

7. SPERIMENTAZIONE DI COMPONENTI A BASE DI TERRA E FIBRE VEGETALI PER L'ISOLAMENTO DI MURATURE IN TERRA BATTUTA

Sezione 3

OBIETTIVI

Dall'analisi delle caratteristiche termiche di murature in terra battuta sviluppata nel precedente capitolo è emerso come il comportamento termico di questi elementi costruttivi sia legato in particolar modo all'inerzia termica e come il trasferimento e i passaggi di fase del vapore acqueo all'interno del muro abbiano un ruolo fondamentale anche per l'aspetto termico, per cui si parla di comportamento termo-igrometrico della terra battuta.

L'opportunità di isolare la terra battuta è ancora oggetto di studio, le perplessità sono legate principalmente alla possibilità che interventi di questo tipo possano interferire con gli scambi di vapore delle pareti con l'ambiente, compromettendo l'integrità di queste ultime. Inoltre l'isolamento delle pareti, sul lato interno e, anche se in misura minore, su quello esterno ne limita le prestazioni di inerzia termica. Anche per questi motivi, per l'isolamento di queste strutture, si preferisce in genere l'uso di componenti naturali, spesso a base di terra ed aggregati fibrosi o minerali, altamente compatibili con il materiale terra. Molte delle soluzioni tecnologiche che fanno uso di terra alleggerita, utilizzate ad oggi per l'isolamento, prevedono l'uso di strutture di supporto in legno oppure la produzione di blocchi compressi, soluzioni che comportano una certa laboriosità, tempi di realizzazione piuttosto lunghi e costi elevati per la posa in opera nel caso di isolamento esterno. In generale i costi legati alla mano d'opera per la realizzazione di interventi di recupero su edifici in terra sono particolarmente elevati a causa dei tempi lunghi di realizzazione, principalmente dovuti alla perdita di conoscenze tecniche e alla ormai scarsa diffusione di queste tecnologie costruttive in rapporto a quelle tradizionali.

È sembrato quindi interessante lavorare in fase di sperimentazione alla produzione di pannelli a base di terra e fibre per l'isolamento di strutture in terra battuta, che possano essere più velocemente posati in opera, senza bisogno di strutture di supporto particolari. Si è passati poi a verificare come questi influenzino le prestazioni del pacchetto murario non solo in termini di trasmittanza termica, ma anche in relazione ai parametri legati alle prestazioni termiche nel periodo estivo e all'inerzia termica in regime non stazionario. I test in regime dinamico hanno permesso una valutazione delle prestazioni termiche dei componenti realizzati, su parametri prestazioni termiche più adatti a definire il comportamento termico di elementi in terra cruda, in risposta alle sollecitazioni di temperature cicliche su un arco di tempo di 24h.

METODOLOGIA

Individuazione di risorse disponibili

Durante l'esperienza di ReHab sul cantiere di recupero di un edificio in terra battuta nel Sud-est della Francia è stata trovata una pianta particolarmente invasiva, la *Renouée du Japon* (*Poligono del Giappone* in lingua italiana), che infestava buona parte del sito del cantiere, in particolare nella zona limitrofa al fiume. In linea con la filosofia

sperimentale del progetto, si è pensato di condurre ricerche sulle caratteristiche fisiche della pianta per verificare se fosse possibile utilizzarne le fibre per realizzare blocchi in terra alleggerita per l'isolamento interno della parete nord.

Le ricerche effettuate su questa specie hanno evidenziato caratteristiche delle fibre particolarmente interessanti; si tratta di una pianta largamente diffusa in Piemonte e in Europa, inserita in diverse liste nere regionali, nazionali ed internazionali (Gruppo di Lavoro Specie Esotiche della Regione Piemonte 2013). Questo ne fa una risorsa interessante, largamente disponibile, per l'eventuale produzione di componenti a base di terra alleggerita con fibre per l'isolamento di edifici in terra battuta nella regione Piemonte. Da questa esperienza si è preso spunto per indagare ulteriori risorse vegetali disponibili sul territorio regionale potenzialmente adatte allo scopo e da poter sperimentare in laboratorio, facendo riferimento in particolare ad elementi naturali di scarto di produzioni agroalimentari o industriali diffuse nella regione.

Per gli esperimenti in laboratorio è stata inoltre individuata un'area di riferimento per l'approvvigionamento di terra nel territorio di Novi Ligure, essendo questa una zona di particolare diffusione di costruzioni in terra battuta in Piemonte, si è ritenuto che la terra lì reperita, potesse facilmente avere le caratteristiche necessarie alla costruzione essendo stata largamente utilizzata a questo scopo in passato.

Programma di ricerca

La ricerca viene articolata su diverse fasi: di caratterizzazione dei materiali, realizzazione di campioni in laboratorio ed infine una fase di test termici sui campioni, con il metodo della piastra calda.

Fase A, Caratterizzazione della terra a disposizione:

Sono condotte analisi in laboratorio per stabilire le caratteristiche del materiale da costruzione disponibile, allo scopo di verificarne l'idoneità alla costruzione in terra battuta e definire corrette modalità per il suo utilizzo nelle diverse fasi di sperimentazione. Vengono effettuate le seguenti analisi:

- Analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione delle terre
- Limiti di Atterberg
- Prove da campo

Fase B, Realizzazione di campioni di muro in terra battuta con la terra locale:

Durante questa fase sono realizzati campioni di parete in terra battuta di dimensioni ridotte, con diverso contenuto di umidità nella preparazione della miscela di terra in fase di compattazione. Lo scopo principale è quello di ottenere dei campioni su cui effettuare in seguito test termici. Un particolare aspetto dei test sui singoli campioni riguarda la valutazione dell'incidenza del contenuto d'acqua utilizzato nella miscela di terra in fase di compattazione, sulle proprietà termiche a secco delle pareti. L'ipotesi è che questa variabile possa agire sul rapporto pieni vuoti all'interno del muro. Al termine del processo di essiccazione, all'interno della struttura della parete potrebbe determinarsi una diversa distribuzione dei vuoti, a seconda della quantità d'acqua iniziale. Il volume dei vuoti potrebbe influire sulla

conducibilità termica della parete in due modi: (i) in modo diretto, producendo un volume d'aria all'interno del muro, e (ii) in modo indiretto, influenzando la quantità d'acqua che il muro potrebbe assorbire durante i costanti scambi di vapore acqueo con l'aria ambiente circostante.

Al fine di individuare il contenuto ottimale d'acqua per la miscela di terra a disposizione, sono realizzate una serie di prove Proctor Standard (UNI EN 13286-2:2005; AASHTO T265).

Sono inoltre progettati e realizzati in laboratorio casseri sperimentali in legno per la compattazione del terreno, prendendo spunto dalle caratteristiche di quelli utilizzati tradizionalmente per le costruzioni in terra battuta, ma adeguandoli alle esigenze di ricerca e alle risorse disponibili.

Vengono realizzati tre diversi campioni di parete in terra battuta, di spessore ridotto con diverso contenuto d'acqua in fase di compattazione secondo le indicazioni tratte dai Proctor Test effettuati.

Fase C, *Realizzazione pannelli in terra alleggerita con fibre vegetali:*

Questa fase prevede la realizzazione in laboratorio di prototipi di pannelli in terra alleggerita con le fibre vegetali precedentemente individuate e disponibili sul territorio Piemontese: poligono del Giappone, paglia di riso, canapa.

