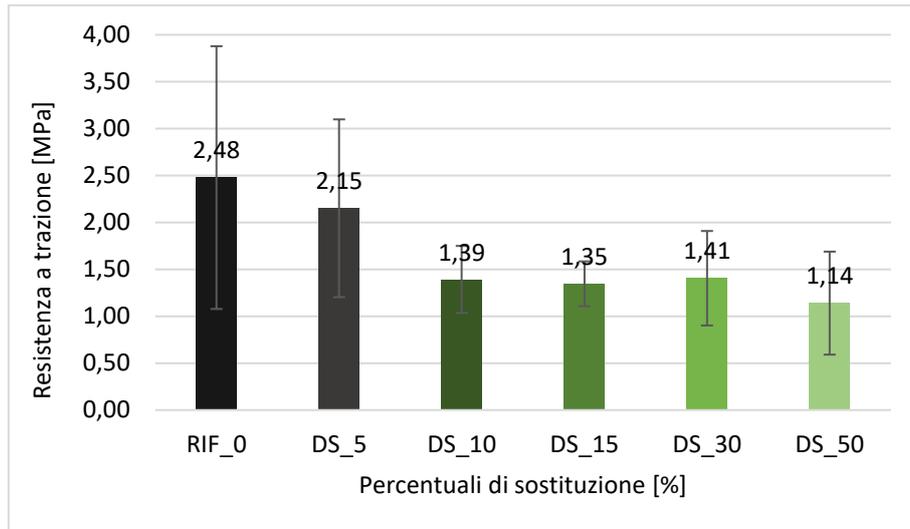


Grafico 24 Resistenza a trazione dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

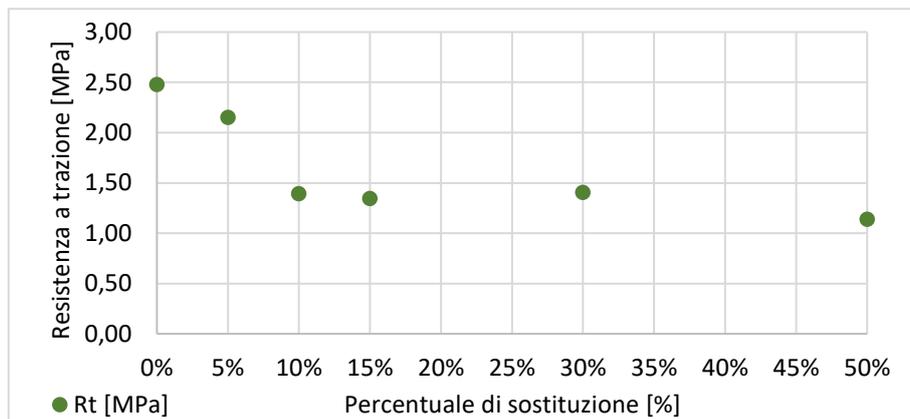


Grafico 25 Distribuzione della resistenza a trazione per percentuale di sostituzione

### 3.9.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 24, la resistenza a trazione varia, ma non di molto, all'aumentare della percentuale di sostituzione dei sedimenti rispetto all'argilla.

Si può vedere come rispetto al campione di riferimento RIF\_0, la resistenza a trazione si riduce fino a dimezzarsi nel campione DS\_50.

Inizialmente, la resistenza si riduce solo del 13% in DS\_5, ma già in DS\_10 c'è una diminuzione di resistenza pari al 44%, al 46% in DS\_15, al 43% in DS\_30 ed infine, al 54% in DS\_50.

La minore resistenza dei provini dipende dalla maggiore porosità (grafico 26), come evidenziato anche dalla prova Pundit dove a porosità maggiore si riscontrava anche un modulo elastico minore.

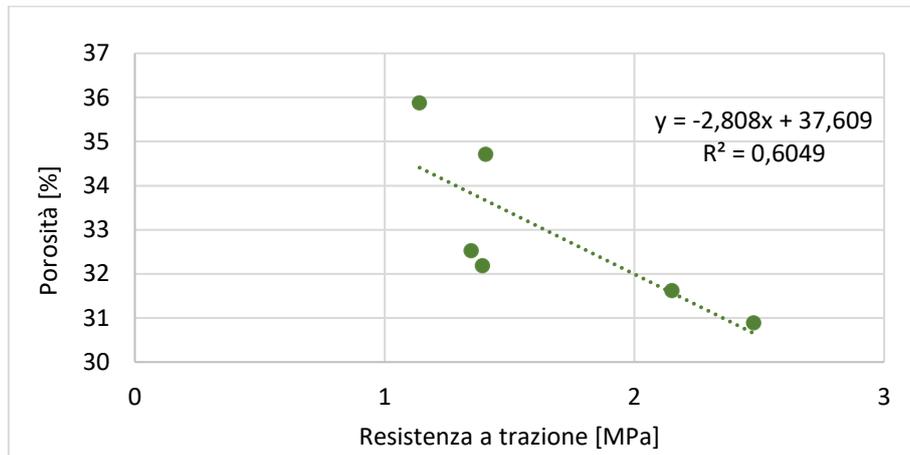


Grafico 26 Confronto tra resistenza a trazione e porosità dei provini per percentuale di sostituzione

### 3.10 INITIAL RATE OF ABSORPTION (IRA)

Per determinare il tasso iniziale di assorbimento d'acqua dei mattoni (IRA) sono stati testati cinque provini per ciascuna percentuale di sostituzione, ricavati dalle metà dei provini ottenuti durante la rottura a trazione.

Successivamente, per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

#### 3.10.1 Risultati delle prove

PROVINI	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PESO SECCO [g]	PESO DOPO 1 MIN [g]	IRA [g/min/200 cm <sup>2</sup> ]	IRA media [g/min/200 cm <sup>2</sup> ]	SD [-]
RIF_0	4.1	24,73	47,35	50,66	3,19	0,17
	5.1	25,29	53,79	56,98		
	5.2	24,55	45,22	48,61		
	6.1	25,29	47,85	50,87		
	6.2	26,64	52,65	55,67		
DS_5	5.1	23,58	45,32	48,40	3,24	0,32
	5.2	26,02	47,08	50,21		
	6.1	33,02	64,02	67,69		
	6.2	22,52	42,03	45,48		
	7.1	30,19	59,48	62,35		
DS_10	5.1	29,99	58,54	61,73	3,39	0,30
	5.2	21,50	41,02	44,16		
	7.1	30,22	57,28	60,48		
	8.1	27,91	54,82	58,43		
	8.2	28,06	57,62	61,42		
DS_15	4.1	21,93	41,51	45,39	3,49	0,23
	5.1	24,99	50,21	53,64		
	5.2	20,24	41,22	44,60		
	6.1	24,30	49,10	52,54		
	6.2	24,24	44,11	47,41		
DS_30	4.1	27,27	50,96	54,55	3,60	0,33
	4.2	27,00	50,54	54,29		
	5.1	22,42	45,05	48,48		
	5.2	24,38	45,91	49,97		
	6.1	21,40	39,91	43,09		
	6.2	21,40	39,91	43,09		

	6.1	24,82	51,12	54,75	3,63		
	6.2	23,25	46,13	50,79	4,66		
<b>DS_50</b>	7.1	25,86	46,95	51,39	4,44	4,44	0,52
	8.1	28,25	52,26	56,68	4,42		
	8.2	26,26	47,60	52,67	5,07		

Tabella 24 Risultati della prova IRA sui provini

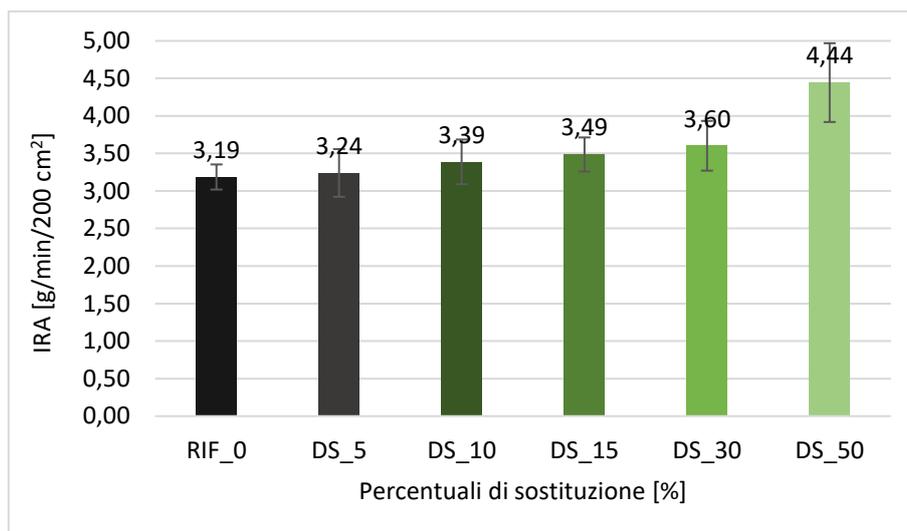


Grafico 27 IRA dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

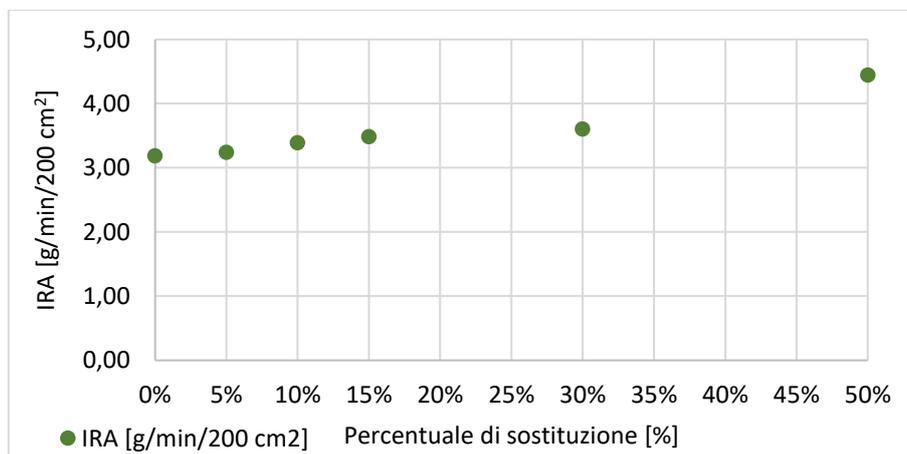


Grafico 28 Distribuzione IRA per percentuale di sostituzione

### 3.10.2 Discussione dei risultati

Come si osserva dal grafico 27, i valori di IRA crescono in modo lineare all'aumentare della percentuale di sostituzione di materiale dragato, come confermato dal grafico 29. Si può vedere come rispetto al campione di riferimento RIF\_0, il valore del tasso iniziale di assorbimento aumenti di circa il 2% in DS\_5, del 6% in DS\_10, del 9% in DS\_15, del 13% in DS\_30 ed infine del 40% in DS\_50.