Al fine di ottenere un primo riscontro sulle possibili percentuali di terra e fibre da utilizzare per la produzione dei pannelli, sono effettuate prove sui leganti presso il *Laboratoire CRAterre*, a Grenoble, Francia. Dai test sono ricavate indicazioni sulle densità a secco e relative conducibilità termiche attese per miscele a diverso contenuto di terra e fibre (Volhard 1995).

Presso il laboratorio STI del Politecnico di Torino vengono realizzati casseri in legno per la realizzazione dei campioni di dimensione 50x50x5 cm

Sulla base delle prove effettuate a CRAterre e di dati reperiti in letteratura, vengono stabilite percentuali per la composizione di miscele in terra e fibre. Vengono realizzati due pannelli per componente fibrosa, con diverso contenuto percentuale. Lo scopo è poter valutare le variazioni del comportamento termico delle pareti in terra battuta se accoppiate ai pannelli, a seconda delle diverse composizioni della miscela di terra e fibre e in base al tipo di fibra utilizzata.

Fase D, *Test termici in piastra calda*

Gli elementi costruttivi realizzati in laboratorio sono sottoposti a test termici con il metodo della piastra calda. I muri campione sono testati singolarmente in modo da verificare l'influenza del contenuto d'acqua della miscela di terra in fase di compattazione sulle prestazioni termiche della parete.

Successivamente sono attestate le caratteristiche termiche dei diversi pannelli campione in terra alleggerita in regime stazionario ed infine sono ripetuti i test termici in regime dinamico accoppiando ai pannelli il muro campione in terra battuta con la maggiore densità. I dati ottenuti permettono una valutazione dell'incidenza di un sistema di isolamento proposto, sulla prestazione termica di pareti in terra battuta, sia in regime stazionario che in regime dinamico e sulle proprietà di inerzia della parete.

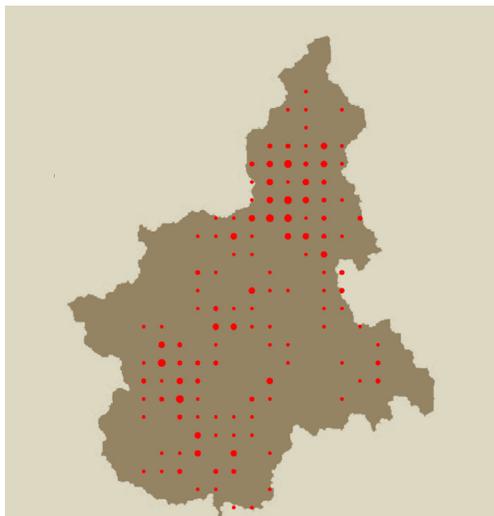


Fig. 7.1, Diffusione del Poligono del Giappone in Piemonte. (Adattamento da Gruppo di Lavoro Specie Esotiche della Regione Piemonte 2013)



Fig. 7.2, La pianta di Poligono del Giappone.



Fig. 7.3, Poligono del Giappone a Torino lungo il Po, Parco del Valentino.

7.1 FIBRE VEGETALI PER COMPONENTI IN TERRA ALLEGGERITA SU TERRITORIO PIEMONTESE

POLIGONO DEL GIAPPONE

*Reynoutria japonica*¹

Pianta esotica infestante, originaria dell'Asia Orientale (Cina, Giappone) coltivata in Italia a scopo ornamentale dalla metà del XIX secolo. È divenuta spontanea a partire dal 1875 in Trentino-Alto Adige e dal 1891 a Torino e si è diffusa in tutte le regioni del Nord Italia nel corso del '900²; era apprezzata per la resistenza a condizioni difficili e in particolare per l'adattabilità a terreni instabili e tossici. Attualmente è iscritto nella lista delle 100 specie esotiche più invasive e più dannose del mondo (lista dell'UICN, Unione Internazionale della Conservazione della Natura), e in molte liste nere regionali³.

Habitat e diffusione

Molto diffusa lungo i bordi dei corsi d'acqua o le sponde periodicamente alluvionate, dove ha disponibilità idrica sufficiente. Predilige siti ben soleggiati, come i margini forestali, le siepi naturali, i terreni incolti, le scarpate stradali e ferroviarie, dalle regioni di bassa quota fino al limite di quelle montane

Caratteristiche

Pianta erbacea perenne, alta in media da 1 a 3 m. I fusti molto numerosi, formano densi popolamenti, sono cavi all'interno, ramificati nella parte superiore. La particolare sezione del fusto, dotata di alveoli che consentono il passaggio dell'aria all'interno della fibra

Riproduzione e misure di contenimento

Il poligono del Giappone produce rizomi fusti sotterranei, lunghi e robusti

¹ Fallopija japonica, Polygonum cuspidatum ; fr.: Rénouee, in.: Japanese knotweed, nome dialettale piemontese: Fiorin. (Gruppo di Lavoro Specie Esotiche della Regione Piemonte (a cura del), 2013. Scheda monografica Reynoutria japonica. Regione Piemonte, Torino. Ultimo aggiornamento: settembre 2013).

² Il Poligono di Sachalin (Reynoutria sachalinensis), della stessa famiglia e con caratteristiche simili è arrivato in Europa nel 1863, ugualmente infestante è però meno diffuso.

³ **INV** DAISIE (100 WORST), **INV** LISTA UICN (100 WORST), **INV** LISTA NERA REG. LOMBARDIA (L.R. 10/08), **INV** LISTA NERA VALLE D'AOSTA (Poggio *et al.*, 2010), **INV** LISTA NERA CPS-SKEW. (Gruppo di Lavoro Specie Esotiche della Regione Piemonte (a cura del), 2013.

che formano fitte reti capaci di estendersi lontano dal ceppo di origine fino a 7 m di distanza e 2 m di profondità. Nuovi individui si generano da frammenti di rizomi e da frammenti di fusti; questo rende la specie molto difficile da eliminare, che rappresenta una minaccia per le flore indigene dei terreni colonizzati contribuendo ad una diminuzione della biodiversità. I popolamenti densi favoriscono l'erosione lungo le rive dei corsi d'acqua

Le diverse metodologie provate per la lotta alla diffusione incontrollata della pianta si sono dimostrate inefficaci, e le soluzioni di taglio ed eradicamento piuttosto costose.

Potenzialità

- *Le caratteristiche fisiche* della sezione del fusto cava e la presenza di alveoli nelle fibre si rivelano particolarmente vantaggiose nell'ottica di un utilizzo del materiale a fini di isolamento termico in edilizia.
- *Particolare diffusione* sul territorio piemontese
- *L'inserimento in diverse liste nere* delle specie esotiche più invasive e dannose e la difficoltà di eradicamento ne fanno un potenziale materiale da riutilizzare.

Criticità

- *A causa del suo sistema di riproduzione* Necessita di estrema cura nelle fasi di trasporto, lavorazione e gestione, per evitare di espanderne l'area di diffusione.

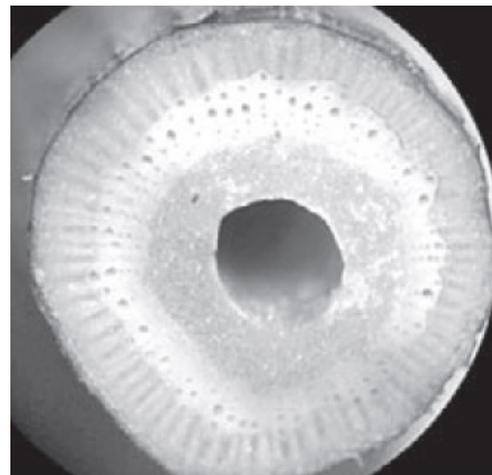


Fig. 7.4, Sezione del Rizoma del Poligono del Giappone (foto da M. Boyer 2009)

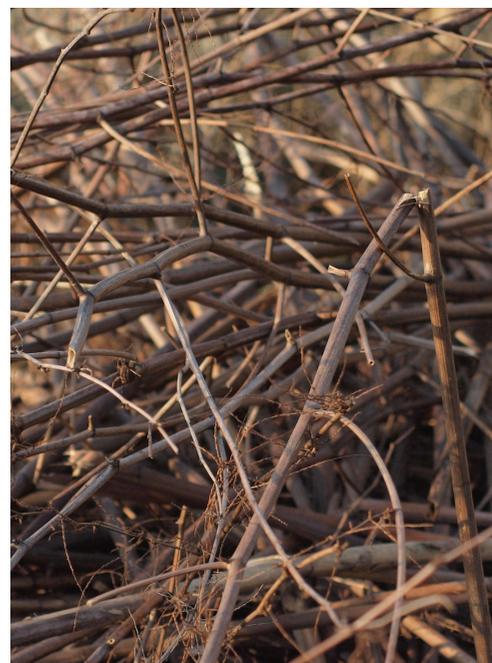


Fig. 7.5, Stelo secco del Poligono del Giappone da cui si ricavano le fibre.

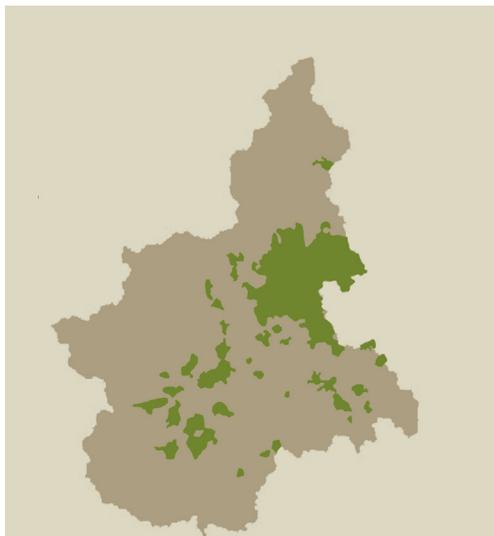


Fig. 7.6, Diffusione della coltivazione del riso in Piemonte.



Fig. 7.7, Fasci di fibra di canapa

PAGLIA DI RISO

Oryza sativa L.

Il riso è una graminacea originaria del sud-est asiatico ed è una delle principali risorse alimentari dell'umanità. È considerata generalmente un co-prodotto dell'agricoltura proveniente dalla produzione di cereali.

Habitat e diffusione

Il riso si può coltivare ovunque, purché ci sia acqua in abbondanza. L'Italia, con 1516 migliaia di tonnellate (2010), rappresenta il principale produttore europeo; la risicoltura è localizzata quasi totalmente nella Valle Padana e largamente diffusa sul territorio piemontese in particolare nelle province di Vercelli e Novara.

Caratteristiche

Lo stelo di forma tubolare cava e il passaggio dell'aria all'interno della fibra le conferisce buone qualità di isolamento (Carfrae, 2011). La struttura più spessa e le cavità d'aria dipendono dalla vita in acqua della pianta e le conferiscono buona resistenza a trazione.

Gestione ed impieghi della paglia di riso

Scarsamente considerata sul mercato costituisce circa il 50% della massa della pianta di riso. Viene generalmente trattata come scarto della produzione del riso: reinterrata per la fertilizzazione del terreno o più spesso bruciata in campo, il che produce emissioni di CO₂; questa pratica è già stata vietata o limitata da specifiche legislazioni⁴. Anche la Regione Piemonte ha recentemente finanziato progetti di ricerca finalizzati alla valorizzazione della paglia in alternativa alla bruciatura in campo, nell'ambito della produzione di energia da biomassa⁵. In edilizia la paglia viene impiegata mescolata a carta e colla a base d'acqua principalmente per la produzione di pannelli isolanti compressi, utilizzati per pareti interne

⁴ Per la Provincia di Vercelli vedasi il nuovo "Regolamento per l'abbruciamento delle stoppie del riso", DGC n. 67, 20-07-12. Per le aziende risicole delle Lombardia Misura 214 del PSR 2007-2013

⁵ <https://www.enermhypiemonte.it/progetti/44>. Si veda anche: Regione Piemonte, I residui colturali del riso una risorsa per la produzione e per l'ambiente, Quaderni Agricoltura, 74, 2011, pp.42-45. Finanziato dalla Regione Piemonte tramite la Misura 124 – Programma di Sviluppo Rurale. http://www.raer.unito.it/IT/research_projects.htm.

e controsoffittature⁶.

Potenzialità

- *Le caratteristiche fisiche* del fusto della paglia di riso evidenziano un ottimo potenziale come componente per elementi in terra alleggerita (Allam, Garas, El Kady 2011; Elwan et al. 2006)
- *Ampia disponibilità* sul territorio piemontese in cui la produzione del riso costituisce in alcune province uno dei capisaldi dell'industria alimentare.
- *Considerato materiale di scarto* derivante da una produzione alimentare

Criticità

- *Accessibilità variabile* a causa dell'effettiva resa delle coltivazioni del riso, fortemente dipendenti dalle condizioni meteorologiche al momento della raccolta.

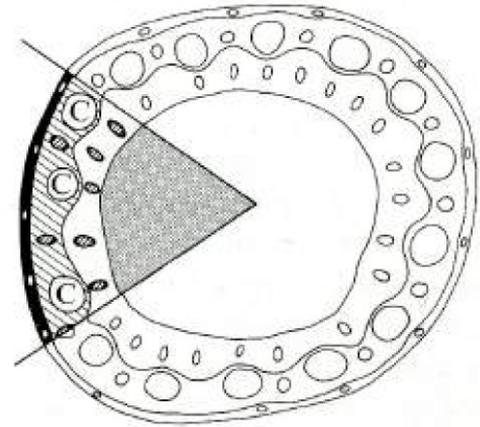


Fig. 7.8, Sezione della fibra di canapa; si notano gli alveoli all'interno della sezione che permettono il passaggio d'aria.

⁶ Progetto ECO-PCCM: http://www.cordis.europa.eu/result/report/rcn/49566_es.html; http://www.cnr.it/commesse/Scheda_MODulo.html?id_mod=2119.



Fig. 7.9, La canapa è diffusa oggi in Piemonte soprattutto nella zona di Carmagnola.



Fig. 7.10, Piantagione di canapa a Carmagnola (foto Assocanapa).

CANAPA *Cannabis Sativa*

La canapa appartiene alla famiglie delle Cannabinacee o Cannabaceae, è originaria delle zone temperate dell'Asia ma, per la sua grande adattabilità, si è diffusa in Europa.