Questi risultati dipendono fortemente dalla porosità del campione, in quanto maggiore è la porosità del provino e maggiore è il quantitativo di acqua che riesce a penetrare nel provino stesso.

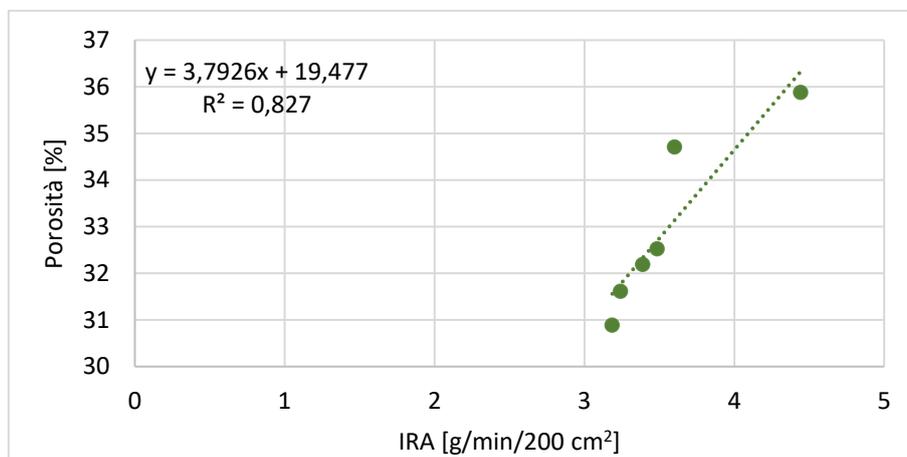


Grafico 29 Confronto tra IRA e porosità dei provini per percentuale di sostituzione

Un altro interessante aspetto è quello che lega l'IRA alla resistenza meccanica del campione.

Come riportato nel capitolo 2.8, l'adesione tra malta e mattone è dovuta principalmente all'interconnessione meccanica dei prodotti di idratazione del cemento che crescono nei pori del mattone e sulla superficie del mattone, e quelli legati alla pasta di malta.

Un IRA più elevato produce una maggiore penetrazione della pasta di malta nel mattone e, quindi, una maggiore forza di adesione. Tuttavia, se l'IRA è troppo alto, la forza di adesione sarà ridotta a causa di un aumento delle microfessurazioni indotte dal ritiro all'interfaccia mattone/malta.

L'IRA del mattone riduce la resistenza del legame alla flessione se è troppo alta o troppo bassa.

I valori ottimali di IRA per un mattone variano da 1 a 3 g/min/200 cm<sup>2</sup> (di solito 2 g/min/200 cm<sup>2</sup>) [23].

Ciò significa che dai risultati ottenuti, i provini hanno un IRA troppo elevato per un'applicazione ottimale. In questo caso, la soluzione operativa consiste nel bagnare il mattone prima della posa.

Se l'assorbimento dell'acqua avviene in meno di un minuto e mezzo, il mattone va inumidito prima della posa; se è troppo secco, assorbirà troppa acqua dalla malta applicata, indebolendo il legame.

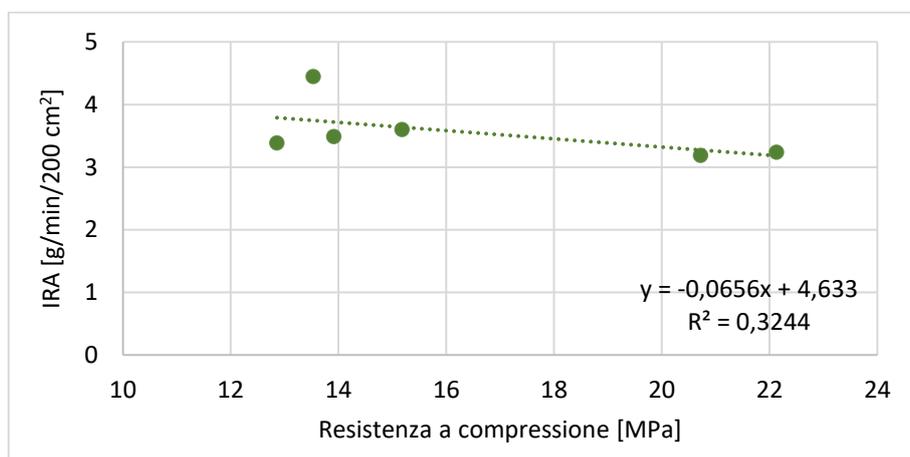


Grafico 30 Confronto tra IRA e resistenza a compressione dei provini per percentuale di sostituzione

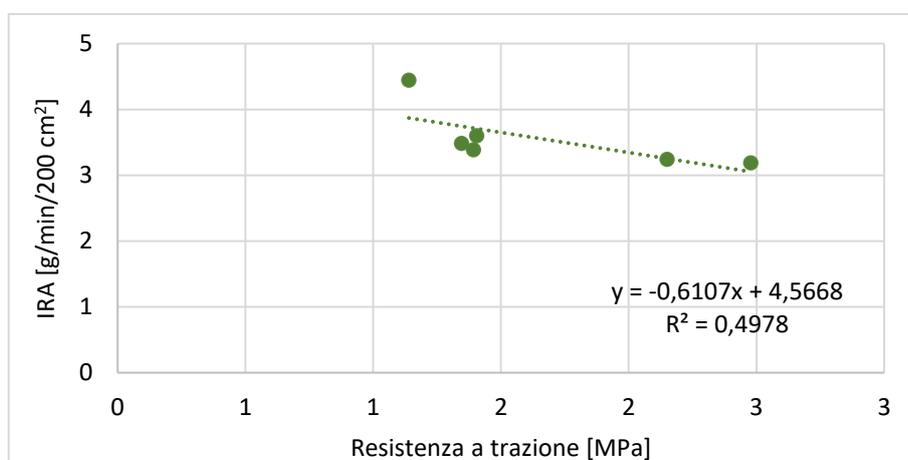


Grafico 31 Confronto tra IRA e resistenza a trazione dei provini per percentuale di sostituzione

### 3.11 ASSORBIMENTO D'ACQUA

Per determinare l'assorbimento d'acqua dei mattoni sono stati testati cinque provini per ciascuna percentuale di sostituzione, gli stessi utilizzati nella prova del tasso iniziale di assorbimento (IRA).

Successivamente, per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

#### 3.11.1 Risultati delle prove

PROVINI	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PESO SECCO [g]	PESO DOPO 24 h [g]	ASSORBIMENTO [%]	ASSORBIMENTO MEDIO [%]	SD [-]
RIF_0	4.1	24,73	47,35	53,90	13,83	13,56 0,24
	5.1	25,29	53,79	61,20	13,78	
	5.2	24,55	45,22	51,27	13,38	
	6.1	25,29	47,85	54,32	13,52	
	6.2	26,64	52,65	59,64	13,28	
DS_5	5.1	23,58	45,32	51,71	14,10	13,96 0,33
	5.2	26,02	47,08	53,69	14,04	
	6.1	33,02	64,02	73,08	14,15	
	6.2	22,52	42,03	47,97	14,13	
	7.1	30,19	59,48	67,44	13,38	
DS_10	5.1	29,99	58,54	66,76	14,04	14,19 0,19
	5.2	21,50	41,02	46,89	14,31	
	7.1	30,22	57,28	65,27	13,95	
	8.1	27,91	54,82	62,68	14,34	
	8.2	28,06	57,62	65,88	14,34	
DS_15	4.1	21,93	41,51	47,77	15,08	14,68 0,26
	5.1	24,99	50,21	57,42	14,36	
	5.2	20,24	41,22	47,24	14,60	
	6.1	24,30	49,10	56,30	14,66	
	6.2	24,24	44,11	50,60	14,71	
DS_30	4.1	27,27	50,96	58,82	15,42	15,59 0,18
	4.2	27,00	50,54	58,39	15,53	
	5.1	22,42	45,05	52,02	15,47	
	5.2	24,38	45,91	53,20	15,88	
	6.1	21,40	39,91	46,15	15,64	

	6.1	24,82	51,12	59,37	16,14		
	6.2	23,25	46,13	54,03	17,13		
<b>DS_50</b>	7.1	25,86	46,95	54,95	17,04	17,04	0,55
	8.1	28,25	52,26	61,27	17,24		
	8.2	26,26	47,60	56,00	17,65		