Habitat e Diffusione

In Italia la canapa è diffusa sin dall'antichità (IV-V sec. a. C). Lo sviluppo dell'industria canapiera portò l'Italia negli anni Trenta, ad essere seconda solo alla Russia nella produzione di canapa; la coltivazione per la selezione si concentrava soprattutto in Piemonte particolarmente nel cuneese e nelle zone del canavese che dalla pianta prende il nome⁷. Andò in crisi per la concorrenza di altre colture da fibra, l'introduzione delle fibre sintetiche e per il cambiamento della destinazione dei terreni verso colture meno usuranti e più meccanizzate (Caligaris 2004). Il settore fu abbandonato del tutto nel 1975 a causa della legge restrittiva contro la produzione di stupefacenti, ma negli ultimi quindici anni è stata riscoperta e incentivata a livello europeo, e nella varietà sativa è ritornata legale (Madia, Tofani 1998). È stata reintrodotta anche in Piemonte, nella zona di Carmagnola tradizionalmente legata alla canapicoltura⁸, dove è attivo, gestito da Assocanapa, l'unico impianto italiano per prima trasformazione degli steli di canapa⁹. È una pianta resistente, si adatta a quasi tutti i tipi di terreno, ma predilige quelli soffici e permeabili.

Caratteristiche

Pianta annuale, con fusti alti in media da 1 a 5 m; la sezione del fusto può variare da pochi millimetri ad alcuni centimetri. Il fusto è formato dal taglio, una corteccia esterna, costituita da fibre (25-30% del fusto) e da una parte interna di tipo legnoso, il canapulo (70-75%). La fibra è resistente a sforzi di trazione e al logorio, mentre il canapulo ha un'elevata capacità di assorbire i liquidi ed è ricco di silicio, componente a cui deve le sue ottime

⁷ Le tre varietà di canapa italiane più conosciute e ancora oggi competitive sono la Carmagnola, la C.S. (Carmagnola Selezionata) e la Fibranova, di origine piemontese.

⁸ Dati della Regione Piemonte danno una produzione di circa 2000 quintali su circa 30 ha nel 2005. Regione Piemonte, in Il ritorno della canapa in Piemonte Quaderni Agricoltura, n.53, 2006, p. 31

⁹ Assocanapa (<http://www.assocanapa.org/>), insieme al CNR IMAMOTER ha brevettato nel maggio 2010 un prototipo di macchinario per la prima trasformazione delle paglie di canapa che può trattare il prodotto di circa 400/500 ha di canapa di varietà italiane del costo di circa 600 mila euro.

proprietà di isolamento termoacustico. La pianta ha accrescimento molto rapido, il ciclo vegetativo si completa in 3-4 mesi; la fibra è traspirante ed igroscopica e consente di regolare l'umidità.

Gestione ed impieghi sul mercato della fibra di canapa

In edilizia hanno trovato applicazione la fibra corta semimacerata, detta anche "lana di canapa", nella produzione di pannelli isolanti e fonoassorbenti e il canapulo nella produzione di intonaci e cappotti isolanti e di blocchi da costruzione in canapa e calce. Nell'Africa Subsahariana la canapa era utilizzata come legante anche nella preparazione dei mattoni in terra cruda¹⁰. Oggi in Italia e in Piemonte in particolare, l'unico sottoprodotto della canapa per cui esiste un mercato è il canapulo. La fibra che resta al termine della stigliatura (separazione di fibra e canapulo) delle bacchette di canapa secca può essere considerata un materiale di scarto poiché i processi che sarebbero necessari a trasformarla sono nella pratica troppo costosi rispetto alle possibilità di impiego sul mercato e non vengono attuate.

Potenzialità

- *Derivato di una coltura locale e di un settore in fase di sviluppo, soggetta a programmi di incentivo da parte dell'Unione Europea, che può diffondersi con facilità e dai cicli di accrescimento rapidi.*
- *In edilizia può aumentare le caratteristiche ignifughe e antiparassitarie, di isolamento termoacustico e di traspirabilità.*
- *Considerato uno scarto, allo stato attuale della filiera piemontese costituisce un materiale considerato scarto.*

Criticità

- *Diffidenza nei confronti della coltura, ancora assimilata con la produzione di sostanze stupefacenti*
- *Ritardo nello sviluppo delle tecnologie che ne permettano lavorazione a basso costo.*



Fig. 7.11, Fasci di fibre di canapa stoccati.

¹⁰ Tra i prodotti più recenti il brevetto spagnolo cannabric (http://www.cannabric.com/catalogo/btc_bloque_de_tierra_comprimido/).



Fig. 7.12, La prova di sedimentazione indica un terreno ricco in sabbia e ghiaia, seppur fine, i risultati non collimano con quelli delle altre prove.



Fig. 7.13, Secondo il test di Alcock il terreno esaminato presenta un ritiro di 2cm sui 60 cm del cassero.



Fig. 7.14, Test di Consistenza: la sfera formata dal cordone si schiaccia tra pollice ed indice

7.2 CARATTERIZZAZIONE TERRA, CAVA DI POZZOLO FORMIGARO (AL)

Il tema della classificazione dei terreni a scopo costruttivo comprende diversi tipo di test: Prove che possono realizzarsi direttamente in cantiere, generalmente dette da campo, e prove da condursi in laboratorio con strumenti di precisione. Le prime, di tipo preliminare ed avanzato, possono dare indicazioni già piuttosto precise sul comportamento dei suoli e risultano molto utili quando non si ha a disposizione una strumentazione da laboratorio (Achenza - Sanna 2008). Le seconde sono di verifica o approfondimento, ma che alcuni autori le considerano oggi, comunque fondamentali.

Finalità delle prove è determinare le caratteristiche del terreno a disposizione in modo da avere gli elementi per stabilire quali siano le tecniche costruttive più adeguate al materiale, e quali gli accorgimenti da prendere riguardo alla composizione delle miscele di terra necessarie alla realizzazione dei pannelli in terra alleggerita e dei muri campione in terra battuta per i successivi test termici.

7.2.1 PROVE DA CAMPO

Sono state eseguite una serie di prove preliminari e approfondite; tra le prime, le *prove al tatto*, la *prova di lavaggio* e di *aderenza*, (Achenza - Sanna 2008), hanno dato risultati concordi, indicando che il terreno a disposizione è un terreno limoso con una quantità di argilla mediamente importante, dato che sembra confermato anche dal test del ritiro lineare. I dati ottenuti sono invece in contrasto con la lettura della stratigrafia del terreno durante la prova di sedimentazione che indica un terreno maggiormente sabbioso.

- *Prova al tatto*: si sgretola tra le dita la terra asciutta dopo aver eliminato i grani più grossi. Risultato: al tatto la terra ha dato una sensazione poco abrasiva, lasciando pensare ad un contenuto di sabbia basso, non si riscontra particolare resistenza alla pressione, indice di presenza di argilla moderata.
- *Prova del lavaggio*: Consente di verificare la presenza di argilla nel terreno. La terra viene impastata con acqua fino a che non raggiunge lo stato plastico e ci si lavano le mani. Risultato: la terra risulta difficile da eliminare dalla pelle senza l'aiuto dell'altra mano, per cui dovrebbe avere una buon contenuto di argilla. Diversamente, in caso di terra

sabbiosa sarebbe scivolata via dalle mani abbastanza facilmente.