Tabella 25 Risultati della prova di assorbimento d'acqua sui provini

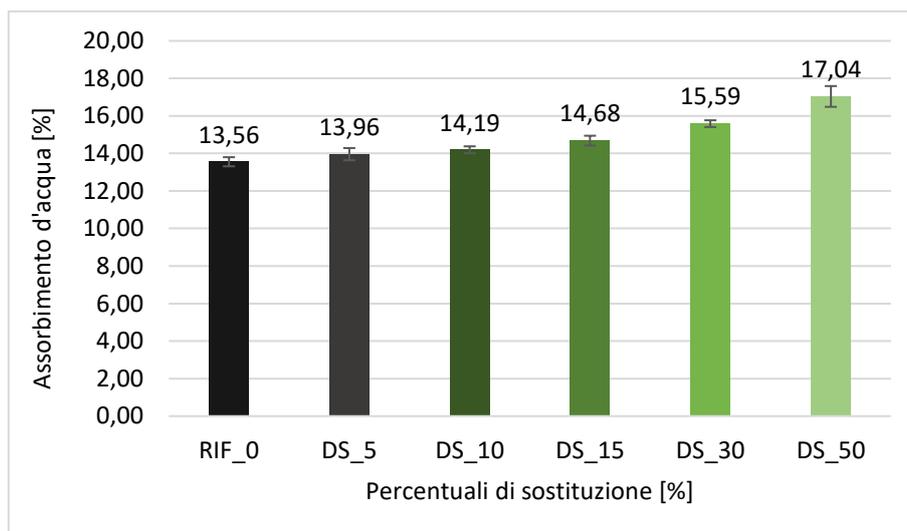


Grafico 32 Assorbimento d'acqua dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione

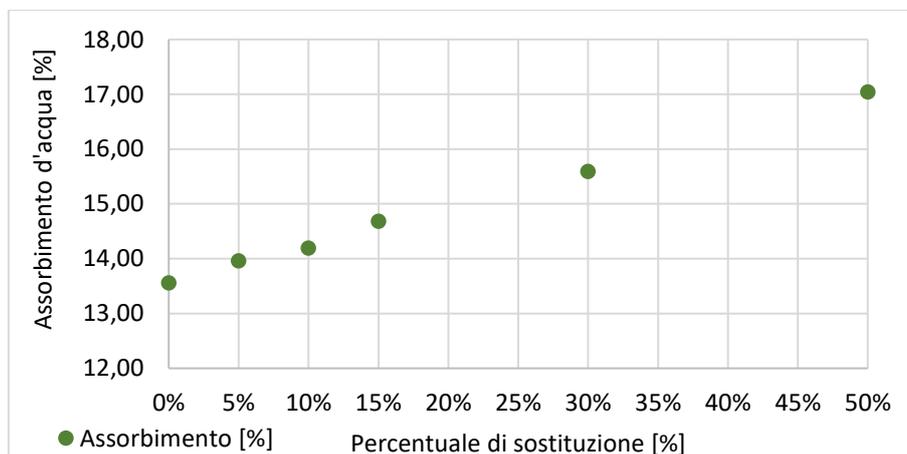


Grafico 33 Distribuzione dell'assorbimento d'acqua per percentuale di sostituzione

### 3.11.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 32, l'assorbimento d'acqua nei campioni testati cresce linearmente all'aumentare della percentuale di sostituzione di materiale dragato, come confermato dalla curva di tendenza lineare mostrata nel grafico 34.

I risultati mostrano come, rispetto al campione di riferimento RIF\_0, il valore dell'assorbimento aumenti del 3% in DS\_5, del 5% in DS\_10, del 8% in DS\_15, del 15% in DS\_30 ed infine del 26% in DS\_50.

Come per l'IRA, questi risultati dipendono fortemente dalla porosità del campione, in quanto maggiore è la porosità del provino e maggiore è il quantitativo di acqua che il provino riesce ad assorbire stesso.

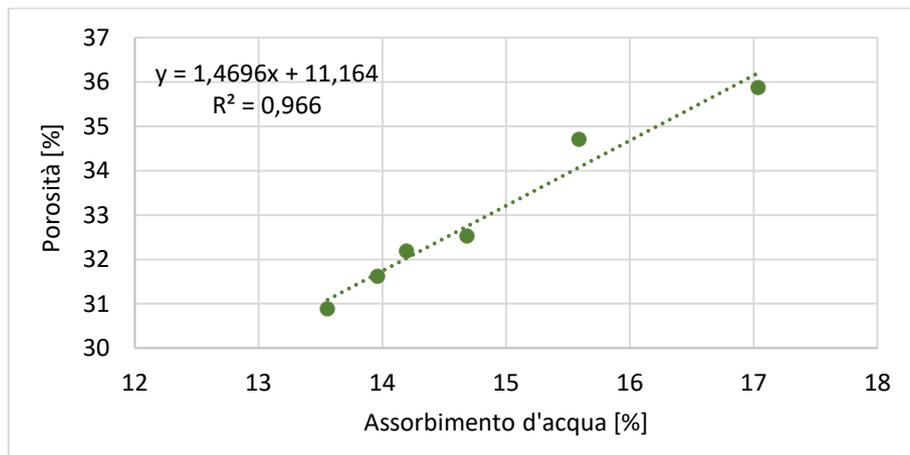


Grafico 34 Confronto tra percentuale di assorbimento e porosità dei provini per percentuale di sostituzione

## 4 OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

Per avere una rappresentazione più completa del lavoro effettuato, si è deciso di ripetere tutta la sperimentazione andando a modificare la temperatura di cottura dei mattoni, portandola da 900 °C a 950 °C, e osservare cosa questa variazione ha prodotto. Questo al fine di migliorare le prestazioni (come, ad esempio, diminuire il coefficiente IRA).

Si decide di realizzare unicamente provini con percentuale di sostituzione del 30% cotti a 950 °C, rapportandoli a provini fatti con l'argilla di riferimento, cotti a loro volta a 950 °C.

I diversi test si sono realizzati per poter verificare l'ottimizzazione del processo produttivo, si procede dunque alla preparazione di 4 provini per percentuale di sostituzione al 30%, e 4 provini di riferimento, per un totale di 8 provini.

Le proporzioni dei componenti sono le stesse descritte nel capitolo 2.11 ed i valori vengono riportati di seguito per completezza nella tabella 26.

PERCENTUALI SOSTITUZIONE	ARGILLA FINE (<250µm) [g/L]	ARGILLA GROSSA (>250µm) [g/L]	DS [g/L]	SABBIA [g/L]	ACQUA [g/L]
RIF_0.950	178,96	95,54	/	/	21,60
DS_30.950	125,27	66,88	52,28	15,24	21,60

Tabella 26 Proporzione dei componenti

La metodologia di preparazione dei provini è quella descritta nel capitolo 2.12, con la differenza che una volta che i provini vengono lasciati ad essiccare 48 h all'aria e 24 h in stufa a 105 °C, questi vengono cotti in una muffola a 950 °C per 8 h, di cui 6 h per raggiungere la temperatura di 950 °C (con una rampa di circa 2,6 °C/min) ed ulteriori 2 h di mantenimento a tale temperatura.

Dopo la cottura, i campioni vengono lasciati raffreddare fino alle condizioni ambientali (20 °C).

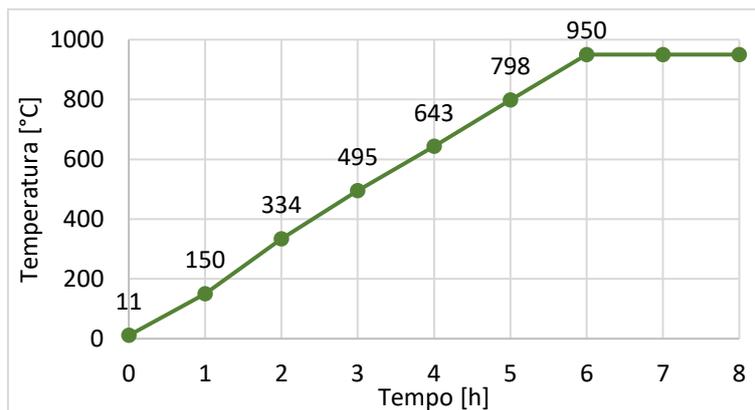


Grafico 35 Andamento della temperatura in funzione del tempo

Di seguito sono riportate delle tabelle riassuntive (Tabelle 27 e 28) con i valori delle dimensioni medie, dei pesi e delle percentuali di perdita in peso dei provini confezionati con le diverse percentuali di sostituzione.

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 0%: RIF_0.950				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1	 PESO [g]: 127,10	 PESO [g]: 107,43 %perdita peso 0-48h: 15,48	 PESO [g]: 103,08 %perdita peso 48h-24h: 4,05	 PESO [g]: 94,98 %perdita peso 24h-cottura: 7,86 Dim [mm]: 38x38x38
2	 PESO [g]: 134,87	 PESO [g]: 113,56 %perdita peso 0-48h: 15,80	 PESO [g]: 109,24 %perdita peso 48h-24h: 3,80	 PESO [g]: 100,66 %perdita peso 24h-cottura: 7,85 Dim [mm]: 38x38x40

3				
	PESO [g]: 128,79	PESO [g]: 107,91 %perdita peso 0-48h: 16,21	PESO [g]: 104,45 %perdita peso 48h-24h: 3,21	PESO [g]: 96,25 %perdita peso 24h-cottura: 7,85 Dim [mm]: 38x38x40
				
	PESO [g]: 136,03	PESO [g]: 114,51 %perdita peso 0-48h: 15,82	PESO [g]: 110,60 %perdita peso 48h-24h: 3,41	PESO [g]: 101,89 %perdita peso 24h-cottura: 7,88 Dim [mm]: 39x39x40

Tabella 27 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini RIF\_0.950

PERCENTUALE DI SOSTITUZIONE 30%: DS_30.950				
N	giorno 0	48h aria	24h stufa a 105°C	dopo cottura
1				
	PESO [g]: 132,95	PESO [g]: 111,57 %perdita peso 0-48h: 16,08	PESO [g]: 108,01 %perdita peso 48h-24h: 3,19	PESO [g]: 97,94 %perdita peso 24h-cottura: 9,32 Dim [mm]: 39x39x40