- *Prova di aderenza:* Si umidifica una massa di terra fino a farne una pallina, a questo punto vi si affonda un coltello o una spatola. Risultato: il coltello entra e si ritrae abbastanza facilmente, segno di presenza di argilla moderata.
- *Prova di sedimentazione:* Si riempie con della terra un contenitore di vetro a fondo piatto, da almeno 1 litro, fino a un quarto dell'altezza; gli altri tre quarti vengono riempiti con acqua; si agita il tutto e lo si lascia decantare per un'ora. L'operazione viene ripetuta una seconda volta, e si attendono 8 ore affinché tutte le componenti della terra sedimentino sul fondo. Al termine della prova le componenti del terreno sono distinguibili per strati successivi. La prova si basa particolarmente sull'esperienza e la sensibilità dell'operatore e la distinzione degli strati, in particolare di limo e argilla, risulta particolarmente difficile, ragion per cui non può essere considerata perfettamente affidabile. Risultato: la terra di Pozzolo Formigaro all'apparenza presentava: ghiaia 30%, sabbia 35%, limo e argilla 35%. Le quantità riscontrate con questa prova si discostano abbastanza nettamente da quelle ottenute attraverso l'analisi granulometrica in laboratorio, come vedremo più avanti, a testimonianza della difficoltà di lettura dei risultati.
- *Test del ritiro:* altrimenti detto test di Alcock, viene realizzato utilizzando una stecca di legno da 60 cm di lunghezza e 4 di larghezza e profondità. La stecca viene riempita con un impasto di terra allo stato plastico, dopo aver oleato le superfici interne. Si attende l'essiccazione completa della terra, in genere tre giorni, e si compatta la terra secca e indurita verso una delle due estremità della stecca. A questo punto si misura lo spazio vuoto formatosi, tanto maggiore quanto maggiore il contenuto di argilla nel terreno.

I risultati del test hanno dato buon esito, con un ritiro di circa il 3%, considerato entro i limiti accettabili (Röhlen-Ziegert 2011).

Successivamente sono state realizzate analisi più approfondite che hanno dato ulteriori interessanti indicazioni:

- *Test di Consistenza:* Una pallina di 2-3 cm di diametro impastata con terra fine viene umidificata in modo che non risulti collosa. Su un piano si lavora la terra formando un cordone; il cordone deve cominciare a dividersi quando raggiunge un diametro di 3mm, altrimenti bisogna



Fig. 7.15, Test di Consistenza: la pallina si schiaccia non presenta particolari fessure dopo lo schiacciamento e non si sbriciola: dovrebbe avere un buon contenuto di argilla.



Fig. 7.16 - 7.17, Test di Coesione: preparazione del cilindro con terra allo stato plastico; il cilindro scivolando sulla superficie del tavolo si spezza in monconi di dimensioni tra i 9 e i 12 cm: medio contenuto di argilla.



Fig. 7.18 - 7.19, Test di Trasudamento: la pallina preparata viene battuta; sono stati necessari 30 colpi per ottenere un lieve trasudamento superficiale.



Fig. 7.20 - 7.21 Test di resistenza a secco: la pastiglia si spezza a metà e non si sbriciola: buon contenuto di argilla

ricominciare il procedimento. Con una parte del cordone frazionato si forma una piccola sfera e la si schiaccia tra il pollice e l'indice. Risultati: la terra si schiaccia con un po' di difficoltà e non presenta particolari fessure né tende a sbriciolarsi, per cui si può dedurre che abbia un buon contenuto di argilla.

- *Test di Coesione:* Dopo aver preparato un cilindro da 12 mm di diametro lavorando la terra allo stato plastico su una superficie piana, lo si fa scorrere lungo il bordo della superficie d'appoggio. Il cilindro si spezza autonomamente in monconi di una certa dimensione; la dimensione dei monconi restituisce indicazioni sul contenuto in argilla del terreno. Risultati: nel caso della terra di Pozzolo, la frattura avviene tra i 9 e i 12 cm; la terra sembrerebbe avere un contenuto d'argilla non particolarmente elevato, ma comunque medio.
- *Test di trasudamento:* Preparata una pallina di terra di 2-3 cm allo stato plastico, con grani inferiori a 5mm, la si appiattisce sul palmo della mano e la si batte in modo da far uscire l'acqua all'interno. Risultati: per ottenere un leggero trasudamento sulla superficie della pallina sono stati necessari più di 30 colpi e non si sono presentati fenomeni di fessurazione e sgretolamento; sono confermate quindi le impressioni ottenute dalle altre prove, che si tratti di una terra a prevalenza di limo leggermente plastica.
- *Test di resistenza a secco:* Vengono preparate tre pastiglie di terra del diametro di 8 cm e spessore 1 cm e si lasciano essiccare al sole oppure in forno. Una volta completamente secche le si spezza a metà e successivamente si prova a polverizzarle. Risultati: Le prove confermano ancora una volta la tesi di una buona presenza di argilla, poiché le pastiglie essiccate si spezzano con un colpo secco e non si riesce a sbriciolarle con le dita.

I risultati delle prove hanno dato risultati generalmente costanti, suggerendo particolare presenza di limo e buone quantità anche di argilla. Questi dati però contrastano con i risultati della prova di sedimentazione che sembrerebbero più orientati verso una natura sabbiosa della terra campione; Si è ritenuto dunque di dover effettuare ulteriori prove in laboratorio per stabilire con maggiore esattezza la composizione del terreno a disposizione.

7.2.2 ANALISI GRANULOMETRICA

Al fine di conoscere la distribuzione granulometrica delle particelle solide della terra reperita è stata eseguita un'analisi granulometrica di un suo campione. L'analisi permetterà di costruire la curva granulometrica della terra a disposizione e trarre importanti indicazioni circa le sue caratteristiche.

Su una frazione molto ampia del volume di terra disponibile è stata eseguita una quartatura (UNI EN 932-2:2000) in modo da ottenere un campione rappresentativo del suolo di riferimento. Il quantitativo del campione da sottoporre all'analisi è stabilito dalla norma UNI EN ISO 14688-1:2003. A seconda del massimo diametro delle particelle solide di terreno vengono utilizzate diverse quantità di campione secondo la seguente tabella.

Diametro massimo particelle [mm]	Peso minimo campione [Kg]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Tabella 7.1, Quadro riassuntivo quantità di campione secondo UNI EN ISO 14688-1:2003

Avendo riscontrato che il diametro massimo dei grani del terreno a disposizione era di 20 mm è stata eseguita una proporzione con riferimento ai quantitativi in tabella ed è stato prelevato un campione di 6,25 Kg per l'analisi.

Il campione è stato sminuzzato con un martelletto con punta di gomma in modo da separare i grani, senza danneggiarli. L'analisi granulometrica è stata eseguita in due procedure successive:

- *Granulometria per stacciatura*: attraverso cui vengono classificati i suoli costituiti da particelle con diametro $\geq 0,063$ mm, che fanno riferimento alla parte di terreno costituito da sabbia e ghiaia.
- *Granulometria per sedimentazione*: attraverso la quale è possibile classificare terreni costituiti da particelle di diametro $< 0,063$ mm, che fanno riferimento alla parte di terreno costituito da limo e argilla.



Fig. 7.22-7.23 Essiccazione in forno e pesatura di parte del campione di terra utilizzato per l'analisi granulometrica.



Fig. 7.24, Lavaggio della frazione grossa per separarla dalla parte fine.



Fig. 7.25, Il lavaggio della frazione fine consente di separare la parte sabbiosa che rimane sul setaccio da limo e argilla che invece vengono recuperate insieme all'acqua all'interno di una vasca.



Fig. 7.26, Frazioni secche di ghiaia sabbia ottenute dalla separazione e successiva essiccazione in forno.