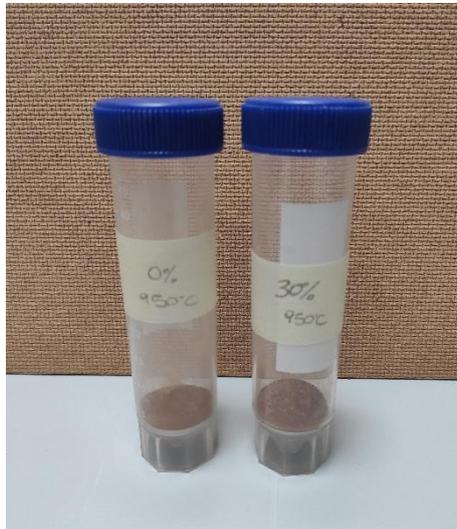
2				
	PESO [g]: 133,64	PESO [g]: 111,91 %perdita peso 0-48h: 16,26	PESO [g]: 108,47 %perdita peso 48h-24h: 3,07	PESO [g]: 98,36 %perdita peso 24h-cottura: 9,32 Dim [mm]: 38x38x41
3				
	PESO [g]: 128,85	PESO [g]: 107,82 %perdita peso 0-48h: 16,32	PESO [g]: 104,59 %perdita peso 48h-24h: 3,00	PESO [g]: 94,87 %perdita peso 24h-cottura: 9,29 Dim [mm]: 38x38x39
4				
	PESO [g]: 128,89	PESO [g]: 107,58 %perdita peso 0-48h: 16,53	PESO [g]: 104,60 %perdita peso 48h-24h: 2,77	PESO [g]: 94,88 %perdita peso 24h-cottura: 9,29 Dim [mm]: 39x40x37

Tabella 28 Dimensioni medie, pesi e percentuali di perdita in peso dei provini DS\_30.950

Una volta raffreddati, i provini vengono sottoposti alle prove descritte nel capitolo 2 per individuarne le proprietà chimiche, fisiche e meccaniche.

In particolare, viene misurata la densità di tutti i provini; due provini per campione vengono sottoposti alla prova ad ultrasuoni ed alla prova a compressione; i restanti due provini vengono sottoposti alla prova a trazione e, con le due metà che se ne ottengono, si effettuano le prove di IRA e assorbimento d'acqua.

Infine, vengono prelevati dei campioni, macinati e setacciati mediante setaccio <math><90\ \mu\text{m}</math> e mandati ad analizzare mediante diffrazione di raggi X (XRD).



*Figura 65 Campioni per XRD*

## 4.1 DIFFRATTOMETRIA DI RAGGI X (XRD) POST-COTTURA

### 4.1.1 Risultati delle prove

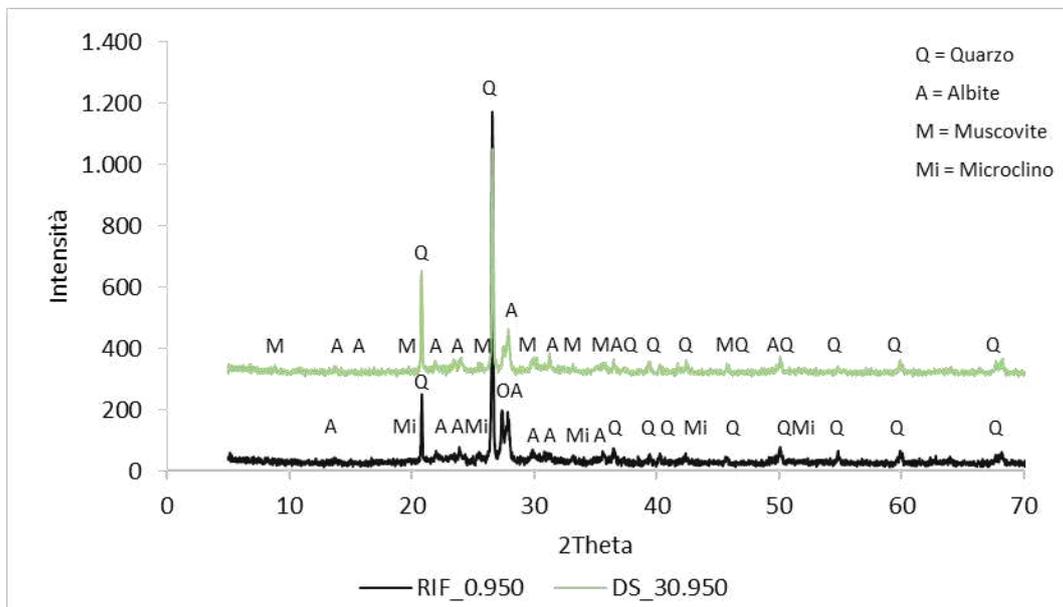


Grafico 36 Diffrazione di raggi X di un campione di mattone cotto per ciascuna percentuale di sostituzione

### 4.1.2 Discussione dei risultati

Dalla diffrazione di raggi X (XRD) si osserva come dopo la fase di cottura a 950 °C la principale specie mineralogica presente nei provini sia ancora il quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), tuttavia mentre in DS\_30.950 vi sono picchi di muscovite e albite, esattamente come nei provini cotti a 900 °C (DS\_30), nei provini con percentuale di sostituzione 0% (RIF\_0.950) si sono venuti a formare microclini, alluminosilicati appartenenti al gruppo dei feldspati.

## 4.2 DENSITÀ

Prima che vengano effettuate le prove meccaniche distruttive sui campioni, essi vengono pesati per valutarne la densità. È stata calcolata quindi la densità media dei provini per ciascuna percentuale di sostituzione e la relativa deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

### 4.2.1 Risultati delle prove

PROVINI	PESO [g]	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	DENSITÀ [g/cm <sup>3</sup> ]	DENSITÀ MEDIA [g/cm <sup>3</sup> ]	SD [-]	
RIF_0.950	1	94,98	55,42	1,71	1,69	0,01
	2	100,66	59,89	1,68		
	3	96,25	57,07	1,69		
	4	101,89	60,27	1,69		
DS_30.950	1	97,94	58,37	1,68	1,65	0,02
	2	98,36	60,47	1,63		
	3	94,87	58,19	1,63		
	4	94,88	57,44	1,65		

Tabella 29 Risultati della densità per percentuale di sostituzione

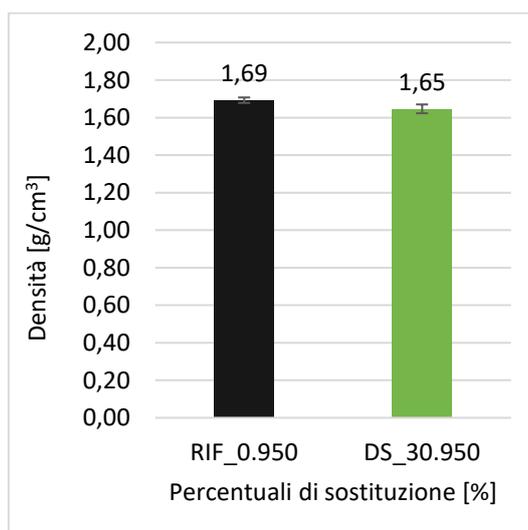


Grafico 37 Densità dei provini per percentuale di sostituzione

#### 4.2.2 Discussione dei risultati

Dai risultati si osserva che anche in questo caso i valori di densità ottenuti sono in accordo con la norma UNI 8942:1986 [26] (massa volumica dei laterizi pieni =  $1,3 \div 1,8$  g/cm<sup>3</sup>).

Il grafico 37 mostra che i valori della densità delle due percentuali di sostituzione sono pressoché identici questo perché nonostante i due campioni siano costituiti da specie mineralogiche differenti (come dimostrato dalla prova diffrattometrica di raggi X), quarzo-albite-microclino il RIF\_0.950 e quarzo-albite-muscovite il DS\_30.950, microclino e muscovite hanno valori di densità molto simili, rispettivamente 2,56 g/cm<sup>3</sup> e 2,7 g/cm<sup>3</sup> [28].

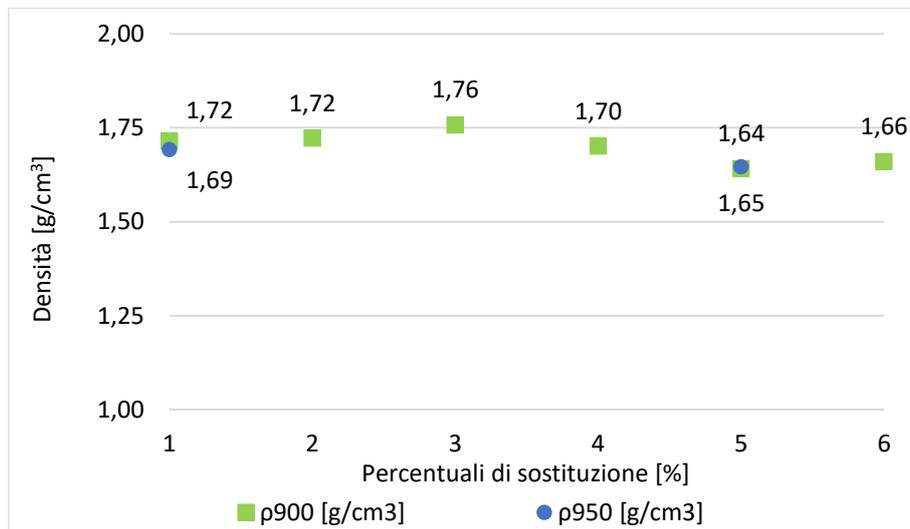


Grafico 38 Confronto tra provini cotti a 900 °C e 950 °C

Dal grafico 38 si osserva che aumentando la temperatura di cottura dei provini da 900 a 950 °C non vi sono variazioni nella densità, nonostante il processo produttivo abbia seguito un piano diverso.