Procedimento per setacciatura

Le norme di riferimento che regolano la procedura da seguire per l'analisi granulometrica per stacciatura sono la UNI EN 933-1: 1999 e la CNR BU 23/71, che indica la tecnica di riferimento.

L'analisi è stata eseguita con setacci e crivelli della serie UNI seguendo le norme di riferimento citate, fatto salvo per l'uso del setaccio da 0,075mm in sostituzione di quello da 0,063 mm indicato dalla norma, per separare la parte di sabbia e ghiaia da sottoporre a stacciatura da quella limo-argillosa da analizzare con il metodo della sedimentazione.

Il campione di terra è stato essiccato in stufa a ventilazione forzata per 24h ad una temperatura di $110 \pm 5^\circ\text{C}$ e pesato in modo da ottenere il peso secco del campione di prova M_1 . Il peso ottenuto è stato poi confrontato con quello della somma del quantitativo di terra ritenuto sui setacci con cui è stata eseguita la prova.

Lavaggio e setacciatura parte grossa

Utilizzando il setaccio con fori da 2mm di diametro è stata separata la porzione di ghiaia e sabbia grossa da quella di sabbia fine, limo e argilla. La frazione grossa ritenuta sul setaccio è stata sottoposta a lavaggio in modo da eliminare le particelle fini rimaste ancora aggrappate a quelle grosse, e una volta libera da residui è stata essiccata in forno per 24h e fino a che non presentasse massa costante. Una volta essiccata, la parte grossa è stata pesata e lasciata raffreddare prima di passarla attraverso la pila di setacci da 20 - 2 mm, scossa da una setacciatrice meccanica. Terminato il procedimento, il materiale ritenuto nei diversi setacci viene pesato e vengono calcolate le masse passanti attraverso ogni setaccio espresse come percentuale della massa secca complessiva M_1 .

La parte fine risultante dal lavaggio è stata essiccata separatamente in forno per 24h ad una temperatura di $110 \pm 5^\circ\text{C}$ e successivamente aggiunto alla parte fine.

Lavaggio parte fine

La parte fine ottenuta dalla prima scrematura viene ulteriormente separata dalla frazione di argilla e limo attraverso il passaggio al setaccio da 0,075. Limo e argilla risultanti vengono essiccati in forno e messi da parte per la prova di sedimentazione.

La porzione ritenuta sul setaccio viene invece sottoposta a lavaggio secondo

il procedimento sopradescritto per separare la parte limo-argillosa ancora attaccata ai grani sabbiosi. L'operazione è piuttosto lunga e conviene aiutarsi con una piccola spatola in modo da favorire il passaggio di limo e argilla attraverso le maglie del setaccio; si sconsiglia l'uso di un pennellino, poiché l'argilla tende ad attaccarsi alle setole del pennello gonfiandole e complicando il procedimento. L'operazione è stata ritenuta conclusa quando l'acqua passante attraverso il materiale ritenuto sul setaccio è risultata limpida. Il materiale ritenuto sul setaccio è stato essiccato in forno a 110 ± 5 °C e pesato. Dopo un periodo di raffreddamento è stato passato attraverso la pila di setacci da 2,00 - 0,075 mm sottoposta a vibrazione mediante setacciatrice meccanica; la percentuale di materiale passante attraverso i diversi setacci è stato calcolato attraverso il procedimento descritto per la parte grossa. La frazione contenuta sul fondo è stata aggiunta a limo e argilla.

La frazione limo-argillosa risultante dal lavaggio della parte fine viene seccata in forno a 110 ± 5 °C e aggiunta a quella precedentemente ottenuta separandola dalla sabbia.

Di seguito viene riportata una tabella con i dati ottenuti dall'analisi granulometrica per stacciatura.

Diametro setacci UNI (mm)	Peso mat. ritenuto (g)	Peso mat. ritenuto (%)	Peso mat. passante (g)	Peso passante (%)
20	27,25	0,74	3634,39	99,26
16	42,48	1,16	3591,91	98,10
10	150,69	4,12	3441,22	93,98
6,3	125,37	3,42	3315,85	90,56
5	100,78	2,75	3215,07	87,80
3,15	118,34	3,23	3096,73	84,57
2	158,95	4,34	2937,78	80,23
1	172,8	4,72	2764,98	75,51
0,5	130,8	3,57	2634,18	71,94
0,2	194,62	5,32	2439,56	66,62
0,075	306,76	8,38	2132,8	58,25
Fondo (Limo e Argilla)	2132,8	58,25		

Setaccio 20 mm
ritenuto: 27,25 g
passante: 99,26%



Setaccio 16 mm
ritenuto: 42,48 g
passante: 98,10%



Setaccio 10 mm
ritenuto: 42,48 g
passante: 93,98%



Setaccio 5 mm
ritenuto: 100,78 g
passante: 87,80%



Setaccio 2 mm
ritenuto: 158,95 g
passante: 80,23%



Setaccio 1 mm
ritenuto: 172,8 g
passante: 75,51%



Setaccio 0,075 mm
ritenuto: 66,62 g
passante: 58,25%





Fig. 7.27-7.28, Preparazione della soluzione deflocculante e pesatura del campione di terra da analizzare con il metodo della sedimentazione.

Peso materiale analizzato complessivo (M ₁)	3661,64
---	---------

Tabella 7.2, Dati ottenuti dall'analisi granulometrica per staccatura della terra di Pozzolo Formigaro (AL)

Procedimento per sedimentazione

La frazione di Limo e argilla è stata analizzata mediante la *prova di sedimentazione* secondo la procedura indicata dalla normativa ASTM D422-63. Il metodo sfrutta la diversa velocità di sedimentazione in un fluido, di componenti con peso specifico e forma diversa, e fa riferimento alla legge di Stokes che permette di calcolare il tempo di sedimentazione di particelle di diametro e densità diverse in un liquido di profondità, densità e viscosità note.

La prova è stata eseguita utilizzando un idrometro di tipo ASTM 151H, due cilindri di vetro della capienza di 1000 ml ciascuno, senza fare uso di vasca d'acqua a temperatura costante; un agitatore elettrico per la dispersione meccanica con bicchiere a deflettori rimovibili.

Per realizzare l'analisi, un campione del peso di 50 g è stato prelevato dalla frazione passante al setaccio 0,075 mm precedentemente essiccata in forno. Al campione è stata aggiunta una soluzione deflocculante al 4% d'acqua distillata ed *Esametafosfato di sodio*, in modo da separare i grani di terra tra di loro, e poi lasciato a riposo per 24h. Contemporaneamente è stata riempita la seconda provetta da 1000 ml con la stessa soluzione deflocculante usata in precedenza, e sono effettuate le letture con l'aerometro per apportare le dovute correzioni dovute al menisco e per il deflocculante (ASTM D422-63).

Il composto di terra con deflocculante è stato passato nell'agitatore elettrico e versato nel contenitore cilindrico con aggiunta di acqua distillata fino a riempimento, mescolato per 1 minuto e preso le letture della densità del fluido con l'aerometro come indicato dalla procedura¹¹; ad ogni lettura, a partire da 1 minuto, è stata presa lettura della temperatura del fluido in



Fig. 7.29, Il deflocculante viene aggiunto alla soluzione di terra in acqua distillata.