### 4.3 PROVA PUNDIT AD ULTRASUONI

Per questa prova sono stati testati due provini per ciascuna percentuale di sostituzione. Di seguito sono riportati i risultati.

#### 4.3.1 Risultati delle prove

PROVINI	TEMPO [ $\mu$ s]	VELOCITÀ [m/s]	PESO [kg]	DENSITÀ [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO DINAMICO [GPa]	MODULO ELASTICO DINAMICO MEDIO [GPa]	SD [-]
RIF_0.950	1	11,8	3050,85	0,0950	1804,61	12,5	3,42
	3	15,4	2467,53	0,0963	1688,60	7,6	
DS_5.950	2	20,2	1881,19	0,0984	1704,59	4,5	0,55
	3	22,8	1754,39	0,0949	1621,16	3,7	

Tabella 30 Risultati prova Pundit sui provini

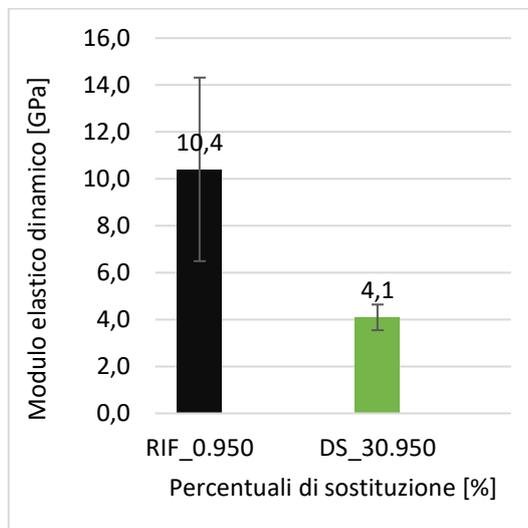


Grafico 39 Modulo elastico dinamico dei provini per percentuale di sostituzione

### 4.3.2 Discussione dei risultati

Come si osserva nel grafico 38, la sostituzione dell'argilla di riferimento con il 30% di sedimenti dragati comporta una diminuzione del modulo elastico, il quale si riduce del 60%, come già osservato per i test con il diverso processo produttivo.

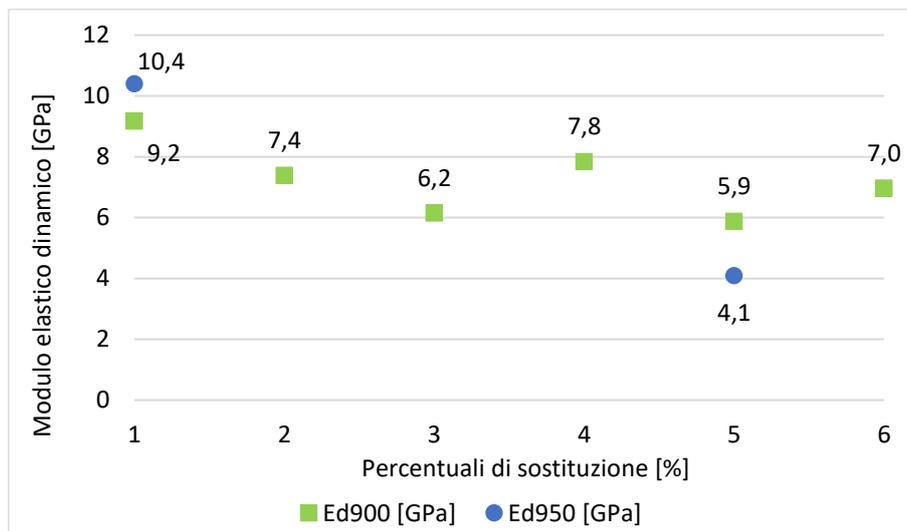


Grafico 40 Confronto tra provini cotti a 900 °C e 950 °C

Rispetto ai provini realizzati precedentemente, in questi provini c'è stato un innalzamento del modulo elastico per quanto riguarda la percentuale di sostituzione 0%, ma un peggioramento del modulo elastico nei provini con percentuale di sostituzione dei DS del 30%. Tuttavia tali variazioni rispetto ai provini con il processo produttivo a 900 °C, dato anche il numero più basso di campioni testato, risulta essere non significativo.

#### 4.4 RESISTENZA A COMPRESSIONE

I test per valutare la resistenza a compressione dei mattoni sono stati condotti su due provini per ciascuna percentuale di sostituzione, gli stessi utilizzati per la prova Pundit ad ultrasuoni, e se ne è calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

##### 4.4.1 Risultati delle prove

PROVINI		AREA MEDIA [mm <sup>2</sup> ]	FORZA [KN]	RESISTENZA A COMPRESSIONE [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	SD [-]
RIF_0.950	1	1434,50	21,70	15,13	19,59	6,30
	3	1490,25	35,83	24,04		
DS_30.950	2	1521,38	14,15	9,30	11,77	3,49
	3	1477,56	21,04	14,24		

Tabella 31 Risultati della prova a compressione sui provini

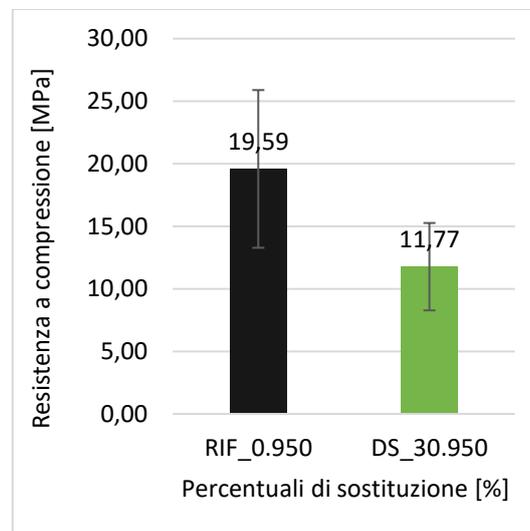


Grafico 41 Resistenza a compressione dei provini per percentuale di sostituzione

##### 4.4.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 40, la resistenza a compressione diminuisce quando sostituiamo il 30% dell'argilla di riferimento con DS e questa diminuzione è pari al 40%.

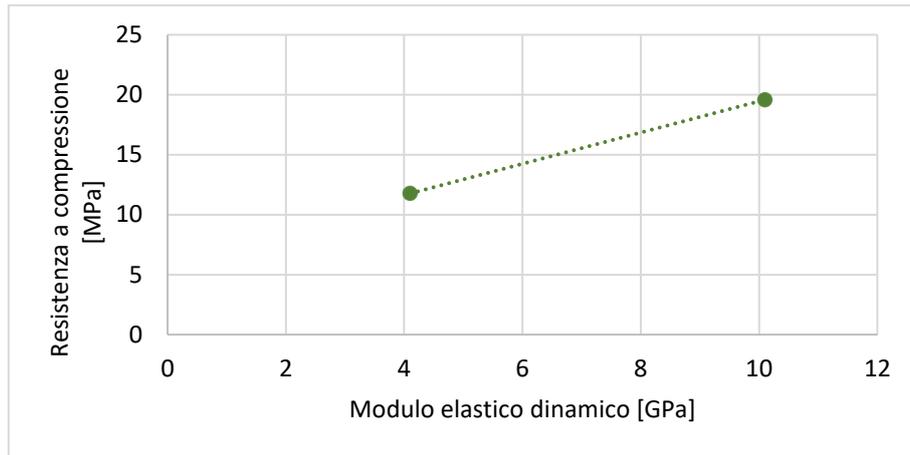


Grafico 42 Confronto tra modulo elastico e resistenza a compressione dei provini

Si constata dalla prova Pundit ad ultrasuoni che i campioni confezionati con un'alta percentuale di sostituzione hanno un modulo elastico basso e questo si traduce in maggiore porosità e minore resistenza meccanica, come viene accertato dalle prove di rottura. Il modulo elastico dinamico può essere, infatti, relazionato alla resistenza a compressione in quanto a un basso valore di modulo elastico corrisponde una bassa resistenza meccanica (grafico 41).

I bassi valori di resistenza meccanica ottenuti rispettano, tuttavia, i limiti imposti dalle norme vigenti che stabiliscono un valore minimo di resistenza alla compressione di 10 MPa [19].

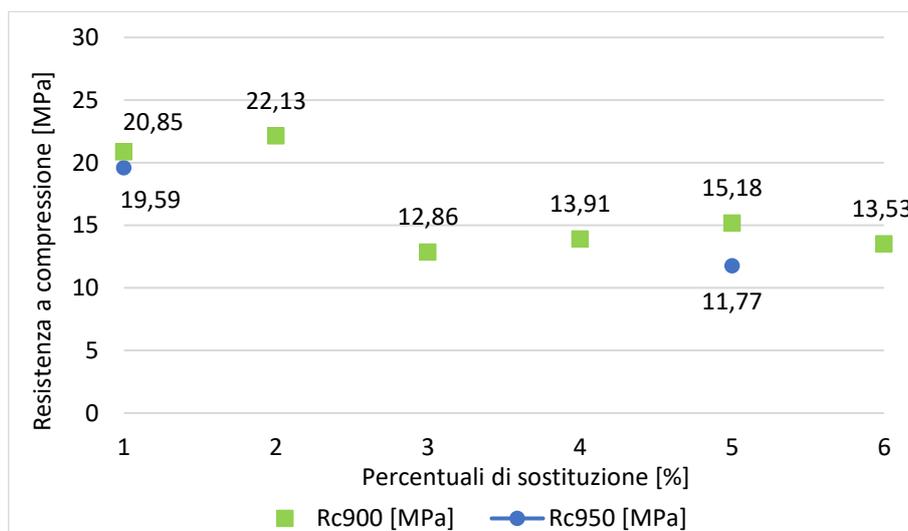


Grafico 43 Confronto tra provini cotti a 900 °C e 950 °C

Infine, il grafico 42 mostra che, contrariamente a quanto ci si aspettava, la resistenza meccanica dei provini cotti a 950 °C non è affatto migliorata, bensì è diminuita del 6% in RIF\_0.950 e del 22% in DS\_30.950.