¹¹ La procedura prevede che il campione di terra venga lasciato a riposo dopo l'aggiunta del deflocculante per almeno 16h; si è notato che con una posa superiore al lasso di tempo indicato, una volta versato nel cilindro con aggiunta di acqua e mescolato, può provocare la formazione di schiuma sulla superficie del liquido che rende difficile la lettura dei dati per i primi 2 minuti, quando la schiuma si disperde.

modo da apportare le dovute correzioni.

Le percentuali di suolo rimaste in sospensione al momento delle singole letture vengono calcolati con la formula:

$$P = [(100\ 000/W) \times G / (G - G_1)] (R - G_1) \quad (\text{ASTM D422-63})$$

Il diametro delle particelle di terreno vengono calcolati secondo normativa, utilizzando una semplificazione della legge di Stokes:

$$D = K\sqrt{(L/T)}$$

dove :

K, è una costante che dipende dalla gravità specifica delle particelle di suolo e dalla temperatura del fluido al momento della lettura;

L, è l'effettiva profondità dell'idrometro ed è calcolata in base alla lettura presa con l'idrometro;

T, è il lasso di tempo che intercorre dall'inizio della sedimentazione al momento della lettura.

I valori calcolati vengono riportati in tabella:

Ora Reale	t [min]	ρ lettura	ρ lettura R	ρ lettura corretta Rc	Partic. sospese [%]	Part. sospese [%]	T lettura Soluzione [°C]	Profondità effettiva L [cm]	Costante K	D part. sospese [mm]
11:00:15	0,25	1,0300	1,0319	1,0299	95,975	55,906	20,50	8,40	0,01447	0,084
11:00:30	0,50	1,0290	1,0309	1,0289	92,535	53,902	20,50	8,60	0,01447	0,060
11:01:00	1	1,0280	1,0299	1,0279	89,095	51,898	20,50	8,90	0,01447	0,043
11:02:00	2	1,0260	1,0279	1,0259	82,215	47,890	20,50	9,40	0,01447	0,031
11:04:00	4	1,0235	1,0253	1,0233	73,271	42,681	20,50	10,10	0,01447	0,023
11:08:00	8	1,0220	1,0238	1,0218	68,111	39,675	20,50	10,50	0,01447	0,017
11:14:00	14	1,0200	1,0218	1,0198	61,232	35,667	20,50	11,00	0,01447	0,013
11:30:00	30	1,0180	1,0198	1,0178	54,352	31,660	20,80	11,50	0,01438	0,009
12:00:00	60	1,0145	1,0163	1,0143	42,312	24,647	21,20	12,50	0,01438	0,007
13:00:00	120	1,0135	1,0153	1,0133	38,872	22,643	21,60	12,80	0,01430	0,005
15:00:00	240	1,0130	1,0148	1,0128	37,152	21,641	22,20	12,90	0,01421	0,003
19:00:00	480	1,0120	1,0138	1,0118	33,712	19,637	21,00	13,10	0,01438	0,002
11:00:00	1440	1,0095	1,0113	1,0093	25,112	14,628	22,30	13,90	0,01421	0,001

Tabella 7.3, Calcolo diametro e percentuale di particelle in sospensione della frazione di limo e argilla



Fig. 7.31, Ad intervalli di tempo determinati viene effettuata una lettura del densimetro.



Fig. 7.32, A partire da 1 minuto viene presa la temperatura del fluido per effettuare le dovute correzioni in fase di calcolo.

Di seguito si riporta il grafico della curva granulometrica ottenuto riportando i dati calcolati secondo i due procedimenti; la curva cade all'interno del fuso granulometrico delle terre idonee alla costruzione in terra battuta individuato da CRAterre (Houben, Guillaud 1994).

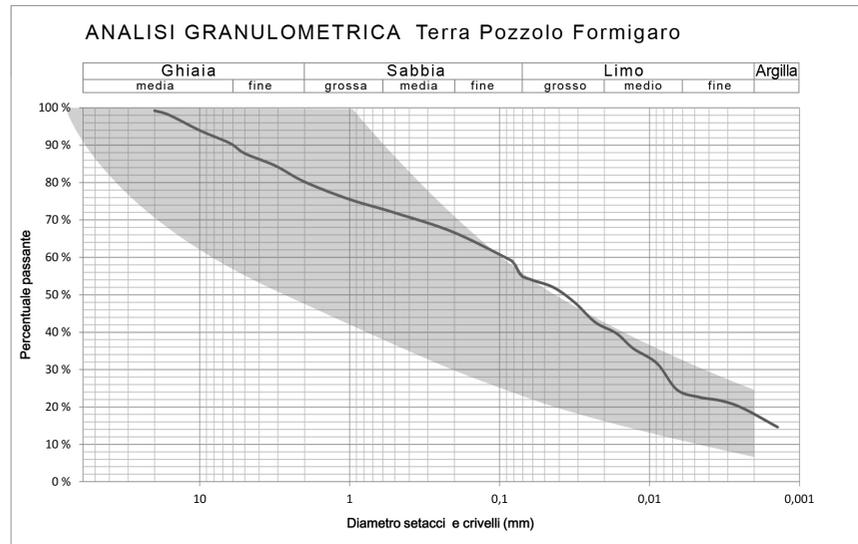


Fig. 7.30, Grafico della curva granulometrica del terreno analizzato. In grigio sullo sfondo è indicato il fuso granulometrico limite consigliato da CRAterre per terre adatte alla costruzione in pisé. La curva è quasi interamente compresa nel fuso.

La terra analizzata presenta la seguente composizione:

- Ghiaia 20%;
- Sabbia 22%;
- Limo 39%;
- Argilla 19%

Secondo i dati riportati in letteratura, la curva mostra caratteristiche che possono essere considerate limite per la costruzione in terra battuta. Il contenuto di ghiaia e sabbia eccede di poco il minimo indicato da G. Bollini (Bollini 2013); se confrontato con i valori riportati da Walker e Maniatidis (Walker, Maniatidis 2003), il contenuto di argilla e limo risulta invece eccedere abbondantemente le quantità medie, mentre la parte di sabbia e ghiaia risulta deficitaria di circa un 10%. In generale la percentuale



Fig. 7.35-7.36, Test del limite liquido con il cucchiaino di Casagrande; preparazione di uno dei campioni di terra per la prova



Fig. 7.37, Test del limite liquido con il cucchiaino di Casagrande; il campione di terra viene inciso con l'apposito strumento.

viene calcolato attraverso la differenza (Cancellieri 2008):

$$I_p = L_l - L_p$$

L'indice di Plasticità dipende dal tipo e dalla quantità di argilla presente all'interno del terreno.

La prova è stata eseguita utilizzando il metodo standard descritto dalla norma AASHTO 89-02, utilizzando il cucchiaino di Casagrande; il campione da analizzare è stato tuttavia vagliato utilizzando un setaccio della serie UNI, con maglie del diametro di 0,5 in mancanza di quello di diametro 0,475, indicato dalla norma.

Durante l'esecuzione della prova, l'esperienza dell'operatore risulta di particolare importanza, poiché i risultati sono fortemente legati alle proprie capacità di osservazione. Dei cinque campioni di terra su cui è stata eseguita la prova, solo tre hanno dato risultati attendibili, considerati comunque un numero sufficiente. Secondo le prove hanno restituito un indice di plasticità I_p del 6%; confrontando il dato con i gradi di plasticità delle terre indicati da CRAterre, il terreno analizzato risulta poco plastico, mentre limite liquido e plastico sono all'interno delle zone limite consigliate (Houben - Guillaud 1994).