## 4.5 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRECTA

I test per valutare la resistenza a trazione dei mattoni sono stati condotti su due provini per ciascuna percentuale di sostituzione e per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

### 4.5.1 Risultati delle prove

PROVINI	LUNGHEZZA MEDIA [mm]	FORZA [KN]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	RESISTENZA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	SD [-]
RIF_0.950	2	38,0	8,5	4,1	0,28
	4	38,0	9,6	4,4	
DS_5.950	1	39,0	3,9	1,6	1,49
	4	35,5	7,9	3,7	

Tabella 32 Risultati della prova a trazione sui provini

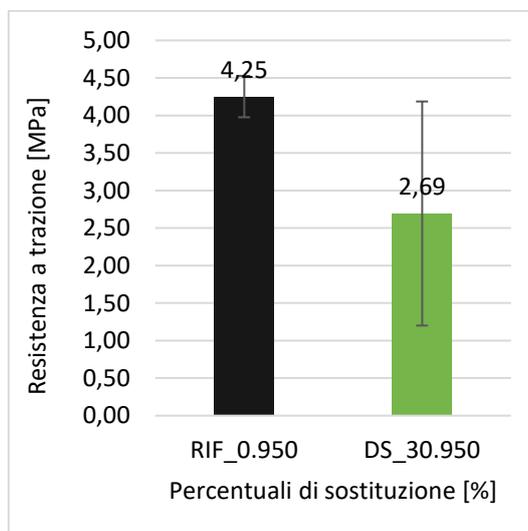


Grafico 44 Resistenza a trazione dei provini per percentuale di sostituzione

### 4.5.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 43, la resistenza a trazione del provino DS\_30.950 diminuisce del 37% rispetto al provino di riferimento RIF\_0.950.

La minore resistenza dei provini era facilmente intuibile già dalla prova Pundit dove si era registrata una diminuzione del modulo elastico di più del doppio (60%): minore è il modulo elastico e minore è la resistenza a trazione del campione (grafico 44).

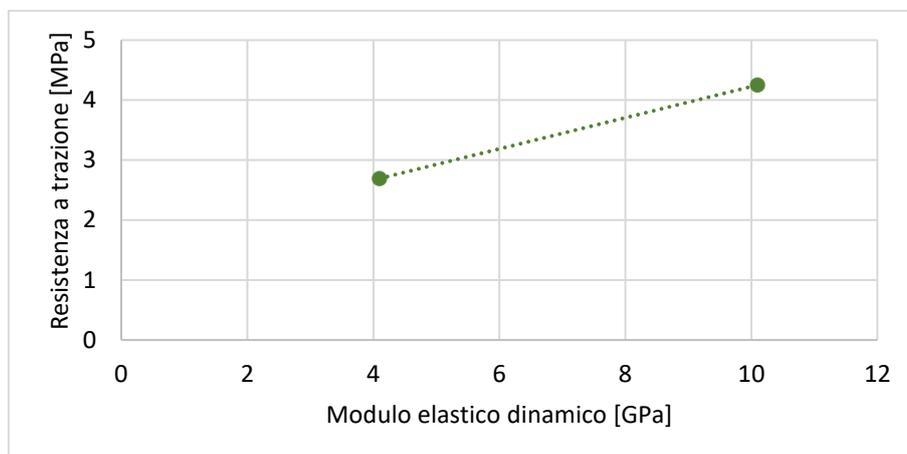


Grafico 45 Confronto tra modulo elastico e resistenza a trazione dei provini

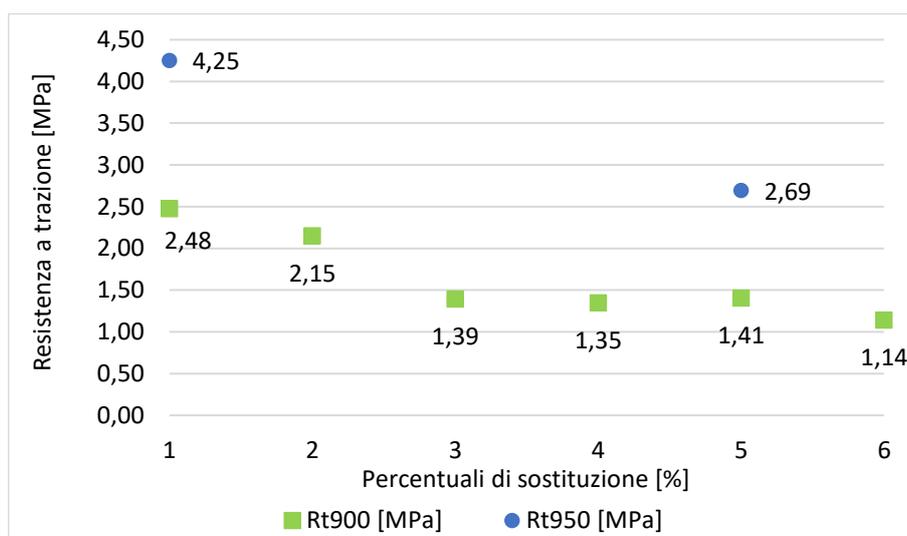


Grafico 46 Confronto tra provini cotti a 900 °C e 950 °C

Se la variazione di temperatura di cottura non ha apportato migliorie nella resistenza a compressione, non si può dire altrettanto per quanto riguarda la resistenza a trazione. Il grafico 45 mostra un deciso aumento dei valori della resistenza a trazione nei provini cotti a 950 °C, con un incremento del 42% in RIF\_0.950 e del 47% in DS\_0.950 rispetto ai provini con le medesime percentuali di sostituzione ma che hanno subito una cottura a 900 °C.

## 4.6 INITIAL RATE OF ABSORPTION (IRA)

Per determinare il tasso iniziale di assorbimento d'acqua dei mattoni (IRA) sono stati testati quattro provini per ciascuna percentuale di sostituzione, ricavati dalle metà dei provini ottenuti durante la rottura a trazione.

Successivamente, per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

### 4.6.1 Risultati delle prove

PROVINI	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PESO SECCO [g]	PESO DOPO 1 MIN [g]	IRA [g/min/200 cm <sup>2</sup> ]	IRA MEDIO [g/min/200 cm <sup>2</sup> ]	SD [-]
RIF_0.950	2.1	27,74	48,50	51,00	2,50	2,44
	2.2	26,32	49,71	51,86	2,15	
	4.1	26,80	47,94	50,70	2,76	
	4.2	25,72	52,12	54,45	2,33	
DS_30.950	1.1	22,16	39,54	42,47	2,93	2,99
	1.2	28,25	53,15	56,26	3,11	
	4.1	27,01	46,93	50,10	3,17	
	4.2	25,35	46,85	49,61	2,76	

Tabella 33 Risultati IRA sui provini

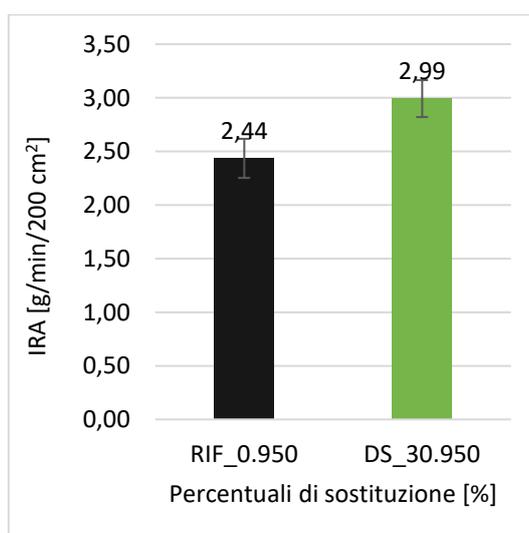


Grafico 47 IRA dei provini per percentuale di sostituzione

#### 4.6.2 Discussione dei risultati

Il grafico 46 mostra un aumento del valore di IRA quando si sostituisce l'argilla di riferimento con materiale dragato pari al 18%.

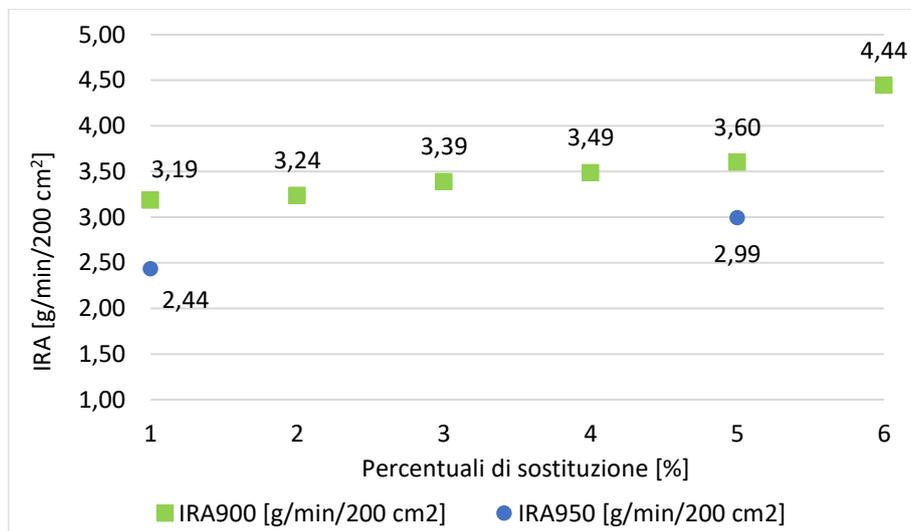


Grafico 48 Confronto tra provini cotti a 900 °C e 950 °C

I valori ottimali di IRA per un mattone pieno variano da 1 a 3 g/min/200 cm<sup>2</sup> (di solito 2 g/min/200 cm<sup>2</sup>) [23].

Ciò significa che i risultati ottenuti, contrariamente a quanto accaduto per i provini cotti a 900 °C, rientrano nel range previsto dalla normativa, sia per i provini di riferimento sia per i provini che presentano una percentuale di sostituzione pari al 30%.

## 4.7 ASSORBIMENTO D'ACQUA

Per determinare l'assorbimento d'acqua dei mattoni sono stati testati quattro provini per ciascuna percentuale di sostituzione, gli stessi utilizzati nella prova del tasso iniziale di assorbimento (IRA).

Successivamente, per ogni percentuale di sostituzione è stato calcolato il valore medio e la deviazione standard.

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove.

### 4.7.1 Risultati delle prove

PROVINI	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]	PESO SECCO [g]	PESO DOPO 24 h [g]	ASSORBIMENTO [%]	ASSORBIMENTO MEDIO [%]	SD [-]
RIF_0.950	2.1	27,74	48,50	55,59	14,62	14,41 0,18
	2.2	26,32	49,71	56,78	14,22	
	4.1	26,80	47,94	54,89	14,50	
	4.2	25,72	52,12	59,57	14,29	
DS_30.950	1.1	22,16	39,54	45,57	15,25	15,44 0,17
	1.2	28,25	53,15	61,30	15,33	
	4.1	27,01	46,93	54,26	15,62	
	4.2	25,35	46,85	54,13	15,54	

Tabella 34 Risultati della prova di assorbimento d'acqua sui provini

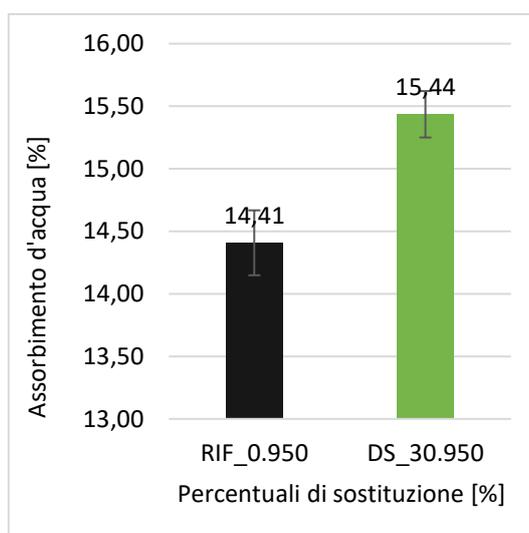


Grafico 49 Assorbimento d'acqua dei provini per percentuale di sostituzione

### 4.7.2 Discussione dei risultati

Come riportato nel grafico 50, l'assorbimento d'acqua nei campioni testati cresce all'aumentare della percentuale di sostituzione di materiale dragato del 7%.

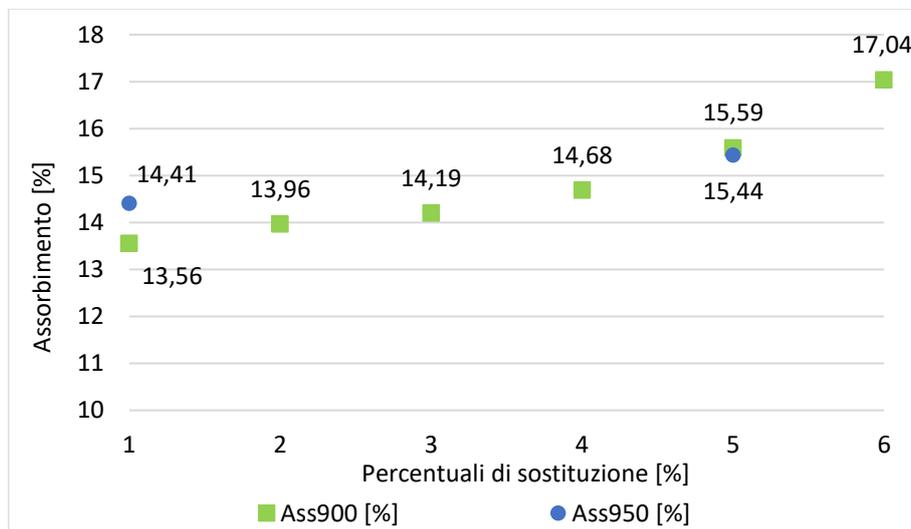


Grafico 50 Confronto assorbimento d'acqua tra i provini cotti a 900 °C e 950 °C

Dal grafico 49 si osserva che la percentuale di assorbimento d'acqua nei provini cotti a 950 °C è abbastanza simile a quella che si riscontrava nei provini cotti a 900 °C. Si ha infatti un incremento del 7% nei provini RIF\_0.950 e dell'1% in DS\_30.950, che non viene considerato significativo.

## CONCLUSIONI

In questa sperimentazione sono state studiate 6 tipologie di laterizi ottenute sostituendo l'argilla tradizionale con percentuali via via maggiori di materiale dragato dal porto di Ancona, trattato in laboratorio per eliminare metalli pesanti, contaminanti organici e materia organica in esso contenuti, secondo i limiti previsti dalla norma UNI EN 12457-2:2004 [28].

Le percentuali di sostituzione dell'argilla trattata, in peso, prese in esame sono state 0%, 5%, 10%, 15%, 30% e 50%.

I provini realizzati con percentuale di sostituzione 0% sono stati presi come riferimento per la valutazione delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche dei restanti provini.

L'obiettivo della sperimentazione è stato valutare la possibilità di realizzare mattoni con sedimenti di dragaggio, con proprietà apprezzabili, paragonabili a quelli dei materiali tradizionali.

I risultati dell'analisi diffrattometrica di raggi X hanno mostrato che i sedimenti dragati sono costituiti pressoché delle stesse specie mineralogiche dell'argilla tradizionale, ovvero quarzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) e muscovite, rendendo quindi le due materie prime di natura simile.

Campioni di argilla di riferimento e DS sono stati poi sottoposti ad un'analisi termogravimetrica e, osservando le curve ottenute dall'analisi, tra i 550 °C e gli 850 °C, si evidenzia una reazione endotermica con perdita di massa da parte dei campioni: la perdita è di 16,43% per i DS, 5,60% per l'argilla fine <250  $\mu\text{m}$  e 4,67% per l'argilla >250  $\mu\text{m}$ .

Il carbonato di calcio subisce una decomposizione in ossido di calcio a 750 °C liberando anidride carbonica, per cui è sufficiente valutare la perdita di  $\text{CO}_2$  per risalire alla quantità di carbonato presente originariamente nel campione.

Dai risultati si osserva come il campione di DS presenti un maggior contenuto di  $\text{CaCO}_3$  rispetto all'argilla, come anche evidenziato dalla maggior intensità dei picchi attribuiti alla calcite rilevata nei sedimenti dragati durante la prova XRD.

I provini cotti sono stati sottoposti ad una serie di prove in cui sono state misurate la densità, la porosità, il modulo elastico dinamico, la resistenza a compressione e a

trazione indiretta, il tasso iniziale di assorbimento d'acqua (IRA) e l'assorbimento d'acqua.

Approssimando il provino ad un cubo, è stata calcolata la densità di ciascuno a partire dal peso e ne è stata ricavata la densità media.

Si può affermare che i valori della densità non cambiano in modo significativo all'aumentare della percentuale di sostituzione questo perché, come dimostrato dalla prova diffrattometrica di raggi X, i mattoni cotti sono costituiti delle medesime specie minerali, seppur con proporzioni differenti.

I provini più porosi sono risultati quelli in cui l'argilla è stata sostituita da DS con percentuali di sostituzione maggiori: la porosità cresce all'aumentare della percentuale di sostituzione, partendo da 31% in RIF\_0 fino ad un massimo di 36% in DS\_50 seguendo un andamento lineare. Ciò influenza il comportamento meccanico dei provini.

I valori del modulo elastico, misurati attraverso una prova Pundit ad ultrasuoni su due campioni per tipologia di mattone di cui poi ne è stata calcolata la media, tendono a diminuire man mano che la percentuale di sostituzione dei DS rispetto all'argilla di riferimento aumenta, come conseguenza della maggiore porosità dei provini poiché maggiore è la porosità e minore è il modulo elastico.

Un modulo elastico elevato indica la presenza di vuoti o difetti all'interno del campione che vanno a condizionare la resistenza meccanica: a un basso valore di modulo elastico corrisponde solitamente un basso valore di resistenza a compressione.

La resistenza a compressione dei provini varia man mano che la percentuale di sostituzione aumenta. I test sono stati condotti su tre provini per ciascuna percentuale di sostituzione e si è calcolato il valore medio.

Si può vedere come rispetto al campione di riferimento RIF\_0, ad un iniziale miglioramento della resistenza pari a 7% dovuto alla sostituzione del 5% dell'argilla con sedimenti dragati (DS\_5), segue un peggioramento del 38% in DS\_10, del 33% in DS\_15, del 27% in DS\_30 ed infine del 35% in DS\_50. Tuttavia i bassi valori ottenuti rispettano i limiti imposti dalle norme vigenti che stabiliscono un valore minimo di resistenza alla compressione di 10 MPa [19].

Anche la prova a trazione indiretta è stata condotta su tre provini per percentuale di sostituzione, ricavandone poi la media.

Rispetto al campione di riferimento RIF\_0, la resistenza a trazione si riduce fino a dimezzarsi nel campione DS\_50.