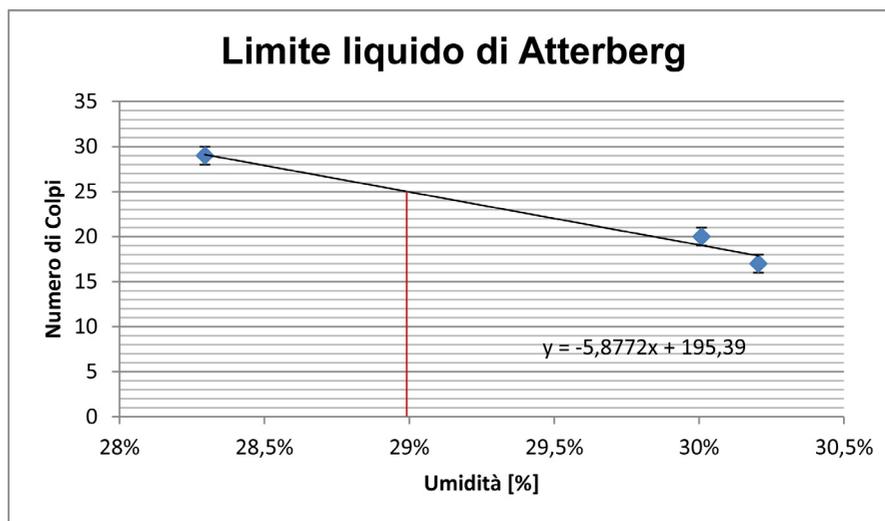


Fig. 7.38, Grafico del limite liquido per il campione di terra analizzato. in basso a destra si riporta l'equazione della funzione lineare.

Limite Liquido di Atterberg, Terra di Pozzolo Formigaro						
Campione	Capsule	Peso LU [g]	Peso LS [g]	P Rec [g]	w _l [%]	n° colpi
1	2.1	33,91	30,99	20,67	28,29	29,00
5	2.2a	16,08	12,83	2,37	31,07	26,00
3	3.2	35,89	32,37	20,64	30,01	20,00
2	3.1	36,07	32,53	20,81	30,20	17,00

Limite Liquido	28,99 %
----------------	---------

Tabella 7.4, Calcolo del limite liquido secondo il metodo AASHTO 89-02

Per calcolare il limite plastico del terreno sono stati realizzati bastoncini da 3,2 mm di diametro appoggiandosi su una lastra di vetro. La procedura di riferimento assume che il limite di plasticità di un terreno viene raggiunto quando, per questa dimensione, i bastoncini presentano fessure sulla superficie. A questo punto viene calcolato il contenuto di umidità dei bastoncini. La media dei risultati ottenuti rappresenta il *Limite di plasticità* per il terreno analizzato.

Limite Plastico di Atterberg, Terra di Pozzolo Formigaro					
Campione	Capsule	Peso LU [g]	Peso LS [g]	P Rec [g]	w _i [%]
1	1.1	12,23	11,88	10,29	22,01
2	0	9,81	9,51	8,19	22,73
3	1.2	10,18	10,04	9,48	25,00

Limite Plastico	23,25 %
-----------------	---------

Indice di Plasticità	5,74
----------------------	------

Tabella 7.5, Calcolo del limite plastico secondo il metodo AASHTO 89-02, e calcolo *Indice di plasticità*

Un basso indice di plasticità indica una scarsa capacità del terreno a deformarsi senza incorrere in rotture, allo stesso tempo però i terreni limosi sono piuttosto stabili e non particolarmente soggetti a fessurazioni dovute a fenomeni di ritiro (Bollini 2013 pp.23). I risultati riscontrati sui limiti di Atterberg, se confrontati con la composizione ottenuta dall'analisi



Fig. 7.39, Test del limite liquido con il cucchiaio di Casagrande; incisione del campione.

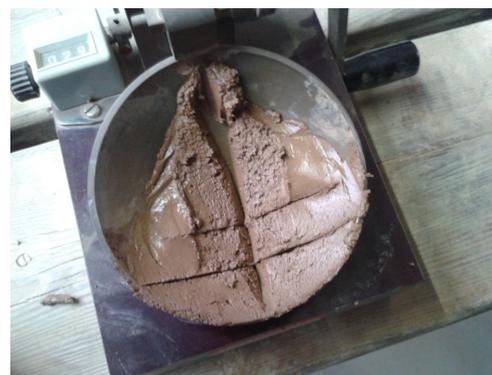


Fig. 7.40, Raggiunto il numero di colpi necessario alla chiusura del solco, viene asportata una parte del campione, pesata, essiccata in forno e ripesata una volta secca.



Fig. 7.41, Pesatura del campione umido asportato.

I_p	Terra
0-5	non plastica
5-15	poco plastica
15-40	plastica
>40	molto plastica

Tabella. 7.6, Classificazione delle terre secondo l'indice di plasticità (CRATERRE; Houben, Guillaud 1989)

granulometrica confermano le tesi di Minke, secondo cui suoli limosi possiedono limite liquido del 15-35%, limite plastico uguale al 10-25% e $I_p = 5-15\%$ (Minke 2006).

Attraverso grafici che mettono in relazione l'indice di plasticità con il limite liquido e la percentuale di argilla contenuta nel terreno, è possibile conoscere rispettivamente il grado di coesione e quello di espansività, che indica in particolar modo la suscettibilità del suolo a fenomeni di gonfiamento e ritiro. Questi fenomeni dipendono non solo dalla quantità di argilla presente, ma anche dalla sua tipologia, che non è peraltro verificabile attraverso questo genere di prove.

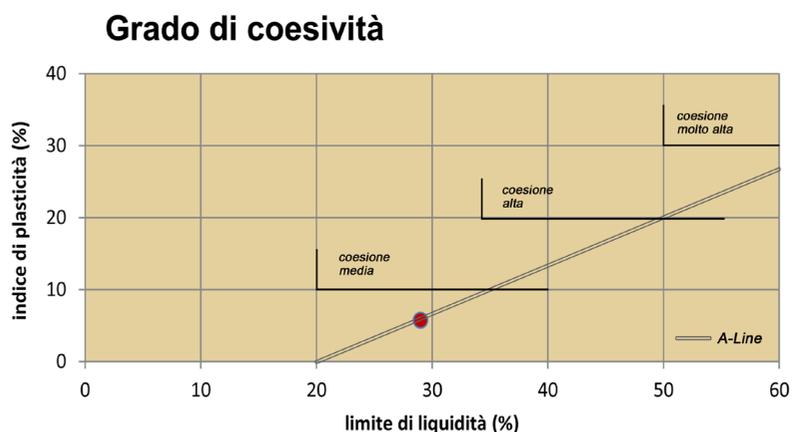


Fig. 7.42, Grafico del limite liquido per il campione di terra analizzato. in basso a destra si riporta l'equazione della funzione lineare.

Il grafico X indica che il terreno possiede un grado di coesione medio-basso e si trova proprio sulla A-line, che marca il limite tra terre di tipo limoso, al di sotto, e di tipo argilloso, al di sopra. Il secondo grafico mostra invece come la terra analizzata ricada in una zona di bassa espansività; la diagonale in nero separa le terre con bassa espansività, che si trovano al di sotto di essa, da quelle ad espansività più consistente, che si trovano al di sopra.