Inizialmente, la resistenza si riduce solo del 13% in DS\_5, ma già in DS\_10 c'è una diminuzione di resistenza pari al 44%, al 46% in DS\_15, al 43% in DS\_30 ed infine, al 54% in DS\_50. Anche questo risultato è legato alla porosità del materiale.

Per determinare il tasso iniziale di assorbimento d'acqua dei mattoni (IRA) sono stati testati cinque provini per ciascuna percentuale di sostituzione, ricavati dalle metà dei provini ottenuti durante la rottura a trazione, ed è stato calcolato il valore medio.

La prova mostra che i valori di IRA crescono in modo lineare all'aumentare della percentuale di sostituzione di materiale dragato da un minimo di 2% in DS\_5 ad un massimo di 40% in DS\_50.

Questi risultati dipendono fortemente dalla porosità del campione, in quanto maggiore è la porosità del provino e maggiore è il quantitativo di acqua che riesce a penetrare nel provino stesso.

I valori ottimali di IRA per un mattone variano da 1 a 3 g/min/200 cm<sup>2</sup> (di solito 2 g/min/200 cm<sup>2</sup>) [23]. Ciò significa che dai risultati ottenuti, i provini hanno un IRA troppo elevato per un'applicazione ottimale. In questo caso, la soluzione operativa consiste nel bagnare il mattone prima della posa.

Gli stessi provini sono stati usati anche per la prova di assorbimento d'acqua, il quale conferma la tendenza secondo cui all'aumentare della percentuale di sostituzione aumenta la percentuale di assorbimento a causa della maggiore porosità dei provini. In particolare, rispetto al campione di riferimento RIF\_0, il valore dell'assorbimento aumenta del 3% in DS\_5, del 5% in DS\_10, del 8% in DS\_15, del 15% in DS\_30 ed infine del 26% in DS\_50.

I risultati della sperimentazione mostrano che mattoni realizzati con sedimenti dragati in sostituzione dell'argilla naturale presentano proprietà fisiche, chimiche e meccaniche simili a quelle dei mattoni tradizionali, per cui costituiscono un'alternativa valida ad essi.

Al fine di migliorare le prestazioni (come, ad esempio, diminuire il coefficiente IRA), considerando che la parte fondente si sviluppa dopo i 950 °C, il provino di riferimento e quello con percentuale di sostituzione del 30% sono stati preparati e sottoposti ad un nuovo processo di produzione, con temperature di cottura pari a 950 °C.

I provini sono stati sottoposti poi a prove di densità, Pundit ad ultrasuoni, resistenza a compressione e trazione indiretta, IRA e assorbimento d'acqua.

I risultati hanno rivelato che aumentando la temperatura di cottura, non ci sono variazioni nella densità dei provini e sono costituiti dalle stesse sostanze minerali, come dimostrato dall'XRD.

Per quanto riguarda il modulo elastico, misurato su due campioni per percentuale di sostituzione, c'è stato un innalzamento del modulo elastico in RIF\_0.950, ma un peggioramento in DS\_30.950. Tuttavia tali variazioni rispetto ai provini con il processo produttivo a 900 °C sono poco significative dato il numero più basso di campioni testato. La prova di resistenza a compressione, condotta su due provini per percentuale di sostituzione, ha segnalato che, contrariamente a quanto ci si aspettava, la resistenza meccanica dei provini cotti a 950 °C non è migliorata, bensì è diminuita del 6% in RIF\_0.950, anche se in modo non significativo, e del 22% in DS\_30.950.

La resistenza a trazione è stata testata su due provini per percentuale di sostituzione.

I risultati hanno mostrato un aumento dei valori della resistenza a trazione nei provini cotti a 950 °C, con un incremento del 42% in RIF\_0.950 e del 47% in DS\_0.950 rispetto ai provini con le medesime percentuali di sostituzione ma che hanno subito una cottura a 900 °C.

Con le metà ottenute durante la rottura a trazione, si è proceduto allo svolgimento della prova IRA e di assorbimento dell'acqua.

Contrariamente a quanto accaduto per i provini cotti a 900 °C, questi rientrano nel range di valori IRA ottimali previsto dalla normativa ( $1 \div 3 \text{ g/min/200 cm}^2$ ) sia per i provini di riferimento sia per i provini che presentano una percentuale di sostituzione pari al 30%, mentre le percentuali di assorbimento d'acqua sono molto simili a quelle riscontrate nei

provini cotti a 900 °C. Si ha infatti un incremento del 7% nei provini RIF\_0.950 e dell'1% in DS\_30.950, che non viene considerato significativo.

L'ottimizzazione del processo produttivo ha perciò prodotto un miglioramento del tasso iniziale di assorbimento d'acqua e della resistenza a trazione, seppur con una minore resistenza a compressione che dovrà essere approfondita ulteriormente.

Analizzando i risultati della sperimentazione, si può concludere che i mattoni confezionati con sedimenti dragati esplicano gli obiettivi posti nella sperimentazione ovvero l'utilizzo di materiali riciclati come sostituti dei materiali tradizionali.

Volendo considerare i risultati di questa ricerca sotto un punto di vista del vantaggio economico e della sostenibilità ambientale, si può affermare che l'utilizzo di DS come materiale di riciclo nel campo delle costruzioni, apporti degli indubbi benefici.

Secondo uno studio del ministero delle infrastrutture e dei trasporti [29], il volume di materiali da dragare nei principali porti italiani ammonta a circa 63 milioni di mc e la tendenza è confermata nel porto di Ancona, con un fabbisogno annuale di dragaggio di 2,89 milioni di mc.

Per questo motivo, è importante trovare metodi di smaltimento o riutilizzo dei sedimenti dragati e il loro uso nei materiali da costruzione costituisce un fattore considerevole nella sostituzione delle materie prime naturali non rinnovabili che lentamente si stanno esaurendo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Rapporto Global Alliance for Buildings and Construction (GABC), 2019
- [2] Climate and Clean Air Coalition, *Mitigating Black Carbon and Other Pollutants from Brick Production*, Climate and Clean Air Coalition, Paris, France, 2015.
- [3] L. Zhang, Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and building materials*, 2013
- [4] AIMAT, *Manuale di materiali per l'ingegneria*, McGraw-Hill Companies, 1996
- [5] G.P. Emiliani, F. Corbara, *Tecnologia ceramica Vol I e II*, Gruppo Editoriale Faenza Editrice s.p.a., 1999
- [6] V. Corinaldesi, *Materiali strutturali per l'ingegneria civile*, Università politecnica delle Marche, 2020
- [7] C. De Simone, *I materiali locali nella tradizione costruttiva dell'Italia meridionale*, Tesi di Laurea in Ingegneria edile, Università degli studi di Napoli Federico II, 2018
- [8] M. Manni, F. Frota de Albuquerque Landi, T. Giannoni, A. Petrozzi, A. Nicolini, F. Cotana, *A Comparative Study on Opto-Thermal Properties of Natural Clay Bricks Incorporating Dredged Sediments*, 2021
- [9] K. Srushti K, A. Wani, S. Sahana, R. Mohd Zia Ur, Praveen K M, *A Feasibility Study on the Use of Dredged Material as a Raw Material in Clay Brick Production*, 2022
- [10] H. Slimanou, D. Eliche-Quesada, S. Kherbache, N. Bouzidi, A./K. Tahakourt, *Harbor Dredged Sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties*, in "Journal of Building Engineering", 2020

- [11] A. Mottana, R. Crespi, G. Liborio, *Minerali e rocce*, Mondadori, 1977
- [12] M. Milanesio, Diffrazione da materiali policristallini: principi e campi d'applicazione, in *Analisi di materiali policristallini mediante tecniche di diffrazione*, Martina Franca (Ta) - Palazzo Ducale, 2006.
- [13] A.W. Coats, J.P. Redfern, Thermogravimetric Analysis, in *Analyst*, vol. 88, n. 1053, 1963
- [14] S. Gaisford, V. Kett, P. Haines, *Principles of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016
- [15] C. Atzeni, G. Pia, U. Sanna, N. Spanu, Surface wear resistance of chemically or thermally stabilized earth-based materials, *Materials and Structures*, 41, 2008
- [16] H. Baum, I. Soroka, A. Bentur, Properties and structure of oil shale ash pastes: Composition and Physical features, *Cement and concrete research*, 15, 1985
- [17] Micromeritics Instrument Corporation, *Mercury Intrusion Porosimetry Theory*
- [18] UNI EN 12504-4, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, 2021
- [19] UNI EN 772-1, Metodi di prova per elementi per muratura – Parte 1: Determinazione della resistenza a compressione, 2015
- [20] ASTM D3967, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, 2005

[21] ASTM C67/C67M, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, cap 8, 2021

[22] UNI EN 771-1 Appendice C, Elementi di muratura per laterizio – Determinazione dell'assorbimento di acqua, 2015

[23] ASTM C67/C67M, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, cap 10, 2021

[24] W.M. McGinley, IRA and The Flexural Bond Strength of Clay Brick Masonry, MASONRY - Components to Assemblages, ASTM STP 1063, John H. Matthys, Editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990

[25] M. Balconi, Trasformazioni metamorfiche dei silicati, Rendiconti della Società Mineralogica Italiana 10, 1954

[26] UNI 8942-1, Prodotti di laterizio per murature – Parte 1: Terminologia e sistema di classificazione, 1986

[27] J.W. Anthony, R.A. Bideaux, K.W. Bladh, M.C. Nichols, Handbook of Mineralogy: Silica, silicates, Vol II, 1995.

[28] UNI EN 12457, Caratterizzazione dei rifiuti - Lisciviazione - Prova di conformità per la lisciviazione di rifiuti granulari e di fanghi, 2004

[29] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti e Finanza, Iniziativa di studio sulla portualità italiana, Fabbisogno di dragaggio dei principali porti italiani, 2015